

**Российская академия наук**  
**Отделение энергетики, машиностроения, механики и процессов управления**  
**Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН**  
**Научный совет по машиностроению РАН**  
**Российский национальный комитет по теории машин и механизмов**  
**Межведомственный научный совет по трибологии**

# **НАУЧНЫЕ ТРУДЫ**

**VIII Международной научной конференции**  
**«Фундаментальные исследования и**  
**инновационные технологии**  
**в машиностроении»**

**Москва**  
**2024**

УДК 621.9  
ББК 34.5

**Редакционная коллегия:**

*академик Ганиев Р.Ф., д.т.н., проф. Глазунов В.А., д.т.н., проф. Албагачиев А.Ю., д.т.н.*

**Научные труды VIII Международной научной конференции “Фундаментальные исследования и инновационные технологии в машиностроении”. – М.: ИМАШ РАН. – 2024. – 266 с.**

В сборник включены статьи, написанные по материалам докладов, представленных на VIII Международной научной конференции “Фундаментальные исследования и инновационные технологии в машиностроении”, проходившей с 19 по 20 ноября 2024 г. в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте машиноведения им. А.А. Благодного РАН. На конференции были представлены результаты работ по следующим шести научным направлениям:

1. Робототехника и автоматизация технологических процессов.
2. Волновые технологии в машиностроении.
3. Инновационные, цифровые и аддитивные технологии в машиностроении.
4. Трибология, триботехнологии и сварка трением.
5. Перспективные конструкционные и трибологические материалы, наноматериалы и покрытия.
6. Искусственный интеллект, цифровые двойники изделий и модели накопления повреждений при обработке

**Организаторы конференции** – Министерство науки и высшего образования Российской Федерации; Российская академия наук; Отделение энергетики, машиностроения, механики и процессов управления РАН; Институт машиноведения им. А.А. Благодного РАН; Научный совет по машиностроению РАН, Российский национальный комитет по теории машин и механизмов; Межведомственный научный совет по трибологии; Российский союз научных и инженерных объединений (обществ); Ассоциация технологов–машиностроителей; Ассоциация инженеров–трибологов России.

*Материалы сборника подготовлены к изданию оргкомитетом конференции на основе оригиналов авторских рукописей. Ответственность за достоверность сведений и хранение государственной или корпоративной тайны несут авторы публикаций.*

**ISBN 978-5-904282-22-6**

© ФГБУН Институт машиноведения  
им. А.А. Благодного РАН, 2024

## ГАЗОДИНАМИЧЕСКИЕ ПОКРЫТИЯ ИЗ МУЛЬТИАРМИРОВАННЫХ ПОРОШКОВЫХ СМЕСЕЙ НА ОНОВЕ Al-Mg

А.В. Аборкин<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых, Владимир, Россия; [aborkin@vlsu.ru](mailto:aborkin@vlsu.ru)

Нанокристаллические порошки на основе алюминиевых сплавов Al-Mg, мультиармированные нано- и микрочастицами были успешно получены путем высокоэнергетического шарового размола. Проведена характеристика порошков с использованием сканирующей электронной микроскопии, гранулометрического и рентгенофазового анализа. Полученные порошки были использованы для холодного газодинамического напыления. Полученные результаты демонстрируют, что использование для холодного газодинамического напыления мультиармированных порошков может являться эффективной стратегией формирования покрытий и объемных материалов на основе алюминия и его сплавов с высокой микротвердостью.

Одним из перспективных методов, который может быть эффективно использован для создания покрытий и объемных материалов с заданными свойствами, является метод холодного газодинамического напыления, для которого характерна широкая область функционального назначения, включающая как напыление защитных покрытий и восстановление поверхностей, так и перспективы в сфере аддитивного производства [1]. Основными недостатками порошковых покрытий на основе алюминия и его сплавов, сдерживающими их более широкое применение, являются низкие износостойкость и механические свойства. Названные недостатки преодолевают за счет создания композиционных покрытий, путем армирования алюминиевых порошков керамическими микрочастицами, например, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> [2, 3], SiC [4-6], TiN [7-9], В<sub>4</sub>С [6, 10] и др. и наночастицами, например, TiB<sub>2</sub> [11], наноалмазы [12], Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> [13]. Преимущество использования для армирования микрочастиц состоит в высокой эффективности напыления таких смесей при высокой степени переноса керамических частиц в покрытие. Покрытия с большей нанотвердостью могут быть получены из нанокристаллических алюминиевых порошков [14-16] или путем мультиармирования [17].

Цель данной работы состоит в разработке составов и метода получения мультиармированных порошковых смесей на основе алюминиевых сплавов пригодных для газодинамического напыления в условиях низкого давления, а также изучения структурно-фазового состава и микротвердости сформированных из них покрытий.

### Оборудование и методики проведения исследований

Мультиармированные порошки для газодинамического напыления получали шаровым размолом исходных компонентов в две стадии. На первой стадии был получен композиционный наноструктурированный порошок на основе алюминиевого сплава АМг2 и АМг6, армированный 1 вес. % нанокристаллического графита (nc-Gr) или 0.3 вес. % фуллеренов (C<sub>60</sub>). Для этого проведен высокоэнергетический шаровой размола матричного материала и армирующих частиц в планетарной мельнице. Смесью обрабатывали в стальном размольном контейнере с помощью стальных шаров диаметром 8 мм. Вторая стадия состояла в совместной обработке

нанокпозиционного порошка, полученного на первой стадии и керамических частиц Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (d<sub>50</sub>=18.5 мкм) или AlN (d<sub>50</sub>=5.9 мкм). Для этого нанокпозиционный порошок помещали в контейнер из ZrO<sub>2</sub> и добавляли 10–90 вес. % керамических частиц. Смесью подвергали шаровому размолу в течение 15 мин шарами из ZrO<sub>2</sub> диаметром 8 мм в планетарной мельнице. Покрытия из полученных мультиармированных порошков формировали методом холодного газодинамического напыления. Для этого использовали установку ДИМЕТ-404. Напыление проводили на подложки из стали Ст08кп. Режим напыления – стационарный (напыление в точку) при температуре потока воздуха 450°C, расстояние от среза сопла до поверхности подложки 10 мм, время экспозиции 15 секунд. Гранулометрический состав полученных мультиармированных порошков определяли на приборе Микросайзер-201С. Морфологию поверхности порошков синтезированных на первой стадии, характеризовали на автоэмиссионном сканирующем электронном микроскопе сверхвысокого разрешения Zeiss Ultra plus на базе Ultra 55. Мультиармированные порошки, полученные на второй стадии, а также полученные из них покрытия, исследовали с помощью сканирующего электронного микроскопа LEO 1450 VP, оснащенного детектором для энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии INCA 300. Исследования структурно-фазового состава порошков и полученных из них покрытий проводили методом рентгеновской дифрактометрии на установке D8 ADVANCE. Количественный анализ содержания керамических частиц в покрытии был проведен методом эталонного отношения интенсивностей. Размер области когерентного рассеяния (ОКР) матричного сплава для порошков и покрытий рассчитывали по формуле Селякова-Шеррера. Усредненные по объему размеры кристаллитов были рассчитаны исходя из предположения, что они имеют сферическую форму. Микротвердость покрытий измеряли на поперечных шлифах методом Виккерса с помощью микротвердомера Shimadzu HNV-2 при нагрузке 245 мН и выдержке 10 с. Для каждого образца было проведено не менее 10 измерений.

### Результаты и их обсуждение

Порошковая смесь представляла собой частицы матричного сплава АМг2 или АМг6 размером не

более 300 мкм, которые имеют округлую форму с развитой поверхностью. При большем увеличении на поверхности частиц порошка фиксировали достаточно равномерно распределенный наполнитель - нанокристаллический графит или фуллерены. Изучение морфологии мультиармированных порошковых смесей с 10–70 вес. % керамических частиц, которые были получены после второй стадии шарового размола, позволили выявить ряд особенностей их формирования. Например, для смесей с 10 вес.% керамических частиц можно отметить их малое количество в свободной форме. В этом случае керамические частицы практически полностью распределены по поверхности матричного сплава (АМг2 или АМг6) или внедрены в него. При этом для составов, содержащих 30 или 70 вес.% керамических частиц картина становится иной. Фиксируется появление значительного количества свободных керамических частиц в порошковой смеси, которое увеличивается с ростом их содержания. Это позволяет предположить наличие некоего «порога насыщения» при котором поверхность частиц матричного сплава практически полностью покрыта твердыми керамическими включениями. Данное обстоятельство не позволяет или по крайней мере затрудняет внедрение керамических частиц в пластичный матричный сплав. Кроме того, поверхность частиц матричного сплава становится более развитой, что обусловлено деформационным воздействием керамических частиц при шаровом размоле. При этом формируются субмикро - и микрочастицы матричного материала, образующиеся при микрорезании более твердыми керамическими частицами поверхности частиц матричного сплава. Тут также нужно отметить, что внедрение керамических частиц способствует проникновению углеродных наноструктур с поверхности внутрь частиц матричного сплава.

Анализ гранулометрического состава синтезированных порошков показывает уменьшение размера частиц матричного сплава после второй стадии обработки. Так, например, для сплава АМг6, армированного 0.3 вес.% C<sub>60</sub> дополнительное введение от 10 до 70 вес.% Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> вело к снижению среднего размера частиц порошковой смеси с 17.8 до 12.3 мкм. В то же время, при введении от 10 до 70 вес. % AlN, средний размер частиц порошковой смеси изменялся в диапазоне от 16.4 до 8.2 мкм. С одной стороны, это связано с влиянием на результаты измерений увеличения доли более мелких керамических частиц. С другой стороны, наличие керамики на поверхности частиц матричного сплава препятствует протеканию процессов сварки между последними и интенсифицирует процессы диспергирования при высокоэнергетическом шаровом размоле.

Анализ фазового состава сформированных покрытий на основе сплавов АМг2 и АМг6 показывает, что данные, полученные для порошков и покрытий несколько отличаются. Например, для покрытий можно наблюдать снижение сигнала пика (111) кристаллической плоскости алюминия по сравнению с порошками, что указывает на уменьшенную долю кристаллических плоскостей (111). Это говорит об изменении преимущественной

ориентации зерен матричного сплава на более хаотичную при деформации в ходе холодного газодинамического напыления. Кроме того, интенсивность пиков, соответствующих керамической фазе покрытия несколько ниже, чем в порошках. Это свидетельствует о не полном переносе керамических частиц из порошковой смеси в покрытие. В независимости от типа матричного сплава и армирующих частиц, покрытия имеют достаточно однородную микроструктуру, представляющую собой плотно упакованные деформированные частицы матричного сплава с равномерно распределенными в их объеме углеродными наноструктурами и керамическими частицами. Изредка в теле покрытия фиксировали поры, размер которых не превышал ~8-10 мкм. Это показывает, что при используемых температурно-скоростных условиях напыления, кинетическая энергия уплотнения частиц матричного сплава остается достаточной для эффективного формирования покрытия с малой пористостью, несмотря на формирование нанокристаллической структуры. Кроме того, можно отметить, что в процессе газодинамического напыления происходит незначительное изменение микрогеометрии подложки, что вызвано эрозийным воздействием на нее напыляемой порошковой смеси. В таблице 1 представлены результаты измерения микротвердости покрытий на основе матричных сплавов АМг2 и АМг6 с различным содержанием армирующих частиц.

Таблица 1. Микротвердость покрытий

Матричный сплав	Тип армирования	Микротвердость
АМг2	1 вес.% nc-Gr+10 вес.% Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	282±8
	1 вес.% nc-Gr+25 вес.% Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	316±15
	1 вес.% nc-Gr+30 вес.% Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	335±33
	1 вес.% nc-Gr+35 вес.% Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	357±18
	1 вес.% nc-Gr+50 вес.% Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	332±26
АМг6	0.3 вес.% C <sub>60</sub> +10 вес.% Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	262±10
	0.3 вес.% C <sub>60</sub> +25 вес.% Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	286±17
	0.3 вес.% C <sub>60</sub> +30 вес.% Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	299±6
	0.3 вес.% C <sub>60</sub> +35 вес.% Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	310±5
	0.3 вес.% C <sub>60</sub> +50 вес.% Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	328±20
	0.3 вес.% C <sub>60</sub> +70 вес.% Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	387±19
	0.3 вес.% C <sub>60</sub> +10 вес.% AlN	260±10
	0.3 вес.% C <sub>60</sub> +25 вес.% AlN	280±18
	0.3 вес.% C <sub>60</sub> +30 вес.% AlN	281±20
	0.3 вес.% C <sub>60</sub> +35 вес.% AlN	290±5
0.3 вес.% C <sub>60</sub> +50 вес.% AlN	306±12	

Анализ полученных данных об изменении микротвердости покрытий показывает, что введение в состав порошка керамических частиц способствовало повышению микротвердости покрытий. Сопоставление данных о микротвердости моно- и мультиармированных порошков позволяет сделать вывод, что высокая микротвердость покрытия в первую очередь обусловлена зернограницным упрочнением матричного сплава, а во вторую очередь – наличием в формируемом покрытии твердых керамических микрочастиц.

Рис. 1 демонстрирует суммарные данные, отражающие зависимость изменения микротвердости покрытия на основе алюминия и его сплавов от содержания армирующих керамических частиц.

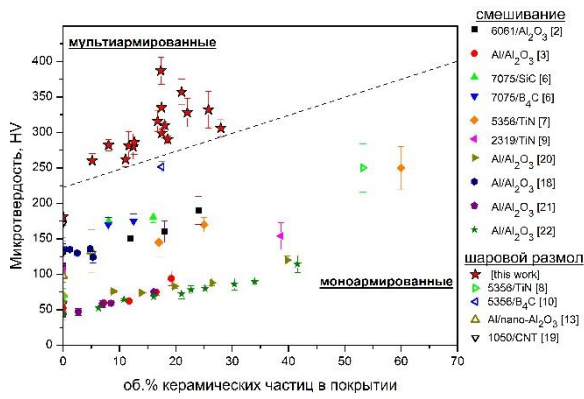


Рис. 1. Зависимость микротвердости газодинамических покрытий на основе алюминия и его сплавов от объемной доли армирующих керамических частиц в покрытии

Сравнительный анализ показывает, что мультиармированные покрытия, полученные в данной работе, обеспечивают наилучшие показатели микротвердость среди других порошковых композиций на основе алюминия и его сплавов используемых для холодного газодинамического напыления, армированных различными нано- и микрочастицами, которые были получены как путем простого механического смешивания [2, 3, 6, 7, 9, 18, 20-22], так и высокоэнергетического шарового размола [8, 10, 13, 19]. Представленные результаты демонстрируют, что использование для газодинамического напыления мультиармированных порошков может являться эффективной стратегией для формирования покрытий и объемных материалов на основе алюминия и его сплавов с высокой микротвердостью.

Работа выполнена в рамках государственного задания в сфере научной деятельности Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема FZUN-2024-0004, госзадание ВлГУ).

1. Yin S., Cavaliere P., Aldwell B., Jenkins R., Liao H., Li W., Lupoi R. Cold spray additive manufacturing and repair: Fundamentals and applications // *Addit Manuf.* 2018. V. 21. P. 628–650.
2. Spencer K., Fabijanac D. M., Zhang M. X. The use of Al–Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> cold spray coatings to improve the surface properties of magnesium alloys // *Surf. Coat. Technol.* 2009. V. 204. P. 336–344.
3. Shockley J., Strauss H., Chromik R., Brodusch N., Gauvin R., Irissou E., Legoux J. In situ tribometry of cold-sprayed Al–Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> composite coatings // *Surf. Coat. Technol.* 2013. V. 215. P. 350–356.
4. Kumar S., Reddy S. K., Joshi S. V. Microstructure and performance of cold sprayed Al–SiC composite coatings with high fraction of particulates // *Surf. Coat. Technol.* 2017. V. 318. P. 62–71.
5. Yu M., Suo X., Li W., Wang Y., Liao H. Microstructure, mechanical property and wear performance of cold sprayed Al5056/SiCp composite coatings: Effect of reinforcement content // *Appl. Surf. Sci.* 2014. V. 289. P. 188–196.
6. Meydanoglu O., Jodoin B., Kayali E. S. Microstructure, mechanical properties and corrosion performance of 7075 Al

matrix ceramic particle reinforced composite coatings produced by the cold gas dynamic spraying process // *Surf. Coat. Technol.* 2013. V. 235. P. 108–116.

7. Li W. Y., Yang C., Liao H. Effect of vacuum heat treatment on microstructure and microhardness of cold-sprayed TiN particle-reinforced Al alloy-based composites // *Mater. Des.* 2011. V. 32. P. 388–394.
8. Li W. Y., Zhang G., Zhang C., Elkedim O., Liao H., Coddet, C. Effect of ball milling of feedstock powder on microstructure and properties of TiN particle-reinforced Al alloy-based composites fabricated by cold spraying // *J. Therm. Spray Technol.* 2008. V. 17. P. 316–322.
9. Li W. Y., Zhang G., Liao H. L., Coddet C. Characterizations of cold sprayed TiN particle reinforced Al2319 composite coating // *J. Mater. Process. Technol.* 2008. V. 202. P. 508–513.
10. Yandouzi M., Bu H., Brochu M., Jodoin B. Nanostructured al-based metal matrix composite coating production by pulsed gas dynamic spraying process // *J. Therm. Spray Technol.* 2012. V. 21. P. 609–619.
11. Chen H., Pala Z., Hussain T., McCartney D. Fabrication and microstrain evolution of Al–TiB<sub>2</sub> composite coating by cold spray deposition // *Proc. Inst. Mech. Eng. L.* 2019. V. 233. P. 1044–1052.
12. Woo D.J., Heer F.C., Brewer L.N., Hooper J.P., Osswald S. Synthesis of nanodiamond-reinforced aluminum metal matrix composites using cold-spray deposition // *Carbon.* 2015. V. 86. P. 15–25.
13. Poirier D., Legoux J., Drew R., Gauvin R. Consolidation of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Al Nanocomposite Powder by Cold Spray // *J. Therm. Spray Technol.* 2011. V. 20. P. 275–284.
14. Jodoin B., Ajdelsztajn L., Sansoucy E., Zúñiga A., Richer P., Lavernia E.J. Effect of particle size, morphology, and hardness on cold gas dynamic sprayed aluminum alloy coatings // *Surf. Coat. Technol.* 2006. V. 201. P. 3422–3429.
15. Richer P., Jodoin B., Ajdelsztajn L., Lavernia E.J. Substrate Roughness and Thickness Effects on Cold Spray Nanocrystalline Al–Mg Coatings // *Journal of Thermal Spray Technology.* 2006. V. 15. P.246–254.
16. Ajdelsztajn L., Schoenung J.M., Jodoin B., Kim G. Cold spray deposition of nanocrystalline aluminum alloys // *Metall Mater Trans A Phys Metall Mater Sci.* 2005. V. 36. P. 657–666.
17. Aborkin A., Alymov M., Arkhipov V., Khrenov D. Formation of Heterogeneous Powder Coatings with a Two-Level Micro- and Nanocomposite Structure under Gas-Dynamic Spraying Conditions // *Dokl. Phys.* 2018. V. 63. P. 50–54.
18. Qiu X., Wang J., Tang J., Gyansah L., Zhao Z., Xiong T. Microstructure, microhardness and tribological behavior of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> reinforced A380 aluminum alloy composite coatings prepared by cold spray technique // *Surf. Coat. Technol.* 2018. V. 350. P. 391–400.
19. Kang K., Bae G., Won J., Lee C. Mechanical property enhancement of kinetic sprayed Al coatings reinforced by multi-walled carbon nanotubes // *Acta Mater.* 2012. V. 60. P. 5031–5039.
20. Wang Q., Spencer K., Birbilis N., Zhang M. X. The influence of ceramic particles on bond strength of cold spray composite coatings on AZ91 alloy substrate // *Surf. Coat. Technol.* 2010. V. 205. P. 50–56.
21. Shockley J., Descartes S., Vo P., Irissou E., Chromik R. The influence of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> particle morphology on the coating formation and dry sliding wear behavior of cold sprayed Al–Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> composites // *Surf. Coat. Technol.* 2015. V. 270. P. 324–333.
22. Fernandez R., Jodoin B. Cold Spray Aluminum–Alumina Cermet Coatings: Effect of Alumina Content // *J. Therm. Spray Technol.* 2018. V. 27. P. 603–62

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ ТРЕНИЯ ПРИ КОЛЕБАНИЯХ СДВИГА И СКОРОСТИ

Албагачиев А.Ю.

Институт Машиноведения имени А.А. Благонравова ИМАШ РАН, Москва, Россия; [Albagachiev@yandex.ru](mailto:Albagachiev@yandex.ru)

На основе решения дифференциального уравнения теплопроводности в частных производных преобразованием Лапласа получена аналитическая модель расчета температуры в условиях скоростных и сдвиговых колебаний при сухом трении скольжения. Приведены, в виде графиков, расчетные зависимости температуры от амплитуды колебаний, времени и глубины для стали 12X18H10T.

**Ключевые слова:** сдвиг, скорость, колебания, модель, температура.

### Введение

В процессах трения, резания, удара при механической обработке и эксплуатации узлов трения возникают нестационарные контактные колебания сил, скоростей, температур и износа с различными частотами и амплитудами причиной которых является комплексное влияние: разности силы трения покоя и трения движения, температуры повышающаяся при скачках силы, схватывания микронеровностей. Причиной возникновения фреттинг-износа также являются колебания, которые влияют на температуру, градиент температуры по глубине от поверхности. Аналитическое моделирование тепловых явлений при обработке и эксплуатации деталей машин и установление закономерностей их зависимости от колебаний является весьма важной проблемой.

Предметом исследования в данной работе является разработка модели, которая характеризует изменение средней температуры в зависимости от колебаний сдвиговых напряжений и скорости.

### Разработка модели

Уравнение теплопроводности решали преобразованием Лапласа

$$a \frac{\partial^2 \theta}{\partial z^2} = \frac{\partial \theta}{\partial t} \quad (1)$$

При начальных и граничных условиях

$$\text{При } t=0 \quad \theta=0 \quad z \rightarrow \infty \quad \theta=0$$

$$-\lambda \frac{\partial \theta}{\partial z} = \tau A \omega \sin^2 \omega t \quad (2)$$

Где  $\theta$  - температура;  $z$ -координата;  $t$ -время;  $a$  - температуропроводность;  $\lambda$  - теплопроводность;  $\tau$  - сдвиг;  $\omega$  - частота;  $A$  - амплитуда,  $Z$  - координ.

Данное граничное условие представим в виде

$$\frac{\partial \theta}{\partial z} = -\beta \omega \sin^2 \omega t \text{ при } z = 0, \text{ где } \beta = \frac{\tau A}{\lambda} \quad (3)$$

Уравнение (1) решалось при граничном условии (3). Полученная после решения формула имеет вид:

$$\theta = \frac{a\beta\omega}{\sqrt{\pi a}} \sqrt{t} \exp\left(-\frac{z^2}{4at}\right) - \beta\omega z \left[ \frac{1}{2} - \Phi^* \left( \frac{z}{\sqrt{2at}} \right) \right] \quad (4)$$

Результаты расчета температуры. На рисунках 1,2,3 приведены расчетные данные температуры по

формуле (4) для стали 12X18H10T.

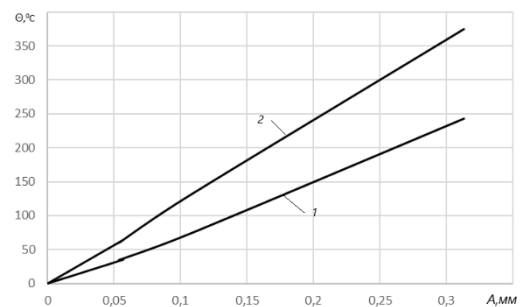


Рисунок 1. Зависимость средней температуры от амплитуды колебаний при трении 1-при  $t=0,02$ с;  $\omega=50$  Гц; 2-при  $t=0,0402$ с;  $\omega=50$  Гц.

Анализ характера и величины расчетных кривых показал, что линейная зависимость температуры от амплитуды колебаний (рис. 1) при фреттинге хорошо согласуется с экспериментальными данными, приведенными в работе [1] при  $t=0,0402$ с;  $\omega=50$  Гц.

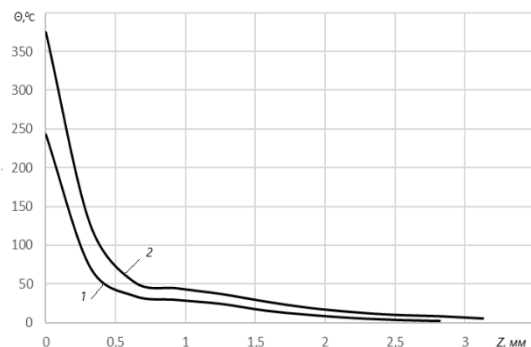


Рисунок 2. Распределение средней температуры по глубине. 1-при  $t=0,02$ с,  $\omega=50$  Гц 2-при  $t=0,0402$ с,  $\omega=50$  Гц.;

Результаты расчета распределения температуры по глубине от поверхности для стали 12X18H10T (рис.2) показывают в отличие от модели без учета колебаний где температура снижается плавно, при учете колебаний сдвига и скорости кривые распределения температуры имеют две области снижения : 1-область быстрого снижения протяженностью до 0,5 мм , а затем продолжительная 2-область медленного падения температуры превышающую по времени первую в 5...6 раз. При этом, если на поверхности температура имеет нелинейную зависимость от времени, то на глубине 0,3 мм она становится

линейной (рис.3).

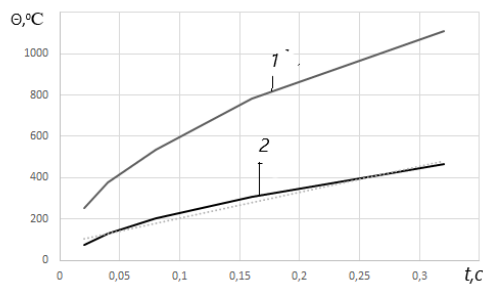


Рисунок 3. Изменение средней температуры трения по времени. 1- на поверхности  $Z=0$ ; 2- на глубине  $Z=0,3$  мм

Таким образом, разработанная модель позволяет выявить влияние колебаний режимов трения на закономерности изменения контактной и объёмной температур.

Данное исследование было проведено в связи с доведением РТУ МИРЭА Государственного задания

№ 075-00701-24-07 от 03.04.2024г. и заключением дополнительного соглашения к Соглашению о предоставлении субсидии из федерального бюджета на финансовое обеспечение выполнения государственного задания на оказание государственных услуг (выполнение работ) от 05.04.2024г. №075-03-2024-077/8 по теме "Исследование методов пассивации поверхностей в процессах механической обработки и эксплуатации" (шифр "Наука")

1. Н.П.Голего, А.Я.Алябьев, В.В.Шевеля. Фреттинг-коррозия металлов «Техника» 1974, 270с.
2. Трение,износ и смазка. Под общ. Ред. А.В.Чичинадзе, -М.: Машиностроение,2003,-576 с.
3. Карслоу Г.,Егер Д.Теплопроводность твердых тел.М.: Наука,1964,382с.
4. А.В.Лыков. Теория теплопроводности. -М.: Высшая школа ,600с.
5. Дроздов Ю.Н.,Юдин Е.Г.,Белов А.И.Прикладная трибология.-М.: Эко-Пресс,2010.-604с.
6. Воронцов А.Л., Албагачиев А.Ю.,Султан-заде Н.М. Теоретические основы обработки металлов в машиностроении. Старый Оскол «ТНТ»,2013.-552с.

## ПОВЫШЕНИЕ КАЧЕСТВА ПОВЕРХНОСТИ ЗУБЬЕВ БЛОКОВ ШЕСТЕРЕН АВИАЦИОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

А.Ю. Албагачиев<sup>1</sup> А.Г. Караванова<sup>1</sup> А.П. Яковлева<sup>2</sup>

<sup>1</sup> ИМАШ РАН, Москва, Россия

<sup>2</sup> МГТУ им. Н. Э. Баумана, Москва, Россия

Предложен метод последовательной отделочной обработки для повышения качества поверхности зубьев авиационных блоков шестерен. Авторами сделано предположение, что последовательное применение зубошлифования и зубохонингования позволит снизить шум в зубчатой передаче. В работе представлены результаты экспериментальных исследований.

Рост требований к современным авиационным двигателям определяет соответствующее повышение требований к зубчатым колесам и блокам шестерен, входящим в их состав. Проблеме качества изготовления этих деталей уделяется особое внимание в технологии производства авиационных двигателей. Качество изготовления поверхности эвольвентных профилей зубьев определяют основные эксплуатационные показатели зубчатого редуктора, такие как износостойкость, коррозионная стойкость и уровень шума в зубчатой передаче [1].

Существующие методы формирования зубчатых венцов должны удовлетворять параметрам, выбираемым конструктором в соответствии с ГОСТ 1643–81 или его зарубежным аналогам ISO 1328, DIN 3962, ANSI/AGMA 2015, которые важно принимать во внимание при выборе и использовании современного зубообрабатывающего оборудования [2].

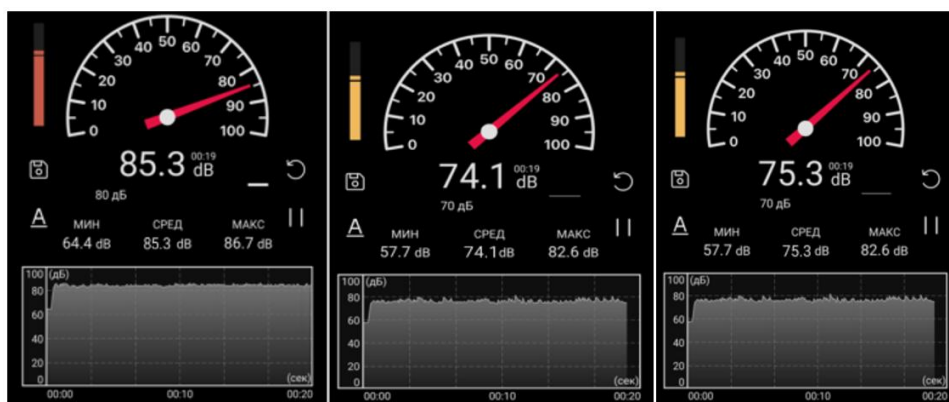
Нормы Международной организации гражданской авиации (ICAO) предусматривают жесткие требования к уровню шума авиадвигателя. Авиационный шум оказывает серьезное воздействие на экологию и здоровье людей. Поэтому проблемы авиационного шума и защиты окружающей среды – актуальная задача [3-5].

В современных авиационных двигателях работают разные по назначению зубчатые колеса, в том числе блоки шестерен, состоящие из цилиндрического и конического колеса, с внешним зацеплением и модулями от 2мм до 2,7 мм. Эти блоки изготавливают из сталей 16ХЗНВФМБ-Ш, 16ХЗНВФМБ и др.

При изготовлении этих деталей требуется обеспечить: высокую степень точности венца, минимальную шероховатость эвольвентных профилей зубьев  $Ra=0,4-0,09$  мкм, отсутствие термических прижогов и трещин. Кроме этого требуется

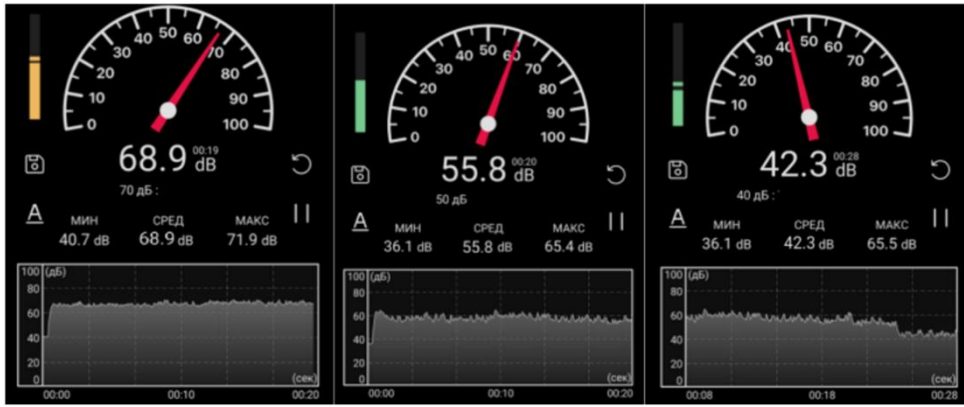
обеспечить параметры качества поверхностного слоя: микротвердость, глубину упрочнения и наличие сжимающих остаточных напряжений на поверхности зубьев. Поэтому работы, направленные на повышение качества поверхности зубьев блоков шестерен и снижение уровня шума в двигателе – актуальная задача. Авторами было выдвинуто предположение, что последовательное применение зубошлифования и зубохонингования позволит обеспечить выполнение технических требований по точности, твердости, глубине упрочнения и т. д. [6-9]. Кроме того, после зубохонингования изменятся параметры качества поверхности и это позволит снизить уровень шума в передаче.

Виброакустическая активность зубчатой передачи определяется уровнем ее вибраций под воздействием спектра собственных частот и спектра возмущающих сил. Модификации по профилю и длине зубьев, а также погрешность их изготовления являются основной причиной возникновения разницы угловых скоростей сопряженных элементов зубчатой передачи. Силы, действующие в зацеплении зубьев, пропорциональны этому угловому ускорению, они передаются через валы, подшипники, корпус редуктора, вызывая вибрацию всей конструкции узла, механизма и двигателя в целом.



а)





б)

Рис. 1. Результаты измерений шума венцов зубьев: а - шум после операции зубошлифования, б – измерение шума после операции зубохонингования.

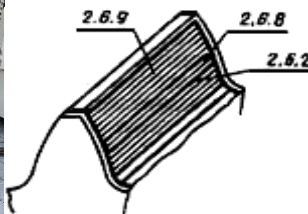
Исследование уровня шума при работе блоков шестерен, в соответствие с ГОСТ 32109–2013, после обработки зубошлифованием показан на рисунке 1а и зубохонингованием на рисунке 1б. Нормирование уровня шума в зубчатом зацеплении является одной из самых актуальных задач в современном авиастроении. Блок шестерен состоит из конического и цилиндрического колес. Различия в точности и качестве поверхности зубьев готовых деталей после

изготовления блоков шестерен представлены в таблице. За счет повышения точности их изготовления после применения последовательного метода отделочной обработки, учитывая биение венцов и правильность пятна контакта зубьев, достигнуто значительное снижение уровня шума зубчатого зацепления при работе зубчатой передачи.

Таблица 1. Сравнение качества поверхности различных методов отделочной обработки

№	Зубохонингование	Зубошлифование
Модуль колёс 2 и 2,7, мм	0,2–15 мм	0,7–18
Степень точности по ГОСТ 1758-81	3-4	4-6
Шероховатость боковых поверхностей зубьев Ra, мкм	0,045–0,1	0,4–1,6
Необходимость подрезания основания зуба	+	+
Необходимость подбора в пары	+	+
Возможность обработки dna впадины зуба	+	+
Воспроизводимость процесса	+	+
Технологичность сборки	+	+

Условное обозначение: (+) — положительный результат;  
(-) — отрицательный результат; (+/-) — возможность положительного или отрицательного результата.



а)

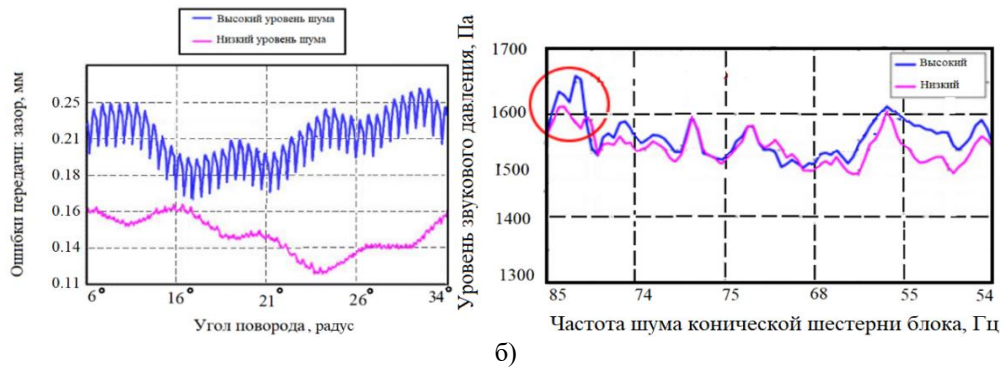


Рис. 2. Результаты измерений пятна контакта зубьев и шума венцов зубьев: а - пятно контакта конического венца, б – проверка зазора в зацеплении конического венца по частоте шума шестерен и уровню звукового давления на испытаниях

Для оценки шума в зубчатой передаче необходимо измерить погрешность передачи в местах контакта зубьев (ГОСТ 16530–83), которая считается основной причиной шума (рис. 2 а, б). В стремлении улучшить качество конических зубчатых передач, которые сложно контролировать с помощью устройств для измерения погрешности передачи, в работе оценивали качество конических зубчатых передач, проверяя не только погрешность передачи, но и уровень шума.

Для обеспечения лучших показателей по уровню шума и снижения остаточных напряжений растяжения на поверхности зубьев зубчатых колес на предприятиях ПК «Салют» АО ОДК применяли такие специфические операции, как: зубопритирка, подбор пар по уровню шума, отбор пар с пониженным уровнем шума и т. д. После применения последовательного метода отделочной обработки качество поверхностного слоя зубьев значительно возрастает и можно рассматривать вопрос исключения таких операций из техпроцесса. После применения последовательного метода отделочной обработки шероховатость на поверхности зубьев снижается в 2...4 раза (с Ra 0,4–0,09 до Ra 0,1–0,045), погрешность шага зубьев снижается до 0,004 мм (с 0,007 мм). Уровень шума после зубохонингования снижается в 1,5–2 раза (с 85–75 дБ до 68–42 дБ).

Разработанный метод последовательной отделочной обработки можно предложить для изготовления блоков шестерен авиационных двигателей на АО «Салют» для серийного производства.

- 1 Глазунов, В.А. Разработка и исследование механизма параллельной структуры с зубчатыми передачами с учетом трения / В.А. Глазунов, А.Ю. Албагачиев, М.Н. Ерофеев [и др.] // Проблемы машиностроения и надежности машин - 2022. – №2. – С.57-67.
- 2 Ворожцова, Н.А. Повышение технологических возможностей метода непрерывного обратного зубошлифования / Н.А. Ворожцова, В.Ф. Макаров, Е.Н. Горбунов [и др.] // Вестник. – 2021. – № 5. – С. 15-22.
- 3 Малков, Е.М. Состояние акустического загрязнения населённых пунктов в черте расположения аэропортов / Е.М. Малков, А.В. Стерликов // Здоровье населения и среда обитания. – 2009. – № 2. – С. 36-39.
- 4 Сазонов, Э.В. Оценка шумового загрязнения территорий поселений, находящихся в зоне влияния аэродромов. / Э.В. Сазонов, И.А. Сухорукова // Вестник МГСУ. – 2012. – №2. – С. 130–134.
- 5 Солдатов, С.К. Авиационный шум как причина экологических и социальных проблем / С.К. Солдатов, В. Н. Зинкин // Системный анализ в медицине: Материалы IX международной научной конференции. - Благовещенск: Дальневосточный научный центр физиологии и патологии дыхания. – 2015. – №10. – С. 172–176.
- 6 Караванова, А.Г. Различия результатов процессов обработки зубчатых колес методами хонингования, шлифования и полирования исходя из выявленных значений микронеровностей обрабатываемой поверхности. / А.Г. Караванова, А.С. Калашников. // Наука и бизнес: пути развития. – 2020. – №11. – С.23-27.
- 7 Караванова, А.Г. Неровности обрабатываемой поверхности после различных методов шлифования / А.Г. Караванова, А.С. Калашников. // Наука и бизнес: пути развития. – 2020. – №12. – С.34-37.
- 8 Караванова, А.Г. Анализ современных технологий изготовления авиационных зубчатых колес / А.Г. Караванова, А.С. Калашников. – Гагаринские чтения. – 2019. – №45. – С. 91.
- 9 Караванова, А.Г. Исследование операции зубошлифования цилиндрических колёс планетарных передач/ А.Г. Караванова, А.С. Калашников. МИКМУС - 2018). – 2018. – №30. – С. 256-259.

## РЕЗОНАНС ПРИ СВАРКЕ ТРЕНИЕМ С ПЕРЕМЕШИВАНИЕМ

А.Ю.Албагачиев<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Институт машиноведения им. А.А.Благонравова РАН, Москва, Россия; [Albagachiev@yandex.ru](mailto:Albagachiev@yandex.ru)

Предложен метод расчетного определения возникновения резонанса при сварке трением с перемешиванием металлов на основе использования периодов и частот отраженных упругих волн. Приведены примеры расчетов резонанса и не резонанса.

**Ключевые слова:** сварка, волны, частоты, резонанс

### Введение

При сварке трением с перемешиванием (СТП) [1] в соединяемых объектах в результате перемещения вращающегося инструмента по стыку возникают продольные и поперечные упругие и пластические динамические волны [2], которые оказывают воздействие на качество и прочностные свойства сварочного шва. Воздействия тепла, генерируемого в результате работы деформации и давления отраженных упругих волн, приводят к перекристаллизации, и к изменению размеров зерен в формируемом шве, что влияет на его усталостную прочность. Ранее нами были предложены теплофизические аналитические модели расчета температуры применительно к сварке трением с перемешиванием, модель оценки суммарных остаточных напряжений, включающая алгебраическую сумму механических, температурных и напряжений от структурно-фазовых превращений, возникающих в сварочном шве [3].

### Метод определения резонанса в сварочном шве

Технологические параметры - скорости вращения и перемещения пина при СТП зависят не только от оптимальной температуры, возникающей и поддерживаемой в зоне перемешивания модели, которых ранее рассматривались нами, но от скоростей упругих поперечных волн. В данной работе предлагается простой оригинальный подход к созданию резонанса в шве, получаемого при СТП. Идея заключается в том, чтобы появился резонанс в сварочном шве периоды собственных колебаний упругих волн в обоих объектах, должны быть одинаковыми и при этом больше времени контактирования инструмента со свариваемыми объектами. Упругие волны сжатия от воздействия инструмента распространяются в обоих свариваемых объектах перпендикулярно направлению его движения по двум прямо противоположным направлениям и отразившись от свободных поверхностей объектов возвращаются и сталкиваются между собой в шве. Одновременная встреча отраженных упругих волн, многократно увеличивая амплитуду колебаний и упругие напряжения, приводят к упрочнению и снижению пор в сварочном шве.

$$T_1 = T_2 > t \quad (1)$$

Где  $T_1$  и  $T_2$  - периоды колебаний;  $t$  - время контактирования инструмента со свариваемыми объектами.

$$T_1 = 2l_1 \sqrt{\frac{\rho_1}{E_1}}, \quad T_2 = 2l_2 \sqrt{\frac{\rho_2}{E_2}}, \quad (2)$$
$$t = L / V$$

Где  $l_1, l_2$  - протяженности объектов

перпендикулярно шву,  $v_1, v_2$  - скорости упругих волн;  $E_1, E_2$  - модули упругости свариваемых объектов,  $L$  - протяженность контакта инструмента со свариваемыми объектами.

При СТП одинаковых материалов, например Al+Al, или Cu+Cu размеры ширины свариваемых объектов нужно выбирать равными, так как скорости упругих волн в них будут одинаковыми и следовательно их периоды колебаний будут равны.

Установим взаимосвязь между технологическими режимами СТП.

Результующую скорость сварки при использовании цилиндрического пина при СТП определим по формуле

$$V = ns \quad (3)$$

где  $n$  - частота вращения инструмента;  $s$  - перемещение инструмента за оборот инструмента.

С учетом (1), (2), (3) получим условие возникновения резонанса в шве при СТП одинаковых материалов с одинаковыми протяженностями ( $l_1 = l_2$ )

$$2l \sqrt{\frac{\rho}{E}} \geq \frac{d}{ns} \quad (4)$$

где  $d$  - диаметр инструмента;  $E$  - модуль упругости;  $\rho$  - плотность.

При сварке разноименных материалов с разными размерами и скоростями упругих волн условие (4) примет вид

$$v_1 = 2l_1 \sqrt{\frac{\rho_1}{E_1}}, \quad v_2 = 2l_2 \sqrt{\frac{\rho_2}{E_2}} \geq \frac{d}{ns} \quad (5)$$

Для скорости частиц в волне имеем

$$V_c = \frac{\sigma}{\sqrt{E\rho}} \quad (6)$$

Где  $\sigma$  - напряжение.

При упругой волне сжатия скорость частиц имеет то же направление, что скорость распространения волны, а при упругой волне растяжения направление скорости противоположно направлению распространения волны.

Напряжения в волне определяются произведением модуля упругости на отношение скорости частиц к скорости волн.

$$\sigma = E \frac{V_c}{v} \quad (7)$$

Для получения резонанса в сварочном шве при сварке разных материалов кроме условия (4) необходимо выдержать еще условие (5) равенство частот колебаний  $V_1 = V_2$ .

**Первый пример** расчета резонанса в шве при СТП двух одинаковых пластин из алюминия по условию (4)

Дано: СТП пластин 400x1000 мм из Al.

$E=7,110^4$  МПа;  $\rho = 2712$  кг/м<sup>3</sup>;  $l_1 = l_2=0,4$ м;  $d=310^{-3}$ м;

Решение:

Расчет по условию (4)

$$2 \cdot 0,4 / \sqrt{\frac{710^{10}}{2712}} > 310^{-3}/V, \text{ отсюда } V > 18,75 \text{ м/с;}$$

Рассчитаем частоту процесса сварки по условию (5)

$$v_1 = v_2 = 6250 \text{ Гц}$$

Отсюда можно сделать вывод - в сварочном шве наступит резонанс.

**Второй пример**

Дано: СТП пластины 400x1000 мм из Al и такой же пластины из меди.

Для Al:  $E=7,110^4$  МПа;  $\rho = 2712$  кг/м<sup>3</sup>;  $l_1 = 0,4$ м;  $d=310^{-3}$ м;

Для меди:  $E=110$  ГПа;  $\rho = 8930$  кг/м<sup>3</sup>;  $l_2=0,4$ м;  $d=310^{-3}$ м;

Решение:

После расчета по условию (5) получим следующие частоты для меди и алюминия:

$$v_1 = 4387 \text{ Гц}, \quad v_2 = 6250 \text{ Гц}$$

Так как частоты не совпадают, то резонанс в шве отсутствует.

Таким образом, предложенный метод расчета может быть применен не только для определения резонансных режимов сварочного шва при СТП, но и для прогнозирования его появления оказывающее благоприятное влияние на качество шва, тем самым повышая его усталостную прочность.

1. Котлышев Р.Р. Сварка трением с перемешиванием / Р.Р. Котлышев: моногр. - Ростов н/Д: Издательский центр ДГТУ, 2012. - 135 с.
2. Ионов В.Н., Огибалов П.М. Напряжения в телах при импульсном нагружении. Учеб. пособие для вузов. М., Высшая школа, 1975, 463 с.
3. Албагачиев А.Ю. Физико-механическое моделирование сварки трением с перемешиванием. Научно-технические проблемы в машиностроении. 2023. № 4 (142). С. 24-29.
4. А.Ю. Албагачиев, М.Е. Ставрокий, М.И. Сидоров [и др] Триботехническая диагностика: учебник для вузов - Санкт-Петербург: Лань, 2020. - 292 с.
5. Албагачиев А.Ю., Усов П.П. Численное моделирование переноса тепла при сварке трением с перемешиванием // Проблемы машиностроения автоматизации. 2022. № 3. С. 88-93.
6. Nandan R., Roy G. G., Lienert T. J., DebRoy T. Numerical modelling of 3 D plastic flow and heat transfer during friction stir welding of stainless steel // Science and Technology of Welding and Joining. 2006. Vol. 11. no 5. pp. 526-537.

## ИССЛЕДОВАНИЕ КОЭФФИЦИЕНТОВ ТРЕНИЯ ПОЛИМЕРОВ В РАЗЛИЧНЫХ УСЛОВИЯХ ТРЕНИЯ

В.П. Бирюков, А.А. Якубовский

Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, Москва, Россия; laser-52@yandex.ru

Работа посвящена определению коэффициента трения сверхвысокомолекулярного полиэтилена (СВМПЭ), высокомолекулярного полиэтилена (ВМПЭ), полиэтилентерефталата (ПЭТ) и полиоксиметилена (ПОМ) в условиях сухого трения и при смазке дистиллированной водой и гидравлическим маслом. Получены закономерности коэффициентов трения в зависимости от смазочной среды. Наименьшими коэффициентами трения обладали образцы СВМПЭ, ВМПЭ, ПЭТ и ПОМ в масле. Результаты исследований могут быть использованы для замены металлических деталей в автомобилестроении, кораблестроении и подвижном состав железнодорожного транспорта.

**Ключевые слова:** Сверхвысокомолекулярный полиэтилен, коэффициент трения, композиционный полимер.

### Цель

Определить коэффициенты трения полимеров в условиях сухого трения, а также в условиях смазки дистиллированной водой и гидравлическим маслом.

### Введение

Трибологические испытания [1] сверхвысокомолекулярного полиэтилена (СВМПЭ) проводились по схеме «штифт-пластина», штифт из СВМПЭ имеет диаметр 4 мм и длину 20 мм, а пластина из стали Q235 имеет диаметр 25 мм и толщину 2 мм с шероховатостью поверхностей Ra 0,03, 0,75 и 2,04 мкм со следующими параметрами: нагрузка 60 Н, скорость 100 мм/с, двойным ходом 5 мм, частотой движения 10 Гц, временем 60 минут, общим расстоянием скольжения 360 м. Коэффициент трения составил при шероховатости Ra 0,03 – 0,09, Ra 0,75 – 0,12, Ra 2,04 – 0,16, объём износа составил 0,35, 0,7, 1,5 мм<sup>3</sup>, f глубина износа 0,02, 0,03, 0,06 мм соответственно. Было выявлено, что при увеличении шероховатости контробразца, коэффициент трения СВМПЭ возрастает, как и другие трибологические характеристики.

Образцы содержащие CF, MoS<sub>2</sub> и чистый сверхвысокомолекулярный полиэтилен (СВМПЭ), получили спеканием, в разных соотношениях: СВМПЭ – 100% (1), СВМПЭ – 90% и CF – 10% (2), СВМПЭ – 90% и MoS<sub>2</sub> – 10% (3), СВМПЭ – 80%, CF – 10% и MoS<sub>2</sub> – 10% (4), их истирали на машине трения по схеме «шарик-диск» (GCr15) по следующим параметрам: нагрузка 10 Н, скорость скольжения 0,33 м/с, время 0, 8, 16, 32 ч. Результаты испытания показали, что материал (1) имел наименьшее значение коэффициента трения 0,1–0,19, (2) – 0,12–0,17, (3) – 0,17–0,25, у композита (4) коэффициент трения составил 0,12–0,15. Скорость изнашивания в зависимости от времени изменялась: (1) – 8–16, (2) – 6–5, (3) – 6–9 и (4) – 6–3 •10<sup>-5</sup> мм<sup>3</sup>/Нм. Основным механизмом изнашивания для (1) и (2) являлся абразивный износ, тогда как для композитов (3) и (4) – легкий окислительный и усталостный износ. Было выявлено, что композит (4) имеет наилучшие смазывающие свойства, также имеет самые низкие коэффициенты трения и наименьшую скорость изнашивания благодаря CF и MoS<sub>2</sub>.

Сверхвысокомолекулярный полиэтилен (СВМПЭ) [3] смешивали в разных пропорциях с нано-SiC и XNBR: СВМПЭ – 100% (А); СВМПЭ – 95%, нано-SiC

– 5% (Б); СВМПЭ – 85%, нано-SiC – 5%, XNBR – 10% (В); СВМПЭ – 90%, XNBR – 10% (Г). Твердость по Шору-D данных образцов составила, А – 65, Б – 68, В – 66, Г – 67. Трибологические испытания проводили по схеме «блок-кольцо» (GCr15), при нагрузке 200 Н, скорости 200 мин<sup>-1</sup>, времени 2 часа. Коэффициент трения образцов составил, (А) – 0,4, (Б) – 0,3, (В) – 0,26, (Г) – 0,28, а интенсивность изнашивания, (А) – 168, (Б) – 8, (В) – 3, (Г) – 7 мм<sup>3</sup>/Н•м. Исследование показало, что добавление нано-SiC и XNBR в матрицу СВМПЭ привело к увеличению твердости материала, а также что интенсивность изнашивания снизилась на 98%.

Чистый сверхвысокомолекулярный [4] полиэтилен (СВМПЭ) смешивали в разных пропорциях с поликристаллическим муллитовым волокном (ПМВ) в процентном соотношении 2, 4, 6, 10 и 20%. Трибологические испытания образцов с размерами 65×45×2 проводили по схеме «штифт диск» из стали 45 диаметром 6 мм, со следующими параметрами: нагрузка 100 Н, частотой скольжения 10 Гц, скоростью скольжения 10 мм в течение 50 мин. Коэффициент трения чистого СВМПЭ составил 0,56, с добавлением ПМВ 2, 6 и 20 % – 0, 38, 051 и 0,42 соответственно. Скорость износа СВМПЭ составила 66,7, а с добавлением ПМВ 4%–1, 20% - 3•10<sup>-5</sup> мм<sup>3</sup>/Н•м, при содержании ПМВ 6% скорость износа была близка к нулю. По завершению исследования было выявлено, что оптимальное содержание ПМВ составляет 6%, так как достигаются наименьшие коэффициенты трения и скорости скольжения с сохранением механических характеристик близким к чистому СВМПЭ.

### Материалы и методы

Для выполнения экспериментов были изготовлены прямоугольные образцы полимеров сверхвысокомолекулярного полиэтилена (СВМПЭ) (1), высокомолекулярного полиэтилена (ВМПЭ) (2), полиэтилентерефталата (ПЭТ) (3) и полиоксиметилена (ПОМ) (4) с размерами 40×20×10 мм. Определение трибологических характеристик проводили на машине трения МТУ-01 при испытании плоских образцов в паре трения с кольцевым контробразцом из стали 40Х. Торец кольцевого контробразца обрабатывали на наждачной бумаге из карбида кремния с зернистостью Р180. Также испытания проводились в условиях сухого трения, а также в условиях смазки дистиллированной водой (H<sub>2</sub>O, pH –

6,4) и гидравлическим маслом (МГЕ 10-А). Давление и скорость скольжения были 0,73 МПа и 0,5 м/с соответственно.

### Результаты и их обсуждение

На рис. 1 представлены графики коэффициентов трения на сухую и с использованием смазки. Изучив полученные данные, было выявлено, что при использовании воды в качестве смазки коэффициент трения снижался в 1,5–2 раза, а в масле в 2–4 раза в сравнении с сухим трением. Самый низкий коэффициент трения 0,05 был получен на образце (4) при смазке маслом. При смазке водой минимальный коэффициент трения получен на образце (3). Образец (2) незначительно уступал по величине коэффициента трения образцу (4) при трении с маслом.

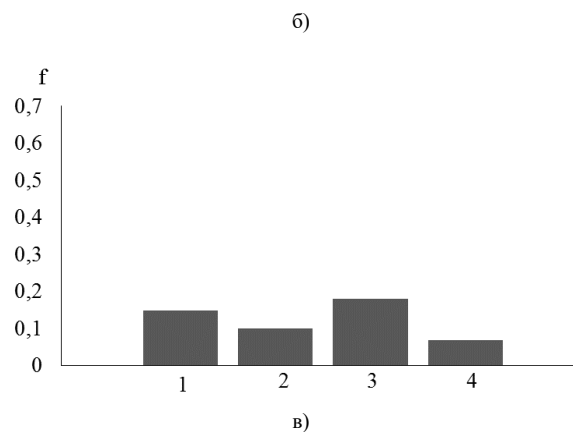
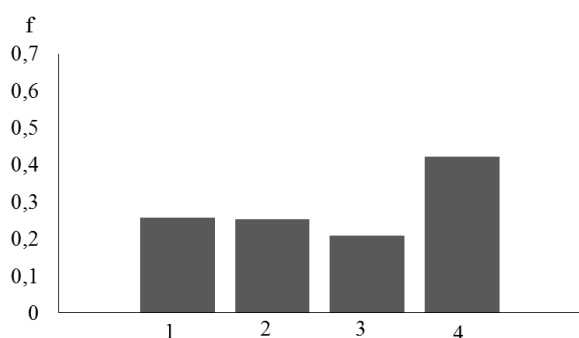
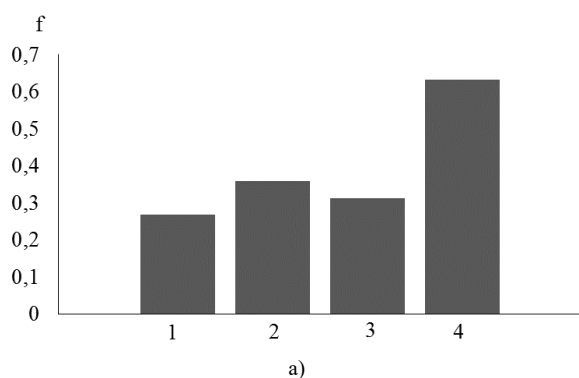


Рис. 1. Графики коэффициентов трения в различных условиях смазки при сухом трении (а), вода (б) ( $H_2O$ , pH – 6,4), масло (в) (МГЕ 10-А): 1 – СВМПЭ, 2 – ВМПЭ, 3 – ПЭТ, 4 – ПОМ

### Заключение

В условиях смазки водой коэффициент трения снижался в 1,5–2 раза, а в масле в 2–4 раза, в сравнении с сухим трением. Самым низким коэффициентом трения 0,05 обладал образец (4) при смазке маслом. За ним по возрастанию коэффициентов трения следовали образцы (2), (1) и (3). При смазке водой наименьший коэффициент трения получен на образце (3).

1. Ting C., Weiguo M., Kaihui Z. Wear simulation of UHMWPE against the different counterface roughness in reciprocating unidirectional sliding motion // Scientific Reports, 2024, 15858. doi: 10.1038/s41598-024-66613-w
2. Zhen J., Han Y., Zhu L. MoS<sub>2</sub>/CF synergistic enhancement to improve the friction and wear properties of UHMWPE composites // Tribology International, 2023, Vol. 179 108097. doi: 10.1016/j.triboint.2022.108097
3. Xiaobao Z., Gui G., Bugon S. Study of frictional wear and desorption of nanoparticle-rubber blend modified UHMWPE composites // Polymer Composites, 2024, Vol. 45, Issue 12, pp. 1-14. doi: 10.1002/pc.28509
4. Yu L., Wei D., Zheng A. An investigation on tribological properties and mechanical properties of UHMWPE/polycrystalline mullite fiber // Polymer Bulletin, 2023, Vol. 80, pp. 3041-3054. Doi: 10.1007/s00289-022-04197-z

## ИССЛЕДОВАНИЕ ТРИБОТЕХНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ФОТОПОЛИМЕРА

В. П. Бирюков, Я. А. Горюнов

Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, Москва, Россия; [laser-52@yandex.ru](mailto:laser-52@yandex.ru)

Изложены результаты триботехнических испытаний образцов, выращенных с помощью 3D принтера, из фотополимерной смолы на основе соевого масла с различным временем последующего отверждения ультрафиолетовым излучением. Обнаружено, что наибольшей стойкостью к абразивному износу при трении по закрепленному абразивному зерну обладал образец, подвергнутый обработке ультрафиолетовым излучением в течение 45 минут. Установлено, что обработка ультрафиолетом способствует увеличению давлений заедания и критических скоростей скольжения.

**Ключевые слова:** фотополимер, аддитивные технологии, абразивное изнашивание, нагрузка заедания, задр.

### Цель

Целью настоящей работы являлось определение триботехнических характеристик образцов фотополимера в зависимости от времени последующего отверждения с помощью ультрафиолетового облучения.

### Введение

Трехмерная печать – один из методов производства с повышенной точностью изготовления. Проекционная масочная стереолитография (Digital Light Processing (DLP)) является широко используемой технологией трехмерной печати, основанной на принципе отверждения фотополимерной смолы ультрафиолетовым излучением. Данная технология характеризуется, как один из самых быстрых, точных и перспективных способов трехмерного моделирования. Она нашла свое применение в аэрокосмической и оборонной промышленности, автомобилестроении, медицине и т. д. Спектр задач, способных решить с помощью данного способа трехмерной печати начинается с быстрого прототипирования, изготовлением форм для литья под давлением, неотвественных механизмов, и заканчивается изготовлением конечных изделий и функциональных прототипов. Данный метод трехмерной печати использует смолу, которая представляет смесь из трех основных компонентов: олигомеров, мономеров и фотоинициаторов. Кроме основных компонентов в состав смол могут вводиться наполнители различного функционального назначения. Для отверждения применяется цифровой проектор, подсвечивающий ультрафиолетовым излучением сразу весь слой.

Образцы [1] с размерами  $12 \times 10 \times 5$  мм были изготовлены из фотоотверждаемой акриловой смолы с толщиной отверждаемых за один проход слоев 10, 30, 50, 80 и 100 мкм. Характеристики акриловой смолы: твердость по Шору 84 D; вязкость 150–200 МПа·с; длина волны отверждения 355–410 нм; плотность 1,15 г/см<sup>3</sup>. После выращивания отдельная партия образцов дополнительно отверждалась под прямыми лучами ультрафиолетового излучения в течение 1800 с. Испытания по определению триботехнических характеристик проводили по схеме «шар-плоскость» при нагрузке 3, 5 и 8 Н в течение 3600 с. Контрольный образец, диаметром 5 мм, изготовленный из стали AISI 304 был неподвижно закреплен. Образец, закрепленный на платформе, совершал возвратно-поступательные движения с частотой 4 Гц. Длина хода составляла 5 мм. Полимерный образец с высотой отверждаемых слоев 10 мкм и последующим отверждением имел наименьшие показатели

коэффициента трения 0,386. Наибольший коэффициент трения 0,475 выявлен у образца с высотой отверждаемых слоев 100 мкм. Минимальная скорость изнашивания  $9,42 \cdot 10^{-4}$  мм<sup>3</sup>/Нм наблюдалась у образцов с высотой отверждаемых слоев 10 мкм, при этом у образцов с высотой отверждаемых слоев 100 мкм скорость изнашивания составляла  $64,36 \cdot 10^{-4}$  мм<sup>3</sup>/Нм. Наибольшая скорость изнашивания наблюдалась у образца с высотой отверждаемых слоев 10 мкм без дополнительной обработки ультрафиолетовым излучением и составляла  $88,02 \cdot 10^{-4}$  мм<sup>3</sup>/Нм. Дополнительная обработка ультрафиолетовым излучением уменьшила скорость изнашивания образцов в 9,3 раза.

Метод цифровой обработки светом (DLP) применялся при изготовлении образцов [2] из фотоотверждаемой смолы на основе высокомолекулярного алифатического уретан-акрилатного олигомера и изоборнилакрилата в пропорции 7:3 для определения и сравнения их трибологических характеристик. Первая партия образцов состояла из смолы без добавления наполнителей. Вторая партия состояла из образцов, наполненных наночастицами политетрафторэтилена (ПТФЭ) с содержанием 5 мас.%. Размер частиц ПТФЭ составлял 5,8...16 мкм. Третья партия состояла из образцов, наполненных синтетическим графитом размером 3,4...6,5 мкм с содержанием 1 мас.%. Четвертая партия состояла из образцов, наполненных MoS<sub>2</sub> с содержанием 1,6 мас.%. Размер частиц MoS<sub>2</sub> достигал от 0,9...1,6 до 7 мкм. Пятая партия состояла из образцов наполненных ПТФЭ с содержанием 5 мас.% и MoS<sub>2</sub> с содержанием 1,6 мас.%. Шестая партия состояла из образцов, наполненных ПТФЭ с содержанием 5 мас.% и MoS<sub>2</sub> с содержанием 1,6 мас.%. Седьмая партия состояла из образцов наполненных синтетическим графитом с содержанием 0,5 мас.% и MoS<sub>2</sub> с содержанием 0,8 мас.%. Восьмая партия включала в себя наночастицы ПТФЭ с содержанием 5 мас.%, синтетического графита с содержанием 0,5 мас.% и MoS<sub>2</sub> с содержанием 0,8 мас.%, соответственно. Толщина отверждаемых слоев равнялась 50 мкм. Испытания по определению триботехнических характеристик проводили по схеме «торец штифта (образец фотополимера)-плоскость диска (сталь 100Cr6)» при нагрузке 25 Н и линейной скорости 250 мм/с в течение 60 минут. Диаметр и длина образцов составляли 8 и 20 мм, соответственно. Минимальный коэффициент трения 0,43 наблюдался у образцов, наполненных частицами ПТФЭ и MoS<sub>2</sub>. Наименьшая интенсивность изнашивания около  $0,25 \times 10^{-8}$  см<sup>3</sup>/Нм также отмечалась при испытании

образцов, где присутствовали частицы ПТФЭ и MoS<sub>2</sub>. После испытаний на поверхности всех образцов фиксировались признаки адгезионного и абразивного изнашивания. Установлено, что наименьшую интенсивность изнашивания имели образцы наполненные ПТФЭ и MoS<sub>2</sub>, за ними по убыванию следовали образцы с частицами ПТФЭ, далее образцы наполненные ПТФЭ, графитом и дисульфидом молибдена и следом шли образцы наполненные ПТФЭ и графитом.

Для определения триботехнических характеристик было изготовлено четыре партии образцов из фотоотверждаемой смолы [3]. Первая партия состояла из образцов без наполнителя. Вторая партия была наполнена частицами графита с содержанием 2 и 5 мас.%. Третья – дисульфидом молибдена (MoS<sub>2</sub>) – 2,5 и 5 мас.% и четвертая – политетрафторэтиленом (ПТФЭ) с содержанием 5 и 10 мас.%, соответственно. Толщина отверждаемых слоев составляла 0,05 и 0,1 мм. Все образцы промывали в этаноле, просушивали и облучали ультрафиолетовым излучением в течение 60 минут. Диаметр образцов составлял 8 мм. Испытания по определению триботехнических характеристик проводились по схеме «торец штифта (образец фотополимера)-плоскость диска (сталь С45 твердостью 48 HRC)» при скорости скольжения 1 м/с и давлении 0,5 МПа. Путь трения составил 4000 м. Наименьший коэффициент трения 0,47 был зафиксирован при испытании образцов, наполненных частицами ПТФЭ с содержанием 10 мас.%. Минимальная скорость изнашивания 4,21·10<sup>-5</sup> мм<sup>3</sup>/Нм также наблюдалась у образцов, наполненных частицами ПТФЭ с содержанием 10 мас.%. Установлено, что образцы содержащие частицы ПТФЭ продемонстрировали снижение скорости изнашивания в 6,5 раз по сравнению с образцами без наполнителя.

### Материалы и методы

Образцы были выращены на фотополимерном 3D-принтере по технологии DLP. В качестве материала для выращивания была использована смола Anycubic ECO UV Resin Clear на основе эпоксидированного соевого масла.

Первая партия образцов (1) состояла образцов без дополнительной обработки. Вторая партия (2) была подвергнута обработке ультрафиолетовым излучением (УФО) в течение 30 минут. Третья партия (3) была подвергнута УФО в течение 45 минут, четвертая партия образцов (4) – 60 минут, соответственно. Габариты образцов составляли 70×20×10 мм. Испытания на абразивное изнашивание выполняли по схеме: ««торцевая поверхность стальной втулки с наклеенной наждачной бумагой – широкая сторона образца (фотополимер)» при нагрузке 1 МПа в течение 20 секунд. Для испытаний использовали наждачную бумагу с абразивным зерном P120 карбида кремния. Испытание на задир проводили по схеме «торец кольцевой оправки (сталь 40X) – широкая сторона образца (фотополимер)» в условиях смазки маслом МГЕ-10а. Торцу оправки перед каждым циклом испытаний была передана шероховатость наждачной бумагой зернистостью P180, P600 и P1200. Испытания проводились при нагрузке 1...7,57 МПа и скорости скольжения 0,25...3,95 м/с. Исследование морфологии поверхности трения образцов были выполнены на цифровом микроскопе.

### Результаты и обсуждения

Результаты испытаний на абразивное изнашивание закрепленным абразивным зерном представлены в таблице 2. Анализ полученных результатов показал, что минимальную потерю массы имели образцы, подвергнутые УФО в течение 60 минут, за ними по возрастанию следовали образцы подвергнутые УФО в течение 45 и 30 минут, соответственно.

Таблица 1. Результаты испытаний на абразивное изнашивание закрепленным абразивом

№ образца	Масса до испытаний, г	Масса после испытаний, г	Потеря массы, г	Средняя потеря массы, г
2.1	17,4499	17,3320	0,1179	0,1178
2.2	17,3320	17,2133	0,1187	
2.3	17,2133	17,0965	0,1168	
3.1	17,5372	17,4315	0,1057	0,1092
3.2	17,4315	17,3201	0,1114	
3.3	17,3201	17,2095	0,1106	
4.1	17,5895	17,4893	0,1002	0,1004
4.2	17,7893	17,3859	0,1034	
4.3	17,3859	17,2882	0,0977	

На рис. 1 представлена морфология поверхностей трения образцов после испытаний закрепленным абразивным зерном. На всех образцах наблюдались мелкие риски и следы микрорезания.

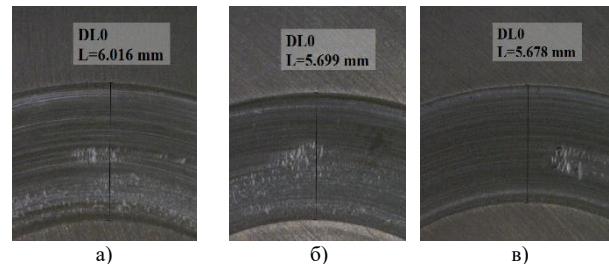
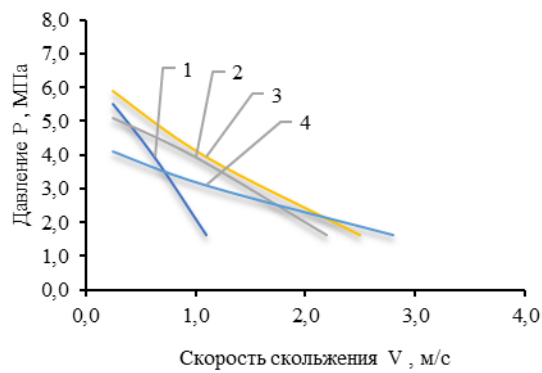


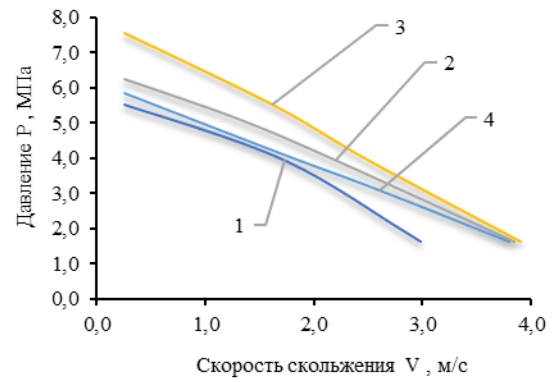
Рис. 1. Морфология зон трения образцов фотополимеров испытанных закрепленным абразивным зерном: а – УФО 30 минут; б – УФО 45 минут; в – УФО 60 минут.

На рисунке 2 приведены графики зависимости нагрузки заедания от скорости скольжения при испытании фотополимера с различным временем отверждения в паре с кольцевой оправкой из стали 40X, торец которой был обработан на наждачной бумаге зернистостью P180 (рис. 2, а), P600 (рис. 2, б) и P1200 (рис. 2, в).

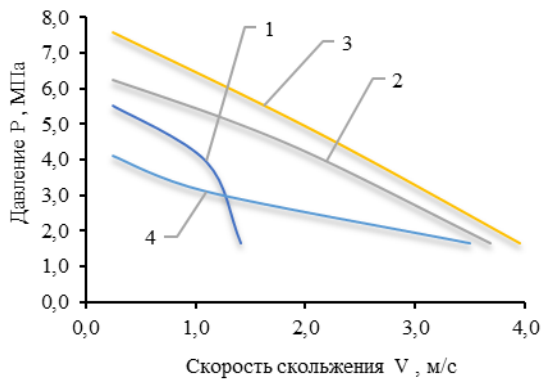




а)



в)



б)

Рис. 2. Графики зависимости нагрузки заедания от скорости скольжения при обработке стали 40X наждачной бумагой P180 (а), P600 (б) и P1200 (в): 1 – необработанные образцы, 2 – УФО 30 минут, 3 – УФО 45 минут, 4 – УФО 60 минут.

При давлении 2,0 МПа скорость скольжения до заедания образцов, обработанных ультрафиолетовым излучением, была в 1,3–2,8 раза выше, чем у необработанных образцов. Наилучшие результаты показал образец, подверженный обработке ультрафиолетовым излучением в течение 45 минут.

#### Заключение

Определено влияние времени отверждения на триботехнические характеристики фотополимеров. Проведенные эксперименты показали, что наибольшей стойкостью к абразивному износу обладал образец, подверженный обработке ультрафиолетовым излучением в течение 45 минут. Установлено, что обработка ультрафиолетом способствует увеличению давления до заедания и критических скоростей скольжения.

1. Yu L., Zhu Y., Wang L., Zhang J., Zhou J., Fu Y. Influence of 3D printing process parameters on the tribological properties of acrylic resin // J Appl Polym Sci. 2022. V. 140(6) P. 1–18.
2. Slapnik J., Stiller T., Wilhelm T., Hausberger A. Influence of Solid Lubricants on the Tribological Performance of Photocurable Resins for Vat Photopolymerization // Lubricants. 2020. V. 8(12), 104.
3. Kowalewski P., Opalka M. Enhanced Tribological Performance of Dlp 3d Printed Composites with Solid Lubricant Additives – Graphite, Ptfе, Mos2 // Materials Processing & Manufacturing eJournal. 2024. P. 1–26.

## ОБ АЛГОРИТМАХ ИДЕНТИФИКАЦИИ ПАРАМЕТРОВ ВНУТРЕННЕГО СЛОЯ ТРЕХСЛОЙНОЙ УПРУГОЙ ПОЛОСЫ

А.А. Бобылев<sup>1</sup>, М.Е. Щербаков<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Московский государственный университет им. М.В.Ломоносова, Москва, Россия; [abobylov@gmail.com](mailto:abobylov@gmail.com)

<sup>2</sup>Московский государственный университет им. М.В.Ломоносова, Москва, Россия

Рассматривается задача идентификации параметров внутреннего слоя трехслойной упругой полосы при индентировании жестким штампом с микровыступами. Для решения задачи разработаны вычислительные алгоритмы на основе нейронных сетей и метода градиентного бустинга, сравнивается их эффективность. Проведены параметрические исследования для оценки влияния параметров исходной контактной задачи на точность алгоритмов. Полученные результаты могут быть полезны при разработке методов неразрушающего контроля многослойных покрытий с использованием искусственных тактильных механорецепторов.

### Введение

Одним из направлений применения искусственных нейронных сетей (ИНС) является разработка систем тактильного осязания, что находит применение в робототехнике, медицинских приборах и протезировании [1]. Также представляется перспективным применение ИНС в задачах идентификации механических свойств материалов при помощи индентирования благодаря способности ИНС моделировать сложные нелинейные зависимости между входными и выходными данными. В отличие от классических численных методов, используемых для решения обратных задач механики деформируемого твердого тела, ИНС обладают высокой гибкостью и способностью адаптироваться под различные условия задач, что делает их более эффективными при решении задач идентификации.

В настоящей работе рассматривается задача идентификации параметров внутреннего слоя трехслойной упругой полосы на основе анализа характеристик контактного взаимодействия при индентировании в полосу жесткого штампа с микровыступами. Задача идентификации является обратной по отношению к контактной задаче, в которой необходимо определить характеристики контактного взаимодействия на основе известных параметров трехслойной упругой полосы и штампа для заданных условий нагружения.

Цель работы состоит в разработке алгоритмов, позволяющих по заданным на микровыступах штампа характеристикам контактного взаимодействия определить модуль Юнга, коэффициент Пуассона и координаты верхней и нижней границ внутреннего слоя полосы. Модули Юнга и коэффициенты Пуассона двух других слоев предполагаются известными.

Для решения задачи идентификации используется аппарат ИНС. Обучение сетей производится на синтетических данных, полученных путем компьютерного моделирования процесса индентирования штампа в трехслойную упругую полосу. Полученные результаты сопоставляются с результатами, полученными при помощи алгоритма градиентного бустинга, являющегося известной альтернативной техникой машинного обучения.

### Постановка контактной задачи

Пусть невесомая трехслойная упругая полоса в прямоугольной системе координат  $Ox_1x_2$  занимает область  $\Omega = \{x = (x_1, x_2) \in R^2: |x_1| < \infty, 0 \leq x_2 \leq h\}$

(рис. 1). Нижняя граница полосы сцеплена с жестким основанием.

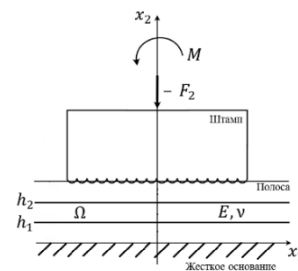


Рис. 1. Расчетная схема

В полосу вдавливаются гладкий жесткий штамп с поверхностным рельефом, состоящим из  $K$  микровыступов. Форма основания штампа задается функцией

$$\Phi(x_1) = \Phi_1(x_1) + \Phi_2(\xi_1)/K,$$

где  $\Phi_1(x_1)$  – выпуклая функция, определяющая макроформу штампа;  $\Phi_2(\xi_1)$  – строго выпуклая функция, характеризующая форму микровыступов;  $\xi_1 = \{Kx_1/a\}$  – “быстрая” координата;  $a$  – ширина штампа;  $\{\cdot\}$  – дробная часть числа.

Расчеты выполняются для следующего класса жестких штампов:

$$\Phi_1(x_1) = \alpha_1 a(2x_1/a - 1)^{m_1},$$

$$\Phi_2(\xi_1) = \alpha_2 a(2\xi_1 - 1)^{m_2},$$

где  $\alpha_1 \geq 0$ ,  $\alpha_2 > 0$ ,  $m_1 > 1$ ,  $m_2 > 1$  – безразмерные параметры.

Нормальная компонента главного вектора и главный момент внешних сил, приложенных к штампу, задаются в виде:

$$F_2 = -faE^*, \quad M_3 = eF_2a,$$

где  $E^* = 10^5$  – нормирующий множитель, МПа;  $f > 0$  – безразмерный параметр;  $e$  – безразмерный параметр, характеризующий эксцентриситет равнодействующей внешней нагрузки относительно центра приведения  $x^c = (0,5a, h)$ . Трение отсутствует.

Полная постановка контактной задачи и вычислительный алгоритм ее решения приведены в работе [2].

### Постановка задачи идентификации

Введем на множестве микровыступов сеточную координату  $i = \overline{1, K}$  и сеточные функции

нормализованных контактных усилий  $R = [r_i]$  максимумов контактного давления на микровыступах  $P = [p_i]$  и относительных величин площадей фактического контакта  $S = [s_i]$ :

$$r_i = \frac{K}{|F_2|} \int_{\Gamma_i} p(\xi_1) d\xi_1, \quad p_i = \max_{\Gamma_i} p(\xi_1),$$

$$s_i = \frac{1}{\text{meas } \Gamma_i} \int_{\Gamma_i} [p(\xi_1) > 0] d\xi_1,$$

где  $[\cdot]$  – скобка Айверсона (функция равная 1 для истинного аргумента и равная 0 в противном случае);  $\Gamma_i$  – часть границы полосы, соответствующая  $i$ -му микровыступу.

Задача идентификации состоит в нахождении по заданным характеристикам контактного взаимодействия  $\{R, P, S\}$  следующих параметров внутреннего слоя упругой полосы: модуля Юнга  $E$ , коэффициента Пуассона  $\nu$ , координат его нижней  $x_2 = h_1$  и верхней  $x_2 = h_2$  границ.

### Генерация данных

Процесс генерации базы данных для обучения ИНС состоит из трех этапов. На первом этапе задаются параметры задачи, определяющие форму основания штампа и приложенные нагрузки. Далее приведены результаты расчетов для следующего набора параметров:  $K = 8$ ,  $m_1 = 0$ ,  $\alpha_1 = 3 \cdot 10^{-5}$ ,  $m_2 = 2$ ,  $\alpha_2 = 10^{-4}$ ,  $h/a = 0,5$ ,  $f = 5 \cdot 10^{-5}$ ,  $e = 0,1$ . Коэффициент Пуассона и модуль Юнга верхнего и нижнего слоев полагались равными  $\nu' = 0,25$  и  $E' = E^*$  соответственно.

На втором этапе формируется множество наборов параметров внутреннего слоя полосы в следующих диапазонах значений:

- модуль Юнга  $E$ :  $(0,2 \div 5)E^*$ ;
- коэффициент Пуассона  $\nu$ :  $0,1 \div 0,45$ ;
- координата нижней границы внутреннего слоя  $h_1$ :  $(0,1 \div 0,8)h$ ;
- координата верхней границы внутреннего слоя  $h_2$ :  $(0,2 \div 0,9)h$ .

Координаты нижней и верхней границ внутреннего слоя задаются так, чтобы толщина слоев полосы была не менее  $0,1h$ . Для генерации множества наборов параметров внутреннего слоя полосы в указанных выше диапазонах используется статистический метод Latin Hypercube Sampling [3].

На последнем этапе при помощи вычислительного алгоритма решения прямой задачи [2] для сформированных наборов параметров  $\{E, \nu, h_1, h_2\}$  вычисляются соответствующие характеристики контактного взаимодействия  $\{R, P, S\}$ . В результате получаем 500000 тренировочных, 50000 проверочных и 5000 тестовых образцов.

### Нейросетевое решение

В качестве базовой выбрана нейронная сеть прямого распространения, состоящая из нескольких полносвязных слоев. Входной слой содержит 3К

нейронов, соответствующих набору сеточных функций характеристик контактного взаимодействия  $\{R, P, S\}$ . Выходной слой имеет четыре нейрона, соответствующих набору определяемых параметров среднего слоя полосы  $\{E, \nu, h_1, h_2\}$ . Выполняется нормализация входных данных.

Для выбора гиперпараметров сети применяется фреймворк Optuna [4], реализующий алгоритмы байесовской оптимизации. При обучении сети используются оптимизатор Adam [5], функция потерь MSE (среднеквадратичная ошибка) и метрика качества MAPE (средняя абсолютная процентная ошибка).

В результате многочисленных вычислительных экспериментов установлено, что для рассматриваемой задачи лучшую точность предсказания демонстрирует полносвязная ИНС, состоящая из четырех слоев с 223, 261, 492 и 10 нейронами соответственно и функциями активации ReLU. При ее обучении использовались такие приемы, как постепенное уменьшение шага обучения и ранняя остановка алгоритма.

В качестве альтернативной архитектуры ИНС используется каскадная архитектура. В отличие от одной полносвязной сети, предсказывающей на выходах сразу все четыре параметра среднего слоя полосы, предлагается построить четыре отдельные полносвязные ИНС, которые будут по очереди предсказывать каждая свой параметр. Причем каждая последующая сеть принимает выходные значения предыдущих сетей вместе с вектором  $\{R, P, S\}$ . Последовательность определения параметров определяем из физических соображений:  $\{h_2 \rightarrow E \rightarrow \nu \rightarrow h_1\}$  и находим гиперпараметры сетей при помощи Optuna.

### Градиентный бустинг

Градиентный бустинг [6], наряду с ИНС, является одним из наиболее мощных методов машинного обучения, который показывает высокую эффективность в решении сложных задач регрессии. Его способность точно моделировать зависимости за счет последовательного улучшения предсказаний делает его перспективным для применения в задачах идентификации параметров материалов, включая рассматриваемую в данной работе трехслойную упругую полосу.

В силу того, что выходом алгоритма градиентного бустинга является единственное значение, построим каскад сетей аналогично рассмотренному выше. Подобрать оптимальные гиперпараметры для каждого из четырех ансамблей и обучив их с использованием библиотеки XGBoost, получаем каскад моделей градиентного бустинга.

### Сравнение полученных решений

В табл. 1 приведены средние относительные погрешности предсказаний на тестовых наборах данных для трех рассмотренных выше алгоритмов.

Таблица 1. Средние относительные погрешности предсказаний

		Полносвязная ИНС	Каскад ИНС	XGBoost
MAPE	$E$	0,68%	6,02%	5,35%
	$\nu$	1,14%	10,87%	14,02%

		Полносвязная ИНС	Каскад ИНС	XGBoost
$h_1$		0,84%	5,29%	6,78%
$h_2$		0,30%	0,80%	1,09%

Из полученных результатов следует, что лучшую точность предсказания демонстрирует алгоритм с использованием одной полносвязной сети.

### Параметрические исследования

Проведем исследование влияния отдельных параметров исходной контактной задачи на точность результатов решения рассматриваемой задачи идентификации с помощью, описанной выше полносвязной ИНС.

На первом этапе варьируется отношение толщины полосы к размеру основания штампа  $h/a$ . Для каждого значения этого отношения генерируется отдельная база данных и на ней обучается нейронная сеть. Полученные результаты показывают, что предсказания алгоритма становятся тем точнее, чем меньше отношение  $h/a$  (табл. 2).

Таблица 2. Параметрическое исследование для  $h/a$

$h/a$	MAPE			
	$E$	$v$	$h_1$	$h_2$
0,1	0,68%	1,14%	0,84%	0,30%
0,25	0,79%	1,65%	1,01%	0,38%
0,5	1,03%	2,76%	1,32%	0,43%
0,75	1,88%	7,91%	2,61%	0,48%
0,9	2,61%	15,2%	3,51%	0,52%
1,5	4,01%	24,7%	5,43%	0,68%

В качестве второго исследуемого параметра задачи выберем коэффициент Пуассона верхнего и нижнего слоев полосы  $v'$  и рассмотрим диапазон его возможных значений  $0,1 \div 0,45$ . Установлено, что при уменьшении значения коэффициента Пуассона  $v'$  точность предсказаний алгоритма увеличивается (табл. 3).

Таблица 3. Параметрическое исследование для  $v'$

$v'$	MAPE			
	$E$	$v$	$h_1$	$h_2$
0,1	1,01%	2,53%	1,31%	0,40%
0,25	1,03%	2,76%	1,32%	0,43%
0,35	1,38%	3,92%	1,80%	0,49%
0,45	1,39%	5,86%	2,03%	0,54%

### Выводы

В данной работе проведен сравнительный анализ трех алгоритмов решения задачи идентификации параметров внутреннего слоя трехслойной упругой полосы (модуля Юнга, коэффициента Пуассона, положения нижней и верхней границ).

Лучшую точность предсказания продемонстрировал алгоритм на основе полносвязной нейронной сети с четырьмя выходами и следующими гиперпараметрами: функцией потерь MSE, функциями активации ReLU, а также четырьмя скрытыми слоями с 223, 261, 492 и 10 нейронами соответственно.

Проведенные эксперименты показали, что этот алгоритм позволяет предсказывать параметры внутреннего слоя со следующими средними относительными погрешностями: 0,43% для положения верхней границы, 1,03% для модуля Юнга, 1,32% для положения нижней границы и 2,76% для коэффициента Пуассона.

Сравнение с каскадом сетей на основе алгоритма градиентного бустинга на деревьях решений показало, что предложенный нейросетевой алгоритм имеет более высокое качество предсказания на тестовых примерах.

Кроме того, с использованием разработанного нейросетевого алгоритма были проведены параметрические исследования, результаты которых позволили установить закономерности между качеством предсказания алгоритма и значениями ряда параметров исходной контактной задачи.

Полученные результаты указывают на потенциал применения разработанного алгоритма в практических задачах, связанных с идентификацией механических свойств многослойных структур.

1. Садовничий В.А., Горячева И.Г., Акаев А.А. и др. Применение методов механики контактных взаимодействий при диагностике патологических состояний мягких биологических тканей. М.: изд-во Моск. ун-та. 2009. 306 с.
2. Бобылев А. А. Алгоритм решения задач одностороннего дискретного контакта для многослойной упругой полосы // Прикладная механика и техническая физика. 2024. Т. 65, № 2. С. 230-242.
3. Petelet, M., Iooss, B., Asserin, O., Loredo, A. Latin hypercube sampling with inequality constraints // AStA Advances in Statistical Analysis. 2010. V. 94. P. 325-339.
4. Bergstra, J., Bardenet, R., Bengio, Y., Kégl, B. Algorithms for hyper-parameter optimization // Advances in neural information processing systems. 2011. V. 24.
5. Kingma D. P. Adam: A method for stochastic optimization // arXiv preprint arXiv:1412.6980. 2014.
6. Chen T., Guestrin C. Xgboost: A scalable tree boosting system // Proceedings of the 22nd ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining. 2016. P. 785-794.

## ВЛИЯНИЕ МИКРОСТРУКТУРЫ И СОСТАВА ЛЕГИРОВАННЫХ МОЛИБДЕНОМ И ВОЛЬФРАМОМ НАНОУГЛЕРОДНЫХ ПОКРЫТИЙ-ОРИЕНТАНТОВ НА ИХ АНТИФРИКЦИОННЫЕ СВОЙСТВА ПРИ ТРЕНИИ В РЕЖИМЕ ГРАНИЧНОЙ СМАЗКИ

И.А. Буяновский<sup>1</sup>, М.М. Хрущов<sup>1</sup>, Д.А. Суляндзига<sup>2</sup>, В.Д. Самусенко<sup>1</sup>, А.Н. Большаков<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, Москва, Россия; [buyan37@mail.ru](mailto:buyan37@mail.ru)

<sup>2</sup>Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

В работе представлены результаты исследования химического и фазового состава, структуры, физико-механических и трибологических характеристик антифрикционных нанокристаллических покрытий, легированных соответственно молибденом и вольфрамом, которые предположительно имеют высоко упорядоченное линейно-цепочечное (монокристаллическое) строение.

В последние десятилетия установлено, что для защиты от износа и снижения высоких энергетических потерь при трении в режиме граничной смазки, в условиях которой постоянно или периодически работают практически все смазываемые узлы трения, на контактирующие поверхности трущихся деталей этих узлов рационально наносить алмазоподобные углеродные покрытия [1, 2]. При умеренных нагрузках и температурах граничный режим смазки поддерживается вследствие образования на поверхностях контактирующих тел граничных слоёв адсорбционного происхождения [3]. При тяжёлых режимах граничной смазки этого, однако, может оказаться недостаточно, чтобы обеспечить нормальную работу узла трения [4-5]. В этой связи в ряде публикаций [5-8] были оценены антифрикционные свойства образованных линейно-цепочечным sp<sup>1</sup>-углеродом “монокристаллических” безводородных покрытий m-C, легирование которых молибденом, вольфрамом и кремнием обеспечило при трении по стали в серосодержащей среде значительное снижение энергетических потерь по сравнению с традиционными методами, применяемыми для решения этих целей в настоящее время.

В предлагаемой работе представляются результаты комплексного исследования структуры и фазового составов, а также трибологических свойств указанных антифрикционных вакуумных покрытий, легированных вольфрамом и молибденом m-C:W и m-C:Mo. Покрытия линейно-цепочечного углерода m-C, легированные молибденом и вольфрамом, получали по технологии, описанной в [8, 9], используя импульсно-плазменное напыление с дополнительным облучением ионами Ag<sup>+</sup> для получения углеродной плёнки. Легирование углеродных покрытий вольфрамом и молибденом осуществлялось путём бомбардировки ионами этих элементов, получаемыми при распылении соответствующих мишеней. Технология нанесения покрытий этого типа изначально предполагала отсутствие в них водорода и наличие карбиноподобных цепочечных структур sp<sup>1</sup>-углерода. Покрытия наносились на образцы, изготовленные из стали ШХ-15 или её аналог – сталь 100Cr6.

Исследование структуры и состава покрытий. Углубленное исследование покрытий m-C: Mo было проведено методом рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии (РФЭС) на фотоэлектронном спектрометре PHI VersaProbe II 5500. Из данных РФЭС-

профилирования следует, что химический состав покрытия m-C: Mo неоднороден и меняется с глубиной. В первом приближении можно выделить два слоя. Наружный слой с повышенным содержанием углерода, ~56 ат.%, содержит ~37 ат.% Мо и около 6 ат.% кислорода. Внутренний слой содержит до 50 ат.% молибдена и ~20 ат.% кислорода, а количество углерода в нем снижено вдвое по сравнению с наружным слоем.

Механические свойства исследуемых покрытий оценивали на приборе CSM Micro Indentation Tester МНТХ, оснащённом трёхгранной пирамидой Берковича (при максимальной нагрузке 10 мН). Оценивались нанотвёрдость Н и модуль упругости Е, их соотношение, Н/Е – индекс пластичности и коэффициент упругого восстановления Re. Измерения показали, что механические свойства сравниваемых покрытий достаточно близки между собой, так что разница между контактными давлениями при одинаковых нагрузках будет минимальными.

Оценка антифрикционных свойств исследуемых покрытий проводили на четырёхшариковой машине КТ-2 с модернизированным узлом трения, позволяющим реализовать трение установленного в вертикальном шпинделе шарика диаметром 12,7 мм по трём сложенным треугольником роликам диаметром 8 мм (шарики и ролики – стандартные подшипниковые детали из стали ШХ-15), на цилиндрические поверхности которых нанесены исследуемые покрытия толщиной 0,8-1,2 мкм. Осевая нагрузка на узел трения составляла ~110 Н, частота вращения шпинделя – 1 мин<sup>-1</sup>, продолжительность одного испытания – 60 мин. Испытания проведены при трении в режиме граничной смазки в неактивной (полиальфаолефиновое масло ПАО-4), поверхностно-активной (то же масло +1% мас. олеиновой кислоты (ОК)) и химически активной (то же масло +2% мас. присадки ДФ-11) смазочных средах. Для сравнения эти же образцы были испытаны также при сухом трении. Было установлено, что это покрытие (как легированное, так и нелегированное) существенно снижает трение как смазанных, так и несмазанных стальных деталей, на которые эти покрытия были нанесены. Результаты испытаний приведены на рис. 1 в виде зависимостей коэффициента трения от их продолжительности.

Как следует из полученных нами результатов (см. рис. 1), нанесение на сталь покрытий линейно-цепочечного углерода m-C, m-C:Mo и m-C:W существенно

снижает величину коэффициента трения, а дополнительное смазывание нанесённых покрытий инактивным маслом ПАО-4 позволяет довести коэффициенты трения с 0,84 (пара трения «сталь-сталь» в отсутствие смазочного материала) до ~0,15 (рис. 1). Согласно рис. 1 в отсутствие смазочного материала наиболее сильно снижает трение стали по стали нанесение на нижние образцы-ролики покрытие линейно-цепочечного углерода m-C ( $f = 0,25$ ), линейно-цепочечный углерод, легированный вольфрамом m-C:W (кривая 3) снижает трение до 0,42, а легированный молибденом m-C:Mo (кривая 4) – только до 0,74.

На рис. 1 видно, что при проведении испытаний в инактивном масле ПАО-4 были получены коэффициенты трения порядка 0,15–0,16 (кривые 6–8). При этом следует отметить, что кривая 6 приблизительно после 30 минут испытания начинает заметно возрастать, что, по-видимому, связано с разрушением нелегированного покрытия, а для пары трения сталь-сталь при смазке тем же маслом был получен коэффициент трения 0,67 (кривая 5). Таким образом, анализ рис. 1 показывает, что антифрикционные свойства исследованных материалов в основном определяются соотношением материала покрытия и наличием (или отсутствием) легирования покрытия линейно-цепочечного углерода, а при их совместном действии со смазочным материалом коэффициенты трения практически одинаковы.

На рис. 2 показано, как влияют на антифрикционные свойства этих же покрытий (и стали без покрытия) поверхностно-активной (ПАО-4+1% олеиновой кислоты) и химически активной (ПАО-4+2% присадки ДФ-11) сред. Как видно из этого графика, все исследуемые материалы (как с покрытиями, так и сталь без покрытия) обеспечивают в поверхностно-активной среде на протяжении всей продолжительности испытаний коэффициенты трения порядка 0,15-0,16, т.е. в поверхностно-активной среде (1% раствор олеиновой кислоты в масле ПАО-4) заметно снижаются коэффициенты трения стали по стали, а трение стали по покрытиям-ориентантам остаётся на том же уровне, как и для стали по покрытиям в инактивной среде, что свидетельствует о том, что при этих условиях трибологические эффекты не суммируются.

При исследовании этих же материалов в химически активной серосодержащей среде ситуация резко меняется. В то же время как для пар трения «сталь-сталь» и «сталь – покрытие m-C» коэффициенты

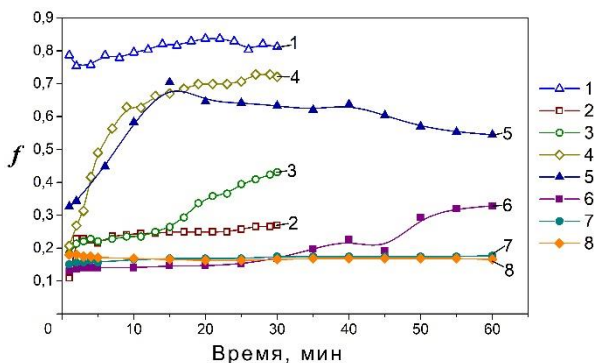


Рис. 1. Изменение коэффициента трения в зависимости от продолжительности испытания без смазки и при смазке ПАО-4 пар трения: 1 – сталь-сталь, без смазки; 2 – сталь по

покрытию m-C, без смазки; 3 – сталь по покрытию m-C:W, без смазки; 4 – сталь по покрытию m-C:Mo, без смазки; 5 – сталь-сталь, ПАО-4; 6 – сталь по покрытию m-C, ПАО-4; 7 – сталь по покрытию m-C:W, ПАО-4; 8 – сталь по покрытию m-C:Mo, ПАО-4

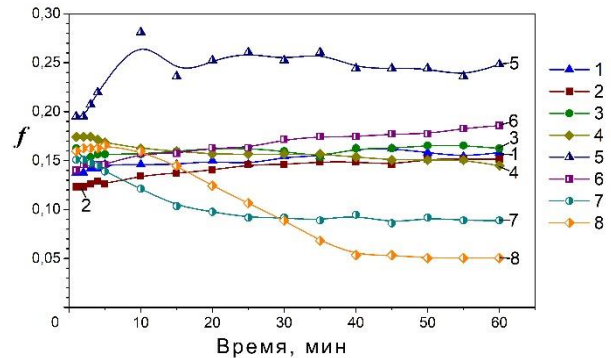


Рис. 2. Изменение коэффициента трения в зависимости от продолжительности испытания при смазке ПАО-4 с поверхностно-активной (ОК) и химически активной (ДФ-11) присадками пар трения: 1 – сталь-сталь, ПАО-4+1%ОК; 2 – сталь по покрытию m-C, ПАО-4+1%ОК; 3 – сталь по покрытию m-C:W, ПАО-4+1%ОК; 4 – сталь по покрытию m-C:Mo, ПАО-4+1%ОК; 5 – сталь-сталь, ПАО-4+2%ДФ-11; 6 – сталь по покрытию m-C, ПАО-4+2%ДФ-11; 7 – сталь по покрытию m-C:W, ПАО-4+2%ДФ-11; 8 – сталь по покрытию m-C:Mo, ПАО-4+2%ДФ-11

трения в этой среде составляют, как и в поверхностно-активной среде, 0,14-0,16. Совершенно иначе ведут себя в химически-активной среде образцы с покрытиями m-C:Mo и m-C:W. В самом начале эксперимента для первой из этих пар коэффициент трения составлял 0,16, но уже через 5 минут он начал резко снижаться, достигнув ещё через 35 минут значения 0,05, после чего коэффициент трения не изменялся до конца эксперимента (кривая 8). При испытании второй пары сталь-m-C:W, уже с самого начала коэффициент трения начал снижаться с 0,145, достигнув через 25 минут значения 0,09, после чего коэффициент трения оставался на этом уровне до конца эксперимента (кривая 7). Столь характерное для химически активных присадок может быть объяснено только образованием на поверхностях раздела трущихся тел известных модификаторов трения, дисульфидов молибдена и вольфрама, как результат трибохимического взаимодействия серы с легирующими покрытиями молибденом и вольфрамом.

### Заключение.

Таким образом, покрытие-ориентант, как легированное, так и нелегированное снижает потери на трение приблизительно также, как и смазочные материалы, а при наличии трибохимического взаимодействия смазочной среды с легирующим покрытием элементом, приводящим к образованию модифицированного слоя, который обеспечивает низкое сопротивление сдвигу, потери на трение снижаются в разы.

Учёт полученных результатов предлагаемого исследования позволит оптимизировать процесс создания высокоэффективных смазочных материалов для тяжёлонагруженных узлов трения.

1. Bewilogua K., Hofmann D. History of diamond-like carbon films— From first experiments to worldwide applications //Surface and Coatings Technology. – 2014. – Т. 242. – С. 214-225.

2. Tyagi A. et al. A critical review of diamond like carbon coating for wear resistance applications //International journal of refractory metals and hard materials. – 2019. – Т. 78. – С. 107-122.
3. Kalin M., Velkarvrh I., Vizintin J. Role of adsorption and tribophysical parameters in lubrication of DLC // Proceedings on the Tribology Congress IV (WTC 2009). Kyoto, 2009. – С. 25.
4. Kalin M. et al. Review of boundary lubrication mechanisms of DLC coatings used in mechanical applications // Meccanica. – 2008. – Т. 43. – С. 623-637.
5. Левченко В.А., Буяновский И.А., Игнатъева З.В., Матвеевко В.Н. Роль углеродных покрытий-ориентантов в оптимизации смазочной способности граничных слоёв // Проблемы машиностроения и надёжность машин. – 2004. – №2. – С. 45-48.
6. Буяновский И.А., Хрущов М.М., Самусенко В.Д. Алмазоподобные углеродные покрытия: трибологическое поведение при граничной смазке: Часть 1. Структура, методы испытаний, смазка адсорбционными слоями // Материаловедение. – 2021. – № 9. – С. 3-18.
7. Буяновский И. А., Хрущов М. М., Самусенко В. Д. Алмазоподобные углеродные покрытия: трибологическое поведение при граничной смазке. Часть II. Смазка химически модифицированным слоем // Материаловедение. – 2021. – № 10. – С. 3-11.
8. Буяновский И.А., Большаков А.Н., Левченко В.А. Влияние на антифрикционные свойства смазочных сред легирования ориентирующих углеродных покрытий карбидообразующими элементами // Трение и износ. 2018. – Т. 39. – № 5. – С. 471-476.
9. Албагачиев А.Ю., Буяновский И.А., Самусенко В.Д. Антифрикционное покрытие. Патент RU. 272 8449 С1.2907.2020 F 16С 33/04 (2020.01)

## ДИАЛКИЛДИТИОФОСФАТЫ МЕТАЛЛОВ КАК ПРИСАДКИ К МАСЛАМ И ИХ СМАЗОЧНЫЕ СВОЙСТВА

И.А. Буяновский, В.Д. Самусенко, И.М. Петрова

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт машиноведения им. А.А. Благонравова  
Российской академии наук, Москва, Россия; [buyan37@mail.ru](mailto:buyan37@mail.ru)

Повышение уровня ресурсосбережения, долговечности и надёжности смазываемых узлов трения машин и механизмов всегда является актуальной проблемой для трибологов. Одним из эффективных путей решения этой проблемы является корректный выбор и применение соответствующих присадок к смазочным маслам. В настоящее время одними из наиболее распространённых присадок к моторным маслам являются диалкилдитиофосфаты ряда металлов.

**Введение.** Диалкилдитиофосфаты цинка [1] в конце 30-х годов XX века уже успешно использовались в качестве эффективных антиокислительных присадок. С 1955 г., когда выяснилось, что масла, содержащие эту присадку, заметно снижают износ элементов пары трения кулачок-толкатель. Дитиофосфаты цинка входят в состав большинства современных моторных масел, где выполняют функцию противоизносных и антиокислительных присадок [2]. К настоящему времени синтезировали и оценили уровень трибологического поведения значительного числа дитиофосфатов различных металлов (MeDP). Установлено, что эффективность их смазочного действия определяется как их поверхностной активностью (адсорбционной способностью), так и последующим трибохимическим взаимодействием адсорбата с металлической поверхностью подложки, в результате чего молекулы дитиофосфатов металла разлагаются, а содержащиеся в них химически активные элементы, такие как сера, фосфор и кислород, образуют на этой поверхности модифицированные слои, защищающие её от повреждения [1-2].

Ниже рассмотрено и проанализировано трибологическое поведение дитиофосфатов ряда металлов, представляющих интерес для исследователей и разработчиков присадок к смазочным маслам (прежде всего – моторным), а также интерес к развитию химии присадок к смазочным маслам.

**Анализ.** Первое систематическое исследование трибологических характеристик диалкилдитиофосфатов металлов было опубликовано в 1968-69 гг. [3]. Исследовались ди-(4-метилпентил-2)- и ди-н-гексилдитиофосфаты девяти металлов: висмута, серебра, свинца, сурьмы, олова, кадмия, железа, никеля и цинка. Испытания проводились на стандартной четырёхшариковой машине по методу, заметно отличающемуся ГОСТ 9490-75, но с критериями, которые с определенным допущением могут рассматриваться как оценки современных критериев  $R_k$ ,  $R_c$ ,  $I_3$  и  $D_m$ . При ранжировании ди-(4-метилпентил-2) дитиофосфатов исследуемых металлов по противоизносным характеристикам авторы обсуждаемой работы установили следующую последовательность снижения этой характеристики:

$Ag, Bi, Pb > Sb, Sn \geq Cd > Fe, Ni > Zn$

По противоизносным свойствам:

$Zn, Cd, Ni > Fe > Ag > Pb > Sb, Sn > Bi$

Несколько отличались от них соответствующие последовательности результатов испытаний ди-н-гексилдитиофосфатов тех же металлов, т.е. для снижения противоизносных свойств:

$Bi > Pb > Ni, Cd, Fe > Zn$

А для снижения противоизносных свойств:

$Cd, Zn, Fe > Ni > Pb > Bi$

Анализ полученных экспериментальных данных позволил авторам [3] установить, что основное влияние на смазочные свойства масел с диалкилдитиофосфатами металлов оказывает природа металла, а влияние углеводородных радикалов значительно ниже. Позднее было показано, что эффективность противоизносного действия композиций с дитиофосфатами металлов тем выше, чем выше их термическая стабильность, а эффективность их противоизносного действия, наоборот, тем выше, чем ниже их термическая стабильность.

Аналогичное исследование было проведено на стандартной четырёхшариковой машине по ГОСТ 9490-75 [4]. Были оценены и сопоставлены между собой трибологические характеристики синтезированных диалкилдитиофосфатов шести металлов – бария, цинка, меди, никеля, кобальта и молибдена, концентрация которых обеспечивала содержания массовой доли 0,06% по фосфору. Базовым маслом служило масло М-11, нагрузка при измерении  $D_m$  – 392 Н. Если ранжировать по смазочной способности диалкилдитиофосфаты исследуемых металлов, то мы получим следующие последовательности от лучших к худшим:

- по противоизносным свойствам:  
 $Ni > Cu, Co > Mo > Zn > Ba$ ;
- по противоизносным свойствам:  
 $Zn, Co > Mo > Ni > Cu > Ba$ ;
- по антифрикционным свойствам:  
 $Mo > Ni > Ba, Zn, Co > Cu$ .

Наиболее востребованными дитиофосфатами металлов в мировой практике в качестве противоизносных и антиокислительных присадок по-прежнему являются дитиофосфаты цинка, а в качестве противоизносных и антифрикционных – дитиофосфаты молибдена. Существенно реже используются дитиофосфаты бария и сурьмы. Однако исследования трибологического поведения дитиофосфатов металлов широко продолжают [1]. Значительная часть этих исследований посвящена дитиофосфатам цинка – как их трибологическому поведению в различных условиях, так и механизму их смазочного действия. Молекулярная структура этой присадки приведена на рис. 1.



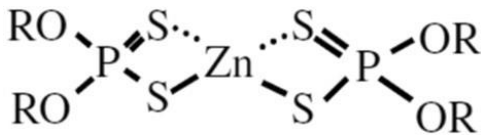


Рис. 1. Молекулярная структура дитиофосфата цинка (по данным [2]): P, S, Zn – соответственно атомы фосфора, серы, цинка; O – кислорода, R – углеводородный радикал

Механизм смазочного действия этой присадки заключается в образовании износостойкого модифицированного слоя («трибоплёнка») на поверхностях контакта трущихся деталей, устраняющего металлический контакт этих деталей и тем самым исключающего (или минимизирующего) интенсивное адгезионное и абразивное их изнашивание. При рассмотрении механизмов, позволяющих диалкилдитиофосфату цинка ZDDP выполнять свои функции, следует учитывать, что он, с одной стороны, уменьшает износ путём образования плёнки стеклообразного полифосфата, а с другой стороны, препятствует началу изнашивания за счёт образования сульфидов железа.

За последние почти 70 лет многочисленные попытки исследователей и производителей создать полноценную замену этой бифункциональной (антиокислительной и противозносной) присадке к моторным маслам оказались тщетными [2]. Тем не менее, она имеет серьёзный недостаток: высокий коэффициент трения при граничном и смешанном режимах смазки. Необходимость максимально снизить потери энергии на трение в машинах заставила исследователей и производителей перейти к серо-молибден органическим маслорастворимым присадкам. Одной из первых таких присадок был диалкилдитиофосфат молибдена («молибденовый аналог диалкилдитиофосфата цинка» [5]). К концу 70-х гг. XX века такие присадки получили широкое распространение вследствие повышения эффективности использования автомобилей за счёт снижения потерь на трение в моторных и трансмиссионных маслах, одновременно оказывая заметное противозносное действие [5, 6]. Структурная схема диалкилдитиофосфата молибдена (MoDDP) приведена на рис. 2.

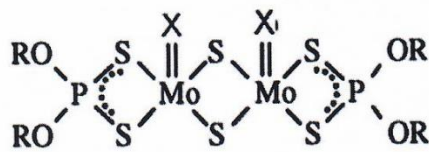


Рис. 2. Структурная схема диалкилдитиофосфата молибдена (по данным [5]). Здесь: P, S, Mo – атомы соответственно фосфора, серы и молибдена, O – кислорода, R – углеводородный радикал, X и X<sub>1</sub> – мостиковые атомы (обычно O или S)

Согласно [1], слои, формируемые дитиофосфатом молибдена на поверхностях трения, при температурах до 220 °С отличаются от слоёв, формируемых дитиофосфатами цинка, поскольку они менее упрочнены. При нагревании они разлагаются с выделением дисульфида молибдена MoS<sub>2</sub>. Кроме того, на поверхностях трения выделяются также MoO<sub>3</sub> и FePO<sub>4</sub>, MoS<sub>2</sub> формируется непосредственно на поверхности трения, а MoO<sub>3</sub> – на глубине 10 нм. Локализованный во всём поверхностном слое FePO<sub>4</sub> имеет более высокую твёрдость и обеспечивает достаточно высокую

износостойкость поверхностному слою, а высокие антифрикционные свойства этому слою придают MoS<sub>2</sub> и MoO<sub>3</sub>.

Для иллюстрации разницы между противозносной присадкой – диалкилдитиофосфатом цинка – и модификатором трения – диалкилдитиофосфатом молибдена на рис. 3 приведено сравнение влияния на антифрикционные свойства масла М-11 присадок диалкилдитиофосфата цинка (2% присадки ДФ-11) и диалкилдитиофосфата молибдена (1% присадки Molyvan L).

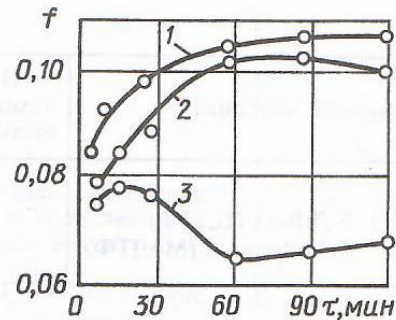


Рис. 3. Зависимость коэффициента трения  $f$  от продолжительности  $\tau$  испытания на стандартной четырёхшариковой машине при нагрузке 196 Н трёх смазочных композиций: 1 – масло М-11, 2 – масло М-11+2% масс. ДФ-11, 3 – масло М-11 + 1% масс. Molyvan L (по данным А.Б. Виппера)

Как видно из рис. 3, антифрикционный эффект от применения молибденсодержащей присадки существенно выше, чем от цинксодержащей.

Несколько иной механизм смазочного действия у диалкилдитиофосфатов таких металлов, как кадмий [7]. Так, при SEM-EDX анализе состава поверхностных слоёв пятен износа, полученных в результате 30-минутного испытания на стандартной четырёхшариковой машине 2% масс. раствора диизопропилдитиофосфата кадмия (CdDDP) в минеральном масле 500SN при нагрузке 588 Н, было установлено наличие на этих пятнах сульфида, сульфата и фосфатов, а также металлического кадмия. По мнению авторов статьи, металлический кадмий высаживается на поверхности пятна износа, плакирует её, «залечивая» повреждения основного металла, реализуя эффект двухслойной смазки.

**Заключение.** Путём анализа первоисточника оценено влияние ряда металлов на эффективность трибологического действия диалкилдитиофосфатов этих металлов. Оценены механизмы смазочного действия диалкилдитиофосфатов характерных металлов (цинка, молибдена и кадмия). Рассмотрена возможность реализации эффекта двухслойной смазки для дитиофосфатов кадмия, гадолиния и других металлов.

1. Лашхи В.Л., Меджибовский А.С., Чудиновских А.Л., Гай Э.М. Научные основы химмотологии моторных масел. – М.: Проспект, 2024.- 304 с.
2. Spikes H. The history and mechanisms of ZDDP //Tribology letters. – 2004. – Т. 17. – №. 3. – С. 469-489
3. Allum K. G., Forbes E. S. The load-carrying properties of metal dialkyldithiophosphates: the effect of chemical structure //Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Conference Proceedings. – Sage UK: London, England: SAGE Publications, 1968. – Т. 183. – №. 16. – С. 7-14.
4. Ребров И.Ю. Присадки, улучшающие антифрикционные

- свойства смазочных масел. Автореф. дисс. ... канд. техн. наук. ВНИИ НП. М., 1986. – 23 с.
5. Spikes H. Friction modifier additives //Tribology Letters. – 2015. – Т. 60. – С. 1-26.
  6. Mitchell P. C. H. Oil-soluble Mo-S compounds as lubricant additives //Wear. – 1984. – Т. 100. – №. 1-3. – С. 281-300.
  7. Hu J. Q. et al. Antiwear function and mechanism of action of cadmium dialkyldithiophosphate additive //Lubrication Science. – 2005. – Т. 17. – №. 4. – С. 451-459.

## К ИССЛЕДОВАНИЮ ТЕМПЕРАТУРНОГО ПОЛЯ ПРИ СКАНИРУЮЩЕЙ ЛАЗЕРНОЙ ЗАКАЛКЕ

А.И. Веремейчик, Б.Г. Холодарь

Брестский государственный технический университет, Брест, Беларусь; [vai\\_mrtm@bstu.by](mailto:vai_mrtm@bstu.by)

Разработана программа определения температурного поля для случая закалки сталей лазером со сканирующей системой, когда наряду с движением ядра потока вдоль дорожки оно одновременно перемещается в поперечном направлении.

### Цель

Разработка алгоритма расчета и компьютерной программы для исследования температурного поля при лазерной закалке сталей движущимся источником нагрева со сканирующей системой, т.е. когда одновременно с движением ядра потока вдоль прямолинейной дорожки оно периодическим образом перемещается в поперечном направлении, двигаясь по траектории, которая представляет собой совокупность выходящих одна из другой последовательных поперечных линий, причем по условиям работы установки в точках этих линий интенсивность энергетического воздействия и скорость движения пятна может изменяться.

### Некоторые результаты

Для лазерной обработки образцов применялся волоконный лазер непрерывного действия с максимальной мощностью 1 кВт. Технологический комплекс для лазерной закалки оборудован сканирующей системой, которая обеспечивает многократное перемещение пятна обработки по обрабатываемой поверхности с высокой частотой в направлении перпендикулярном направлению обработки. Многократное перемещение лазерного пятна с высокой частотой обеспечивается применением системы двух дефлекторов (рис. 1), которые согласованно совершают колебания во взаимно перпендикулярных направлениях.

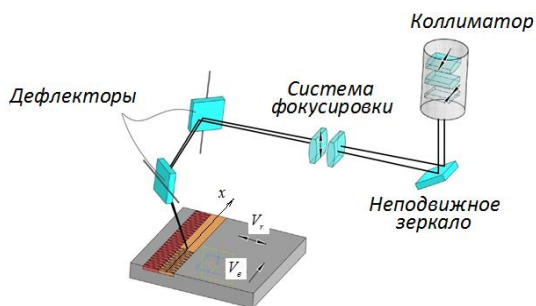


Рисунок 1 – Схема сканирующей системы

Разработанная программа учитывает, что при поверхностной обработке излучением волоконного лазера со сканирующей лазерной головкой производится отключение лазерного излучения после прохождения нескольких поперечных линий, т.е. обрабатываемая дорожка представляет собой последовательность зон, состоящих из участков непосредственного нагружения (пятно воздействия) и “ненагруженных” промежутков. Такой способ при малом радиусе кругового ядра лазера дает возможность создавать в материале тепловое поле определенной интенсивности при заданной номинальной мощности установки, что учтено при разработке программы.

В качестве исходных кинематических данных для расчетов принимались скорость движения лазерной головки вдоль дорожки, ширина дорожки, число поперечных линий на пятне сканирования и частота повторений прохождения двух взаимосвязанных линий. По этим данным определен период времени, соответствующий возврату оси луча в точку с фиксированной поперечной координатой. Задаваемое на установке для лазерной закалки число линий  $N_{lin}$  может быть нечетным или четным (во время испытаний число линий соответствовало значениям 7 и 10), поэтому на пятне сканирования уместается целое или полуцелое число периодов поперечного движения луча, равное  $N_{lin} / 2$ . В связи с тем, что оплавление поверхности обрабатываемого материала происходит в круге определенного радиуса, а не только в точках попадания оси луча лазера, при небольших скоростях движения головки лазера происходит непрерывное слияние зон обработки «пятно+промежуток», поэтому уточнение ситуации может быть проведено только при достаточно больших скоростях движения лазерной головки, когда пятна и промежутки между ними явным образом выделяются. Это дает возможность определить продольную составляющую скорости сканирования, которая является одинаковой для любых скоростей движения лазерной головки при одном и том же числе линий на пятне и частоте их прохождения.

При составлении программы вычислений температурных полей предполагается, что наличие постоянной продольной и периодической поперечной скоростей сканирования позволяет считать ось луча при сканировании движущейся вдоль дорожки по некоторой зигзагообразной линии.

С точки зрения кинематики движение оси луча можно представить как сумму продольного переносного (вдоль оси  $x$ ) и относительного продольного и поперечного движений, причем скорость переносного движения совпадает со скоростью лазерной головки (рис. 1).

Для определения продольной относительной скорости были проведены эксперименты по нагружению плоского стального образца размерами  $200 \times 20 \times 7$  мм со скоростью перемещения головки, равной  $V_e = 20000$  мм/мин. На рис. 2 показан след от воздействия на некотором участке дорожки.



Рисунок 2 – Обработанный образец

Хотя к концу дорожки след становится более оплавленным за счет общего повышения температуры образца с течением времени воздействия, при большом числе образовавшихся зон обработки можно с достаточной точностью определить длину одной зоны  $L'_z$ , как отношение общей длины дорожки ( $L_z \approx 198$  мм) к числу этих зон ( $N=18$ ).

Известно, что центр пятна должен вернуться после прохода пятна в точку с координатой  $y=0$ , то при числе линий на пятне  $N_{lin}=7$ , соответствующему 3.5 периодам  $T_{laz}=1/f$ ,  $f=220$  Гц, по формуле для длины зоны

$$L_z = (V_e + V_r) \frac{N_{lin}}{2} T_{laz} + (V_e - V_r) k T_{laz}, \quad (1)$$

подбираем число  $k$ , которое должно быть полуцелым.

Принимаем из опыта при скорости  $V_e = 20000$  мм/мин  $= 100/3$  см/с длину зоны в пределах  $L'_z = 1,04 \dots 1,1$  см. Находим, что в выбранном интервале такое число  $k$  существует. Принимаем  $k=3.5=7/2 = N_{lin}/2$ .

При расчетах принято:

$$V_{rx} = \frac{2 \text{Long}X \cdot f}{N_{lin}}, \quad V_{ry} = 2 \text{Long}Y \cdot f, \quad (2)$$

где  $\text{Long}X = 2,25$  см,  $\text{Long}Y = 4$  см – продольный и поперечный размеры пятна сканирования, м.

По результатам расчета получено:  $V_{ry} = 176$  см/с,

$V_{rx} = 14,14$  см/с.

Абсолютная скорость при движении по пятну при  $V_e = 20000$  мм/мин:

$V_{ap} = V_e + V_{rx} = 47,48$  см/с.

Абсолютная скорость возвратного движения по промежутку между пятнами:

$V_{av} = V_e - V_{rx} = 19,19$  см/с.

Таким образом, найденное значение  $V_r$  можно принять как достаточно обоснованное и использовать его для режимов с другими значениями скорости переносного движения.

Для различных скоростей переносного движения определено число  $N_z$  зон на образце длиной 198 мм в зависимости от длины пятна воздействия  $L_p$  и длины возвратного движения  $L_v$ , длина зоны «пятно+промежуток»  $L'_z$ . Некоторые результаты расчетов приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Результаты расчета количества зон

№ п/п	$V_e$ , мм/мин	$L_p$ , см	$L_v$ , см	$L'_z$ , см	$N_z$
1	1000	0.25152	-0.19848	5.30E-002	373.4
2	2000	0.27803	-0.17197	0.10606	186.7
3	5000	0.35758	-9.24E-002	0.26515	74.7
4	8000	0.4371	-1.288E-002	0.4242	46.7
5	9000	0.4636	1.3636E-002	0.4773	41.5
6	10000	0.4902	4.015E-002	0.5303	37.3
7	20000	0.7553	0.3053	1.0606	18.7

Знак « $\leftarrow$ » в  $L_v$  показывает, что следующее пятно накладывается на предыдущее. При  $V_e = 8484$  мм/мин пятна не накладываются друг на друга и  $L_v = 0$ .

Для источника нагрева, расположенного в точке  $A(x, y, z)$ , приращение температуры над исходным уровнем температуры тела в данной точке  $A_0(x_0, y_0, z_0)$  в заданный момент времени  $t$  определяется выражением:

$$T(r, t) = \frac{Q}{8(\pi a t)^{3/2}} \exp\left[-\frac{r^2}{4at}\right], \quad (3)$$

где  $Q$  – выделение тепла в точке в единицу времени, Дж;  $a = \lambda/(c\rho)$  – коэффициент температуропроводности,  $\text{м}^2/\text{с}$ ;  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности,  $\text{Вт}/(\text{м}\cdot^\circ\text{C})$ ;  $c$  – удельная теплоемкость,  $\text{Дж}/(\text{кг}\cdot^\circ\text{C})$ ;  $\rho$  – плотность материала,  $\text{кг}/\text{м}^3$ ;  $t$  – время, с;  $r = \sqrt{(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2 + (z-z_0)^2}$  – расстояние от источника тепла до рассматриваемой точки, м (рис. 3). Исходная температура принята равной нулю.

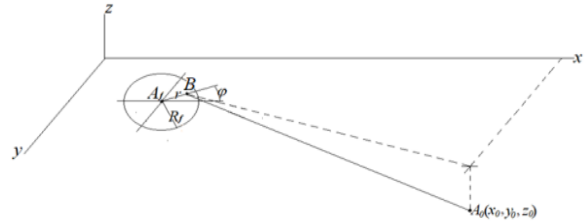


Рисунок 3 – Расстояние между точкой пятна и точкой  $A_0$  тела

Поскольку источник излучения создает не точечный, а распределенный по некоторому закону поток, то величину  $Q$  можно представить в виде интеграла

$$\int q_0 \cdot f(a, t) da, \quad (4)$$

где  $q_0$  – максимальная интенсивность потока,  $f(a, t)$  – закон его распределения по площади  $a$  пятна нагрева в зависимости от текущего значения времени  $t$ . Функция  $f(a, t)$  представима в виде произведения:

$$f(a, t) = f(a) \cdot f(t). \quad (5)$$

В качестве  $f(a)$  можно выбрать различные приближенные представления, в частности используются равномерный по площади или распределенный по гауссовому закону поток.

Поскольку тепловое воздействие распределено по некоторой поверхности тела, необходимо рассматривать действие совокупности точечных источников, что приводит к необходимости интегрирования выражения (1) в пределах этой поверхности:

$$T_s(r, t) = \int \int \{T(r, t) ds\} d\xi, \quad (6)$$

где  $\xi$  – переменная интегрирования по времени от начального значения  $\xi_0=0$ ,  $S$  – переменная интегрирования по поверхности.

Распределение интенсивности воздействия по площади ядра подчинено гауссовому закону  $q = q_0 \exp(-\gamma r^2)$ , где  $r$  – расстояние от оси луча,  $\gamma$  – коэффициент сосредоточенности потока. Поскольку при этом  $r$  меняется от нуля до бесконечности, при решении задач зона ядра потока ограничивается

некоторым радиусом  $R_f$ , так что выражение для  $q$  можно записать в виде  $q = q_0 \exp\left(-\left(r/R_f\right)^2\right)$  [1].

Поскольку при движении луча по дорожке предполагается изменение потока во времени, то множитель  $q_0$  следует записать в виде  $q_0 \cdot F(t)$ , где функция времени  $F(t)$  должна описывать фактический закон изменения интенсивности потока и, таким образом, должна быть введена в подынтегральное выражение (4) при значениях  $0 \leq F(t) \leq 1$ . Эту функцию далее представляем в виде произведения  $F(t) = Coef(t) \cdot G_f(t)$  так, чтобы функция  $Coef(t)$  учитывала изменение общей мощности источника (например, ее отключение до значения  $F(t) = 0$  на участках промежутка между пятнами), а  $G_f(t)$  – изменение мощности при нахождении оси луча вблизи продольных краев дорожки. Необходимость введения функции  $G_f(t)$  связана с тем, что возле краев дорожки относительная скорость поперечного движения луча принимает значения близкие к нулю и равные ему, что в реальных условиях работы установки вызывает возможность значительного перегрева материала.

Если рассматривать вопрос об определении температуры для точек, находящихся на достаточном удалении от оси луча источника, то внутренний интеграл в (6) можно определить, относя при этом все энергетическое воздействие к оси луча, и для определения расстояния между источником и рассматриваемой точкой использовать приведенное выше в (3) определение этого расстояния. Однако учитывая наличие достаточно большой зоны оплавления вдоль линий пятна воздействия на поверхности образца, более правильным будет воспользоваться расчетной схемой, приведенной на рис. 3, которая учитывает, что каждая точка ядра потока имеет не только свой уровень интенсивности воздействия, но и свое расстояние до рассматриваемой точки  $A_0$  с координатами  $x_0, y_0, z_0$ .

При этом подынтегральное выражение в (6) включает в себя экспоненциальную переменную составляющую  $\Psi$  с аргументом, зависящим от времени, координат выделенной точки  $A_0$  и окружающих ее точек, которые могут быть взяты дополнительно в прилегающем к ней объеме материала, текущих координат точки  $A_f$  оси луча и положения точки  $B$  внутри ядра потока (переменные  $r$  и  $\varphi$  на рис. 3):

$$\Psi = \exp\left[-\left(r^2 \left(1 + 4a \cdot s / R_f^2\right) + \left(x_k - x_f\right)^2 + \left(y_k - y_f\right)^2 + z_k^2 - 2r \left(x_{0f} \cos(\varphi) + y_{0f} \sin(\varphi)\right) / \left(4a \cdot s\right)\right)\right], \quad (7)$$

где  $s = t_k - t_f$ ;  $x_{0f} = x_0 - x_f$ ;  $y_{0f} = y_0 - y_f$ ;  $x_k, y_k, z_k$  – координаты точки, выделенной внутри объема вокруг точки  $A_0$ , м.

В формуле (7) подстрочным индексом «f» отмечено значение координат оси луча на поверхности образца в текущий момент времени  $t_f$ . Само интегрирование по времени  $t_f$  должно производиться от начального момента  $t_0 = 0$  до заданного конечного  $t_k$  значения  $t_k \geq t_f$  и, таким образом, будет учитывать смещение оси потока вдоль дорожки и соответствующий общий разогрев тела. Окончательно вместо (6) с учетом сделанных выше определений получаем расчетную формулу в виде:

$$T = \frac{q_0}{8\rho c (\pi a)^{3/2}} \int_0^s \int_0^{R_f} \int_0^{2\pi} \frac{F \cdot \Psi}{s^{3/2}} r dr d\varphi ds, \quad (8)$$

где  $F$  и  $\Psi$  отражают временные и пространственные характеристики воздействия теплового потока. Наличие внутри подынтегрального выражения тригонометрических функций вызывает необходимость в одновременном численном интегрировании по  $r$  и  $\varphi$  и в связи с этим заметно увеличивает длительность проведения вычислений. Как сам интеграл (6), так и его внутренние интегралы в программе вычисляются по методу Симпсона.

В настоящей программе предусмотрена возможность проведения вычислений уровня температуры одновременно для нескольких точек, располагающихся в прилегающем к точке  $A_0$  объеме материала. Кроме того, программа позволяет определять тепловые импульсы, импульсы структуризации и время структуризации в выбранных точках и сечении дорожки [2], что расширяет возможность прогнозирования результатов термообработки и позволяет оценить, какая часть тепловой энергии расходуется на структурообразование материала в зоне термического влияния. Результаты расчета на каждом шаге времени выводятся в файл *Rezultat.dat*. В начальной части файла для контроля ввода исходных данных выводятся наименования и пояснения к ним для основных параметров материала, режима нагружения и организации вывода, а также их числовые значения. Изменение координат  $x_f, y_f$  точки  $A_f$  по времени выводится дополнительно также в отдельный файл *CoordXY.dat*.

1. Веремейчик, А. И. Некоторые аспекты определения температурных полей при термоупрочнении металлоизделий / А. И. Веремейчик, В. М. Хвисевич, Б. Г. Холодарь // Перспективные материалы и технологии / Антанович А. А. [и др.]; под ред. В. В. Рубаника. – Минск: ИВЦ Минфина, 2023. – Гл. 18. – С. 218–237.
2. Веремейчик, А. И. Моделирование тепловых процессов в полупространстве при нагреве движущимся источником с равномерно-распределенным тепловым потоком / А. И. Веремейчик, Б. Г. Холодарь // Вес. Нац. акад. наук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 2023. – Т. 68, № 4. – С. 318–330.

## ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ФОРМИРОВАНИЯ ПРИРОДНЫХ АЛМАЗОВ, ИСПОЛЪЗУЕМЫХ В КАЧЕСТВЕ СЫРЬЯ ДЛЯ ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Витязь П.А.<sup>1</sup>, Хейфец М.Л.<sup>2</sup>, Сениуть В.Т.<sup>1</sup>, Афанасьев В.П.<sup>3</sup>, Колодяжный Д.Ю.<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси, г. Минск, Беларусь;

<sup>2</sup>Институт прикладной физики НАН Беларуси, г. Минск, Беларусь, mlk-z@mail.ru;

<sup>3</sup>Институт геологии и минералогии им. акад. В.С. Соболева СО РАН,  
г. Новосибирск, Российская Федерация.

<sup>4</sup>МГТУ «СТАНКИН», г. Москва, Российская Федерация

### Введение

Изучение минералов, обнаруженных в кратере Попигайского месторождения, показало присутствие в них разнообразных углеродных, в том числе и алмазоподобных, а также других переходных структур, сформированных в результате столкновения метеорита с гранитогнейсовыми породами с высоким содержанием графита.

Для изучения процессов образования структур целесообразно на основе кристаллохимических представлений по диаграммам состояния рассматривать связь степеней свободы физико-химической системы с формирующимися фазами, определять рациональное число и структуру взаимосвязей степеней свободы [1].

Рассматривать образование структур и фаз по диаграммам – геометрическим образам соотношений состав – свойство системы позволяет физико-химический анализ сложных систем [2, 3]. Основными принципами анализа физико-химических диаграмм являются предложенные Н.С. Курнаковым принципы непрерывности и соответствия [4]. Согласно принципу соответствия, на диаграмме каждой фазе должен отвечать определенный геометрический образ, а в соответствии с принципом непрерывности этот образ должен быть непрерывным.

### Цель работы

Определить на основе кристаллохимических представлений по диаграмме состояния физико-химической системы при образовании углеродных, в том числе алмазоподобных, структур положения линий, описывающих фазовые переходы, их количество, возрастающее в результате формирования промежуточных фаз и переходных структур.

### Методика проведения исследований

Анализ быстропротекающих процессов образования разнообразных структур и фаз при высоких давлениях и температурах формирования синтетических и природных алмазов для их идентификации потребовал изучения топологической модели диаграммы состояния углерода [5], а также возможных путей ее трансформации с учетом диссипации поглощаемой энергии.

Формирование новых связей на графе рассматривалось поэтапно, в соответствии со вторым принципом Н.С. Курнакова: соответствия топологической модели физико-химической системе. Степени свободы системы  $S = S_{в} + 1$ , определялись через число связных кусков графа  $S_{в}$ . При этом следили за тем, чтобы добавление новых элементов (вершин, граней, ребер) не изменяло число степеней свободы.

Построение диаграммы состояния углерода (рис.1), проводилось по топологической модели, в соответствии с первым принципом Н.С. Курнакова: непрерывности свойств физико-химической системы в зависимости от температуры  $T$  и давления  $P$  с учетом, поглощаемой при возрастающей скорости синтеза структур энергии  $E$ .

### Результаты и обсуждение

Трансформация топологической модели проводилась на принятой за основу фазовой диаграмме состояния углерода [5]. С учетом образования дополнительной фазы появляется вершина графа, а следовательно, соответствующая грань и два ребра, ее отделяющие. Так как образуется новая фаза, то кристаллизация фаз имеет разные варианты и происходит в общем случае не одновременно, поэтому за солидусом выделяются переходные зоны для различной последовательности выпадения твердых фаз из расплава. С учетом кинетики переходного процесса выделения фаз, сходного с перитектическим, на топологической модели появляются три новые грани, четыре ребра и вершина.

В результате фазовая диаграмма состояния углерода в зависимости от температуры  $T$  и давления  $P$  с учетом поглощаемой энергии  $E$  (рис.1) при возрастающей скорости синтеза структур имеет область, включающую импактные алмазы, а также переходные области выпадения из жидкости ультрадисперсных алмазов и микрогруппировок графита.

Зерна минералов и изображения их поверхностей показаны на рисунках 2–4 [6, 7].

Крупные, относительно прозрачные зерна минерала – якутит (рис.2, а, б) образованы в эпицентре кратера Попигайского месторождения при прямом ударе метеорита. Практически непрозрачные темные зерна минерала (рис.2, в, г) образованы при ударе со сдвигом, в удалении от эпицентра, ближе к периферии кратера.

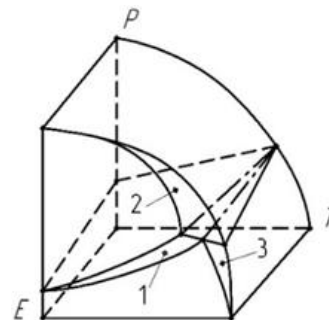


Рис. 1. Фазовая диаграмма состояния углерода в зависимости от

температуры  $T$  и давления  $P$ , с учетом поглощаемой энергии  $E$ , при возрастающей скорости синтеза структур: 1 – область, включающая импактные алмазы с лонсдейлитом; 2 – область выпадения из жидкости ультрадисперсных алмазов; 3 – область выпадения микрогруппировок графита и лонсдейлита

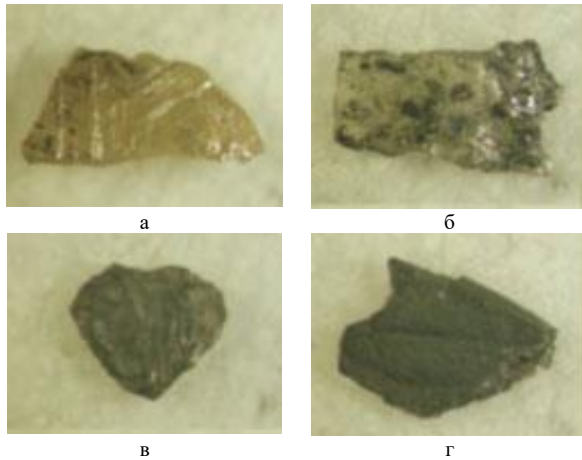


Рис. 2. Типичные формы крупных зерен импактных алмазов минералов якутита Попигайского месторождения [6], образованные в 1-ой области, рис.1 (а, б), и во в 2-ой области, рис.1 (в, г). Содержание графитовой фазы в зернах минерала (а, в) ниже, чем в зернах (б, г)

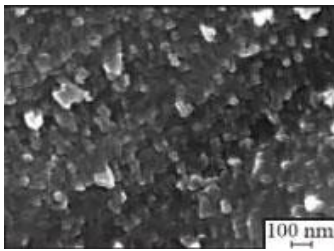


Рис. 3. Изображение поверхности алмазно-лонсдейлитного абразива, полученного методом сканирующей электронной микроскопии [7]

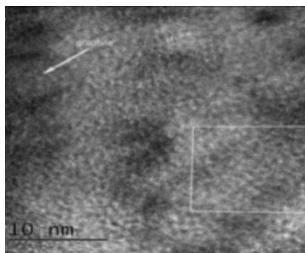


Рис. 4. Изображение нанометровых участков алмазно-лонсдейлитного абразива, полученное методом HRTEM, с графитовой (показано стрелкой) и лонсдейлитовой (выделено рамкой) структурой [7]

В этих зернах, помимо графита, формируется лонсдейлит. Сканирующая электронная микроскопия (рис.3) и HRTEM (рис.4) изображений поверхности зерен позволяет это установить.

Таким образом, анализ трансформации топологической модели позволил предложить фазовую диаграмму состояния углерода в зависимости от температуры  $T$  и давления  $P$ , учитывающую поглощение энергии  $E$ , при возрастающей скорости синтеза структур.

Диаграмма отражает новые области образования фаз при формировании природных минералов, включающие импактные высокодефектные алмазы, а также переходные области, связанные с выпадением из жидкости как ультрадисперсных алмазов, так и микрогруппировок графита и лонсдейлита.

### Заключение

В результате физико-химического анализа топологической модели предложена диаграмма состояния углерода, в зависимости от температуры и давления, учитывающая поглощение энергии, при возрастающей скорости образования структур и фаз.

Диаграмма отражает новые области формирования фаз синтетических и природных алмазов, включающие импактные высокодефектные алмазы, а также переходные области выпадения из жидкости как ультрадисперсных алмазов, так и микрогруппировок графита и лонсдейлита.

1. Хейфец, М.Л. О самоорганизации процессов формирования свойств поверхностного слоя при комбинированных методах обработки металлов / М.Л. Хейфец // Доклады АН Беларуси, 1995, Т.39, № 2. – С.109-113.
2. Аносов, В.Я. Основы физико - химического анализа / В.Я. Аносов, М.И. Озерова, Ю.Я. Фиалков. - М.: Наука, 1976. – 504 с.
3. Хейфец, М.Л. Анализ процессов самоорганизации при обработке металлов по диаграммам состояний физико-химических систем / М.Л. Хейфец // Доклады АН Беларуси, 1995, Т.39, № 6. – С.109-113.
4. Курнаков, Н.С. Введение в физико - химический анализ / Н.С. Курнаков. - М. - Л.: Издательство АН СССР, 1940. – 562 с.
5. Витязь, П.А. Анализ метастабильных и неравновесных процессов по диаграммам состояния при синтезе сверхтвердых материалов / П.А. Витязь, М.Л. Хейфец // Доклады НАН Беларуси, 2007, Т. 51, № 2. – С.95-99.
6. Афанасьев, В.П. Попигайские импактные алмазы: новое российское сырье для существующих и будущих технологий / В.П.Афанасьев, Н.П. Похиленко // Инноватика и экспертиза. 2013. Вып. 1 (30). - С.8-15.
7. Петровский В.А. Рентгеновский анализ якутитов и оценка содержания в них примеси лонсдейлита / В.А. Петровский, В.П. Филоненко, В.И. Силаев, И.П. Зибров, А. Е. Сухарев, А.Л. Земнухов, Б.С. Помазанский // Вестник Пермского ун-та. 2013. Вып. 3(20). – С. 43–60.

## ВЛИЯНИЕ СТРУКТУРНОГО СОСТОЯНИЯ ЭНТРОПИЙНЫХ СПЛАВОВ НА ОСНОВЕ Ni-Co-Cr НА МЕХАНИЧЕСКИЕ И ТРИБОТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

Власов И.И., Севальнёв Г.С.

Россия, федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Национального исследовательского центра «Курчатовский институт»,  
[vlasovteh@yamdex.ru](mailto:vlasovteh@yamdex.ru)

В работе проведены исследования микроструктуры, фазового состава и триботехнических свойств, а также изменение механических свойств в зависимости от температуры испытания высокоэнтропийного сплава на системы NiCoCrWNbAlTiReC вакуумной индукционной выплавки и горячей деформации. По результатам исследований и испытаний было установлено, что структура сплава состоит из ГЦК твёрдого раствора с избыточными фазами. При температуре испытания 20 °С происходит реализация механизма деформационного упрочнения, при повышенных температурах данный эффект отсутствует. После горячей деформации прочностные характеристики сплава резко выросли, а пластические упали.

### Введение

В последние десятилетия наблюдается значительный рост интереса к разработке и исследованию новых материалов, обладающих уникальными физико-механическими характеристиками, обусловленными их структурой [1-2]. Одним из самых перспективных направлений в этой области стало изучение энтропийных сплавов (ЭС) или сплавов с высокой энтропией смешения [3]. Эти материалы открывают новые горизонты в современном материаловедении, предлагая необычные сочетания свойств, что делает их крайне востребованными для различных инженерных и технологических задач.

Энтропийные сплавы представляют собой многокомпонентные системы, состоящие из пяти или более элементов, смешанных в равных или близких пропорциях. Это приводит к образованию простых кристаллических структур, характерных для чистых металлов или гомогенных сплавов с одним доминирующим компонентом. Высокая энтропия смешения способствует формированию твердых растворов, минимизируя образование избыточных фаз и интерметаллидов, что является ключевым фактором, обеспечивающим их свойства [4-5].

### Материалы и методы исследований

Объектами исследования выступал высокоэнтропийный сплав системы легирования NiCoCrWNbAlTiReC. Общее содержание легирующих элементов составляет около 5–8%.

Выплавку слитков проводили в вакуумно-индукционной печи с разливкой жидкого расплава в подогретый тигель при температуре 200 °С.

Металлографический анализ структур высокоэнтропийных сплавов на базе Ni-Co-Cr после выплавки проводили методами световой микроскопии на оптическом конфокальном инвертированном микроскопе при увеличении  $\times 100$  и электронной микроскопии в режиме вторичных и обратноотраженных электронов с использованием сканирующего электронного при увеличении  $\times 500-1000$ . Анализ распределения легирующих элементов проводили с использованием приставки для микрорентгеноспектрального анализа (МРСА) методом энергодисперсионного картирования при ускоряющем напряжении 15 кВ.

Твёрдость полученных заготовок после выплавки и горячей деформации определяли по методу Виккерса

при нагрузке 1 кг (10 Н) в соответствии с ГОСТ 2999–75.

Механические свойства сплавов при комнатной температуре определяли на образцах, полученных из литых и горячедеформированных заготовок, в соответствии с ГОСТ 1497–84. Для определения механических свойств путем статического растяжения при повышенных температурах в интервале от 900 °С до 1200 °С использовали образцы, вырезанные из заготовок, в соответствии с ГОСТ 9651–84.

Испытание на изнашивание проводили по схеме шарик-диск на трибометре при нагрузке 10 Н. В качестве контртела использовали шарик 6 мм из стали ШХ15-ШД.

### Результаты и обсуждения

По результату исследования оптической микроскопии было выявлено, что структура сплава состоит из дендритов с избыточными фазами. Анализ химического состава показал, что в структуре присутствуют в основном карбиды (рис. 1, а). Исследование структуры после горячей деформации показало, что в полученных прутках наблюдается мелкое зерно с классом 8 и большое количество избыточных фаз в теле зерна.

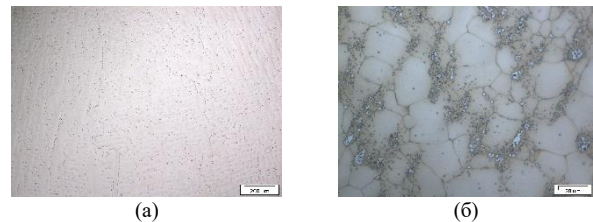
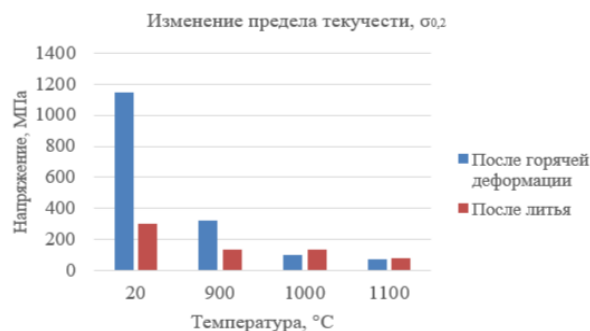


Рис. 1 Микроструктура энтропийного сплава системы NiCoCrWNbAlTiReC после литья (а) и горячей деформации (б)  $\times 100$

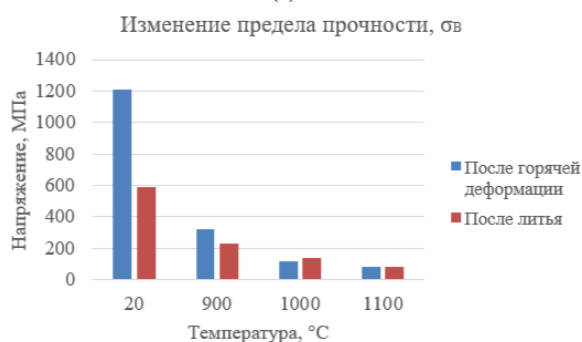
По результатам физико-механических испытаний было установлено, что с увеличением температуры испытания происходит снижение уровня прочностных характеристик, и, в итоге предел прочности и предел текучести становятся практически равны (рис. 2, а и б). При этом относительное удлинение также начинает снижаться в температурном диапазоне 900–1100 °С (рис. 2, в). Так же было установлено, что в этом температурном интервале происходит выравнивание прочностных характеристик сплава после литья и горячей деформации. В то же время в этом диапазоне у образца после горячей деформации увеличивается



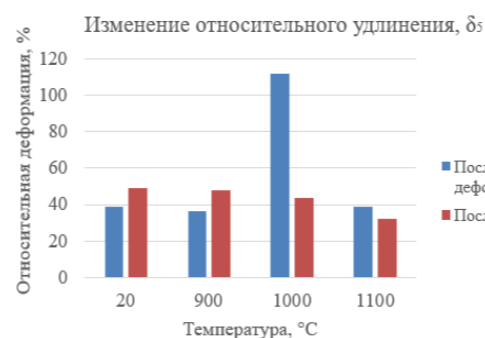
относительное удлинение в 2,5 раза. Все вышперечисленное свидетельствует о протекании структурно-фазовых превращений в данном интервале температур.



(а)



(б)



(в)

Рис. 2 Изменение предела текучести (а), предела прочности (б) и относительного удлинения (в) энтропийного сплава системы NiCoCrWNbAlTiReC после литья и горячей деформации.

Исследование твердости энтропийного сплава (Рис.3) показало, что после процесса горячей деформации твердость незначительно увеличилась, что связано с наличием избыточных фаз. С увеличением

длительности выдержки при температуре 1200°C наблюдается линейный характер снижения твердости сплава. Предположительно это связано растворением избыточных фаз, которые образовались во время горячей деформации. При это также произошло выделение других фаз из матрицы на границу зёрен.

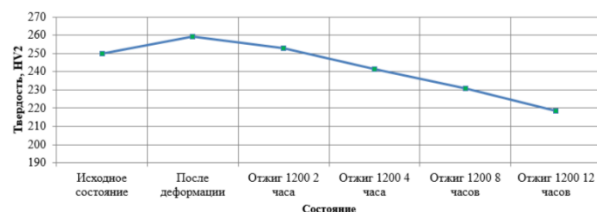


Рис.3 Изменение твёрдости энтропийного сплава в различных состояниях

Испытания на изнашивание в условиях сухого трения скольжения показали, что энтропийные сплавы обладают низкой износостойкостью: интенсивность изнашивания образцов при испытаниях составил  $1-1,55 \cdot 10^3 \text{ мм}^3/(\text{Н} \cdot \text{м})$ .

### Выводы

В рамках данной работы были проведены исследования энтропийного сплава в различных состояниях, определены механические свойства при различных температурах. Было установлено, что в связи с протеканием структурно-фазовых превращений в интервале температур 900–1100 °C уменьшаются прочностные характеристики, но возрастают пластические.

Выражаю благодарность своему научному руководителю Севальневу Г.С.

1. Singh S., Wanderka N., Glatzel U., Banhart J. Decomposition in multi-component AlCoCrCuFeNi highentropy alloy. *Acta Materialia*, 2011, vol. 59, pp. 182–190. DOI: 10.1016/j.actamat.2010.09.023.
2. Cantor B., Chang I.T.H., Knight P., Vincent A.J.B. Microstructural development in equiatomic multicomponent alloys. *Materials Science and Engineering: A*, 2004, vol. 375–377, pp. 213–218. DOI: 10.1016/j.msea.2003.10.257.
3. Cantor B. Multicomponent and high entropy alloys // *Entropy*. 2014. V. 16. №. 9. P. 4749–4768.
4. Yeh J.-W., Chen S.-K., Lin S.-J. et al. Nanostructured high-entropy alloys with multiple principal elements: novel alloy design concepts and outcomes. *Advanced Engineering Materials*, 2004, vol. 6, pp. 299–303. DOI: 10.1002/adem.200300567.
5. Yeh J.W. Recent progress in high-entropy alloys. *Annales de Chimie-Science des Materiaux*, 2006, vol. 31, pp. 633–648. DOI: 10.3166/acsm.31.633-648.

## ПРЕИМУЩЕСТВА ВОЛОКНИСТЫХ КОМПОЗИТОВ С КРИВОЛИНЕЙНЫМ АРМИРОВАНИЕМ ПРИ ВИБРАЦИОННОМ ВОЗДЕЙСТВИИ

Д.Д. Власов, О.Ю. Волкова

<sup>1</sup>Институт машиноведения им. А.А.Благонравова РАН, Москва, Россия; [sklemina97@yandex.ru](mailto:sklemina97@yandex.ru)

**Аннотация.** В статье представлен сравнительный анализ современных аддитивных технологий изготовления композитов с криволинейным армированием. Описаны преимущества волокнистых композитов с криволинейным армированием при воздействии вибрационных нагрузок. Показано, что криволинейное армирование повышает устойчивость материала к вибрациям за счет увеличения собственной частоты колебаний. Многочисленные исследования подтверждают эффективность композитов с криволинейной структурой армирования в условиях динамического нагружения.

### Цель

Целью статьи является анализ современных аддитивных технологий изготовления полимерных волокнистых композитов с криволинейным армированием и оценка их преимуществ при вибрационных нагрузках для улучшения эксплуатационных характеристик нового класса композитных конструкций.

### Введение

Волокнистые композиты широко используются в различных отраслях промышленности благодаря своим высоким прочностным характеристикам и низкому весу. В последнее время особое внимание уделяется композитам с криволинейным армированием, которые способны более эффективно противостоять в том числе вибрационным воздействиям.

Аддитивные технологии изготовления таких композитов открывают новые возможности для улучшения свойств материала. В данной статье рассматриваются современные методы производства композитов с криволинейным армированием, а также проводится анализ их преимуществ в условиях вибрационных нагрузок, что является актуальным для повышения надежности и долговечности конструкций.

### Современные технологии создания композитов с криволинейным армированием

Современные технологии производства композитов с криволинейным армированием основаны на автоматизированных процессах, таких как автоматизированная укладка волокон (AFP) и укладка предварительно пропитанных лент (ATL). Эти методы позволяют точно контролировать направление и укладку волокон, что особенно важно при создании сложных криволинейных структур [1-2].

Также активно развивается технология индивидуальной укладки волокон (TFP), которая позволяет размещать волокна в соответствии с направлением нагрузки, улучшая прочностные характеристики материала. Еще одной перспективной технологией является 3D-печать с использованием волокнистых материалов, позволяющая создавать геометрически сложные детали и комбинировать различные типы волокон для оптимизации свойств композитов.

Применение этих технологий обеспечивает создание композитов с улучшенными механическими свойствами, что делает их востребованными в различных отраслях промышленности.

### Композитные конструкции с криволинейным армированием под воздействием вибраций

Тонкостенные композитные конструкции часто подвергаются динамическим нагрузкам, включая вибрационные воздействия. Из-за невысокой поперечной жесткости такие пластины и оболочки особенно уязвимы к явлению резонанса при эксплуатации. Обычно эту проблему решают за счет увеличения собственных частот колебаний путем изменения размеров конструкции. Однако использование композитных материалов с криволинейными траекториями армирования позволяет повысить жесткость и увеличить собственные частоты без изменения геометрии элемента и точек крепления. Первые исследования, продемонстрировавшие этот эффект, появились сравнительно недавно [3, 4]. С тех пор методы оптимизации траекторий непрерывного и дискретного армирования для композитных пластин значительно усовершенствовались, что позволяет увеличить собственные частоты, снизить амплитуды и изменить формы колебаний [5].

Аналитическое решение задачи о колебаниях ортотропной пластины, представленное в [6], основано на уравнении изгиба пластины (1):

$$D_{11} \frac{\partial^4 w}{\partial x^4} + 4D_{16} \frac{\partial^4 w}{\partial x^3 \partial y} + 2(D_{12} + 2D_{66}) \frac{\partial^4 w}{\partial x^2 \partial y^2} + 4D_{26} \frac{\partial^4 w}{\partial x \partial y^3} + D_{22} \frac{\partial^4 w}{\partial y^4} + \rho h \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} = 0, \quad (1)$$

где  $D_{ij}$  – жесткости пластины;  $w(x, y)$  – функция прогиба пластины;  $\rho$  – плотность материала пластины,  $h$  – её толщина. Количество слагаемых в выражении (1) зависит от анизотропии пластины и зачастую сокращается.

Функция прогиба пластинки  $w(x, y, t)$ , которая будет зависеть от трех координат, может быть представлена в следующем виде (2):

$$w(x, y, t) = w(x, y) (B \cos \omega t + C \sin \omega t). \quad (2)$$

Здесь  $\omega$  – частота колебаний,  $B, C$  – неизвестные константы,  $w(x, y)$  может быть описана следующим соотношением (3):

$$w(x, y) = \sum_m \sum_n A_{mn} \sin \frac{m\pi x}{a} \sin \frac{n\pi y}{b}, \quad (3)$$

где  $A_{mn}, m, n$  – неизвестные константы;  $a, b$  – линейные размеры пластины;  $\lambda$  – константа, обозначающая граничные условия.

В работе [7] изучены колебания и устойчивость слоистых пластин с траекториями армирования, построенными по линейному закону (4) (рис. 1).

$$\theta(x) = \frac{2(T_1 - T_0)}{a}|x| + T_0. \quad (4)$$

Здесь  $a$  – длина пластины;  $T_0$  – угол наклона волокна в центре пластины;  $T_1$  – наклон волокна в углу пластины.

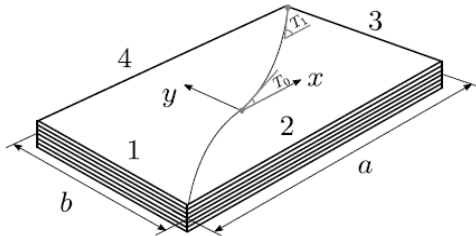


Рис. 1. Слоистая пластина с криволинейным армированием (5) [7]

Используемая авторами методика сочетает вариационный метод Ритца с обобщённой кинематической теорией Каррера для описания слоистых пластин и оболочек. Расчеты для пластин с различными граничными условиями показали хорошее соответствие с численными результатами других исследований, что подтверждает возможность применения этого подхода при проектировании композитных структур нового класса.

В работе [5] авторы рассматривают оптимизацию структуры армирования квадратной пластины с различными граничными условиями. Пластина была разбита на сетку конечных элементов (10x10), и для увеличения собственной частоты колебаний в каждом элементе варьировался угол армирования от  $-90^\circ$  до  $90^\circ$  с шагом  $15^\circ$ . Были проанализированы два варианта армирования: дискретное (рис. 2, а), где ориентация волокна не ограничена, и непрерывное (рис. 2, б), основанное на полиноме третьей степени, где углы армирования в соседних элементах связаны. Для оптимизации армирования по толщине использовался послойный метод, который итерационно улучшает структуру в каждом слое, начиная с внешнего.

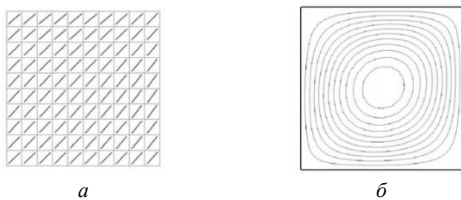


Рис. 2. Расчетный случай пластины, свободно опертой по 4 сторонам, дискретная структура армирования – а; непрерывная структура армирования – б [5]

Результаты показали, что во всех рассмотренных случаях дискретное армирование позволило значительно увеличить собственную частоту колебаний (до 35%). Однако изготовление таких пластин существенно усложняется. Пластины с криволинейным армированием непрерывными волокнами более технологичны (в теории), но в силу геометрических ограничений обеспечивают меньший прирост собственной частоты.

В работе [5] тех же авторов был применён усовершенствованный генетический алгоритм для поиска Парето-оптимальных решений в задаче оптимизации структуры криволинейного армирования, направленной на повышение собственной частоты той же квадратной пластины. При этом вводилось дополнительное условие - минимизация кривизны траекторий укладки волокон. Результаты оптимального армирования для пластины с жёсткими заделками по всем сторонам представлены на рис. 3.

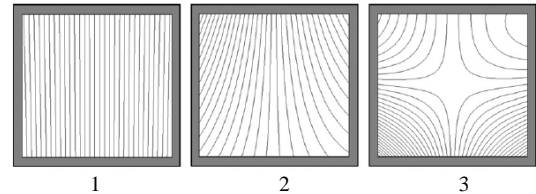


Рис. 3. Оптимальные траектории армирования с различной кривизной [5]

В работе [8] авторы предлагают линейный закон изменения угла армирования (5), который несколько отличается от выражения (4), и проводят сравнение результатов.

$$\theta(x) = (T_1 - T_0)\left(\frac{x}{a}\right) + T_0 \quad (5)$$

Схема армирования (6) представлена на рис. 4.

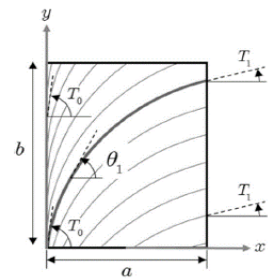


Рис. 4. Структура армирования, полученная с помощью соотношения (6) [8]

Сравнение схем армирования проводилось на трехслойных композитных косых панелях различных размеров и при разных условиях закрепления. Оптимальные структуры армирования определялись с помощью генетического алгоритма. Было показано, что увеличение угла наклона пластины ведёт к росту собственной частоты колебаний, а изменение размеров влияет на формы колебаний. Также авторы отметили незначительные различия в собственных частотах для законов изменения угла (4) и (5).

С развитием аддитивных методов производства исследователи получили возможность не ограничиваться теоретическими исследованиями криволинейно армированных композитов, а также изготавливать специальные образцы для испытаний. Это было осуществлено в недавнем исследовании [9] Шимоды, Цукихары и Шимой. С помощью градиентного метода были построены оптимальные траектории армирования многослойных композитных оболочек, включая стандартные квадратные и прямоугольные пластины, а также U-образную оболочку. Затем, используя технологию TFP, авторы изготовили образцы для натурных испытаний (рис. 5).

Результаты численных расчетов сравнивались с данными для стандартной однонаправленной пластины. Оптимизированные композитные структуры оказались в два раза жестче однонаправленных. Это привело к почти 20%-ному увеличению собственной частоты и снижению амплитуды колебаний, что подтвердилось для всех рассмотренных случаев.

В работе [10] вместо конечно-элементного анализа применяются рациональные сплайновые функции, при этом объект исследования разбивается на контрольные точки, через которые проходят эти функции.



Рис. 5. Часть слоя композитной пластины с криволинейным армированием углеродным волокном [9]

Таким образом, авторы снижают влияние размеров и качества сетки конечных элементов на результаты расчетов, а также сглаживают получаемые траектории армирования. Для консольных и заделанных с двух концов балок-стенок были проведены расчеты, в результате которых получены оптимальные структуры армирования, повышающие собственные частоты на 7% и 11% соответственно (рис. 6). Интересно, что результаты представлены не отдельными траекториями для каждого волокна, а в виде распределения объемной доли армирования, где белый цвет указывает на минимальную долю, а черный – на максимальную (60%).

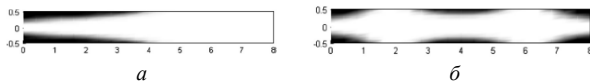


Рис. 6. Оптимальные структуры армирования балок-стенок, консольное закрепление – а; жесткая заделка с двух концов – б [10]

Анализ исследований, касающихся колебаний композитных пластин с криволинейным армированием, показал, что значительное внимание сейчас уделяется моделированию и методам оптимизации структуры укладки волокон. Это свидетельствует о высокой актуальности данного научного направления и его широких перспективах.

## Выводы

Композиты с криволинейным армированием демонстрируют повышенную вибростойкость по сравнению с традиционными материалами. Современные аддитивные технологии позволяют создавать такие структуры с высокой точностью, что улучшает их механические свойства и снижает вероятность дефектов. Дальнейшая оптимизация этих производственных процессов будет способствовать повышению эксплуатационных характеристик композитов в высокотехнологичных отраслях.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда №23-23-00318 (Гибридные биоподобные композитные структуры переменной жесткости как альтернатива квазизотропным материалам), <https://rscf.ru/project/23-23-00318/>.

1. Wang B., Ma X., Tian K., Hao P., Zhou Y., Quan D. Concurrent patch optimization of hybrid composite plates based on proper orthogonal decomposition // *AIAA J.* 2019. V. 57. P. 4915–4926.
2. Kim B.C., Weaver P.M., Potter K. Manufacturing characteristics of the continuous tow shearing method for manufacturing of variable angle tow composites // *Composites A.* 2014. V. 61. P. 141–151.
3. Abdalla M.M., Setoodeh S., Gürdal Z. Design of variable stiffness composite panels for maximum fundamental frequency using lamination parameters // *Composite Structures.* 2007. V. 81. P. 283–291.
4. Blom A.W., Setoodeh S., Hol J.M., Gürdal Z. Design of variable-stiffness conical shells for maximum fundamental eigenfrequency // *Computers & Structures.* 2008. V. 86. P. 870–878.
5. Honda S., Narita Y. Vibration design of laminated fibrous composite plates with local anisotropy induced by short fibers and curvilinear fibers // *Composite Structures.* 2011. V. 93. P. 902–910.
6. Lehnitsky S.G. *Anisotropic plates.* Moscow: Gostekhizdat, 1957.
7. Vescovini R., Dozio L. A variable-kinematic model for variable stiffness plates: Vibration and buckling analysis // *Composite Structures.* 2016. V. 142. P. 15–26.
8. Farsadi T., Asadi D., Kurtaran H. Fundamental frequency optimization of variable stiffness composite skew plates // *Acta Mech.* 2021. V. 232. P. 555–573.
9. Shimoda M., Tsukihara R., Shima K. Numerical and experimental study on optimization of distributed material-orientation for frequency response of CFRP shell structures // *Composite Structures.* 2022. V. 294. 115697.
10. Ghasemi H., Brighenti R., Zhuang X., Muthu J., Rabczuk T. Optimization of fiber distribution in fiber reinforced composite by using NURBS functions // *Computational Materials Science.* 2014. V. 83. P. 463–473.

## ВЫБОР РАЦИОНАЛЬНЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ РЕЖИМОВ ПРОЦЕССА ТЕРМИЧЕСКОГО СВЕРЛЕНИЯ НЕРЖАВЕЮЩЕЙ СТАЛИ

Д.А. Волохов<sup>1</sup>, А.К. Аноприенко<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Институт машиноведения им. А.А.Благонравова РАН, Москва, Россия; [volokhovdaniil@rambler.ru](mailto:volokhovdaniil@rambler.ru)

Термическое сверление – это прогрессивная технология, в ходе которой образование сквозного отверстия в тонкостенной металлической детали происходит за счет ее местного нагрева трением. Метод применяется в производстве автомобилей, теплового оборудования и другой техники. Данная работа обзорекает существующие исследования, посвященные поиску рациональных условий термического сверления заготовок из нержавеющей стали AISI 304, включая технологические режимы.

### Введение

Термическое сверление – это технология обработки металла, в ходе которой образование сквозного отверстия в тонкостенной детали происходит за счет ее местного нагрева трением. В основе технологии термосверления заложен принцип пластической деформации металла: в процессе воздействия сверлом на тонкостенную деталь за счет трения наконечника инструмента о металл происходит пластическая деформация последнего и формируется сквозное отверстие с двумя кольцевыми буртиками по обе стороны. Полученные таким способом буртики металла используются для накатывания или нарезания резьбы [1]. Таким образом, метод позволяет делать отверстия в тонких стенках деталей под крепеж без введения дополнительных операций – таких, как приварка гайки или запрессовка втулки – быстро, точно, и без образования стружки [2, 3]. Термическое сверление находит своё применение в производстве автомобилей, теплового оборудования и другой техники [4].

Данная работа обзорекает существующие исследования, посвященные поиску рациональных условий термического сверления заготовок из нержавеющей стали AISI 304 — зарубежного аналога отечественной марки 12X18H10T.

### Описание существующих исследований

Инструменты, для которых материал не указан, сделаны из карбида вольфрама. Инструменты, для которых не указано покрытие, не имели покрытия.

#### 1. Работа [5]

Входные параметры: технологические режимы – частота вращения шпинделя, подача инструмента – а также геометрические параметры инструмента – угол конической части инструмента (далее – угол конуса инструмента) и доля площади поверхности инструмента, которая контактирует с заготовкой (далее – доля контактирующей площади). Диаметр цилиндрической части инструмента (далее – диаметр инструмента) был равен 8 мм. Характеристики инструмента в общем виде показаны на рис. 1.

Выходной параметр: шероховатость поверхности полученного отверстия.

Для выявления оптимальных условий применили метод Тагути с планом L18. В качестве заготовки использовали лист толщиной 2 мм.

Был сделан вывод, что наименьшая шероховатость получается при следующих условиях: подача инструмента – около 100 мм/мин; частота вращения

– соответствующая скорости 90 м/мин на поверхности цилиндрической части инструмента; угол конуса инструмента – 30 градусов; доля контактирующей поверхности – 50%.

С использованием представленных значений наиболее рациональных условий было получено зеркально гладкое отверстие с шероховатостью  $Ra = 0,96$  мкм. Длина отверстия оказалась примерно в три раза больше толщины листа: около 6 мм. С помощью тривиального вычисления получается, что скорости 90 м/мин с диаметром 8 мм соответствует частота вращения шпинделя около 3583 об/мин.

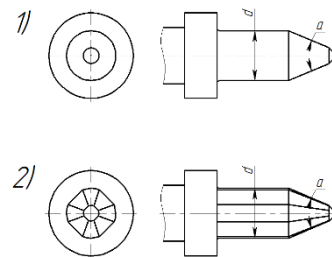


Рис. 1. Общий вид пуансона. 1) Сверло с долей контактирующей площади 100%; 2) сверло с долей контактирующей площади 50%; а – угол конусной части инструмента; d – диаметр цилиндрической части инструмента

#### 2. Работа [6]

Поиск покрытия, которое обеспечит наибольший ресурс инструмента. Для экспериментов использовали пуансоны с PVD-покрытием TiAlN и AlCrN, а также пуансон без покрытия.

При прочих равных условиях инструмент без покрытия изнашивается быстрее всех, а инструмент с покрытием AlCrN изнашивается медленнее всех.

#### 3. Работа [7]

Работа посвящена поиску оптимальных условий термосверления с помощью метода Тагути и нечеткой логики. За входные параметры приняли диаметр инструмента, угол конуса инструмента, долю контактирующей поверхности, толщину заготовки, подачу и частоту вращения шпинделя. Выходные параметры: действующие на инструмент осевая сила и радиальная сила (далее – осевая сила, радиальная сила), отклонения диаметра, отклонение формы поверхности отверстия от круглости, а также глубина полученного отверстия. Целью оптимизации было достигнуть рационально наименьших значений выходных параметров, и их соотношение определялось нечеткой логикой.

В результате анализа были получены следующие

оптимальные значения для условий: диаметр инструмента – 7,3 мм; угол конуса – 45 градусов; доля контактирующей поверхности – 50%; толщина листовой заготовки – 1 мм; подача – 100 мм/мин; частота вращения шпинделя – 3500 об/мин. После эксперимента в данных условиях выходные параметры имели следующие значения: осевая сила – 292 Н; радиальная сила – 50 Н; отклонение диаметра – 0,013 мм; отклонения от круглости – 0,002 мм; длина отверстия – 5,78 мм. Отверстие получилось почти в шесть раз глубже, чем изначальная толщина заготовки.

#### 4. Работа [8]

Поиск рациональных условий термосверления с помощью нечёткой логики. Входные параметры: диаметр инструмента, угол конуса, доля контактирующей поверхности, подача и частота вращения шпинделя, а также толщина листовой заготовки. При этом диаметр инструмента принимал значения 5,3, 7,3, 9,2 мм, а толщина заготовки принимала значения 1, 2 и 3 мм. Выходными параметрами являлись глубина отверстия, осевая и радиальная силы, отклонения диаметра отверстия и формы поверхности отверстия от круглости.

В результате исследования получены следующие рациональные условия: независимо от толщины заготовки и диаметра инструмента, угол конуса – 30 градусов; доля контактирующей поверхности – 50%; подача – 60 мм/мин; частота вращения шпинделя – 3500 об/мин. По влиянию на осевую силу и глубину отверстия наибольшее значение имеет диаметр инструмента. При этом увеличение толщины листа вызывает увеличение всех выходных параметров.

#### 5. Работа [9]

Следующий этап предыдущего исследования. Входные параметры остались теми же, количество выходных параметров уменьшилось: теперь это только осевая сила и глубина отверстия.

Анализ провели с помощью методов нечеткой логики и ANOVA. Также использовали конечно-элементную модель.

Были получены следующие оптимальные значения режимов: диаметр сверла – 9,2 мм; угол конуса – 30 градусов; доля контактирующей поверхности конуса – 50%; подача – 60 мм/мин; частота вращения шпинделя – 3500 об/мин.

Также был проведен регрессионный анализ, в результате были получены уравнения, связывающие входные и выходные параметры, с коэффициентами детерминации не менее 0,933:

$$AF = 15,437 \cdot d^{0,318} \cdot \beta^{0,61} \cdot FCAR^{0,491} \cdot FR^{0,309} \cdot RS^{-0,425} \cdot t^{1,247}, \quad (1)$$

$$BL = 0,629 \cdot d^{0,664} \cdot \beta^{0,014} \cdot FCAR^{0,033} \cdot FR^{-0,044} \cdot RS^{0,101} \cdot t^{0,468}, \quad (2)$$

где AF – осевая сила, Н; BL – глубина отверстия, мм; d – диаметр инструмента, мм;  $\beta$  – угол конуса, град.; FCAR – доля контактирующей поверхности инструмента, %; FR – подача инструмента, мм/мин; RS – частота вращения шпинделя, об/мин; t – толщина листовой заготовки, мм.

#### 6. Работа [10]

Определение влияния технологических режимов – частоты вращения шпинделя и подачи инструмента – на диаметр, форму, глубину, шероховатость поверхности и толщину стенок полученного отверстия. Также измеряли твердость около поверхности отверстий и на глубине, и определяли степень изнашивания инструмента.

Толщина листовой заготовки составляла 3 мм. Анализ проводили с помощью ANOVA.

Были сделаны следующие выводы касательно влияния режимов:

- Чем больше подача и меньше частота вращения шпинделя, тем лучше форма и глубина полученного отверстия. При этом есть обратная связь между глубиной и толщиной стенок отверстия.

- Уменьшение времени контакта за счёт увеличения подачи не только уменьшит продолжительность технологического перехода, но и позволит избежать чрезмерного выделения тепла, что продлит срок службы инструмента.

- Высокая частота вращения шпинделя уменьшает срок службы инструмента и ухудшает свойства стенок полученного отверстия.

- Чем больше подача и частота вращения шпинделя, тем тверже материал в зоне полученного отверстия.

#### 7. Работа [11]

Поиск оптимальных технологических режимов термосверления труднообрабатываемых материалов. Диаметр инструмента – 10 мм, угол конуса – 37 град., покрытие – AlCrN. Толщина листовых образцов – 3 мм.

Анализ провели с помощью ANOVA.

Для получения наилучшей формы и наибольшей глубины полученного отверстия в заготовке из AISI 304, а также для наименьшего изнашивания инструмента, определены следующие режимы: частота вращения шпинделя – 1000 об/мин, подача – 105 мм/мин.

#### 8. Работа [12]

Оптимизация условий термосверления. Для этого использовали новый метод, объединяющий методы Тагути, Парето, алгоритм серых волков и функции желательности.

Входные параметры: диаметр сверла, угол конуса, доля контактирующей площади, толщина заготовки, подача и частота вращения шпинделя. Выходные параметры: осевая и радиальная силы, отклонения диаметра и круглости полученного отверстия, глубина отверстия.

В результате были получены следующие оптимальные значения для условий термосверления: диаметр сверла – 9,2 мм; угол конуса – 45 град.; доля контактирующей площади – 100%; толщина заготовки – 3 мм; подача – 60 мм/мин; частота вращения шпинделя – 2500 об/мин.

#### 9. Работа [13]

Изучение влияния условий термосверления на характеристики резьбы, которую накачивают в полученном отверстии, с помощью ANOVA.

Инструмент сделан из композитного материала: наполнитель – зёрна карбида вольфрама, матрица – кобальт. Входные параметры: отношение толщины

заготовки к диаметру инструмента, подача и частота вращения шпинделя. Контролируемые параметры полученного отверстия: завышение значения диаметра от номинального значения и отклонение от цилиндричности поверхности полученного отверстия, а также длина полученного отверстия. В полученных отверстиях накатали резьбы и проверили их свойства: твердость, структуру материала и прочность.

Были сделаны следующие выводы:

- Увеличение отношения толщины заготовки к диаметру инструмента уменьшает завышение диаметра и увеличивает глубину отверстия.

- Увеличение входных параметров (отношение толщины заготовки к диаметру инструмента, подача, частота вращения шпинделя) приводит к уменьшению завышения диаметра;

- Увеличение входных параметров приводит к увеличению глубины отверстия, при этом наибольшую роль играет отношение толщины заготовки к диаметру инструмента.

- Отношение толщины заготовки к диаметру инструмента – единственный из представленных входных параметров, который влияет на отклонения от цилиндричности, при этом увеличение отношения увеличивает данное отклонение.

#### Выводы

На основании изложенного выше можно сделать следующие выводы насчет рациональных условий термосверления нержавеющей стали AISI 304.

1. Для различных методов и различных критериев оптимальности получаются разные результаты. Иногда результаты противоречат друг другу – например, в работах [8] и [12] получены значительно отличающиеся друг от друга режимы, несмотря на почти совпадающее множество целевых функций. Таким образом, результаты данных исследований требуют проверки и уточнения.

2. Проведенные исследования касаются небольших диаметров отверстий – в диапазоне 5–10 мм – а также толщин заготовок в диапазоне 1–3 мм. Рациональные значения технологических режимов для других диаметров и заготовок могут отличаться и требуют отдельного поиска.

3. Инструмент из карбида вольфрама с покрытием AlCrN имеет больший ресурс, чем инструмент без покрытия и инструмент с покрытием TiAlN.

Данное исследование было частично проведено в связи с доведением РТУ МИРЭА Государственного задания № 075-00701-24-07 от 03.04.2024г. и заключением дополнительного соглашения к Соглашению о предоставлении субсидии из федерального бюджета на финансовое обеспечение выполнения

государственного задания на оказание государственных услуг (выполнение работ) от 05.04.2024г. №075-03-2024-077/8 по теме "Исследование методов пассивации поверхностей в процессах механической обработки и эксплуатации" (шифр "Наука")

1. ТЕМП-БП. Термическое сверление. 02.10.2020. URL: <https://temp-bp.ru/info/novosti-kompanii/termosvarivaniem/> (дата обращения: 03.09.2024)
2. Черепков И.Д., Шаламов П.В. Влияние входных параметров операции термического сверления на выходные // Молодой исследователь: материалы 4-й научной выставки-конференции научно-технических и творческих работ студентов. – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2017. –С. 93-98
3. Токарев А.С., Щербатенко Н.А. Получение отверстий в деталях. Преимущества и недостатки термосверления отверстий // International Journal of Humanities and Natural Sciences, vol. 11-2 (74), 2022 – С. 173-176
4. R.M. Selvaraj, N.R.J. Hynes, A review of process parameters in friction drilling on joining of steels, Archives of Materials Science and Engineering 119/1 (2023) 12-20
5. Machining characteristics study of friction drilling on AISI 304 stainless steel/ Han-Ming Chow, Shin-Min Lee, Lieh-Dai Yang/ journal of material processing technology 207 (2008) 180-186
6. Friction drilling of austenitic stainless steel by uncoated and PVD AlCrN- and TiAlN-coated tungsten carbide tools / Shin Min Lee, Han Ming Chow, Fuang Yuan Huang, Biing Hwa Yan / International Journal of Machine Tools & Manufacture 49 (2009) 81-88
7. Optimization of thermal friction drilling process based on taguchi method and fuzzy logic technique / Sara A. El-Bahloul, Hazem E. El-Shourbagy, Tawfik T. El-Midany / International Journal of Science and Engineering Applications Volume 4 Issue 2, 2015, 55-59
8. Effect of tool geometry, feed rate and rotational speed of thermal friction drilling process on AISI 304 stainless steel / Sara A. El-Bahloul, Hazem E. El-Shourbagy, Tawfik T. El-Midany / Mansoura Engineering Journal, (MEJ), Vol. 41, Issue 1, March 2016, 9-15
9. Experimental and thermo-mechanical modeling optimization of thermal friction drilling for AISI 304 stainless steel / Sara A. El-Bahloul, Hazem E. El-Shourbagy, Ahmed M. El-Bahloul, Tawfik T. El-Midany / CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology, Volume 20, January 2018, 84-92
10. Experimental investigation on friction drilling of stainless steel AISI 304 / Shayan Dehghan, Mohd Idris Shah B. Ismail, Mohd Khairol Anuar B. Mohd Ariffin, B. T. Hang Tuah B. Baharudin, Amir Parmianifard / Int. J. Machining and Machinability of Materials, Vol. 21, No. 4, 2019, 279-299
11. A comparative study on machining and tool performance in friction drilling of difficult-to-machine materials AISI304, Ti-6Al-4V, Inconel718 / Shayan Dehghan, Ehsan Soury, Mohd Idris Shah b. Ismail / Journal of Manufacturing Processes 61 (2021) 128-152
12. Thermal friction drilling process parametric optimization for AISI 304 stainless steel using an integrated Taguchi-Pareto-grey wolf-desirability function analysis optimization technique / Ugochukwu Sixtus Nwankiti, Sunday Ayoola Oke / IJEM (Indonesian Journal of Industrial Engineering and Management) Vol 3 No 3 October 2022, 167-191
13. Parameters affecting the quality of friction drilled holes and formed thread in austenitic stainless steel AISI 304 / Nada Abdelmoneim Bassiouny, Mohammad Al-Makky, Helmi Youssef / The International Journal of Advanced Manufacturing Technology (2023) 125: 1493-1509

## АДДИТИВНЫЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ПРОЦЕСС ИЗГОТОВЛЕНИЯ ДЕТАЛЕЙ ВНУТРИ ОБЪЕМА ПОРОШКА

Л.В. Гаврилина<sup>1</sup>, М.А. Печейкина<sup>2</sup>, Д.Л. Раков<sup>1</sup>, Р.Ю.Сухоруков<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Институт машиноведения им. А.А.Благонравова РАН, Москва, Россия; [rld@mail.ru](mailto:rld@mail.ru)

<sup>2</sup>Московский энергетический институт (Национальный исследовательский университет), Москва, Россия

В статье, посвящённой аддитивным технологическим процессам, рассматриваются основные принципы, методы и применения аддитивного производства, а также его влияние на современные отрасли промышленности. Аддитивные технологические процессы, или аддитивное производство, представляют собой инновационный подход к созданию деталей и изделий, при котором материал добавляется послойно, основываясь на цифровой 3D-модели. В отличие от традиционных методов (субтрактивного производства), аддитивные технологии предлагают гибкость в дизайне и экономию материалов. Предлагается и рассматривается аддитивный технологический процесс изготовления деталей внутри объема порошка.

Аддитивный технологический процесс (АТП) изготовления деталей, также известный как аддитивное производство (или 3D-печать), представляет собой способ создания изделий путем последовательного нанесения материалов слоями, исходя из цифровой 3D-модели. В отличие от традиционных технологий производства, где детали вырезаются или вытачиваются из цельного куска материала (субтрактивное производство), в аддитивном процессе материал добавляется.

Основные технологии аддитивного производства:

FDM (Fused Deposition Modeling) — Моделирование методом послойного наплавления при использовании пластиковой нити (например, PLA, ABS), которая нагревается и экструдирована через сопло. Слои наносятся друг на друга для создания детали. Применяется в прототипировании и производстве изделий для потребительских нужд.

SLA (Stereolithography) — Стереолитография, которая использует жидкую фотополимерную смолу, которая затвердевает под воздействием ультрафиолетового (УФ) лазера. Создает высококачественные изделия.

SLS (Selective Laser Sintering) — Селективное лазерное спекание, при которой порошковый материал (пластик, металл, керамика) сплавляется или спекается лазером. Способ применяется в производстве функциональных деталей, требующих высокой прочности и термостойкости.

SLM (Selective Laser Melting) — Селективное лазерное плавление, при которой лазер расплавляет порошок, что позволяет создавать плотные и прочные металлические детали. Используется в авиации, медицине (изготовление имплантатов), автомобилестроении.

EBM (Electron Beam Melting) — Электронно-лучевое плавление, в которой используется пучок электронов для плавления металлического порошка. Метод позволяет создавать высокопрочные металлические детали для аэрокосмической и медицинской промышленности.

Binder Jetting — Струйное склеивание, при которой на порошковый материал наносится связующее вещество, которое соединяет частицы между собой. Технология используется для создания керамических и металлических изделий.

Можно назвать следующие основные этапы АТП:

- Моделирование: создание цифровой 3D-модели изделия с помощью программного обеспечения

CAD (компьютерное проектирование).

- Подготовка модели: разбиение модели на слои (слайсинг), настройка параметров печати.
- Печать: слой за слоем материал наносится согласно цифровой модели.
- Финишная обработка: удаление поддержек, постобработка поверхности (шлифовка, полировка), при необходимости – термообработка.

Преимущества аддитивного производства:

- Свобода дизайна: позволяет создавать детали с очень сложной геометрией, которая невозможна при традиционных методах.
- Минимальные отходы: материал используется эффективно, так как он добавляется только там, где это необходимо.
- Быстрое прототипирование: можно быстро производить и тестировать новые изделия.
- Персонализация: легко адаптировать изделия под индивидуальные нужды (например, в медицине).

Недостатки:

- Ограничения по скорости производства и размеру изделий.
- Требуется постобработка для достижения высокого качества поверхности.
- Стоимость оборудования и материалов для некоторых технологий может быть высокой.

В настоящее время АТП являются одним из составляющих нового технологического уклада [1]. В качестве основных потребителей является высокотехнологичные отрасли промышленности, в том числе авиационная и космическая промышленность (Рис.1) [2-4]. Для перспективных двигателей пятого поколения при использовании АТ планируются следующие результаты [5]:

- Уменьшение времени проектирования в 10–12 раз
- Снижение массы турбины на 10–15%
- Повышение производительности в 10–30 раз
- Уменьшение времени подготовки производства в 6–10 раз
-





Рис.1. Завихрители фронтального устройства камеры сгорания двигателя ПД-14, изготавливаемые в ВИАМ [5]

Предложенный АТП включает следующие основные этапы [6-8]:

- Создание 3D-модели и подготовка файла. Используя программное обеспечение для компьютерного проектирования, создаётся 3D-модель изделия. Затем модель преобразуется в необходимый формат и разрезается на слои с помощью программ для подготовки аддитивного производства.
- Подготовка металлического порошка. Металлический порошок выбранного материала загружается на подложку 1 в установку для печати, в камеру 2 (Рис.2). Порошок должен иметь однородные частицы и соответствующие свойства для плавления лазером.
- Нанесение первого слоя порошка. Объем металлического порошка равномерно распределяется по платформе.
- Селективное плавление лазером. По сигналу с пульта автоматического управления, путём перемещения при помощи двигателей по направляющим портала с излучательной головкой 4 позиционируют в горизонтальной плоскости в нужном месте рабочего стола. По сигналу с пульта автоматического управления включают источник высокоинтенсивного пучка. Затем производят нагрев порошка до заданного уровня температуры в некоторой области. В пределах этой области, опуская вниз по вертикали с помощью челнока излучательную головку в массу порошка 3 и, регулируя с пульта автоматического управления процесс, её перемещение по трём координатам при передвижении портала, каретки и челнока по заданной программе, путём селективного спекания и отверждения порошка синтезируют деталь 5. Лазерный луч направляется на определённые участки слоя порошка, расплавляя их в соответствии с контуром каждого слоя 3D-модели. Лазер сплавляет частицы порошка, образуя твердую структуру.
- Повторение цикла послойного плавления. Каждый новый слой порошка наносится и сплавляется с предыдущим до тех пор, пока не будет завершено создание всей детали. Этот процесс повторяется для каждого слоя 3D-модели.

- Охлаждение и завершение печати. По завершении послойного плавления платформа с готовым изделием охлаждается для предотвращения внутренних дефектов и деформаций.

На рисунке 3 показана работа излучательной головки в массиве порошка.

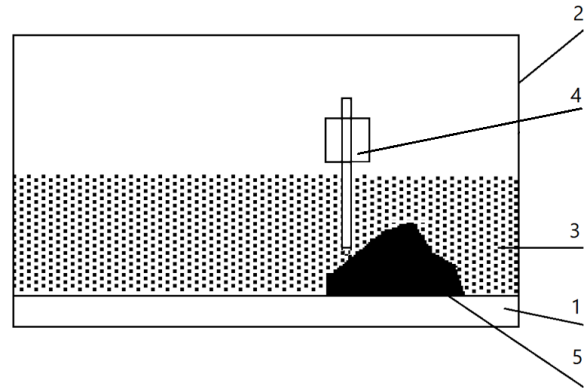


Рис.2. Технологический процесс непослойного синтеза детали

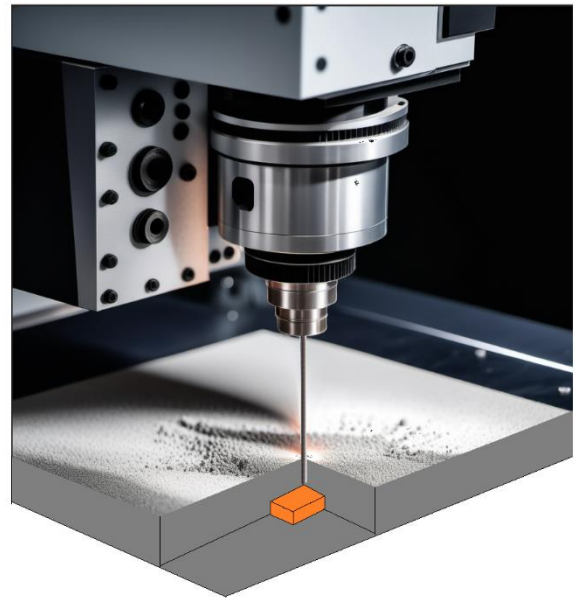


Рис.3. Синтез детали в объёме порошка

Преимущества рассмотренного технологического процесса:

- малая масса и габариты;
- увеличение скорости изготовления деталей;
- удобство применения;
- адаптивность.

Технический результат, получаемый при реализации предлагаемого способа и устройства, заключается в повышении производительности, увеличении скорости технологического процесса и упрощении ряда технологических операций, а также упрощении системы управления технологическими процессами и программного обеспечения. Также расширяются функциональные возможности за счет осуществления как послойного (горизонтального) синтеза, так и объемного – вертикального или смешанного горизонтально-вертикального синтеза деталей.

1. Xu X, Lu Y, Vogel-Heuser B, Wang L. Industry 4.0 and industry

- 5.0—inception, conception and perception. *J Manuf Syst* 2021; 61:530–5.
2. Jamroz W, Szafraniec J, Kurek M, Jachowicz R. 3D printing in pharmaceutical and medical applications – recent achievements and challenges. *Pharm Res* 2018; 35:176. <https://doi.org/10.1007/s11095-018-2454-x>.
3. Kellner T. 3D-Printed ‘Bionic’ Parts Could Revolutionize Aerospace Design; General Electric Reports: Boston, MA, USA, 2017.
4. Blakey-Milner B, Gradl P, Snedden G, Brooks M, Pitot J, Lopez E, Leary M, Berto F, du Plessis A. Metal additive manufacturing in aerospace: a review. *Mater Des* 2021; 209:110008. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2021.110008>.
5. Куркин С.Э. Развитие аддитивных технологий и создание цифровых производств в ФГУП «ВИАМ» для изготовления деталей газотурбинных двигателей. Государственный научный центр Российской Федерации. 21 с. <https://aviatp.ru/files/aviaevents-2019/MAKS/VIAM.pdf>
6. Rakov D.L., Sukhorukov R.Y. Classification and analysis of additive technologies based on the morphological approach. *Journal of Machinery Manufacture and Reliability*. 2021. Т. 50. № 7. С. 616-621. 7.
7. Rakov, D.L., Sukhorukov, R.Y. Design and Technological Solutions for Additive Manufacturing of Parts in the Volume of Material. *J. Mach. Manuf. Reliab.* 53, 346–350 (2024). <https://doi.org/10.1134/S1052618824700225>
8. Раков Д.Л., Сухоруков Р.Ю. Способ аддитивного изготовления деталей и устройство для его осуществления. Патент РФ № 2 811 347 от 11.01.2024, Заявка № 2023125400 от 04.10.2023, Патентообладатель — ИМАШ РАН

## АНАЛИЗ СТЕПЕНИ ИННОВАЦИОННОСТИ ПРИ СТРУКТУРНОМ СИНТЕЗЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

Л.В. Гаврилина<sup>1</sup>, М.А. Печейкина<sup>2</sup>, Д.Л. Раков<sup>1</sup>, Р.Ю. Сухоруков<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, Москва, Россия; [rdl@mail.ru](mailto:rdl@mail.ru)

<sup>2</sup>Московский энергетический институт (Национальный исследовательский университет), Москва, Россия

В современном мире, где технологическое развитие является основным двигателем экономического роста, инновации играют ключевую роль в обеспечении конкурентоспособности. Оценка степени инновационности технологических процессов становится важнейшим инструментом, так как она позволяет не только идентифицировать наиболее перспективные решения, но и оценить их влияние на различные аспекты деятельности. Этот процесс включает в себя анализ новизны решений, их эффективности и воздействия на окружающую среду. В статье рассматриваются основные принципы, методы и применения оценки инновационности, базирующиеся на морфологическом подходе. В отличие от традиционных методов, предложенный подход позволяет гибко реагировать на изменения окружающей среды и формализовать задачу принятия решений на этапе технического предложения.

Определение степени инновационности при структурном синтезе технических систем (ТС) и технологических процессов (ТП) — это оценка уровня новизны и прогрессивности технических и технологических решений, предлагаемых в ходе проектирования или оптимизации производственных процессов. Структурный синтез технологических процессов подразумевает разработку или выбор таких компонентов и структур производственного процесса, которые обеспечивают его максимальную эффективность.

Инновации способны радикально изменить устоявшиеся производственные процессы, улучшая их эффективность, снижая затраты и минимизируя воздействие на окружающую среду. Например, внедрение автоматизации в производственные процессы привело к сокращению временных затрат и значительному увеличению производительности. Кроме того, использование возобновляемых источников энергии или более экологичных материалов стало не только трендом, но и необходимостью для снижения негативного влияния на планету.

Оценка инновационности ТС и ТП позволяет выявить, насколько предлагаемые технические решения (ТР) является актуальным и полезным, как для компании, так и для общества в целом. Это особенно важно в условиях конкуренции, когда предприятия стремятся не просто выжить, но и стать лидерами в своих отраслях.

Одним из основных аспектов оценки инновационности является новизна ТР. Этот параметр оценивает, насколько разработка отличается от существующих аналогов и применялись ли ранее подобные технологии. Однако новизна сама по себе не является достаточным показателем, если она не ведет к реальным улучшениям. Поэтому следующий важный критерий — это эффективность. Она может измеряться в различных показателях, таких как повышение производительности, снижение затрат или сокращение времени на выполнение задач. Третьим критерием является экологичность. Современные инновации должны не только приносить выгоду бизнесу, но и учитывать воздействие на окружающую среду. Например, использование возобновляемых источников энергии или внедрение безотходных технологий часто становится фактором, определяющим степень инновационности ТР. Немаловажную роль играет и рыночный потенциал —

способность инновации завоевать свою нишу на рынке и приносить экономические выгоды. Даже самые передовые разработки могут потерпеть неудачу, если они не будут востребованы потребителями или окажутся слишком дорогими для внедрения.

Для оценки степени инновационности используются как качественные, так и количественные методы. К качественным методам относятся экспертные оценки, анализы конкурентных преимуществ и SWOT-анализ. Они позволяют оценить инновацию с точки зрения стратегических перспектив и рисков. Количественные методы включают расчеты экономической эффективности, индексы инновационности и бенчмаркинг, что помогает получить объективные данные о полезности внедряемых ТР. Также используют цифровые инструменты, такие как прогнозные модели и аналитические системы, для предсказания результатов внедрения инноваций. Это позволяет лучше понять долгосрочные последствия от внедрения новых технологий и минимизировать риски.

Несмотря на развитие методов оценки, существуют значительные трудности. Одной из главных проблем является сложность предсказания долгосрочных последствий от внедрения инноваций. Иногда результаты проявляются через несколько лет, и на ранних стадиях оценить их в полной мере трудно. Кроме того, различия в отраслях требуют специфических подходов к оценке, что затрудняет унификацию методов.

Оценка новизны ТР и ТП является сложным процессом, который включает в себя анализ и оценку новизны, уникальности и значимости решений. Само понятие инновационность имеет большое количество трактовок. Например постулируется, что продукт или услуга являются новыми, если они обеспечивают устойчивые преимущества [1], в статье [2] дается определение инновации как "новое, ценное и реализованное". Деннинг [3] связал понятие общества и инновации, отметив, что "инновация — это принятие новой практики в сообществе". По мнению Маклеода [4], «генерирование ТР происходит благодаря врожденным и развитым талантам, включая знания, которыми он владеет в своей области, знания, полученные в разных областях, практику использования. Знания могут быть как неявными, так и явными. Явные знания могут быть выражены в виде информации (например, теорий, формул), в то время как неявные знания носят

ассоциативный характер, то есть подразумевают способность объединять кусочки знаний». В научной литературе представлены многочисленные подходы к определению этой категории [5-7]. Для оценки инновационности возможно применение метода морфологического анализа (МА).

Метод морфологического анализа был разработан швейцарским астрофизиком Фрицем Цвикки для решения проблем в астрофизике и инженерии. Основная идея метода заключается в разложении исследуемого объекта или процесса на ключевые параметры или функции и последующем систематическом анализе всех возможных комбинаций этих параметров. Процесс выполнения морфологического анализа можно разделить на несколько этапов:

- Идентификация параметров. Проблема или система разбивается на её основные компоненты. Каждый параметр должен описывать важную характеристику системы.
- Определение вариантов для каждого параметра. Для каждого параметра или функции определяются возможные варианты реализации (например, материалы, технологии, формы и т.д.).
- Создание морфологической матрицы (ММ) (Рис.1). Все параметры и их возможные варианты записываются в ММ. В нём фиксируются все возможные сочетания элементов.
- Анализ комбинаций. Исследуются возможные сочетания вариантов из ММ с целью выявления наиболее перспективных решений.
- Оценка и выбор решений. Из всех предложенных комбинаций выбираются те, которые обладают наибольшим потенциалом для решения проблемы.

		Элементы			
		$P^1$	$P^2$	$P^3$	$P^4$
Признаки	$P_1$	$P_1^1$	$P_1^2$	$P_1^3$	$P_1^4$
	$P_2$	$P_2^1$	$P_2^2$	$P_2^3$	
	$P_3$	$P_3^1$	$P_3^2$	$P_3^3$	$P_3^4$
	$P_4$	$P_4^1$	$P_4^2$		
	$P_5$	$P_5^1$	$P_5^2$	$P_5^3$	$P_5^4$

Рис.1. Морфологическая матрица

Одним из главных преимуществ метода морфологического анализа является его способность генерировать множество возможных решений, что особенно важно в условиях ограниченности стандартных подходов. Морфологический ящик позволяет исследовать не только уже известные комбинации решений, но и новые, которые могли быть упущены при использовании традиционных методов анализа. Кроме того, метод МА позволяет структурировать процесс поиска решений. Разбиение проблемы на отдельные параметры и систематизация вариантов для каждого из них помогает избежать упрощений и повысить вероятность нахождения действительно инновационных подходов. Метод также способствует креативному мышлению. Исследование всех возможных сочетаний параметров стимулирует разработчиков или исследователей предлагать

новые, часто нетривиальные идеи. Такой подход полезен при решении задач, которые требуют выхода за пределы общепринятых решений.

Несмотря на свои многочисленные преимущества, метод морфологического анализа имеет и ряд ограничений. Одной из главных сложностей является комбинаторная сложность. Если количество параметров велико, а для каждого из них определено множество вариантов, количество возможных комбинаций может стать огромным. В таких случаях анализ всех возможных вариантов становится чрезвычайно трудоёмким и требует применения дополнительных методов для сужения круга исследуемых решений.

В предложенном морфологическом подходе предлагается анализ «оригинальных» и «типичных» вариантов. Оценка базируется на понятиях меры сходства и различия вариантов [8-10]. Поскольку каждая система характеризуется "своим" набором элементов признаков, то можно всегда отыскать признаки, определяющие его оригинальность и индивидуальность.

Оценка новизны вариантов ТР по отношению к опорным вариантам проводится на основе сравнения их основных характеристик и отличий от опорных вариантов [7]. Первоначально необходимо определить, какие параметры и характеристики являются основными для ТР. Опорные варианты ТР используются как базовые точки отсчета для сравнения. Если рассматриваемый вариант обладает улучшенными или новыми характеристиками, то можно сделать вывод о его новизне. Дополнительно можно использовать экспертные оценки и суждения специалистов, проводить тестирование и сбор обратной связи от разработчиков для получения более объективных оценок новизны вариантов ТР.

ТР являются новыми, если они имеют элементы, не присутствующие в опорных вариантах (Рис.2). Чем больше новых элементов имеют сгенерированные варианты ТР, тем более новыми они являются.

		$P^1$	$P^2$	$P^3$	$P^4$
		Признаки	$P_1$	$P_1^1$	$P_1^2$
$P_2$	$P_2^1$		$P_2^2$	$P_2^3$	
$P_3$	$P_3^1$		$P_3^2$	$P_3^3$	$P_3^4$
$P_4$	$P_4^1$		$P_4^2$		
$P_5$	$P_5^1$		$P_5^2$	$P_5^3$	$P_5^4$

Рис.2. ТР в ММ

Для определения степени новизны используется величина, обратная расстоянию Хэмминга. Расстояние Хэмминга широко применяется в различных областях, таких как теория кодирования, компьютерная биология, тестирование программного обеспечения и другие, для оценки сходства или различий между двумя объектами.

Оценка степени инновационности является неотъемлемой частью планирования. Этот процесс помогает компаниям не только выбрать наиболее перспективные инновации, но и избежать рисков, связанных с неудачным внедрением новых ТП. Основными критериями такой оценки являются новизна, эффективность,

экологичность и рыночный потенциал решений. Несмотря на существующие сложности, правильная оценка инновационности становится важным инструментом для достижения долгосрочного успеха и устойчивого развития.

Метод МА является универсальным инструментом для решения сложных многопараметрических задач. Он позволяет структурировать процесс поиска решений, способствуя генерации новых и нестандартных идей. Несмотря на некоторые ограничения, такие как комбинаторная сложность и субъективность выбора параметров, МА остаётся одним из наиболее эффективных методов для синтеза инновационных решений. В условиях быстро меняющегося мира и возрастающей сложности технологических систем метод МА становится важным элементом в арсенале современных инженеров, учёных и разработчиков.

Рассматриваются основные принципы, методы и применения оценки инновационности, базирующиеся на морфологическом подходе. В отличие от традиционных методов, предложенный подход позволяет гибко реагировать на изменения окружающей среды и формализовать задачу принятия решений на этапе технического предложения.

1. Csikszentmihalyi, Creativity, Flow and the Psychology of Discovery and Invention, 1996.
2. Amabile, Creativity and Innovation in Organizations, 1996; Floyd, "Innovation, Imagination, and Invention," 1989, Pp. 22.
3. Denning and Dunham, The Innovator's Way, 2010, p. 434.
4. MacLeod "The Education of Innovative Engineers," 2010.
5. Кондратьев Н.Д. Большие циклы конъюнктуры и теория предвидения. М.: Экономика, 2002.
6. Cummings L.L., O'Connell M.J. Organizational Innovation: A Model and Needed Research // Journal of Business Research. 1978. Vol. 6. No. 1. P. 33-50.
7. Раков Д.Л. Анализ и оценка инновационности технических решений в морфологическом подходе в машиностроении. Проблемы машиностроения и автоматизации. 2024. № 2. С. 112-117.
8. Rakov D.L., Sukhorukov R.Y., Pecheykina M.A. Choosing and evaluating fabrication processes by means of a computer-aided innovation support system based on the morphological approach. Journal of Machinery Manufacture and Reliability. 2019. T. 48. № 2. С. 173-178.
9. Rakov D.L. Strukturelle Synthese und Analyse von innovativen technischen Systemen. Unique and Exzellent Ingenieurausbildung im 21. Jahrhundert. 2000. С. 388-395.
10. Раков Д.Л., Синёв А.В. Структурный анализ новых технических систем на базе морфологического подхода в условиях неопределённости. Проблемы машиностроения и автоматизации. 2014. № 3. С. 60-66.

## МОДЕЛИРОВАНИЕ СЛУЧАЙНОГО ПРОЦЕССА ПО АДРЕСНОЙ МАРКОВСКОЙ МАТРИЦЕ С ЦЕЛЬЮ ОЦЕНКИ ВАРИАбельНОСТИ НАГРУЖЕНИЯ

И.В. Гадолина<sup>1</sup>, А.В. Ерпалов<sup>2</sup>, Р.Г. Кажлаев<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Институт машиноведения им. А.А.Благонравова РАН, Москва, Россия; [gadolina@mail.ru](mailto:gadolina@mail.ru)

<sup>2</sup>Южно-Уральский университет, Челябинск, Россия

Для оценки долговечности при многоцикловом нагружении с целью получения представительной информации о нагруженности в процессе эксплуатации создается обобщенный блок нагружения. Рассмотрены различные подходы к решению данной задачи. Наряду с точечной оценкой интерес представляет оценка рассеяния, вызванного вариациями оцененной нагруженности. Для этого был применен метод моделирования по адресной марковской матрице.

### Цель

Проанализировать подходы к построению обобщенного блока нагружения и улучшить состоятельность оценки долговечности за счет применения моделирования по адресной марковской матрице переходов.

### Введение

Блок нагружения является информативной и удобной для расчетов и испытаний характеристикой нагружения объекта в эксплуатации. Его длина  $l_6$  выражается в тех же единицах, что и долговечность. В зависимости от доступности измерительных средств, возможны разные подходы к его определению. Ранее для транспортных машин применялись аналоговые приборы для фиксации нагруженности на весьма продолжительных участках пути. Это позволяло оценивать ресурс по представительной реализации напряжений. В настоящее время цифровая техника измерений стала весьма доступной и общераспространенной, и вытеснила аналоговые устройства.

Тем не менее, зачастую записанные цифровым методом реализации и обработанные по методу дождя [1] бывают весьма короткие, например в работе [2], что не позволяет получить вполне состоятельную оценку долговечности, и, тем более, оценить рассеяние оценки за счет вариабельности нагруженности. Для решения этой проблемы в настоящей работе был применен метод на основе моделирования по адресной марковской матрице [3].

### Материалы и методы

В качестве исходного материала для построения расчетного примера были использованы данные по тензометрированию напряжений в раме велосипеда [2]. Объект исследования, а именно, рама велосипеда, была изготовлена из алюминиевых труб 6061-T6. Нагружение многоосное. Характеристики материала были использованы из [4]. Велосипед представляет собой пример транспортного средства, в котором нагрузки по истечении определенного времени эксплуатации могут приводить к образованию поломок, характерных для усталости. Были проведены тензометрические испытания на трех режимах движения при двух положениях велосипедиста, причем записи осуществлялись вблизи узла сварки в нижней трубе и в трубе сидения. Также было записано напряжение при переезде препятствия в виде тротуарного бордюра. На основании этих семи ( $i=1, \dots, 7$ ) режимов был сформирован обобщенный блок с длиной  $l_6 = 40$  секунд,

режимы с долей использования  $p_i, i=1, \dots, 7$ , причем

$$\sum_{i=1}^7 p_i = 1 \quad (1).$$

Предполагается, что перечисленные в табл.1 режимы, исчерпывают все возможные ситуации в процессе эксплуатации велосипеда. Помимо вида покрытия, по которому движется велосипед, на нагруженность влияет положение велосипедиста, а именно, находится ли он в положении сидя (А) или стоя на педалях (Б).

Таблица 1. Распределение времени работы объекта по режимам

Номер режима	Описание типа режима с указанием положения велосипедиста	Доля $p_i$
1	Тротуар, А	0.17*
2	Тротуар, Б	0.17
3	Асфальт, А	0.17
4	Асфальт, Б	0.17
5	Грунтовая дорога, А	0.16
6	Грунтовая дорога, Б	0.158
7	Преодоление бордюра, А	0.002

\*Данные взяты ориентировочно

Для построения обобщенного блока составляется массив данных по схематизации по имеющимся в [2] записям по режимам из табл. 1. С учетом долей времени  $p_i$  и длительности опытных реализаций вычисляется коэффициент для суммирования частот амплитуд в обобщенном блоке. Вопрос согласования границ интервалов при суммировании был рассмотрен в [5]. В результате этих действий получается обобщенный блок длиной  $l_6$  с суммарным числом циклов  $v_6$  [6], причем последняя величина в силу правил суммирования не обязательно будет представлять собой целую величину. Вычисление медианного числа блоков до разрушения  $\lambda$  производится на основе скорректированной линейной гипотезы суммирования усталостных повреждений [6]. Медианный ресурс, с размерностью, совпадающей с размерностью  $l_6$ , выразится как

$$L = \lambda l_6 \quad (2).$$

### Предварительная обработка сигнала.

Предварительный этап обработки записей напряжений был осуществлен авторами работы [2] и заключался в приведении напряжений сложного напряженного состояния к эквивалентным по методу [7]. Согласно данной работе предполагается, что мезоскопическое касательное напряжение  $\tau_{meso}$ , уравнение (3), отвечает за зарождение трещины вдоль полос скольжения в области зерна, а мезоскопическое гидростатическое напряжение  $\sigma_{meso,h}$ , уравнение (4), влияет на

процесс раскрытия трещины.

Мезоскопическое гидростатическое напряжение равно гидростатическому напряжению в макромасштабе, а мезоскопическое напряжение сдвига равно максимальному напряжению сдвига при пропорциональной нагрузке. Таким образом, эти напряжения можно рассчитать по формулам:

$$\tau_{\text{meso}} = \tau_{\text{max}} = (\sigma_1 - \sigma_3)/2 \quad (3),$$

$$\sigma_{\text{meso,h}} = (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)/3 \quad (4).$$

Линейная комбинация этих параметров определяет эквивалентное касательное напряжение ( $\tau_{DV}$ ), выражаемое как [8]:

$$\tau_{DV} = \tau_{\text{meso}} + \alpha_{DV} \sigma_{\text{meso,h}} \quad (5),$$

где коэффициент  $\alpha_{DV}$  (6) определяет влияние гидростатического напряжения и зависит от пределов усталости при симметричном цикле ( $R=-1$ ) и при отнулевом цикле ( $R=0$ ):

$$\alpha_{DV} = (3/2) (\sigma_{F(-1)} - \sigma_{F(0)}) / (2\sigma_{F(0)} - \sigma_{F(-1)}) \quad (6).$$

На рис. 1 а) и б) показан исходный приведенный по формулам (3–6) сигнал во времени и образованный из него процесс «пила» - т.е. последовательность экстремумов без учета формы цикла напряжений и без учета частоты. В работе [9] было проанализировано влияние формы цикла на долговечность. На основе эксперимента был сделан вывод, о том, что форма цикла может оказывать влияние. Поскольку испытания были проведены в ограниченном интервале изменения переменных, в настоящее время господствует мнение о том, что процессы, показанные на рис. 1а) (непрерывный процесс) и на рис. 1б) («пила») обладают эквивалентным повреждающим воздействием на материал при многоциклового усталости.

Преобразованный к последовательности экстремумов процесс режима №1 (табл. 1) [2] по напряжениям, зафиксированным тензорезисторами в опасном сечении нижней трубы велосипеда был использован для оценки рассеяния по методу моделирования по адресной марковской матрице [3].

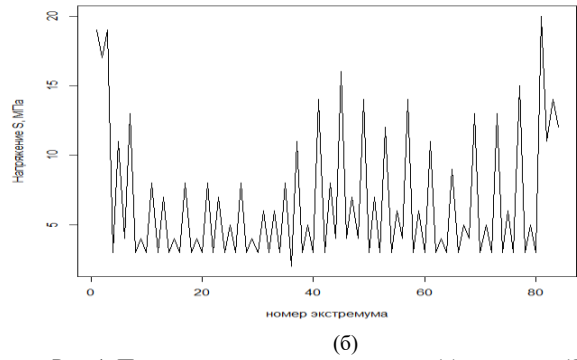
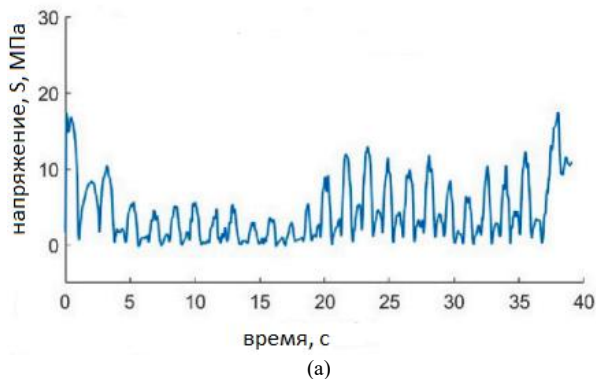


Рис. 1. Пример непрерывного процесса (а) и «пилы» (б)

## Исследование варибельности

Помимо расчетной оценки  $L$  медианного ресурса по формуле (2), в соответствии с концепцией оценки ресурса в вероятностном аспекте [6], требуется оценить рассеяние данной величины, а именно, ее логарифма:

$$S_{lgL} = 0.434m (v^2_{\sigma-1D} + v^2_{\sigma_{\text{max}}})^{0.5} \quad (7),$$

где  $v_{\sigma-1D}$  - коэффициент вариации предела выносливости и  $v_{\sigma_{\text{max}}}$  - коэффициент вариации максимальной амплитуды в блоке. Коэффициент вариации предела выносливости  $v_{\sigma-1D}$  определяют по данным усталостных испытаний [6], а коэффициент вариации максимальной амплитуды в блоке обычно принимают ориентировочно  $v_{\sigma_{\text{max}}} = 0.1$ . Величина  $v_{\sigma_{\text{max}}}$  характеризует нестабильность условий нагружения по отдельным экземплярам машин в парке.

Для определения вариации максимальной амплитуды воспользуемся методом, предложенным автором ранее, а именно, методом моделирования по адресным марковским матрицам переходов, подробно описанного в [3]. В работе [3] был рассмотрен пример, связанный с распространением усталостной трещины. Здесь же рассматривается первая стадия усталости, а именно, зарождение усталостной трещины.

Полезный подход к испытаниям при случайном нагружении был ранее разработан Р.Фишером. Это метод моделирования случайных процессов, задаваемых в виде последовательности пиков по марковской матрице переходов. Сохранение информации о процессе в виде матриц позволяет, в частности, более компактно представить случайный процесс.

Для анализа и синтеза процессов предлагается моделирование по адресным марковским матрицам, созданным на основе реальных записей, аналогичных по форме процессу «пилы», рис.1 б). На этапе анализа заполняется квадратная матрица  $[32 \times 32]$ , в которую заносятся числа повторений восходящих и нисходящих размахов по разрядам. Участок матрицы для примера, показанного на рис.1б), приведен на рис.2. На главной диагонали нули. Заполненная на этапе анализа, аналогичная изображенной на рис.2 матрица, используется для синтеза реплик  $j$  случайных последовательностей с использованием датчика случайных чисел (табл.2). За счет этого реплики получаются различными, хотя сохраняют характер исходного процесса.

	[.1]	[.2]	[.3]	[.4]	[.5]	[.6]	[.7]	[.8]	[.9]
[1.]	0	0	0	0	0	0	0	1	0
[2.]	0	0	0	0	0	0	0	0	0
[3.]	0	0	0	7	4	4	2	4	1
[4.]	0	0	7	0	1	0	1	1	0
[5.]	0	0	4	1	0	0	0	0	0
[6.]	0	0	4	0	0	0	0	0	0
[7.]	0	0	2	1	0	0	0	0	0
[8.]	1	0	4	1	0	0	0	0	0
[9.]	0	0	1	0	0	0	0	0	0
[10.]	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Рис. 2. Участок адресной марковской матрицы (эксперимент №1, [2])

### Результаты и обсуждение

Согласно предложенному методу, было получено достаточное для статистического анализа число реплик. Далее они были обработаны по методу дождя [1] и по этим оценкам был рассчитан ресурс по скорректированной линейной гипотезе с использованием характеристик усталости, приведенных в [2]. В табл.2 показаны гистограммы распределения амплитуд полных циклов для некоторых реплик и относительные оценки долговечности по блоку нагружения из табл.1.

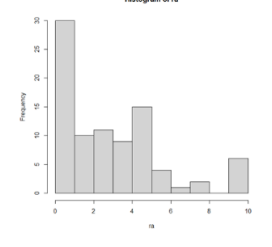
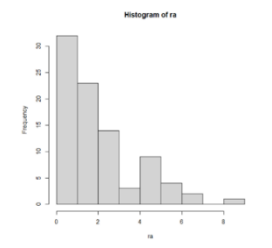
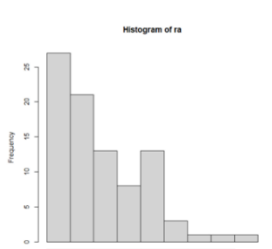
### Выводы

К данным о нагруженности велосипеда [2], был применен метод моделирования по адресной марковской матрице. По результатам моделирования оценены коэффициенты вариации  $v_{\sigma_{max}} = 0.068$  и коэффициент вариации логарифма расчетного ресурса  $v_{lgL} = 0.094$ .

Применительно к данной задаче метод моделирования по адресным марковским матрицам показал свою эффективность. Полученные результаты в целом соответствуют данным из литературы [6].

Работа выполнена при поддержке гранта Российского научного фонда № 23-29-10097, <https://rscf.ru/project/23-29-10097/>. Благодарим авторов работы [2] Ricardo C. Soares, Edison da Rosa и Allan I.F. Sousa из Бразилии за разрешение использовать материалы их статьи в методических целях.

Таблица 2. Характеристики реплик и относительные долговечности

j	Гистограмма полных циклов	Параметр полноты спектра V/	Ресурс в отношении к среднему
1		0.748	
2		0.620	
3		0.636	
...	...	...	...

- ГОСТ 25.101–83. Расчеты и испытания на прочность. Методы схематизации случайных процессов нагружения элементов машин и конструкций и статистического представления результатов. М.: Стандартинформ, 2005. 25 с.
- Soares, Ricardo C. et al. Assessment of fatigue damage in welded aluminum joints subjected to multiaxial stress stat/Heliyon, Volume 9, Issue 4, e15196
- Гадолина, И. В. Изучение изменчивости скорости роста трещин путем применения модели роста трещины к последовательностям экстремумов, моделируемым по матрицам Маркова / И. В. Гадолина // Проблемы машиностроения и автоматизации. – 2024. – № 1. – С. 122-128. – DOI 10.52261/02346206\_2024\_1\_122.
- G. Yahr, Fatigue Design Curves for 6061-t6 Aluminum, 1997.
- Петрова, И. М. Создание обобщенного спектра нагружения при различных вариантах нагружения в эксплуатации / И. М. Петрова, И. В. Гадолина // Пром-Инжиниринг : Труды IV международной научно-технической конференции, Москва-Челябинск-Новочеркасск, 15–18 мая 2018 года. 2018. – С. 26-30. – EDN FCIGYB.
- Когаев В.П. Расчеты на прочность при напряжениях переменных во времени. М., Машиностроение, 1993. 364 с.
- J. Papuga, R. Halama, Mean stress effect in multiaxial fatigue limit criteria, Arch. Appl. Mech. 89 (5) (2019) 823–834.
- K.D. Van, A. Bignonnet, J.-L. Fayard, Assessment of welded structures by a structural multiaxial fatigue approach, 31, in: European Structural Integrity Society, Elsevier, 2003, pp. 3–21.
- Махутов, Н. А. Анализ влияния формы цикла напряжений на долговечность при циклическом нагружении / Н. А. Махутов, И. В. Гадолина // Деформация и разрушение материалов. – 2023. – № 12. – С. 20-24. – DOI 10.31044/1814-4632-2023-12-20-24.



## ИЗБИРАТЕЛЬНЫЙ ПЕРЕНОС ПРИ ФРЕТТИНГЕ СТАЛЬНЫХ И МЕТАЛЛОПОЛИМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ

С.Р. Ганиев<sup>1</sup>, Б.М. Гантимиров<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, Москва, Россия

Рассмотрены проблемные вопросы, связанные с проведением испытаний на фреттинг-изнашивание металлических и металлополимерных материалов при реализации эффекта избирательного переноса. Применение композиционных полимерных материалов в машиностроении обусловлено тем, что другие материалы в частных случаях не могут удовлетворить возрастающим требованиям современных машин и оборудования.

Наряду с новыми материалами появляются и новые методы, которые дают возможность повысить ресурс работы механизмов, сократить затраты на ремонт. Один из таких – это явление избирательного переноса (эффект безызносности).

Исследование возможности избирательного переноса металлополимерными материалами в условиях фреттинга представляет несомненный интерес.

Изнашивание при фреттинге – это механическое изнашивание соприкасающихся тел при колебательном относительном микросмещении. Необходимые для протекания этого процесса относительные микросмещения сопряжённых поверхностей совершаются вследствие вибрации и деформации деталей под нагрузкой. Изнашивание при фреттинге имеет место в шлицевых и шпоночных соединениях, в сопряжении посадок с натягом ступицы на вал, колец подшипников качения в корпусах и на валы, в деталях запорной арматуры нефтегазопроводов и т.д. По литературным данным достаточно амплитуды относительного микросмещения деталей 0,025 мкм для реализации этого процесса изнашивания. По литературным данным при амплитуде микросмещения 0,025 мкм и частоте 50 с<sup>-1</sup> скорость скольжения меняется от 2,5 мм/сек до 7,5 мм/сек.

Износ при фреттинге прямо пропорционален амплитуде микросмещения, а увеличение давления на поверхности увеличивает износ, но до определённой величины давления для данной сопряжённой пары. Причиной этого является то, что дальнейшее увеличение давления приводит к уменьшению амплитуды микросмещения.

Механизм изнашивания при фреттинге заключается в следующем. Под действием силы трения кристаллическая решётка разрушается и происходит отрыв частиц металла, имеющих размер порядка атомного, т.е. происходит диспергирование поверхности без удаления продуктов изнашивания. Оторвавшиеся частицы быстро окисляются. Дополнительным источником повреждения поверхности может явиться возникающее местами схватывание сопряжённых металлов и зарождение усталостных трещин, их развитие, что приводит к увеличению количества частиц в зоне контакта.

Продукты разрушения могут не только окисляться, но и упрочняться, менять свою структуру и способствовать дальнейшему разрушению поверхностей. Температура поверхностных слоёв может быть значительной, несмотря на небольшие скорости скольжения.

Продукты изнашивания стальных деталей при фреттинге на воздухе имеют цвет от светло-красно-коричневого до тёмно-коричневого. Состав этих продуктов: основная масса  $Fe_2O_3$  и небольшое количество  $\alpha-Fe$ , а также окислы  $FeO$ ,  $Fe_3O_4$  и гидроксид  $Fe_2O_3 \cdot H_2O$ .

На поверхностях деталей имеются и мелкодисперсные продукты изнашивания вышеназванных элементов в виде порошков и очень мелких частиц.

Избирательный перенос – вид трения, который обусловлен самопроизвольным образованием в зоне контакта тонкой не окисляющейся металлической плёнки с низким сопротивлением сдвигу и не способной накапливать при деформации дислокации. Его называют эффектом безызносности.

В силу специфических условий работы ряда узлов трения, эффект безызносности может проявляться не полностью. Поэтому не во всех случаях достигается полная безызносность.

Явление избирательного переноса было обнаружено в парах трения: «бронза-сталь» при смазывании спиртоглицериновой смесью, «сталь-бронза» со смазкой ЦИАТИМ-201, а также в паре «сталь-сталь» в узлах компрессора холодильников при смазке масло-фреоновой смесью.

Металлополимеры – это пластические массы с металлическим порошкообразным или волокнистым наполнителем.

В качестве связующего для этих материалов используют термопластичные полимеры: полиэтилен, полипропилен, полиамиды, политетрафторэтилен (фторопласт), поливинилхлорид и др., а также терморезистивные: фенолоформальдегидные, полиэфирные, эпоксидные, кремнийорганические и др.

Кроме полимеров, в качестве связующих используют и каучуки.

Кроме наполнителя и полимерного связующего в состав металлополимерных композиций могут входить неметаллические минеральные и органические наполнители, стабилизаторы, пигменты и красители, пластификаторы, поверхностно-активные вещества. Тип и количество указанных добавок определяется химической природой полимерного связующего.

Существует множество различных фирм и компаний, которые разрабатывают разные металлополимерные материалы.

### 1. «WEICON»

Компания WEICON разрабатывает, производит и реализует специальные клеи и герметики, технические аэрозоли и жидкости, а также высокопроизводительные монтажные пасты и смазки для

всех отраслей промышленности, начиная от производства, ремонта, обслуживания и заканчивая техническим сервисом и уходом.

## 2. ЗАО «Металлополимеры ЛЕО»

Металлополимеры "ЛЕО" – дисперсионно-наполненные ремонтные композиционные материалы системы "холодной сварки". Данный класс материалов предназначен для устранения различных проблем, возникающих при эксплуатации оборудования на промышленных предприятиях.

Металлополимеры "ЛЕО" - составы широкого функционального назначения. Высокие адгезионные свойства в сочетании с конструкционной прочностью, коррозионной стойкостью и износостойкостью позволяют применять металлополимеры "ЛЕО" при восстановлении деталей машин, а также в качестве клеев, герметиков, защитных покрытий, при замене наплавки-сварки.

## 3. «CHESTER MOLECULAR»

Металлополимеры Chester Molecular представляют собой двухкомпонентные композиции на основе эпоксидных смол с металлическими, волокнистыми и другими наполнителями. Подразделяются на универсальные, антифрикционные и защитные покрытия (антикоррозионные и абразивостойкие.).

Металлополимеры Chester Molecular (Честер Молекуляр) используются как экономичная альтернатива полной замене деталей при проведении работ связанных с восстановлением рабочих поверхностей деталей и механизмов, а также защитой этих поверхностей от условий неблагоприятной рабочей среды.

## 4. «BELZONA»

Двухкомпонентный полимерный композит на основе, не содержащей растворителя, эпоксидной смолы с наполнителем из кремнистой стали для ремонта и восстановления металла. Этот ремонтный материал не корродирует и обеспечивает выдающуюся химическую защиту от воздействия широкого спектра химических веществ.

Belzona 1111 (Super Metal) легко смешивать и наносить без специальных инструментов. После отверждения этот материал может подвергаться любой механической обработке с помощью традиционного реза.

Простейший способ производства металлополимеров состоит в смешении металлического наполнителя с полимером, находящимся в различных формах: порошком, гранулами, расплавом, раствором или жидким связующим. Из полученных смесей формуют изделия путем прессования, литья под давлением, экструзии. При изготовлении металлополимеров с волокнистым наполнителем, его пропитывают жидким полимерным связующим, высушивают и из полученного материала прессованием формуют изделия. Добавлением меди в состав материала, возможно, позволит получить металлополимерный материал, обладающий новыми свойствами, которые могут обеспечить избирательный перенос и снижение износа при фреттинге.

В данной работе использовалось масло «Литол 24», в которое вводились порошок меди и

глицерин. Другой вариант это – Литол 24 с добавкой  $\text{CuCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  и глицерина. В качестве металлополимера использовался Belzona 1111.

Лабораторная установка для проведения исследования изготовлена на базе сверлильного станка (рисунок 1) и позволяет воспроизводить фреттинг-изнашивание на лабораторных образцах (рисунок 2. а, б), изготавливаемых по требованиям ГОСТ 23.211-80 из материалов, выбранных для испытания (в данном случае из металлополимерных).

Сущность методики испытания на фреттинг-изнашивание состоит в следующем:

- цилиндрический подвижный образец (контробразец (а)), соприкасающийся торцом с неподвижным цилиндрическим образцом из исследуемого материала при заданной нагрузке, приводится в возвратно-вращательное движение с заданными амплитудой и частотой;

- измеряется износ неподвижного образца (б) за заданное количество циклов, по значению которого определяется износостойкость исследуемого материала.

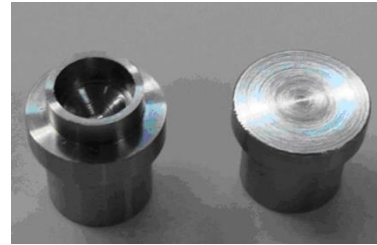


Рисунок 1 – Контробразец (а) и образец (б) имеют размеры в соответствии с ГОСТ

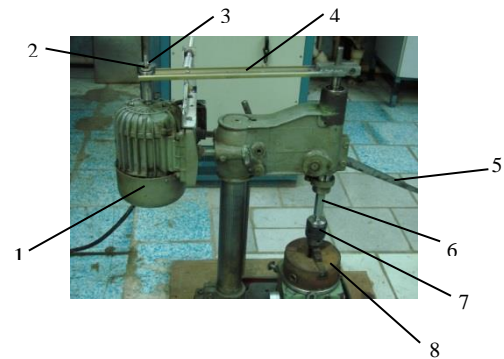


Рисунок 2 - Лабораторная установка для испытания при фреттинге

Режимные параметры испытаний, значения которых были выбраны в соответствии с ГОСТ 23.211-80:

Нормальная нагрузка - 500 Н (9,8 МПа); амплитуда возвратно-вращательного движения образца - 50 мкм, частота возвратно-вращательного движения образца - 30 Гц, длительность испытаний –  $1,25 \cdot 10^5 \dots 6,25 \cdot 10^6$  циклов.

При определении износа «весовым методом» образцы взвешивают до и после испытаний на аналитических весах с точностью до 0,0001 г, что было использовано при эксперименте. Результаты представлены в таблицах 1 и 2.

Таблица 1 - Литол 24 + Cu + Глицерин

№				

образец	контробразец	Масса до, г	Масса после, г	$\Delta m$ , г	Число циклов Нц
1		26,2014	26,2020	+0,0006	2,50·10 <sup>5</sup>
	1	7,7393	7,7460	+0,0067	
2		26,3001	26,2993	- 0,0008	5,00·10 <sup>5</sup>
	2	7,2040	7,2066	+0,0026	
3		26,2568	26,2562	-0,0006	6,25·10 <sup>5</sup>
	3	8,1883	8,1950	+0,0067	

Таблица 2 - Литол 24 + CuCl<sub>2</sub>·2H<sub>2</sub>O+Глицерин

№	Образец	Контробразец	Масса до, г	Масса после, г	$\Delta m$ , г	Число циклов Нц
1			26,3006	26,3007	+0,0001	1,25·10 <sup>5</sup>
	1		8,9611	8,9639	+0,0028	
2			26,3218	26,3220	+ 0,0002	2,50·10 <sup>5</sup>
	2		7,5922	7,5897	-0,0025	
3			26,1751	26,1751	0,0000	5,00·10 <sup>5</sup>
	3		6,4633	6,4659	+0,0026	

Ниже представлены фотографии образцов и контробразцов после испытания, на которых видны дрожки трения с пленками, сформировавшимися в результате избирательного переноса.



Рисунок 3 – Образец 1 и контробразец 1



Рисунок 4 – Образец 2 и контробразец 2



Рисунок 5 -- Образец 3 и контробразец 3

На рисунке 6 показан результат избыточного наполнения контробразца составом «Литол 24 + CuCl<sub>2</sub>·2H<sub>2</sub>O+Глицерин»



Рисунок 6 - Контробразец составом «Литол 24 + CuCl<sub>2</sub>·2H<sub>2</sub>O+Глицерин»

### Вывод

В результате проведенных экспериментов установлено, что реализация избирательного переноса (ИП) в парах трения металл-металлополимер возможно. Следовательно, применение металлополимеров с одновременным использованием ИП в местах посадки подшипников качения может продлить межремонтный период узлов, в которых даже при наличии слоя металлополимера нарушаются посадочные поверхности подшипников качения из-за фреттинга.

1. Гаркунов Д.Н. Триботехника (износ и безызносность): Учебник. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: «Издательство МСХА», 2001. 616 с., ил. 280.
2. Кербер, М.Л. Полимерные композиционные материалы: структура, свойства, технология: учебное пособие / М.Л. Кербер, В.М. Виноградов, Г.С. Головкин и др.; под ред. А.А. Берлина. – СПб., Профессия, 2008 – 560 с., ил.
3. Металлополимеры Лео [Электронный ресурс] – URL: <http://www.leopolimer.ru/Albom.pdf> (дата обращения 19.01.21).
4. Металлополимеры Weicon [Электронный ресурс] – URL: <http://weicon-shop.ru/category/metallopolimery/> (дата обращения 19.01.21).
5. Материалы для ремонта и восстановления металла Belzona [Электронный ресурс] – URL: <https://www.belzona.com/ru/products/1000.aspx> (дата обращения 15.04.18).
6. Металлополимеры Chester Molecular [Электронный ресурс] – URL: <http://www.ditz-spb.ru/node/46> (дата обращения 19.01.21).

## ПРИМЕНЕНИЕ ВОЛНОВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ РАСТВОРОВ ХИТОЗАНА

С.Р. Ганиев<sup>1</sup>, В.П. Касилов<sup>1</sup>, О.Н. Кислогубова<sup>1</sup>, О.А. Бутикова<sup>1</sup>, Е.М. Конев,  
Н.Е. Кочкина<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, Москва, Россия

<sup>2</sup>Институт химии растворов им. Г.А. Крестова РАН, Иваново, Россия

Исследовано влияние волновой обработки на процесс растворения хитозана в 1%-ой уксусной кислоте. Показано, что применение волновой технологии позволяет сократить продолжительность процесса растворения полимера с 1-2 суток до 10-20 мин. Растворы хитозана, полученные традиционным перемешиванием и с помощью волновых резонансных воздействий имеют схожие реологические характеристики.

Природный полисахарид хитозан, благодаря совокупности своих ценных свойств (антибактериальной активности, биосовместимости, безопасности и др.) находит широкое применение в различных отраслях промышленности, прежде всего, в медицине и фармацевтике. Но основной сложностью в практическом применении хитозана является его плохая растворимость в воде, которая обусловлена сильным межмолекулярным взаимодействием в макромолекулах полисахарида [1, 2] и существенно зависит от его молекулярной массы и степени деацетилирования

Для улучшения растворимости хитозана в водной среде биополимер подвергают химической модификации [3], используя для предварительного приготовления раствора полисахарида слабо концентрированные органические и минеральные кислоты [4] - муравьиную, молочную, лимонную, уксусную, соляную и другие. Наиболее часто применяют уксусную кислоту в узком диапазоне концентраций 0.5-2 масс. %, допустимо до 5 масс. % [5], при этом приготовления уксуснокислых растворов хитозана составляет от 4 часов до 1 суток.

Для интенсификации процесса растворения хитозана в данной работе было использовано волновое воздействие. Известно, что волновые технологии, основанные на методах нелинейной волновой механики [6], позволяют на принципиально новом уровне решать различные технологические задачи, в том числе диспергирование и перемешивание многофазных сред. Цель данной работы состояла в исследовании влияния волновых резонансных воздействий на эффективность растворения хитозана и оценке реологических свойств полученных растворов.

Приготовление растворов хитозана с концентрацией 1 масс. % и 2 масс. % осуществляли растворением навески биополимера в 1%-ой уксусной кислоте, механическое перемешивание образцов проводили с помощью волнового аппарата оригинальной конструкции, разработанной в НЦ НВМТ РАН. Обработка хитозановых дисперсий с использованием волновых резонансных воздействий велась в течение 20 мин при частоте 53.6 Гц. Для оценки эффективности протекания процесса растворения проводили визуальный анализ состояния образцов через заданные промежутки времени (1, 5, 10, 20 мин). В качестве образцов сравнения служили уксуснокислые суспензии хитозана, полученные традиционным способом перемешивания с использованием

лабораторного встряхивателя MLW THYS 2 (Германия) в термостатируемых условиях при нагреве до 40°C. Растворение хитозана при наложении волновых резонансных воздействий протекает гораздо быстрее: наблюдалось, что при обработке системы, включающей 1% биополимера практически полное растворение последнего достигается уже по истечении 10 мин обработки в волновом аппарате. А через 20 мин от начала процесса полученный образец представляет собой гомогенный, прозрачный раствор без видимых включений в виде гель-фракции.

Реологические характеристики полученных хитозановых растворов исследовали на реометре MCR 302e (AntonPaarGmbH, Австрия) в режиме осцилляции при температуре 25°C.

Полученные данные представлены на рис 1.

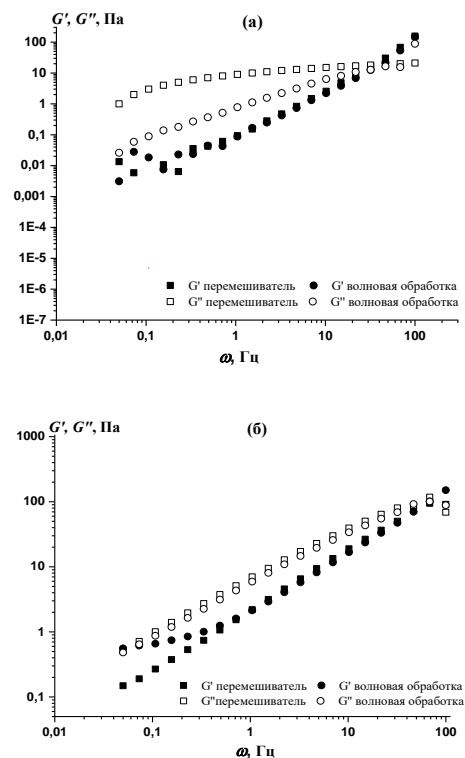


Рис. 1. Зависимости модуля накопления ( $G'$ ) и модуля упругости ( $G''$ ) от частоты деформации ( $\omega$ ) для растворов хитозана с концентрацией полисахарида 1% (а) и 2% (б), полученных с помощью волновых резонансных воздействий и традиционного способа перемешивания с применением лабораторного встряхивателя.

Рис. 1 демонстрирует зависимости компонент комплексного модуля от частоты деформации

исследуемых образцов. Все исследуемые системы имеют свойства жидкостей, их модуль потерь  $G''$  превышает модуль упругости  $G'$  в изученном диапазоне частот [7]. Применение волновых резонансных воздействий в процессе растворения хитозана не оказывает влияние на значения модулей в случае 2%-го раствора полисахарида; для 1%-го раствора модуль потерь не меняется, а значения модуля накопления снижаются незначительно. Проведенные исследования показали, что волновая обработка способствует существенному ускорению процесса набухания и последующего растворения хитозана, не приводя к изменению вязкоупругих характеристик его растворов. Результаты данной работы могут послужить основой для усовершенствования технологии приготовления гелей на основе хитозана для пищевой, медицинской промышленности и косметологии, а также модификации полисахарида за счет сокращения продолжительности стадии растворения и улучшения технико-экономических показателей.

1. Yui T., Imada K., Okuyama K., Obata Y., Suzuki K., Ogawa K. Molecular and crystal structure of the anhydrous form of chitosan, *Macromolecules*, 1994 V. 27, № 26, pp. 7601-7605;
2. Прусов А. Н., Прусова С. М., Радугин М. В., Захаров А. Г. Взаимосвязь степени кристалличности и влагопоглощения полисахаридов, *Журнал Физической Химии*, 2014, Т. 88, № 5, с. 830-835;
3. Madera-Santana T. J., Herrera-Méndez C. H., Rodríguez-Núñez J. R. An overview of the chemical modifications of chitosan and their advantages, *Green Materials*, 2018, V.6, № 4, pp. 131-142,
4. Irom B. C., Kavitha K., Rupeshkumar M. et al. Applications of natural polymer chitosan and chitosan derivatives in drug delivery: A Review, *Res. J. Pharm. Biol. Chem. Sci.*, 2012, V. 3, № 4, pp. 309-316;
5. Миронов А. В., Вихорева Г. А., Кильдеева Н. Р., Успенский С. А. Причины нестабильности вязкостных свойств уксусно кислотных растворов хитозана, *Высокомолекулярные соединения*, Сер. Б., 2007, Т. 49, № 1, С. 136-138;
6. Ганиев Р. Ф., Ганиев С. Р., Касилов В. П., Пустовгар А. П. Волновые технологии в инновационном машиностроении. М.: Институт компьютерных исследований. 2014. 106 с
7. Picout D. R., Ross-Murphy S. B. Rheology of biopolymer solutions and gels, *Sci. World J.* 2003, V. 3, pp. 105-121

## К ВОПРОСУ ПРОВЕДЕНИЯ ИСПЫТАНИЙ ПРИ ФРЕТТИНГЕ

Б.М. Гантимиров<sup>1</sup>, А.К. Аноприенко

<sup>1</sup>Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, Москва, Россия

Рассмотрены проблемные вопросы, связанные с определением величины износа при проведении испытаний на фреттинг- изнашивание различных по свойствам конструкционных материалов для узлов трения

**Ключевые слова:** фреттинг, фреттинг-коррозия, профилограмма, ГОСТ 23.211-80

Отсутствие единого мнения о механизме фреттинг-коррозии находит свое отражение в разнообразии предложенных для обозначения этого явления терминов: «окисление от трения», «коррозия трения», «контактная коррозия», «коррозия подгонки», «ложное бринеллирование», «ржавчина давления», «междуповерхностная коррозия», «окислительный износ» и др. [1].

Некоторые из перечисленных терминов, очевидно, вообще спорны, другие отражают процессы, имеющие второстепенное значение, и характеризуют повреждение лишь визуально.

В 1911 году впервые фреттинг-коррозия была описана как специфичный вид изнашивания сопряженных металлических поверхностей такими учеными, как В.Н. Роуз, Е.М. Иден и Е.Л. Кенингом. Они наблюдали образование коричневого порошка на образцах для усталостных испытаний. Сам термин «*фреттинг-коррозия*» был введен только в 1927 году Г.А. Томлинсоном.

Р.Б. Уотерхауз описывал явление фреттинг-коррозии как специфическое повреждение, возникающее при соприкосновении поверхностей, номинально неподвижных относительно друг друга, которые, в свою очередь, подвергаются микроскопическому колебательному относительно движению. Именно такое движение и возникающие повреждения, по мнению Р.Б. Уотерхауза, и описываются термином «*фреттинг*» [1].

В России выполняется много исследований по изнашиванию при фреттинге и фреттинг-коррозии и публикуются большое количество их результатов.

### Методика испытаний

Работа выполнялась на установке (см. рисунок 1) несколько отличающейся от приведённой в ГОСТ 23.211-80 «Метод испытаний материалов на изнашивание при фреттинге и фреттинг-коррозии»

В отличие от установки по ГОСТ 23.211-80 контакт образца и контрообразца приходил по вертикали, что позволило продуктам изнашивания в виде мелкодисперсного порошка собираться около зоны трения снаружи и внутри зоны трения (рисунок 2). Образцы для испытаний соответствовали требованиям ГОСТ 23.211-80.



Рисунок 1 – Установка для испытания материалов на фреттинг-изнашивание



Рисунок 2 – Образец из стали 20 после испытания с контрообразцом из стали 20

Можно утверждать, что явление фреттинга и фреттинг-коррозии довольно сложные и их изучение требует не только одного желания, но и экспериментального оборудования, глубоких знаний.

Если рассмотреть ГОСТ 23.211-80, то из него следует, что величину износа следует определять обработкой профилограмм, которые следует снимать с восьми трасс на испытанной поверхности со следами износа.

Методика обработки профилограммы требует серьезного отношения к их записи обработке и последующей обработке. Кроме того, если фреттинг

реализуется при возвратно-вращательном движении контробразца по образцу, а следы финишной обработки на поверхности образцов в виде параллельных линий, то результаты на одной поверхности трения испытанного образца могут серьёзно отличаться и приходится вычислять среднюю величину износа. Таким образом, мы определяем некоторую среднюю величину линейного износа, а повреждения поверхности трения могут быть локальными и не всегда быть записаны при профилографировании.

При испытаниях пары полимер-металл или мягких материалов, довольно часто полимер «намазывается» на стальной образец и профилограмма имеет другое строение в отличие от первого варианта и это не оговорено в стандарте. Поверхности мягких материалов могут иметь различные глубины изношенной дорожки на профилограммах одного и того-же образца.

Для использования весового метода необходимо увеличить время фреттинга, чтобы получить износ не менее точности весов. Если число циклов будет равно  $2 \cdot 10^6$  — это 24 часа непрерывного трения.

Нами были проведены испытания образцов из металлов и металлополимеров, которые все чаще применяют при сборке и восстановлении размеров изношенных металлических деталей. При выполнении этих исследований возникали вышеизложенные трудности.

Когда используем методику по ГОСТ 23.211-80 необходимо выполнять следующие действия.

Записываем 8 профилограмм в соответствии с рисунком. Далее обрабатываем их и находим средние линии, расстояния между которыми и есть величина линейного износа на дано «трассе». По формулам, представленным в ГОСТе, вычисляем среднюю величину линейного износа образца и интенсивность изнашивания. Средний износ  $j$ -того образца ( $h_j$ ), мкм, вычисляют по формуле:

$$h_j = \frac{\sum_{i=1}^8 h_i}{8} \quad (1)$$

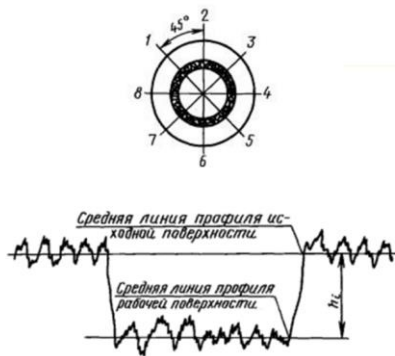


Рисунок 3 – Схема снятия профилограмм с поверхности образцов

Вычисляют интенсивность изнашивания ( $I_h$ ) испытываемого материала по формуле:

$$I_h = \frac{\sum_{i=1}^8 h_i}{2ANk} = \frac{h_j}{2ANk} \quad (2)$$

где  $A$  — амплитуда, мкм;

$N$  — количество циклов испытаний;

$k$  — количество испытанных образцов.

Указанные вычисления производят с погрешностью не более  $1 \cdot 10^{-8}$ .

Если имеется перенос материала контробразца на поверхность образца, которая подвергается профилографированию, то величина износа будет занижена.

Видимо при исследовании изнашивания при фреттинге следует использовать не только оба метода: профилографирования и весовой метод, а разработать ещё способ, который позволит определять точно износ.

Ниже представлены фотографии образцов из различных материалов, прошедших фреттинг-изнашивание (рисунки 4, 5, 6).



Рисунок 4 – Терморасширенный графит и сталь12X18Н10Т



Рисунок 5 – Латунь и латунь



Рисунок 6 - Сталь 20 и сталь 20

1. Н.Л. Голего, Ф.Я. Алябьев, и В.В. Шевеля Фреттинг-коррозия металлов. - Киев: Издательство «Техника», 1974. - 272 с.

2. Уотерхауз Р.Б. Фреттинг-коррозия. Пер. с англ. Под ред. канд. техн. наук Г.Н. Филимонова. - Л.: «Машиностроение» (Ленингр. отд-ние), 1976. - 272 с.

## ПРОЧНОСТНОЙ РАСЧЕТ ДИАФРАГМЕННОГО ЭЛЕКТРОНАСОСА С ПОМОЩЬЮ ЦИФРОВЫХ МОДЕЛЕЙ

Гаффанов Р.Ф.,<sup>1</sup> Михайлов Д.С.,<sup>2</sup> Бодунов Д.М.,<sup>3</sup>

<sup>1</sup> ООО «РАССВЕТ», <sup>2</sup> ООО «ДСМ Металлургия»,

<sup>3</sup> Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, Москва, Россия; [d-bodounov@mail.ru](mailto:d-bodounov@mail.ru)

В работе представлены результаты исследования, связанного с проведением прочностного и гидродинамического расчёта узлов диафрагменного электронасоса ЭДН5 с четырёхступенчатым редуктором и кривошипно-шатунным механизмом ЭДН5-4-3500-Р1-ТМ, предназначенного для перекачки сырой нефти.

Диафрагменный электронасос относится к классу объемных насосов. В состав насоса ЭДН входит гидравлическая и приводная часть (электродвигатель, редуктор, плунжерный насос). Приводная часть заполнена рабочим маслом. Задачей приводной части является создание усилия и его передачи на диафрагму посредством рабочего масла. При работе насоса ЭДН крутящий момент от электродвигателя через коническую передачу передается в поступательное движение плунжера и рабочей диафрагмы [1]. Перекачиваемая жидкость поступает через фильтр и всасывающие трубки в ЭДН всасывающий и нагнетательный клапана в гидрокоробку, в состав которой входит диафрагма, разделяющая насос ЭДН на две части и выполняющая две функции:

- вытеснение перекачиваемой жидкости;
- изолирование приводной части от агрессивной перекачиваемой жидкости.

Всасывание в гидрокоробку происходит при ходе плунжера вниз и вытесняется в колонну НКТ через нагнетательный клапан и шламовые трубки при ходе плунжера вверх. При этом давление, развиваемое в гидрокоробке над плунжером 35 МПа.

Кабельная линия обеспечивает подвод электроэнергии к электродвигателю через токовод. Кабель крепится к патрубку насоса ЭДН и насосно-компрессорным трубам металлическими поясами, или кабельными протекторами.

Проведен анализ напряжённого состояния деталей, возникающего в процессе эксплуатации в течение 18000 часов в наиболее нагруженных узлах ЭДН [2]:

- редуктор четырёхступенчатый с кривошипно-шатунным механизмом;
- в плунжерная пара (плунжер и втулка плунжера);
- коническая пара.

В работе представлены результаты исследований при проведении расчета эффективности отделения газа от жидкости гравитационным газосепаратором входного фильтрующего модуля при поступлении жидкости в гидрокоробку, а также анализ напряжённого состояния всасывающего и нагнетательного клапанов и рабочей диафрагмы.

Расчет выполнен с учетом основных эксплуатационных нагрузок с использованием многоцелевого универсального комплекса инженерного анализа конструкций АРМ Multiphysics 19 и инженерными методами по общепринятым методикам [3, 4].

Также проведен расчет эффективности отделения газа от жидкости гравитационным газосепаратором входного фильтрующего модуля при

поступлении жидкости в гидрокоробку, а также анализ напряжённого состояния всасывающего и нагнетательного клапанов и рабочей диафрагмы.

Ниже представлены некоторые из полученных результатов исследования.

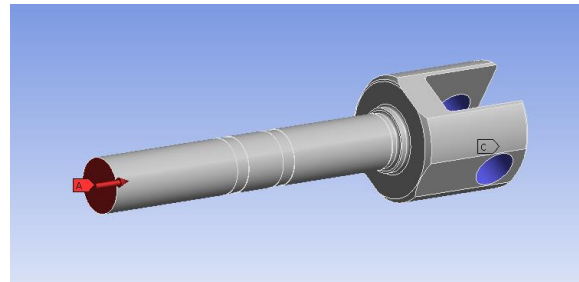


Рисунок 1 – Плунжер, испытывающий сжимающую нагрузку.

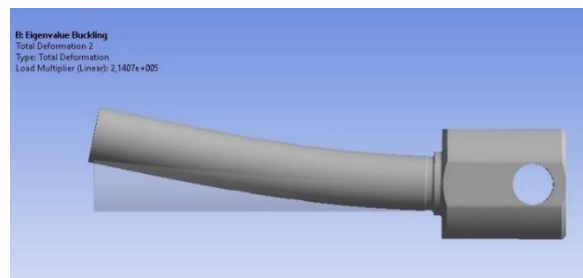
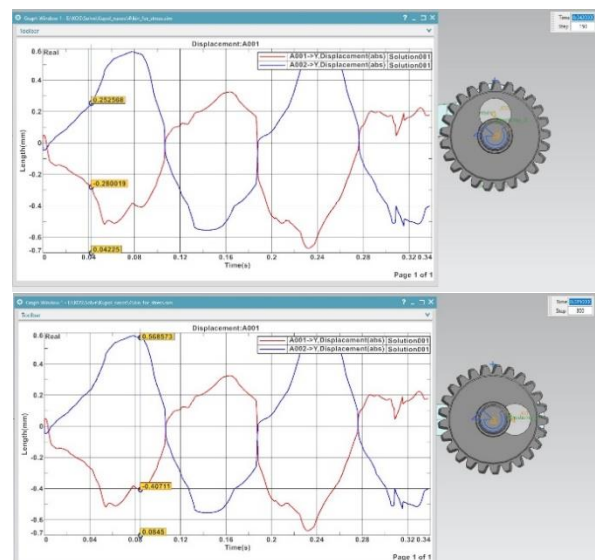


Рисунок 2 – Деформации в плунжере при 214 070 Н

Нагрузка, действующая на плунжер – 35 МПа. Площадь поперечного сечения цилиндрической части плунжера – 312,57 мм<sup>2</sup>. Отсюда нагрузка, действующая на плунжер в рабочих условиях: 10940 Н. На рисунке 3 показаны величины перемещения кончика и основания плунжера.





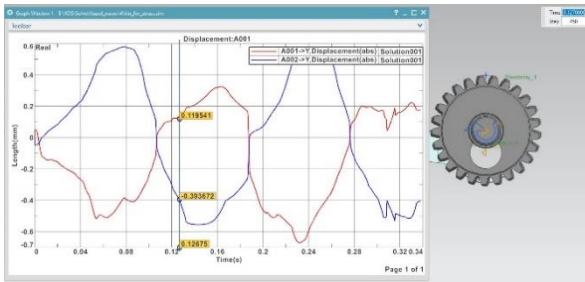


Рисунок 3 – Величины неосевых перемещений кончика и основания плунжера

Необходимо отметить, что вынужденные неосевые перемещения плунжера вызваны колебательным процессом ведущего его кронштейна. При этом кинематический решатель рассматривает тело как абсолютно жесткое, отсюда и преувеличенные перемещения кончика, однако в поверочном прочностном анализе такие перемещения будут практически нивелированы за счет податливости и демпфирования взаимодействующих тел.

При расчете на прочность плунжера и втулки рассматривались 4 наиболее нагруженных положения: максимальное неосевое перемещение основания плунжера, поворот пары на 90 град, поворот пары на 180 град и поворот пары на 270 град.

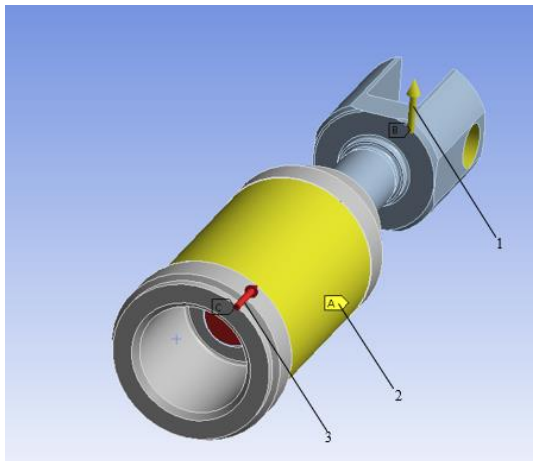


Рисунок 4 – Прочность плунжера и втулки

Результаты расчета показаны на рисунке 5.

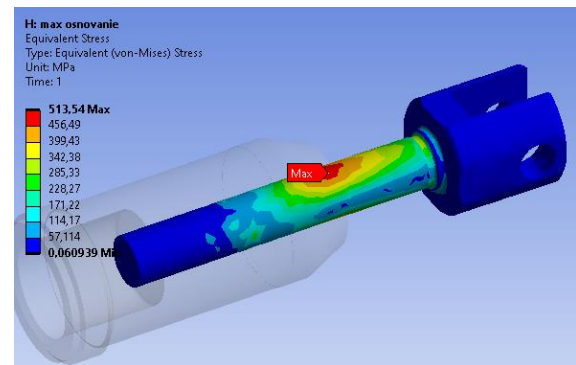
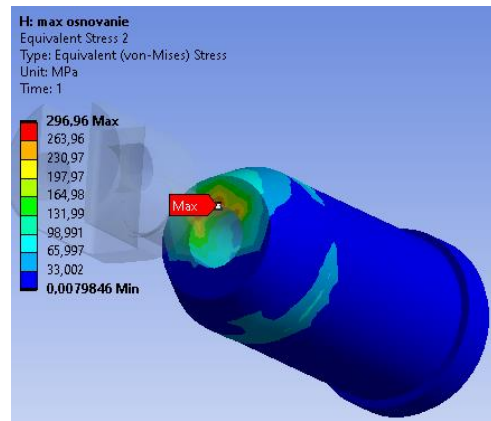


Рисунок 5 – Поля напряжений в плунжере и втулке при максимальном неосевом перемещении основания плунжера

Плунжер испытывает изгибающую нагрузку в процессе работы, от чего возникают завышенные и близкие к пределу текучести напряжения у основания детали. Подобные же концентраторы напряжения возникают и во втулке. Оба процесса имеют циклический характер, а следовательно, могут привести к многоцикловой усталости. Во избежание подобных уровней напряжения необходимо исключить неосевые перемещения плунжера. Для этого необходимо, чтобы кронштейн в месте крепления с плунжером не передавал пульсации.

1. ПНАЭ Г 7-002-86. Нормы расчёта на прочность оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок.
2. Structural alloys handbook/ H.J. Hucek/ Mechanical Properties Data Center, Battelle Columbus Laboratories, Ohio/ 1982.
3. СТ ЦКБА 005.2-2004/ 2004. Арматура трубопроводная. Металлы, применяемые в арматуростроении. Часть 2. Справочные данные о свойствах материалов.
4. Technical Report on Low Cycle Fatigue Properties Ferrous and Non-Ferrous of Materials, SAE J1099 / 2002.

## РОЛЬ СИМУЛЯТОРОВ В РАЗРАБОТКЕ И ТЕСТИРОВАНИИ РОБОТОТЕХНИКИ: АНАЛИЗ ПОПУЛЯРНЫХ РЕШЕНИЙ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ

А.Д. Горохов<sup>1</sup>, А.М. Угурчиев<sup>1</sup>, В.П. Шаргородский<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Институт машиноведения им. А.А. Благоднарова РАН, Москва, Россия; [newandre1955@gmail.com](mailto:newandre1955@gmail.com)

В докладе рассматривается роль симуляторов в разработке и тестировании робототехники как важного инструмента для повышения эффективности процессов разработки и оптимизации жизненного цикла роботов. Освещаются проблемы выбора подходящих симуляторов и критерии их адекватности для различных типов роботов и сценариев. Рассматриваются популярные решения, такие как Gazebo, Webots, CoppeliaSim, Mujoco и NVIDIA Isaac, с акцентом на их функциональность, простоту использования и возможности интеграции с другими инструментами. Особое внимание уделяется перспективам развития симуляторов, включая влияние искусственного интеллекта и виртуальной реальности, а также улучшению точности и производительности моделей для достижения приемлемых рисков и повышения надежности робототехнических систем.

Современная робототехника находится в состоянии стремительного развития, и симуляторы стали неотъемлемой частью этого процесса. Они обеспечивают безопасную и эффективную среду для тестирования новых технологий, воспроизводя условия эксплуатации роботов в виртуальной реальности. Это позволяет разработчикам значительно ускорить процесс проверки работоспособности, минимизировать затраты и исключить риски, связанные с повреждением оборудования.

Основное предназначение симуляторов заключается в возможности моделирования сложных сценариев. Это особенно важно в тех случаях, когда проведение реальных испытаний сопряжено с большими финансовыми затратами или опасностью для окружающей среды. Например, роботы, предназначенные для экстремальных условий, таких как высокая температура, радиация или сильный ветер, могут быть протестированы виртуально без риска выхода из строя дорогостоящих компонентов.

Симуляторы оказывают значительное влияние на все этапы разработки робототехники. Они позволяют инженерам создавать прототипы, тестировать различные сценарии и анализировать производительность устройств еще до их физической сборки. Это сокращает время на разработку, увеличивает точность результатов и открывает возможность для параллельной работы над несколькими задачами. Такие системы также незаменимы при воспроизведении аварийных или трудно реализуемых в реальной жизни ситуаций, таких как столкновения или работа в условиях низкой гравитации.

На рынке симуляторов для робототехники представлено множество решений, каждое из которых обладает своими особенностями, преимуществами и недостатками. Основные из них включают Gazebo, Webots, CoppeliaSim, Mujoco, NVIDIA Isaac, Unity ML-Agents, PyBullet и OpenRAVE [2-9].

Gazebo [2] выделяется интеграцией с ROS [1], возможностью моделирования сложных сценариев и поддержкой плагинов. Это делает его особенно востребованным в промышленности и разработке автономных систем. Однако он имеет высокий порог входа для новичков и предъявляет значительные требования к ресурсам.

Webots [3] ориентирован на образовательные цели

и начальную разработку, предоставляя интуитивный интерфейс, поддержку Python и C++, а также библиотеку готовых моделей. Его основным недостатком являются ограниченные возможности кастомизации физического движка, что ограничивает его применение в более сложных проектах.

CoppeliaSim [4] нацелен на научные исследования и обучение. Поддержка множества сенсоров, гибкая настройка сценариев и интеграция с внешними API делают его подходящим для сложных экспериментов. Однако настройка сложных проектов может быть трудоемкой.

Mujoco [5] привлекает высокой точностью физического моделирования и оптимизацией для задач обучения с использованием ИИ. Это делает его популярным выбором для исследований и разработки алгоритмов управления. В то же время этот симулятор имеет ограниченную область применения, требуя глубоких знаний в области моделирования.

NVIDIA Isaac [6] разработан для высокопроизводительных симуляций с использованием GPU и искусственного интеллекта. Он используется в автономном транспорте и робототехнике в реальном времени. Главными минусами являются высокая стоимость оборудования и сложность начальной настройки.

Unity ML-Agents [7] предлагает универсальную платформу с мощным визуальным движком и интеграцией с машинным обучением. Он применяется в обучении роботов, играх и визуализации. Однако его недостатками являются ограниченная точность физического моделирования и фокусировка на графике.

PyBullet [8] представляет собой легкий и удобный инструмент с открытым исходным кодом, который отлично подходит для быстрых прототипов и исследований. Но его возможности ограничены при моделировании сложных сценариев.

OpenRAVE [9] ориентирован на задачи планирования движений и интеграцию с алгоритмами управления. Основное применение этого симулятора связано с робототехникой и манипуляторами. Тем не менее, устаревший интерфейс и ограниченная поддержка новых технологий снижают его конкурентоспособность. В табл. 1 представлено сравнение популярных робототехнических систем.

Таблица 1. Сравнение популярных симуляторов робототехнических систем

Симулятор	Ключевые особенности	Применение	Минусы
Gazebo	Интеграция с ROS, моделирование сложных сценариев, поддержка плагинов.	Промышленность, автономные системы.	Высокий порог входа для новичков, требовательность к ресурсам.
Webots	Интуитивный интерфейс, поддержка Python и C++, библиотека готовых моделей.	Образование, начальная разработка.	Ограниченные возможности для кастомизации физического движка.
CoppeliaSim	Поддержка множества сенсоров, гибкая настройка сценариев, интеграция с внешними API.	Научные исследования, обучение.	Может быть сложным в настройке для сложных проектов.
Mujoco	Высокая точность физического моделирования, оптимизирован для задач обучения с использованием ИИ.	Исследования, разработка алгоритмов управления.	Исследования, разработка алгоритмов управления.
NVIDIA Isaac	Высокая производительность, интеграция с GPU и ИИ, поддержка обучения автономных систем.	Автономный транспорт, робототехника в реальном времени.	Требует мощного оборудования, сложность настройки для начального использования.
Unity ML-Agents	Универсальная платформа, мощный визуальный движок, интеграция с машинным обучением.	Игры, визуализация, обучение роботов.	Ограниченная точность физического моделирования, фокус на графике.
PyBullet	Легкий, простой интерфейс, открытый исходный код, поддержка задач машинного обучения.	Исследования, быстрые прототипы.	Ограниченные возможности моделирования сложных сценариев.
OpenRAVE	Ориентирован на планирование движений, интеграция с различными алгоритмами управления.	Робототехника, манипуляторы.	Устаревший интерфейс, ограниченная поддержка новых технологий.

Сфера применения симуляторов охватывает множество направлений. В разработке автономных транспортных средств они используются для создания сценариев дорожного движения, что позволяет тестировать системы в условиях, близких к реальным. Промышленные роботы проходят испытания в виртуальной среде, где оттачиваются алгоритмы их взаимодействия с машинами и людьми. Роботы, предназначенные для исследования труднодоступных мест, таких как глубоководные районы или космическое пространство, также проходят тестирование в симуляторах. Кроме того, они активно применяются в логистике, где помогают оптимизировать маршруты движения и предотвращать аварии на складах.

Перспективы развития технологий симуляции обещают вывести робототехнику на новый уровень. В ближайшие годы ожидается активная интеграция искусственного интеллекта, что ускорит адаптацию роботов к изменяющимся условиям. Технологии виртуальной и дополненной реальности позволят разработчикам взаимодействовать с симуляцией в реальном времени, что улучшит реалистичность тестирования. Также важно развитие вычислительных мощностей, которое обеспечит моделирование сложных физических процессов с большей точностью.

Таким образом, симуляторы играют важную роль в создании робототехнических систем, снижая риски и ускоряя разработку. От выбора подходящего инструмента зависит успех проекта, будь то Gazebo для промышленных задач, Webots для обучения или NVIDIA Isaac для работы с автономными системами. В будущем симуляторы будут еще более активно использоваться в робототехнике, открывая перед разработчиками новые горизонты.

Симуляторы позволяют проводить эксперименты в безопасной DiSEct среде, минимизируя риски для

людей и оборудования. Они позволяют сократить время и затраты на физические прототипы. В свою очередь это позволяет быстро тестировать различные идеи и концепты. Симуляция является гибкой средой, где можно менять условия эксперимента, например окружающую среду или параметры системы, что бывает затруднительно реализовать в реальном мире. Так же к плюсам симуляции можно отнести то, что она может использоваться для обучения операторов и инженеров, позволяя им практиковаться в различных сценариях без каких-либо последствий.

Однако у симуляторов есть и недостатки. Зачастую симуляторы упрощают моделирование реальных процессов, что может привести к ошибкам. Для них необходимо иметь сложное программное обеспечение, и, зачастую, необходимо знание программирования и моделирования.

В качестве примера рассмотрим узкоспециализированный симулятор для роботизированной резки, который представили исследователи из NVIDIA под названием DiSEct [10]. Он способен прогнозировать силу воздействия на режущий предмет при разрезании мягких структур, в том числе овощей и фруктов. Ученые долгое время исследовали моделирование поведения роботов в процессе резки (рис. 1). Данная задача подразумевает необходимость подстраиваться под жесткость материалов, силу приложенного давления и саму технику резания.

Для достижения результатов исследователи применяли методы, основанные на обратной связи для настройки адаптации контроллера. Тем не менее, данная адаптация требует очень точной подгонки параметров к каждому конкретному случаю. Хотя такие подходы показали свою эффективность в промышленных условиях, они не продемонстрировали высоких результатов при работе с мягкими объектами.

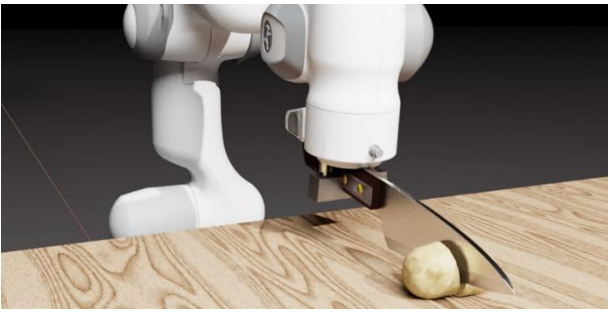


Рис. 1. Симуляция резки картофеля.

Исследователи поставили перед собой задачу создать дифференцируемые алгоритмы для управления. Однако реализовать дифференцируемое моделирование резки оказалось непросто из-за того, что это процесс прерывистого характера. В результате авторы разработки нашли способ, который обеспечивает непрерывное моделирование процесса распространения трещин и механики повреждений в разрезаемом объекте.

В DiSEct обрабатываемый объект представлен в виде трехмерной сетки, формируемой из четырехгранных элементов. Алгоритм дублирует те элементы сетки, которые пересекают поверхность реза, добавляя также дополнительные «виртуальные» вершины на границах этих элементов, где происходит разрез (рис. 2). Виртуальные узлы обеспечивают дополнительные степени свободы, позволяя более точно воспроизводить динамику контакта ножа, который наносит давление и осуществляет рез. Затем в системе DiSEct добавляются пружины, соединяющие виртуальные узлы по обе стороны от ножевой линии (рис. 3). Эти резательные пружины позволяют моделировать механику повреждений и распространение трещин в непрерывной манере, ослабляя их в соответствии с силой давления ножа на сетку. Этот подход к непрерывному моделированию обеспечивает возможность дифференциации динамики, что позволяет вычислять градиенты для параметров, определяющих свойства материалов или пути движения ножа.

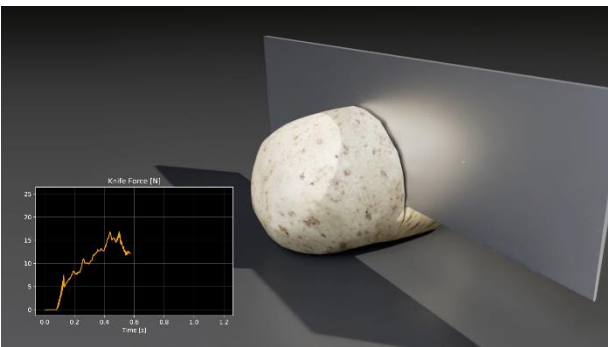


Рис. 2. Моделирование динамики сил ножа.

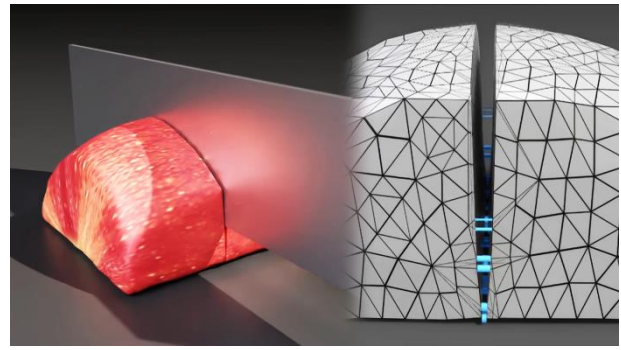


Рис. 3. Моделирование процесса резки методом конечных элементов.

В симуляторе используется преобразование исходного кода, которое автоматически генерирует ядра CUDA для реализации прямого и обратного проходов в процессе моделирования. Такой метод дает возможность реализовывать сложные сценарии моделирования, которые эффективно распараллеливаются на графическом процессоре.

1. YoonSeok Pyo и др. ROS Robot Programming / Seoul, Republic of Korea: Published by ROBOTIS Co.,Ltd., 2017, - 487 с., ил.
2. Gazebo Tutorials. [Электронный ресурс] URL: <https://classic.gazebosim.org/tutorials> (Дата обращения: 01.11.2024).
3. Cyberbotics: Robotics simulation with Webots. [Электронный ресурс] URL: <https://cyberbotics.com/> (Дата обращения: 01.11.2024).
4. Robot simulator Coppeliasim: create, compose, simulate, any robot - Coppelias Robotics. [Электронный ресурс] URL: <https://www.coppeliasrobotics.com/> (Дата обращения: 01.11.2024)
5. MuJoCo — Advanced Physics Simulation. [Электронный ресурс] URL: <https://mujoco.org/> (Дата обращения: 01.11.2024).
6. Isaac - AI Robot Development Platform | NVIDIA Developer. [Электронный ресурс] URL: <https://developer.nvidia.com/isaac> (Дата обращения: 01.11.2024).
7. Unity - Manual: ML Agents. [Электронный ресурс] URL: <https://docs.unity3d.com/2023.1/Documentation/Manual/com.unity.ml-agents.html> (Дата обращения: 01.11.2024).
8. Bullet Real-Time Physics Simulation | Home of Bullet and PyBullet: physics simulation for games, visual effects, robotics and reinforcement learning. [Электронный ресурс] URL: <https://pybullet.org/wordpress/> (Дата обращения: 01.11.2024).
9. OpenRAVE | Home. [Электронный ресурс] URL: <https://openrave.org/> (Дата обращения: 01.11.2024).
10. DiSEct - Differentiable Cutting Simulator. [Электронный ресурс] URL: <https://diff-cutting-sim.github.io/> (Дата обращения: 04.11.2024).

## РОЛЬ МИКРОГЕОМЕТРИИ ПОВЕРХНОСТЕЙ ПРИ ОЦЕНКЕ КОНТАКТНОЙ ЖЕСТКОСТИ СОПРЯЖЕНИЙ

И.Г. Горячева<sup>1</sup>, А.А. Яковенко<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Институт механики МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия; [goryache@ipmnet.ru](mailto:goryache@ipmnet.ru)

<sup>2</sup>Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН, Москва, Россия

**Аннотация** Представлен метод решения задач контакта деформируемых тел с учетом их поверхностной шероховатости. Построены решения контактных задач для шероховатого штампа и полупространства (упругого, вязкоупругого, двухслойного). Результаты моделирования сопоставлены с экспериментальными результатами, полученными во фрикционных испытаниях по схеме шарик – стальной диск с покрытием на основе MoS<sub>2</sub>.

### Введение

Наличие на поверхности тел микрорельефа различной природы приводит к несплошности области контактного взаимодействия. Дискретность контакта очень важна при исследовании таких процессов, как адгезия и когезия, фрикционный разогрев, массоперенос, износ, усталостное разрушение и др. Поэтому в последнее время большое внимание уделяется построению моделей контактного взаимодействия шероховатых деформируемых тел с целью исследования влияния параметров шероховатости тел на характеристики контактного взаимодействия и процессы, сопутствующие этому взаимодействию.

Для построения модели контакта шероховатых тел предлагается использовать двухуровневый подход [1], согласно которому выделяется два характерных масштаба длины: макро, соответствующий размерам номинальной области контакта, и микро, соответствующий характерному размеру неровностей и расстоянию между ними. На микромасштабе решение контактной задачи позволяет определить фактические характеристики контакта, а также дополнительную податливость тел, которая затем используется при решении контактной задачи на макромасштабе. Использование концепции дополнительной податливости для определения номинальных контактных характеристик на макроуровне впервые было предложено Штаерманом [2].

### Постановка задачи

Рассматривается внедрение шероховатого штампа, макроформа которого описывается функцией  $F(x, y)$ , в деформируемое основание (рис. 1). Следуя концепции дополнительной податливости, интегральное уравнение для определения номинальных контактных давлений  $p(x, y)$  и номинальной площади контакта  $\Omega$  записывается в следующем виде:

$$\iint_{\Omega} K(x, y, x', y') p(x', y') dx' dy' + C[p(x, y)] = D - F(x, y), \quad (1)$$

где  $C[p]$  – функция дополнительной податливости,  $K(x, y, x', y')$  – ядро интегрального оператора, зависящее от выбранной модели деформируемого тела, а  $D$  – глубина внедрения штампа.

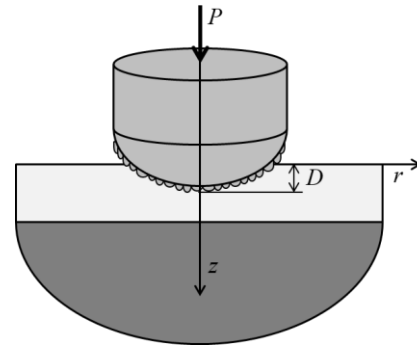


Рис. 1. Схема контакта шероховатого штампа с деформируемым телом

Функция дополнительной податливости  $C[p]$  зависит от параметров микрогеометрии тел и определяется либо экспериментально, либо на основе решения контактной задачи на микроуровне.

### Расчет контактных характеристик на микроуровне

Чтобы решить контактную задачу на микромасштабе прежде всего необходимо описать поверхностную шероховатость. Для этого существуют различные подходы, выбор которых зависит от характера микрорельефа, определяемого видом обработки поверхности. Так, в случае случайного характера микрорельефа применяется статистический подход. Одна из самых популярных контактных моделей в рамках такого подхода является модель Гринвуда-Вильямсона [3]. С использованием этой модели, а также принципа локализации [4] строится решение задачи о контакте полупространств с шероховатой и гладкой поверхностями с учетом взаимного влияния неровностей.

В случае периодического микрорельефа использование принципа локализации и расширенного принципа соответствия [5] позволяет построить решения контактных задач для периодической системы неровностей, внедряемой как в упругое, так и в вязкоупругое полупространство.

С использованием принципа локализации получено следующее выражение для фактических контактных давлений на пятне контакта радиуса  $a$ , которое справедливо как в случае статистического, так и периодического характера распределения неровностей по поверхности внедряемого тела [1]:

$$p(r) = \frac{2E'}{\pi R} \sqrt{a^2 - r^2} + \frac{2\bar{p}}{\pi} \arctan \left( \sqrt{\frac{a^2 - r^2}{A^2 - a^2}} \right), \quad (2)$$

где  $\bar{p}$  – номинальное давление,  $E' = E/(1-\nu^2)$  ( $E$  и  $\nu$  – модуль Юнга и коэффициент Пуассона полупространства),  $R$  – радиус кривизны неровности, а  $A$  – радиус области, вне которой действует номинальное давление, моделирующие взаимное влияние пятен контакта. Дополнительное смещение  $d$ , определяемое как глубина внедрения неровности относительно границы полупространства, всюду нагруженного номинальным давлением, рассчитывается по следующей формуле:

$$d = \frac{a^2}{R} - \frac{2\bar{p}}{E'} \sqrt{A^2 - a^2}. \quad (3)$$

### Анализ влияния микрогеометрии тел на контактную жесткость и номинальные характеристики

Полученная при решении контактной задачи на микромасштабе при заданных параметрах микрогеометрии зависимость дополнительной податливости от номинального давления  $C[p]$  с использованием формулы (3) позволяет построить интегральное уравнение вида (1) контактной задачи на макромасштабном уровне. Такой подход может быть применен для решения контактных задач для различных макроформ и механических свойств контактирующих тел, а также при разных способах описания их поверхностной микрогеометрии.

Построенное таким образом интегральное уравнение (1) позволяет определить распределение номинальных давлений, например, с использованием метода последовательных приближений. На конкретных примерах было получено, что учет поверхностной шероховатости тел вносит не только количественные, но и качественные изменения в распределение номинальных контактных давлений. В частности, увеличивается глубина внедрения и область номинального контакта.

Отметим также, что по найденным номинальным контактным характеристикам, затем можно определить значения фактических давлений (2), а также рассчитать поле внутренних напряжений вблизи пятен контакта. В частности, получено, что рост плотности контакта, что характеризуется уменьшением расстояния между неровностями, приводит к возникновению на некоторой глубине напряженного подповерхностного слоя, в котором могут развиваться пластические деформации и зародиться микротрещины.

### Сравнение с результатами экспериментов

Полученные теоретические результаты и оценки были сравнены с результатами экспериментальных исследований, проведенных в лаборатории трибологии

ИПМех РАН и направленных на исследование процесса скольжения стальных шариков с различной поверхностной шероховатостью по мягким покрытиям на основе дисульфида молибдена, нанесенным на стальную подложку.

Результаты эксперимента показали, что коэффициент трения и скорость изнашивания этих покрытий в значительной степени зависят от шероховатости контртела. Также получено, что увеличение шероховатости (среднеквадратичного отклонения высот неровностей) контртел ведет к росту ширины дорожки трения и более интенсивному износу покрытий. Это коррелирует с численными результатами, полученными с использованием разработанной модели.

### Выводы

Представлен двухуровневый подход к решению задач контакта шероховатых деформируемых тел. Данный подход позволяет определить как номинальные, так и фактические контактные характеристики, а также поле внутренних напряжений вблизи пятен контакта.

Анализ конкретных примеров показал, что контактная жесткость сопряжения существенно зависит от параметров микрогеометрии, а также механических характеристик взаимодействующих тел и свойств поверхностного слоя. Изменение параметров микрогеометрии поверхности существенно влияет на распределение подповерхностных напряжений, т.е. на характер изнашивания поверхностей контактирующих тел в условиях фрикционного взаимодействия.

Таким образом, за счет подбора параметров микрогеометрии сопрягаемых поверхностей можно управлять процессами износа и разрушения, а также изменять (повышать/понижать) контактную жесткость сопряжений.

Работа выполнена при поддержке госбюджетного финансирования в НИИ механики МГУ, номер проекта ЦИТИС АААА-А19-119012990120-9.

1. Горячева И.Г. Механика фрикционного взаимодействия. М.: Наука. 2001. 478 с.
2. Штаерман И.Я. Контактная задача теории упругости. М.-Л.: Гостехиздат. 1949. 270 с.
3. Greenwood J.A., Williamson J.B.P. Contact of nominally flat surfaces // Proceedings of the Royal Society of London A. 1966. V. 295. № 1442. P. 300–319.
4. Горячева И.Г. Периодическая контактная задача для упругого полупространства // Прикладная математика и механика. 1998. Т. 62. № 6. С. 1036–1044.
5. Graham G.A.C. The correspondence principle of linear viscoelasticity theory for mixed boundary value problems involving time-dependent boundary regions // Quarterly of Applied Mathematics. 1968. V. 26. № 2. P. 167–174.

## ВОЛНОВАЯ ОБРАБОТКА ЛИГНИНОЦЕЛЛЮЛОЗНОГО СЫРЬЯ В УСТАНОВКАХ ПАРОВОГО ВЗРЫВА

И.Н. Гришняев

Институт машиноведения им. А.А.Благонравова РАН, Москва, Россия; iisi@inbox.ru

Проведены теоретические и экспериментальные исследования по повышению эффективности использования энергии парового взрыва при обработке лиггиноцеллюлозного сырья (ЛЦС) в реакторах в ходе процессов получения сахаров. Показано, что на выходе из реактора целесообразно устанавливать транспортировочный канал (ТК), содержащий сопло Лаваля. Экспериментально установлено, что это позволяет получить дополнительное измельчение ЛЦС более чем на 25% за счет волнового воздействия на нее парожидкостной среды (ПЖС).

### Цель

В настоящее время для выделения сахаров с последующим получением биоэтанола и других видов продукции используется лиггиноцеллюлозное сырье в виде древесных опилок, отходов сельского хозяйства (солома) и т.п. Процесс обработки ЛЦС содержит несколько стадий, в том числе предварительную, которая направлена на изменение физико-химических свойств ЛЦС и увеличения его реакционной способности при дальнейшем осахаривании.

Одним из видов предварительной обработки является паровой взрыв. В процессе него ЛЦС помещают в реактор и подвергают кратковременному воздействию перегретого пара под давлением (время - секунды...минуты, температура 200...300 °С, давление 2,0...7,5 МПа). Затем с помощью клапана давление сбрасывают, что вызывает паровой взрыв ЛЦС. Механический эффект резкого уменьшения давления приводит к разделению волокон вследствие взрывной декомпрессии. При таких условиях лиггин плавится, частично разрушается, прекращает взаимодействовать с целлюлозой, и выходит из ее структуры. Удаление лигнина и гемицеллюлоз очищает поверхность целлюлозного волокна и увеличивает доступ к ним гидролитических ферментов

На повышение эффективности обработки ЛЦС в процессе парового взрыва было направлено проведенное исследование.

### Физические аспекты, положенные в основу исследований

Если представить перегретую жидкость в виде взрывчатого вещества, на основе которого реализуется явление парового взрыва, то величина удельной энергии, выделяющаяся при ее взрыве  $Q_{ж}=200$  ккал/кг соизмерима со взрывом тротилом, для которого  $Q=1000$  ккал/кг [1].

При этом одна часть тепловой энергии, потраченной на перегрев жидкости, идет на разрушение ЛЦС, а другая на выброс ПЖС и ЛЦС (в дальнейшем называемые смесью) из реактора. Доля кинетической энергии движущейся смеси может быть значительной, что определяет необходимость поиска путей ее использования для дальнейшего разрушения и повышения реакционной способности ЛЦС.

Рассмотрим физические процессы, протекающие при истечении смеси из реактора при открытии клапана сброса давления (КС). В качестве объекта исследований выберем реактор периодического действия, описанный в [2].

В момент открытия КС в реакторе начинает распространяться волна разряжения, движущаяся от клапана. Она вызывает детонационное испарение перегретой жидкости, находящейся в реакторе, и резкое увеличение парового содержания ПЖС. По мере выхода смеси из реактора, происходит увеличение объема истекающей ПЖС с понижением ее температуры и частичной конденсацией пара.

Как правило, истечение смеси из реактора происходит через КС и транспортировочный канал, за которыми идет приемник ЛЦС с диаметром, значительно превышающим диаметр клапана.

Если диаметры КС и ТК равны (рис.1), то физическую картину истечения потока смеси из реактора и возникающее при этом распределение траекторий движения слоев потока до выходного отверстия реактора и после него можно представить в виде, описанном в [3].

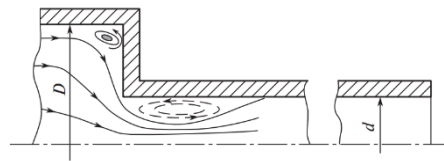


Рис. 1. Выход струи смеси из реактора

Перед входом в ТК линии траектории слоев потока смеси искривляются, причем их кривизна увеличивается от оси реактора к периферии. Это ведет к возникновению в потоке поля центробежных сил, направленных к оси и создающих неравномерное распределение давлений и скоростей перед входным сечением канала и за ним. В результате этого в угловой зоне реактора перед отверстием образуется локализованное вторичное вихревое движение или зона отрыва, которая сохраняется вне зависимости от величины перегрева пара.

Кривизна линий потока парожидкостной среды и степень его сжатия определяется приведенным конструктивным параметром, определяемым отношением  $\bar{d} = d/D$  внутреннего диаметра реактора  $D$  к внутреннему диаметру транспортировочного канала  $d$  [3].

Вытекающий из реактора поток смеси также будет иметь неравномерное распределение давлений и скоростей по сечению ТК, перпендикулярному к его оси. Это ведет к образованию зоны отрыва уже в транспортировочном канале. Форма линий потока за выходным отверстием реактора и размеры зоны отрыва зависят как от распределения давлений и скоростей в выходном отверстии реактора, так и от приведенного

конструктивного параметра, определяемого отношением длины канала  $l$  к  $D$  [3].

Изменяя приведенные конструктивные параметры, можно влиять на картину полей давления и скорости как перед ТК, так и в нем, а в итоге регулировать удельный расход смеси, выходящей из реактора.

Зоны отрыва формируются за счет ПЖС, для которых характерна высокая турбулентность. Необходимо заметить, что стенки ТК имеют температуру порядка температуры окружающей среды, а пар на несколько сотен выше. Это может привести к интенсификации процесса фазового перехода пара в жидкость на стенках канала в вихревых зонах из-за сравнительно длительного контакта ПЖС со стенками канала. Образующаяся жидкость увлекается в вихревое движение и соприкасаясь с нагретыми слоями потока может опять испытывать фазовый переход. Возникает пульсация зон отрыва, влияющая на параметры истекающей смеси. Появление этого эффекта определяется временем взаимодействия паровой среды со стенками ТК и их теплофизическими характеристиками.

В термодинамической теории истечения пара из простых цилиндрических или сужающихся сопел в случае больших перепадов давлений показано, что скорость истечения не может превышать местной скорости звука и только часть энергии вытекающей струи пара, может быть превращена в полезную кинетическую энергию этой струи. Так термодинамические расчеты показывают [4], что при истечении водяного пара в паровой турбине через простые суживающиеся сопла, только  $\sim 0,3 - 0,4$  всей его энергии превращается в кинетическую энергию вытекающей струи, остальная же часть энергии пара остается неиспользованной. Вопрос повышения работоспособности пара при истечении в случае больших перепадов давлений решается постановкой на выходе сопла Лавала.

И действительно, если обратить внимание на распределение линий потока в ТК (рис.1), то можно увидеть, что, если исключить зону отрыва, они напоминают конфигурацию такого сопла. Это определило целесообразность его постановки на выходе из реактора для повышения эффективности использования энергии парового взрыва.

Постановка на выходе реактора сопла Лавала обеспечивает полное расширение ПЖС и достижение давлением на срезе сопла давления окружающей среды. С термодинамической точки зрения постановка расширяющегося сопла позволяет получить дополнительную работу, которая идет на увеличение скорости истечения пара [5].

Необходимо отметить, что в расширяющейся части сопла за счет переохлаждения может возникнуть зона бурной спонтанной конденсации пара, что приводит к появлению скачка уплотнения и, как следствие, возникают нестационарные (автоколебательные) режимы течения переохлажденного пара в сопле Лавала.

Наибольшая интенсивность пульсаций давлений наблюдается в трансзвуковой области течения, в зоне интенсивной спонтанной конденсации. При удалении от этой области как вверх, так и вниз по потоку амплитуда уменьшается.

Расчет сопла Лавала и возникновение нестационарного режима течения осуществляется с

использованием известных расчетно-теоретических моделей [6,7,8]. При этом возникновение бурной спонтанной конденсации в сечении сопла Лавала показывает возможность возникновения автоколебательного режима.

### Экспериментальные исследования

С учетом изложенного подхода был разработан и изготовлен специально спроектированный ТК (рис.2) [9]. Он содержит сопло Лавала, переходящее в цилиндр. ТК ставится на выходе реактора за клапаном сброса давления и не содержит подвижных элементов.

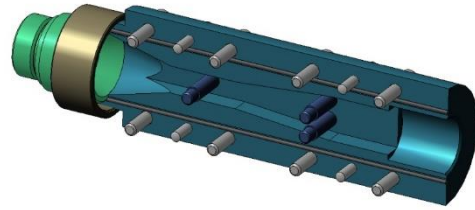


Рис. 2. Транспортировочный канал с волновым измельчением ЛЦС

Конструктивные параметры ТК в совокупности с параметрами реактора и условиями проведения экспериментов позволяли генерировать автоколебания ПЖС в расширяющейся части сопла. В процессе парового взрыва за клапаном сброса давления возникали поверхности разрыва, при переходе через которые практически все параметры парожидкостной среды меняются скачкообразно (скорость резко уменьшается, а давление, плотность и температура возрастают) и поток переходит от одного состояния к другому.

Частицы ЛЦС проходя через такие поверхности или скачки уплотнения испытывают воздействие больших градиентов скорости и температуры, что вызывает диссипацию энергии в потоке и увеличение энтропии. При больших сверхзвуковых скоростях движения резкое торможение сопровождается диссоциацией, ионизацией и физико-химическими превращениями в ЛЦС за скачком уплотнения. За счёт такого воздействия увеличивается удельная поверхность и происходит дополнительное разрушение структуры лигноцеллюлозных частиц. Это, в свою очередь, приводит к повышению реакционной способности сырья на стадиях экстракции, делигнификации ЛЦС и ферментативного гидролиза целлюлозы.

Обработке подвергалась солома мискантуса при различных термобарических условиях (насыщенный водяной пар):  $180^{\circ}\text{C}$ , 10 атм.;  $200^{\circ}\text{C}$ , 15 атм.;  $220^{\circ}\text{C}$ , 23 атм.;  $234^{\circ}\text{C}$ , 30 бар, и времени выдержки 1 и 3 минуты.

Скорость открытия быстродействующего клапана составляла 20 мс. Автогидролизованная масса выстреливалась через ТК, с соплом Лавала и без него, в приёмный бункер. По завершению процесса для исследования отбирались образцы материала. В дальнейшем они направлялись на дальнейшую обработку (делигнификацию) и ферментативный гидролиз.

На рис. 3 представлены полученные образцы. Проведен дисперсный анализ образцов. Средний геометрический размер частиц контрольного измельченного автогидролизованного образца мискантуса составил 108,9



мкм, удельная поверхность с учётом фактора формы частиц 2727 см<sup>2</sup>/г. Средний геометрический размер частиц автогидролизного образца после прохода через волновой узел ТК снизился и составил 76,4 мкм (снижение на 29%), а удельная поверхность увеличилась до 3305 см<sup>2</sup>/г (увеличение на 17,5%).



Рис. 3. Образцы обработанной соломы: слева без ТК; справа с использованием ТК

### Заключение

Таким образом, на основе анализа теории истечения газа из замкнутого объема показано, что для повышения эффективности использования энергии парового взрыва на выходе реактора целесообразно устанавливать ТК, содержащий сопло Лавала. Подбирая конструктивные параметры реактора и ТК, а также обеспечивая определенные условия парового взрыва

можно достичь возникновения в ТК скачков уплотнения, проходя через которые ЛЦС подвергается дополнительной деструкции. Теоритические исследования были подтверждены в ходе экспериментов.

Работа выполнена в НЦ НВМТ ИМАШ РАН.

1. Буланов Н.В. Взрывное вскипание диспергированных жидкостей. Екатеринбург: Изд-во УрГУПС, 2011. – 232 с.
2. Ганиев О.Р., Гришняев И.Н. Учет термодинамических условий вскипания жидкости при проектировании установки парового взрыва// Проблемы машиностроения и надежности машин. 2022, №5, с.84-92
3. Дейч М.Е., Филиппов Г.А. Газодинамика двухфазных сред. - М.: Энергоиздат, 1981. - 472 с.
4. Кошкин В.К., Михайлова Т.В. Техническая термодинамика. Учебное пособие для студентов высших учебных заведений. М.: Изд. МАИ, 2007. – 364 с.
5. Гушин А.М., Володарец Н.В., Соломин А.П., Балагура А.С., Бондарь Е.А. Истечение газа из емкости. <https://poisk-ru.ru/s5502t6.html>
6. Васенин И.М., Рычков А.Д. Численные решения задач о течение смеси газа и частиц в осесимметричном сопле Лавала// Изв. АН СССР, МЖГ, 1973, №5, с.173-175,
7. Клигель Дж., Никерсон Г. Течение смеси газа и твердых частиц в осесимметричном сопле. Сб. Детонация и двухфазное течение. М., Мир., 1966. С.183-201;
8. Пирумов У.Г., Суворова В.Н. Численное решение обратной задачи теории сопла для двухфазной смеси газа и частиц// Механика жидкости и газа. 1986. №4. С106-114
9. Ганиев О.Р., Гришняев И.Н., Ганиев с.Р., Курминев Д.В. Научные основы аэрогидродинамического измельчения лигниноцеллюлозного сырья при паровом взрыве// Проблемы машиностроения и надежности машин. 2023, №5, с.16-24

## ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПОКРЫТИЙ СИСТЕМЫ TiAlTaSiN

А.И. Дмитриев<sup>1</sup>, А.Р. Шугуров<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, Томск, Россия; dmitr@ispms.ru

В работе исследованы покрытия Ti-Al-Ta-Si-N, полученные реактивным магнетронным распылением на постоянном токе. Установлено влияние концентрации легирующих элементов на особенности структуры покрытия. Так при содержании Ta на уровне 5 ат. % с увеличением Si однофазная ГЦК структура покрытий трансформируется в двухфазную аморфно-нанокристаллическую структуру, что повышает ряд механических свойств. С использованием молекулярно-динамического моделирования проведен анализ влияния концентрации атомов Si на механические свойства покрытий. Показано качественное согласие результатов моделирования с имеющимися экспериментальными данными.

### Введение

Среди множества покрытий, используемых в современной промышленности для увеличения износостойкости и защиты деталей и механизмов от коррозии, наиболее широкое распространение получили покрытия на основе нитридов переходных металлов, в частности системы Ti-Al-N [1, 2]. Однако, из-за ярко выраженного ионного характера химической связи Al-N, добавление алюминия в покрытия на основе TiN снижает их трещиностойкость. Недавние исследования [3] показали, что одним из наиболее перспективных легирующих элементов является тантал (Ta), который позволяет существенно повысить трещиностойкость покрытий  $Ti_{1-x}Al_xN$ , а также увеличить температуру формирования вюрцитной фазы w-AlN до 1200 °C, что способствует сохранению высокой твердости покрытий при повышенных температурах. Однако рост содержания Ta в твердом растворе Ti-Al-Ta-N приводит к ослаблению атомных связей, как между Ta-N, так и Al-N. Кроме того, увеличение концентрации Ta вызывает формирование более крупных столбчатых зерен с ровными границами, что способствует быстрому распространению трещин при циклических нагрузках и ускоряет диффузию кислорода при высоких температурах. Одним из возможных решений этой проблемы может стать создание нанокристаллической структуры в покрытиях на основе Ti-Al-Ta-N, что, по нашему мнению, можно достичь введением неметаллических элементов, таких как B, C и Si. Так, легирование покрытий на основе Ti-Al-N кремнием, позволяет значительно увеличить их твердость (более 50 ГПа), одновременно повышая их термическую стабильность и устойчивость к окислению [4].

Принимая во внимание имеющиеся данные, перспективным направлением улучшения свойств покрытий на основе Ti-Al-N является одновременное введение тантала и кремния. Это позволит создать покрытия, обладающие комбинацией улучшенных свойств, характерных для композиций Ti-Al-Ta-N (высокие трещиностойкость, термическая стабильность и стойкость к окислению) и Ti-Al-Ta-Si-N (высокая твердость и нанокристаллическая структура).

Целью настоящей работы являлось конструирование и тестирование многокомпонентных покрытий системы Ti-Al-Ta-Si-N на основе комплексного подхода, сочетающего методы, как экспериментальных исследований, так и средства компьютерного моделирования.

### Материал и методика эксперимента

Покрытия Ti-Al-Ta-Si-N наносили методом реактивного магнетронного распыления при постоянном токе с помощью двухмагнетронной распылительной системы с использованием композиционной мишени Ti-Al-Si и мишени Ta (99,99%). Мишень Ti-Al-Si представляла собой диск из сплава Ti-Al (50 ат.% Ti, 50 ат.% Al), в котором были размещены круглые вставки Si диаметром 5 мм. Варьирование содержания Si выполняли посредством изменения количества вставок Si от 4 до 16. В результате содержание кремния в покрытиях изменялось от 0 до 15 ат. %. Покрытия напыляли в смеси газов Ar + N<sub>2</sub> при давлении в вакуумной камере 0,3 Па. При этом отношение парциального давления азота к общему давлению газовой смеси поддерживалось на уровне  $P_{N_2}/P_t = 0,23$ . Толщина покрытий составляла 3 мкм.

Состав покрытий Ti-Al-Ta-Si-N определяли методом энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии. Структуру и фазовый состав изучали методом рентгеновской дифракции в условиях симметричной съемки с использованием CuK $\alpha$ -излучения. Методом измерения величины прогиба кремниевых подложек с помощью контактного профилометра до и после нанесения покрытий определяли остаточные внутренние напряжения в покрытиях. Выполнены исследования морфологии поверхности и поперечных сечений покрытий методом сканирующей электронной микроскопии (СЭМ). Методом наноиндентирования исследовано влияние содержания Si в покрытиях на их механические характеристики.

Компьютерное моделирование многокомпонентных покрытий выполнялось с использованием метода молекулярной динамики. Для моделирования системы Ti-Al-Ta-Si-N использовалась определенная комбинация гибридных комбинирующих потенциалов. Взаимодействие между парами металлов Ta-Al и Ta-Ti описывалось потенциалом, построенным в рамках метода погруженного атома. Для трехкомпонентного соединения Ti-Al-N — модифицированного погруженного атома, отличающегося использованием усредненной функции электронной плотности. Для пары Ti-Si был выбран потенциал Терзоффа с ковалентным типом взаимодействия, а для пары Si-N — потенциал Стиллингера-Вебера с трехчастичным взаимодействием. Расчет сил между атомами Si и Al проводился с использованием потенциала, учитывающего угловую зависимость ковалентных связей. Силы взаимодействия

между парами Ta-Si и Ta-N были рассчитаны в рамках теории функционала электронной плотности с использованием метода полного потенциала с добавленными плоскими волнами. Моделировались условия, соответствующие тестам по наноиндентированию и царапанию.

Модель покрытия представляла собой параллелепипед с размерами  $20 \times 17 \times 14$  нм по осям  $X$ ,  $Y$  и  $Z$  соответственно. Общее число атомов в таком кристаллите превышало 600 000. Базовый состав покрытия был выбран следующим: Ti-20 ат.%, Al-25 ат.%, Si-2,5 ат.%, Ta-2,5 ат.% и N-50 ат.%. Кроме того, рассматривались составы  $Ti_{0.35}Al_{0.50}Ta_{0.05}Si_{0.10}N$  и  $Ti_{0.375}Al_{0.50}Ta_{0.05}Si_{0.125}N$ . Моделируемая система рассматривалась как микроканонический ансамбль NVE, в котором сохраняются число атомов, энергия и объем. Наноиндентирование и скретч-тест проводились с использованием сферического индентора с радиусом  $R = 5$  нм. При наноиндентировании индентор вдавливался в образец с постоянной скоростью 15 м/с вдоль оси  $Z$ . При царапании индентор перемещался с постоянной скоростью 15 м/с вдоль оси  $X$  слева направо. Глубина отпечатка была равной 2 нм. Атомы, входящие в объем индентора, дополнительно подвергались воздействию сил, направленных от центра сферы и рассчитываемых по формуле

$$F = -k(R - r)^2, \quad (1)$$

где  $k$  – коэффициент жесткости индентора, равный  $10 \text{ эВ}/\text{Å}^3$ , а  $r$  – расстояние от центра индентора до атома. Ориентация кристаллической решетки относительно направления нагружения задавалась таким образом, чтобы поверхность соответствовала плоскостям (001), (011) и (111). Боковые грани задавались свободными, а нижний слой имитировал неподвижную подложку. Уравнения движения интегрировались с шагом по времени  $\Delta t = 10^{-15}$  с.

### Результаты и их обсуждение

Проведенные исследования показали, что при содержании Ta на уровне 5 ат. % с увеличением Si однофазная ГЦК структура покрытий трансформируется в двухфазную аморфно-нанокристаллическую структуру. Размер областей когерентного рассеяния (ОКР) уменьшается с 24 нм в покрытиях Ti-Al-Ta-N до 6 нм в покрытиях с 10 ат. % Si. Резкое уменьшение размера ОКР начинается при содержании Si 5 ат.%, что указывает на начало формирования аморфной зернограничной фазы  $SiN_x$ , которая препятствует росту кристаллитов. При содержании Si 15 ат. % покрытия становятся рентгеноаморфными. Кроме того, рост содержания кремния в покрытиях вызывает изменение преимущественной ориентации кристаллитов. Покрытия, не содержащие Si, характеризуются преимущественной ориентацией зерен (111), в то время как при содержании  $Si \geq 6$  ат.% формируется сильная текстура (200). При увеличении содержания Si от 0 до 5 ат.% происходит уменьшение параметра решетки покрытий, которое связано с внедрением в кристаллическую решетку атомов Si, имеющих меньший размер, чем атомы Ti, Al и Ta, а также с ростом в покрытиях остаточных сжимающих напряжений. Последнее хорошо согласуется с результатами измерения кривизны прогиба подложек,

согласно которым при увеличении содержания Si от 0 до 5 ат.% в покрытиях растут сжимающие напряжения, достигая  $-5,9$  ГПа. При более высоких концентрациях кремния, сжимающие напряжения, напротив, снижаются, что сопровождается увеличением параметра решетки. Исследование микроструктуры поперечных сечений покрытий с помощью СЭМ показало, что при содержании кремния вплоть до 4 ат. % они характеризуются столбчатой структурой, в которой столбчатые зерна распространяются через всю толщину покрытий (рис. 1а). При 5 ат. % Si столбчатая структура фрагментируется, а при дальнейшем повышении содержания Si трансформируется в плотную мелкозернистую структуру (рис. 1б). Наконец, при 15 ат. Si поперечное сечение покрытий обладает гладкой стеклообразной поверхностью без заметных особенностей, характерной для аморфных материалов (рис. 1в). Выявлено, что изменение элементного и фазового составов, а также микроструктуры покрытий при повышении содержания Si приводят к существенным изменениям их твердости  $H$  и приведенного модуля Юнга  $E^*$  (рис. 1д). Внедрение атомов Si в кристаллическую решетку твердого раствора Ti-Al-Ta-Si-N и образование аморфной зернограничной фазы  $SiN_x$  обуславливают рост  $H$  и  $E^*$ . Однако увеличение содержания кремния выше 5 ат. % приводит к росту объемной доли аморфной фазы, вследствие чего твердость и модуль Юнга падают. Поэтому максимальные значения  $H$  и  $E^*$ , достигаются при 5 ат. % Si. При этом твердость данного покрытия превышает 40 ГПа, что позволяет отнести его к сверхтвердым материалам. Необходимо также отметить, что покрытие Ti-Al-Ta-Si-N содержащее 5 ат. % Si, также характеризуется максимальными значениями отношений  $H/E^*$  и  $H^3/E^{*2}$ , что указывает на повышенную трициностойкость (рис. 1е).

В процессе моделирования наноиндентирования и скретч-теста контролировалось изменение нормальной и тангенциальной составляющих результирующей силы, действующих на индентор со стороны нагруженного кристаллита, а также доля атомов со структурой, отличной от исходной кубической (дефекты решетки), определяемых с помощью алгоритма сопоставления полиэдральных шаблонов, реализованных в программе OVITO [5].

Результаты моделирования показывают, что увеличение концентрации атомов Si в составе кристаллита

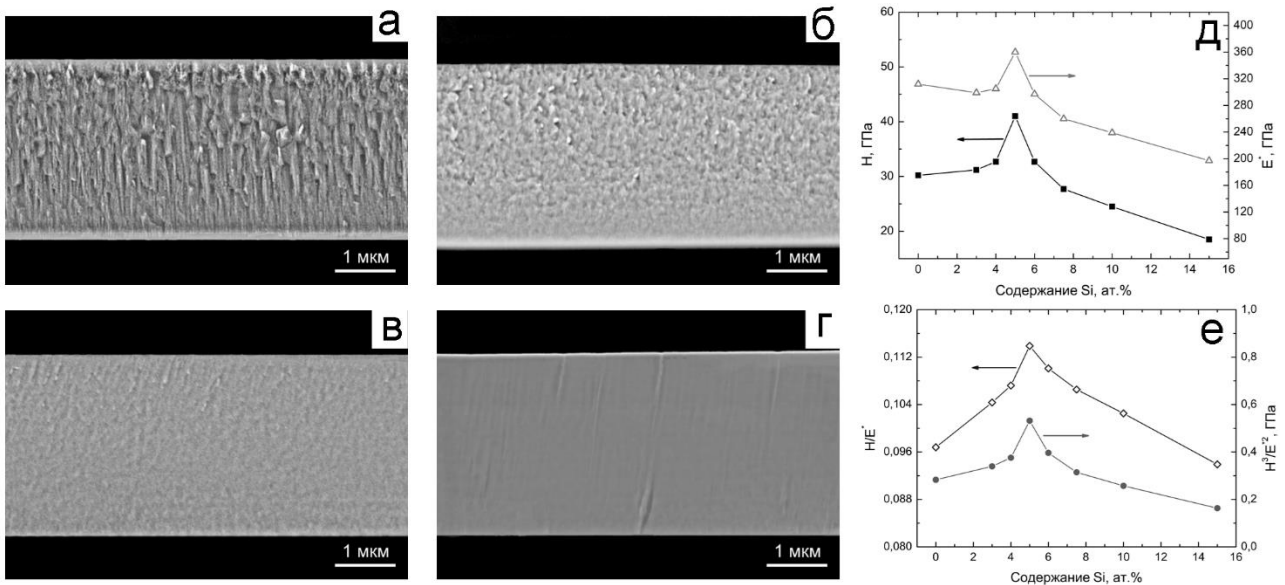


Рис. 1. СЭМ-изображения поперечных сечений покрытий Ti-Al-Ta-Si-N, содержащих: 3 (а), 5 (б), 7,5 (в) и 15 (г) ат. % Si. Зависимости твердости  $H$  и приведенного модуля Юнга  $E^*$  (д), а также отношений  $H/E^*$  и  $H^3/E^{*2}$  (е) покрытий Ti-Al-Ta-Si-N от содержания Si.

многокомпонентного покрытия способствует увеличению значения силы сопротивления тангенциальному перемещению индентора. При этом наибольшие значения силы наблюдаются для кристаллитов с ориентацией поверхности (001). Отметим, что как в тесте на наноиндентирование, данная ориентация кристаллической решетки показывает наилучшие механические свойства.

На рис. 2 представлены зависимости изменения доли атомов, характеризующихся конфигурацией, отличной от исходной кубической решетки, возникающих при латеральном перемещении индентора для вариантов покрытия, отличающихся кристаллографической ориентацией и концентрацией легирующих элементов. Наименьшее количество дефектов наблюдается для покрытий с ориентацией нагружаемой поверхности (001). При этом разница в количестве дефектов с ростом концентрации атомов Si незначительна. Две другие ориентации поверхности (011) и (111) характеризуются примерно двукратным увеличением доли атомов, соответствующих дефектам кристаллической решетки. Разница в количестве дефектов с ростом концентрации атомов Si для этих ориентаций поверхности остается в тех же пределах ( $\pm 1\%$ ), что и для ориентации поверхности (001).

### Заключение

На основании проведенных исследований установлено, что наиболее предпочтительным составом с точки зрения прочностных и трибологических свойств является образцы многокомпонентного покрытия TiAlTaSiN с содержанием атомов Si 10 ат. %.

Работа выполнена при финансовой поддержке проекта РФФ № 22–19–00441.

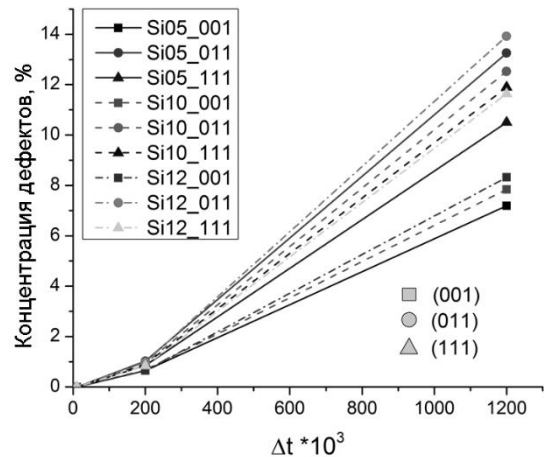


Рис. 2. Изменение концентрации дефектов при царапании для рассмотренных вариантов покрытия

1. PalDey S., Deevi S.C. Single layer and multilayer wear resistant coatings of (Ti,Al)N: a review // *Materials Science and Engineering A*, 2003. V.342. P. 58–79.
2. Yang Y., Xu Y.X., Chen L., Mayrhofer P.H. Improved Ti-Al-N coatings through Ta alloying and multilayer architecture // *Surface and Coatings Technology*, 2017. V. 328. P. 428–435.
3. Shugurov A.R., Kuzminov E.D., Kasterov A.M., Panin A.V., Dmitriev A.I. Tuning of mechanical properties of Ti1-xAlxN coatings through Ta alloying // *Surface and Coatings Technology*, 2020. V. 382. 125219.
4. Rogström L., Ullbrand J., Almer J., Hultman L., Jansson B., Odén M. Strain evolution during spinodal decomposition of TiAlN thin films // *Thin Solid Films*, 2020. V. 520. P. 5542–5549.
5. Stukowski A., Albe K. Extracting dislocations and non-dislocation crystal defects from atomistic simulation data // *Modelling and Simulation in Materials Science and Engineering* 2010. V.18 (8). 085001.

## ИССЛЕДОВАНИЕ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ЭПОКСИДНО-ПЕСЧАНЫХ КОМПОЗИТОВ, ПРИМЕНЯЕМЫХ ПРИ РЕМОНТЕ МАШИН

Т.Н. Егунова<sup>1</sup>, Н.И. Баурова<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ), Москва, Россия; [tanya.e.n5@yandex.ru](mailto:tanya.e.n5@yandex.ru)

<sup>2</sup> Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ), Москва, Россия

Приведены результаты экспериментальных исследований физико-механических свойств эпоксидно-песчаных композитов, используемых при ремонте элементов дорожно-строительных машин. Определены значения коэффициентов трения эпоксидно-песчаного композита. Представлены результаты по определению ударной вязкости образцов эпоксидно-песчаного композита. Установлено, что образцы с наименьшей концентрацией дисперсного наполнителя обладают наилучшими физико-механическими свойствами

### Введение

Полимерные композиционные материалы (ПКМ) на основе дисперсных наполнителей, широко используются при ремонте дорожно-строительных машин и различного оборудования [1-2]. Наиболее перспективными дисперсными наполнителями в настоящее время являются материалы, широко распространенные в природе, которые позволяют осуществлять ремонт в полевых условиях (к таким материалам относится песок, на основе которого создают эпоксидно-песчаные композиты) [3-5]. Преимущество данного вида материала обусловлено широким распространением основного вещества композита, а именно песка, который встречается повсеместно во всех климатических зонах РФ.

Технологическое преимущество использования эпоксидно-песчаных композитов при полевом ремонте техники состоит в том, что их отверждение может осуществляться при комнатной температуре (на открытом воздухе) и обеспечивает хорошие адгезионные свойства. Также стоит отметить, что эпоксидно-песчаные композиты, являются относительно экологически чистым материалом ввиду органической природы происхождения наполнителя.

Эксплуатационные свойства и структура композита зависят от состава, структуры материала и являются показателями качества. Они характеризуют его поведение под действием различных физических факторов (воздействие нагрузки, воды, высоких и низких температур и т.п.) [6-9].

**Цель настоящей работы** заключалась в экспериментальной оценке влияния концентрации и качества подготовки песчаного наполнителя на физико-механические свойства композитов на его основе.

### Объекты и методы

На основании обзора литературы, для проведения экспериментальных исследований, были выбраны полимерные композиционные материалы (ПКМ) на основе эпоксидного связующего и технического песка [10-12].

Для проведения экспериментальных исследований, предварительно были подготовлены образцы эпоксидно-песчаного композита с различной тепловой обработкой наполнителя. Прокаливание песка заключалось в воздействии высоких температурных режимов на сырье с целью удаления влаги. В данном исследовании прокаливание песка производилось с помощью сушильного шкафа MLW WSU 100 в течение 30 минут при температуре 60°C и 100°C.

На основании проведенного обзора литературы [3-5] концентрация наполнителя была взята равной 20 и 5 масс. ч. Отверждение композита производилось при комнатной температуре.

Было подготовлено 4 серии образцов:

- серия №1 – наполнитель без прокаливания, концентрация наполнителя 20 масс. ч.;
- серия №2 – температура прокаливания наполнителя 100°C, концентрация наполнителя 20 масс. ч.;
- серия №3 – температура прокаливания наполнителя 60°C, концентрация наполнителя 20 масс. ч.;
- серия №4 – температура прокаливания наполнителя 60°C, концентрация наполнителя 5 масс. ч.

Износостойкость покрытия определяли на машине марки Nanovea Tribometer, предназначенной для испытания на трение и износ металлов и сплавов, основные характеристики которой приведены в табл. 1. Испытание проводилось в соответствии со стандартом ASTM D3702-94. Определение значений коэффициентов трения проводили при нагрузке 100 Н, при 200 об/мин. Все испытания проводили при сухом трении.

После завершения экспериментальных исследований визуально и с использованием электронного микроскопа оценивалась поверхность трения и полученный отпечаток.

Таблица 1. Основные характеристики машины Nanovea Tribometer для испытаний на трение

Диапазон нагрузок, Н	10–1000
Погрешность нагрузки, %	±1
Погрешность момента трения, %	±2
Скорость вращения шпинделя, об/мин	1–2000
Минимальное время испытаний, с	10
Максимальное время испытаний, мин	9999

Испытание по определению вязкоупругих характеристик эпоксидно-песчаных композитов проводили в соответствии с требованиями ГОСТ 4647–2015 Пластмассы. Методы определения ударной вязкости по Шарпи [13], на маятниковом копре Testsystems TCKM-300 (рис. 1а) с заданными параметрами испытаний (рис. 1б).

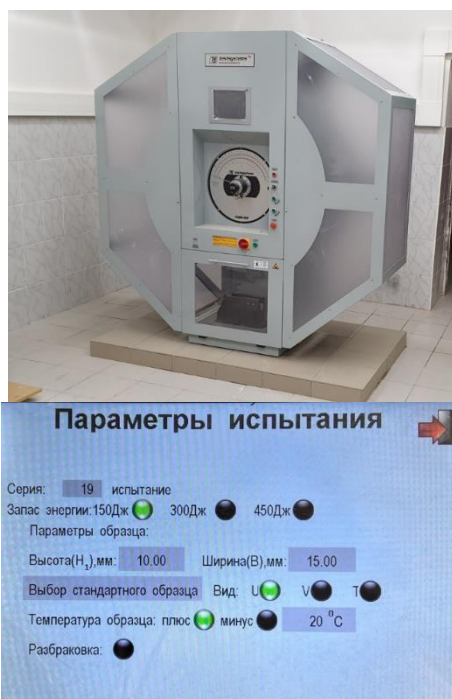


Рис.1. Копер маятниковый ТСКМ-300 (а) и параметры испытания (б)

Внешний вид готовых образцов приведен на рис. 1.

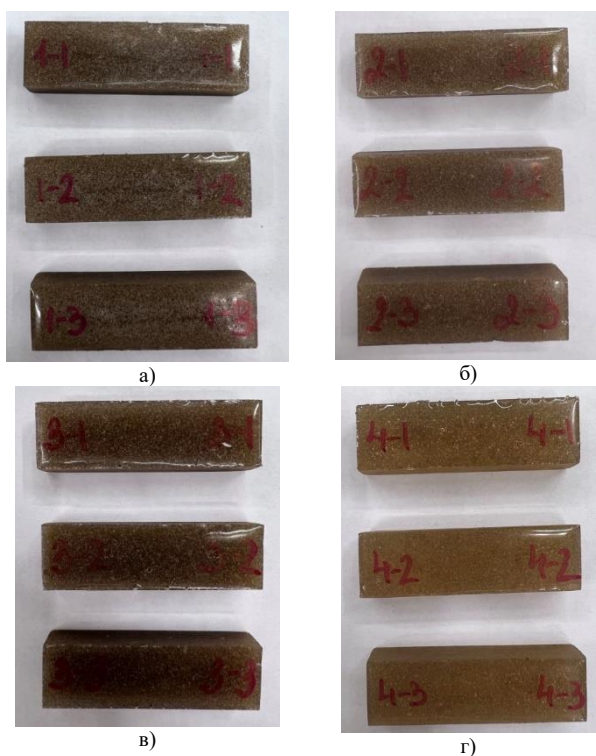


Рис.2. Образцы из эпоксидно-песчаного композита: а – без обработки наполнителя; б – прокаливание наполнителя при 100 °С; в – 20% наполнителя, прокаливание при 60 °С; г – 5% наполнителя, прокаливание при 60 °С; д – без наполнителя

### Результаты и обсуждение

В табл. 2 приведены результаты определения значений коэффициента трения образцов эпоксидно-песчаного композита.

Таблица 2. Результаты определения значений коэффициента трения образцов эпоксидно-песчаного композита

№ серии образцов	Концентрация наполнителя, масс.ч	Подготовка наполнителя	Коэффициент трения
1	20	Без подготовки	0,38
2	20	Прокаливание при 100°С	0,31
3	20	Прокаливание при 60°С	0,31
4	5	Прокаливание при 60°С	0,26

При трении частицы наполнителя препятствуют относительному перемещению деталей. В процессе трения происходит разрушение частиц и, как следствие, износ эпоксидно-песчаного композита.

Сравнительный анализ структуры поверхности образцов после трибологических испытаний приведен на рис. 3.

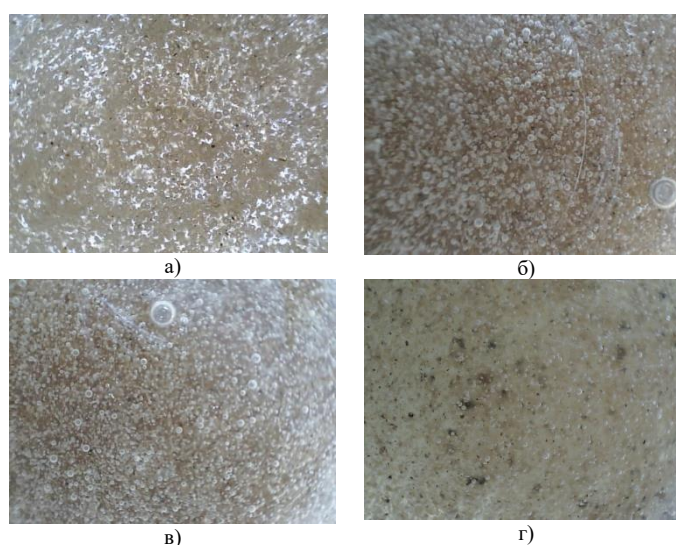


Рис.3. Фото поверхности трения образца после трибологических испытаний: а – образца серии №1; б – образца серии №2; в – образца серии №3; г – образца серии №4.

В ходе исследования на всех образцах были зафиксированы линии царапания. Наибольший износ поверхности трения был зафиксирован в образцах серии №1. На данных образцах присутствуют размытые линии, образующие кольцо вращения. Износ поверхности в виде четких линий по радиусу вращения замечен на образцах серии №2 и №3. Наименьший износ зафиксирован на образце серии №4, где только изредка присутствуют тонкие линии по радиусу вращения.

Серия образцов с содержанием наполнителя без предварительной обработки (№1) показывает наихудшие результаты, за счет большой концентрации различных примесей и загрязнений, что привело к большой шероховатости поверхности отвержденного покрытия и наибольшему показателю коэффициента трения.

Показатели трения серии образцов с обработкой наполнителя при 60°С и 100°С с концентрацией наполнителя 20 масс.ч. показали одинаковый результат. Что можно объяснить, схожей шероховатостью поверхности.

Результаты испытаний образцов на ударную вязкость представлены в таблице 3.

Таблица 3. Результаты испытаний образцов на ударную вязкость

Образцы	Значения ударной вязкости, Дж/см <sup>2</sup>			Средние значения ударной вязкости, Дж/см <sup>2</sup>
Без подготовки наполнителя	0,79	0,77	0,79	0,78
Прокаливание наполнителя при 100 °С, 20% наполнителя	0,79	0,79	0,82	0,80
Прокаливание наполнителя при 60 °С, 20% наполнителя	0,77	0,75	0,79	0,77
Прокаливание наполнителя при 60 °С, 5% наполнителя	0,79	0,80	0,88	0,82

При обработке полученных результатов было установлено, что наличие дисперсного наполнителя незначительно влияет на значения ударной вязкости. Наилучшие значения были зафиксированы у образцов 4–3 и 5–3.

Наихудшие средние значения ударной вязкости получены у групп образцов без предварительной обработки наполнителя и при прокаливании наполнителя при 60 °С с концентрацией 20% масс. ч.

Равные средние значения ударной вязкости получены у групп образцов без дисперсного наполнителя и при прокаливании наполнителя при 100 °С с концентрацией 20% масс. ч.

### Выводы

На основании комплекса проведенных исследований установлено, что эпоксидно-песчаные композиты целесообразно использовать при полевом ремонте дорожно-строительных машин. Данные композиты имеют хорошие адгезионные свойства и могут отверждаться на открытом воздухе.

Структура и свойства материала существенно зависят от подготовки и концентрации дисперсного наполнителя. Введение в состав композита разного количества песчаной смеси также оказывает влияние на физико-механические свойства.

Снижение концентрации дисперсного наполнителя позволило изменить трибологические свойства и

привело к снижению коэффициента трения.

Также введение дисперсного наполнителя в эпоксидную смолу оказывает незначительное влияние на вязкоупругие характеристики материала. Снижение концентрации дисперсного наполнителя привело к увеличению значений ударной вязкости.

1. Marycheva A.N., Guzeva T.A., Pe P.M., Tun L.K., Malesheva U.V. Reinforcing fillers for polymer composite based on organic onwoven materials // Polymer Science - Series D. 2019. 12(2). pp.170-173.
2. Bodrykh N.V., Malysheva G.V. Repair of starter storage batteries // Polymer Science – Series D. 2010. 3(1). pp.70-73.
3. Панова Л.Г., Наполнители для полимерных композиционных материалов. Саратов: Сарат. гос. техн. ун-т, 2010. 68 с.
4. Зорин В.А., Баурова Н.И., Шакурова А.М. Управление микроструктурой и свойствами наполненных полимерных композиций // Клеи. Герметики. Технологии. 2012. № 8. С. 31-35.
5. Михальченков А.М., Феськов С.А., Осипов А.А., Кононенко А.С. Влияние эпоксидно-песчаных покрытий различных составов на процесс изнашивания, специфику износа и ресурс плужных лемехов // Клеи. Герметики. Технологии. 2020. № 1. С. 45-48.
6. Коноплин А.Ю., Баурова Н.И. Климатическая технологичность полимерных композиционных материалов, используемых при ремонте машин // Технология металлов. 2019. № 3. С. 44-48.
7. Baurova N.I. A method of imitational modeling that permits optimizing the properties of polymeric composite materials // Polymer Science - Series D. 2013. №6(3), pp. 265–268.
8. Косенко Е.А., Баурова Н.И., Зорин В.А. Исследование механических свойств углепластиков с различными типами гибридных матриц при отрицательных температурах // Технология металлов. 2021. № 1. С. 7-11.
9. Maung P.P., Htet T.L., Malysheva G.V. Simulation and optimization of vacuum assisted resin infusion process for large-sized structures made of carbon fiber-reinforced plastic // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020. 709 (2). 022041.
10. Коноплин А.Ю., Баурова Н.И. Климатическая технологичность полимерных композиционных материалов, используемых при ремонте машин // Технология металлов. 2019. № 3. С. 44-48.
11. Михальченков А.М., Феськов С.А., Осипов А.А., Кононенко А.С. Влияние эпоксидно-песчаных покрытий различных составов на процесс изнашивания, специфику износа и ресурс плужных лемехов // Клеи. Герметики. Технологии. 2020. № 1. С. 45-48.
12. Baurova N.I. A method of imitational modeling that permits optimizing the properties of polymeric composite materials // Polymer Science, Series D. 2013. Т. 6. № 3. С. 265-268.
13. ГОСТ 4647-2015 Пластмассы. Метод определения ударной вязкости по Шарпи. – М.: Стандартинформ, – 2016. – 23 с.

## О ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ВОЗМОЖНОСТЯХ И РЕАЛИЗОВАННЫХ ПРОЕКТАХ В ОБЛАСТИ АДДИТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ГУБКИНСКОГО УНИВЕРСИТЕТА

Елагина О.Ю., Буклаков А.Г, Дубинов Ю.С.

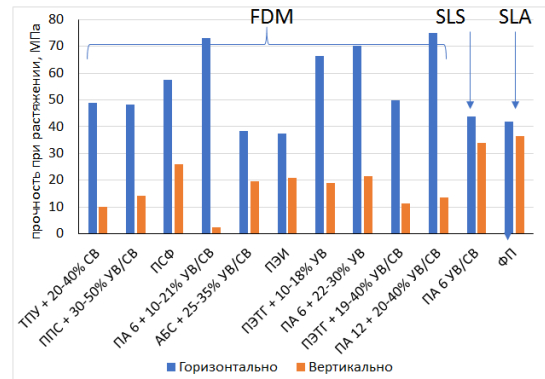
РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина, г. Москва

Представлены результаты исследований механических свойств полимерных мономатериалов и композитов, напечатанных с использованием аддитивных технологий. Рассмотрены проблемы стандартизации требований к свойствам изделий, полученных с применением аддитивных технологий. Показана необходимость учета технологических факторов при обеспечении точности размеров деталей, изготовленных методами 3D-печати.

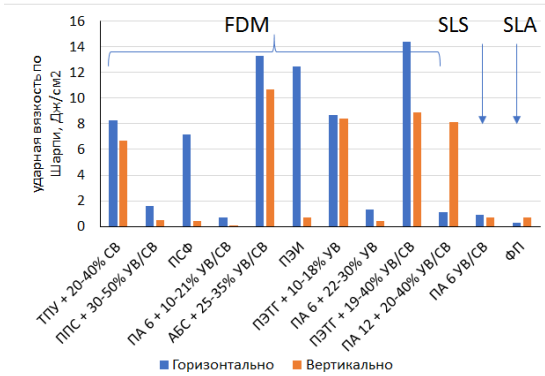
Интерес нефтегазовых компаний к аддитивным технологиям связан со снижением зависимости от логистических цепочек и проблем с поставкой запасных частей и комплектующих [1, 2]. Возможность изготовить на 3D-принтерах необходимую деталь или элемент конструкции, конечно, на первый взгляд имеет ряд значительных преимуществ. Однако при этом нельзя забывать о сложностях достижения требуемого результата как в части обеспечения геометрии изделия, так и в части достижения требуемого комплекса эксплуатационных свойств.

В связи с расширением в последние 3-5 лет доступности оборудования для аддитивной печати полимерных материалов в Губкинском университете были намечены ряд направлений, представляющих практический интерес. К этим направлениям относятся: исследование свойств полимерных материалов, полученных методами 3D-печати, разработка нормативных документов для контроля свойств изделий, полученных с применением аддитивных технологий, вопросы обеспечения точности размеров изделия в процессе его изготовления и ряд других.

Одним из проблем расширения использования аддитивных технологий в промышленности отсутствие справочных данных об уровне получаемых механических свойств. Данные по прочностным характеристикам исходных материалов, которые указывают производители филаментов, не учитывают влияние широкого спектра параметров технологического процесса на конечные свойства изделия. Сотрудниками университета был выполнен большой цикл работ по анализу вклада таких переменных параметров процесса как направление печати, ориентация слоев под разными углами друг относительно друга, ширина раstra и полнота заполнения. Для примера на рисунке 1 представлены графики изменения механических свойств полимерных материалов в зависимости от различных параметров процесса.



а



б



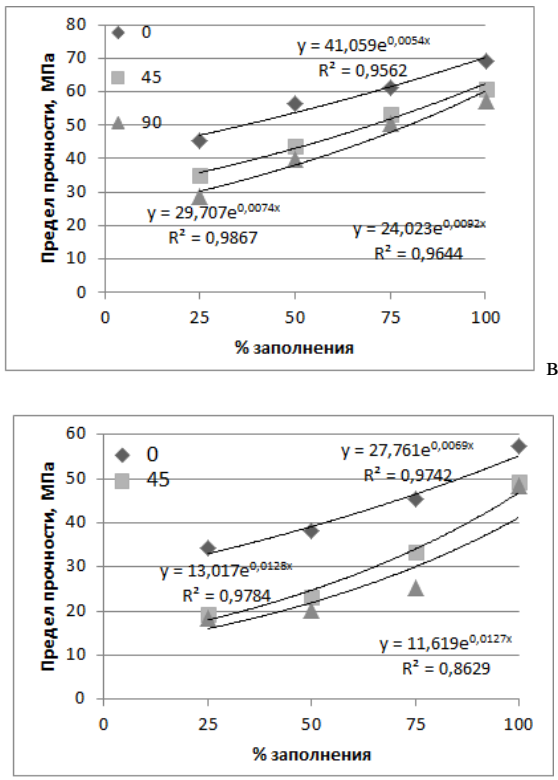


Рисунок 1 – Изменение механических свойств полимерных материалов в зависимости: а, б) – от направления печати, в) от угла наклона и полноты заполнения

Все материалы продемонстрировали существенную анизотропию свойств, которая характеризуется снижением показателей свойств при направлении печати, ориентированном в направлении, перпендикулярном приложенной нагрузке. На уровень механических свойств изделий оказывает воздействие ориентация слоев относительно друг друга и ширина раstra – единичного прохода при формировании слоя. Для примера на рисунке 1 (в, г) показаны результаты испытаний образцов, полученных FDM технологией с углом ориентировки 0, 45 и 90 градусов и шириной раstra 0,8 (рисунок 1в) и 0,4 мм (рисунок 1г). Как видно из полученных данных изменение угла наложения и ширины слоев может обеспечить увеличение механических свойств от 10 до 30%.

Значительное количество переменных факторов, влияющих на механические свойства изделий, получаемых с применением аддитивных технологий, вызывает необходимость разработки новых подходов к регламентации таких характеристик. В качестве таких подходов могут рассматриваться матрицы или сводные диаграммы, объединяющие разные параметры печати для обеспечения заданного уровня свойств. Отсутствие государственной нормативной документации в области аддитивных технологий вызывает потребность у нефтегазовых компаний по разработке собственных стандартов. В качестве примера можно

привести стандарт, разработанный университетом для сертификационного центра ИНТИ компании ПАО «Газпром нефть» «Изделия из пластмасс и эластомеров, полученные методом аддитивных технологических процессов. Испытания продукции».

Немаловажным фактором при изготовлении изделий методом 3д печати является подготовка математической модели. От тщательности ее разработки зависит точность полученного изделия. Применение 3д технологий для задач реинжиниринга требует регламентации как методов построения 3D модели, так и оценки погрешностей, вносимых в геометрические параметры при 3D печати. Одна из работ университета была посвящена оценке изменения фактических размеров напечатанных деталей по сравнению с эталонами, в качестве которых были взяты концевые меры длины и угловые меры. Оценка погрешности контрольных геометрических параметров проводилась по результатам обработки полученных 3D-моделей после сканирования и после их масштабирования в диапазоне от 65 до 110% при 3D-печати. Анализ полученных данных показал, что для повышения точности изготовления необходимо вводить операции разбиения изделия на отдельные геометрические формы и вводить корректировочные коэффициенты, учитывающие погрешности, вносимые на разных этапах прототипирования. Для примера в таблице 1 представлены результаты контроля размеров макетов напечатанных концевых мер.

Таблица 1 – Результаты замеров макетов концевых мер

Масштабирование	0%	0,7%	1%	0,8%	0,75%	0,65%
Номинальный размер, мм	Фактический размер, мм					
	1	2	3	4	5	6
10,08	9,98	9,87	9,98	9,99	9,80	9,92
20,21	19,94	19,79	19,97	19,91	19,67	19,79
80,02	80,22	80,04	79,88	80,24	79,45	79,99
90,03	90,15	90,00	89,88	90,22	89,43	89,99

В заключении следует отметить, что практическое использование аддитивных технологий требует тщательной проработки всех стадий начиная от создания моделей до изготовления деталей.

#### Список литературы

- Обустройство нефтегазовых месторождений с помощью аддитивных технологий. Климков П.С., Ковтун А.С. В сборнике: Технологии обустройства нефтяных, газовых и газоконденсатных месторождений. Сборник тезисов V научно-технической конференции. Отв. редактор А.Г. Чернов. Томск, 2022. С. 17-19.
- Перспективы внедрения аддитивных технологий в нефтегазовую отрасль. Макарова Т.Г., Бикбулатова Г.И. В сборнике: Достижения, проблемы и перспективы развития нефтегазовой отрасли. Материалы Международной научно-практической конференции. 2018. С. 248-251.

## ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОИЗВОДСТВА ИЗДЕЛИЙ С ФУНКЦИОНАЛЬНЫМИ ГАЗОТЕРМИЧЕСКИМИ ПОКРЫТИЯМИ ПОСРЕДСТВОМ АВТОМАТИЗАЦИИ УПРАВЛЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМ ПРОЦЕССОМ

А.М. Емжуев<sup>1</sup>, А.С. Краско<sup>1,2</sup>, Е.В. Преображенская<sup>1</sup>, М.С. Кружкова<sup>1</sup>

Московский технологический университет «МИРЭА», Москва, Россия; [anzor2700@mail.ru](mailto:anzor2700@mail.ru)  
МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

Работа посвящена поиску технологического решения, позволяющего повысить эффективность производства изделий с газотермическими покрытиями. Рассмотрена технология изготовления деталей с газотермическими покрытиями. Описаны основные проблемы, значительно снижающие качество покрытия и приводящие к высокому проценту брака. Перечислены основные параметры, влияющие на качество покрытия. В качестве решения, позволяющего повысить эффективность производства, предложена система автоматического управления, контролирующая ход технологического процесса в целом. Разработана обобщенная схема такой системы.

### Введение

В настоящее время газотермические покрытия нашли широкое применение в различных отраслях промышленности. Ракетно-космическая и авиационная отрасли являются традиционными областями применения таких покрытий [1]. Высокий интерес промышленного сектора экономики к газотермическим покрытиям обусловлен тем, что они позволяют решить множество проблем, возникающих в процессе эксплуатации машин, производственной техники, различных конструкций. Среди них: преждевременный износ в высокотемпературных средах, коррозионный износ, износ в результате действия сил трения.

Успешность напыления покрытий во многом определяется выбором технологического решения осуществления данного процесса. Одним из главных показателей качества газотермического покрытия является прочность сцепления покрытия с основой. Современные способы напыления, в том числе газоплазменное напыление, часто сталкиваются с проблемой невысокой прочности сцепления, что, в свою очередь, влечет за собой потери производительности и высокий процент бракованной продукции [2]. Целью данной работы является поиск эффективного технологического решения данной проблемы.

### Технология напыления газотермических покрытий

Газотермические покрытия формируются из частиц, находящихся в расплавленном состоянии. Наряду с ними в формировании покрытия участвуют частично оплавленные и нерасплавленные частицы. Для получения частиц распыляемый материал в виде порошка или проволоки подается в зону нагрева (ацетилен-кислородное пламя, электрическая дуга) вместе с распыляющим газом, основным назначением которого является ускорение напыляемых частиц [3]. В ряде методов распыляющий газ выполняет также функции диспергирования и нагрева.

Непосредственно перед напылением деталь проходит ряд подготовительных операций [4], [1]: формообразование; термическая обработка для снятия остаточных напряжений; очистка поверхности детали от загрязнений; активация поверхности. Затем происходит напыление покрытия. Деталь с покрытием как правило проходит ряд заключительных операций: снятие остаточных напряжений термической обработкой,

механическая обработка поверхности, упрочнение покрытия. На рис. 1 показана последовательность этапов технологического процесса изготовления детали с газотермическим покрытием.



Рис. 1. Этапы обработки деталей с ГП

### Проблемы, возникающие в процессе напыления газотермических покрытий, и поиск решения

Одним из важнейших показателей качества покрытий является прочность сцепления частиц напыляемого материала с основой [5]. В общем случае параметры, влияющие на качество получаемого покрытия, можно разделить на три группы, соответствующие этапам

ТП:  $P_e$  – параметры качества поверхности обработанного покрытия, обеспечивающие эксплуатационные свойства;  $P_c$  – параметры качества напыленного покрытия;  $P_b$  – параметры качества поверхности основы, на которую напыляется покрытие [1].

$$P_e = (\Delta_s, R_a, tp, \sigma_r, H_\mu, h_H, T_d, p, h, \sigma_{сц}), \quad (1)$$

где  $\Delta_s$  – отклонение размера, мкм;  $R_a$  – среднее арифметическое отклонение профиля поверхности, мкм;  $tp$  – относительная опорная длина профиля, %;  $\sigma_r$  – остаточные напряжения 1-ого рода в поверхности детали, МПа;  $H_\mu$  – поверхностная микротвердость, МПа;  $h_H$  – глубина наклепа, мкм;  $T_d$  – плотность дислокаций, см<sup>-2</sup>;  $p$  – пористость покрытия, %;  $h$  – толщина покрытия, формируемого на поверхности детали, мкм;  $\sigma_{сц}$  – прочность сцепления, МПа.

$$P_c = (\sigma_{сц}, p, R_a, H_\mu), \quad (2)$$

где  $\sigma_{сц}$  – прочность сцепления, МПа;  $p$  – пористость покрытия, %;  $R_a$  – среднее арифметическое отклонение профиля поверхности, мкм;  $H_\mu$  – поверхностная

микротвердость, МПа.

$$P_b = (R_a, S, \sigma_{ост}), \quad (3)$$

где  $R_a$  – среднее арифметическое отклонение профиля поверхности, мкм;  $\sigma_{ост}$  – остаточное напряжение в поверхностном слое основы, МПа;  $S$  – степень очистки поверхности.

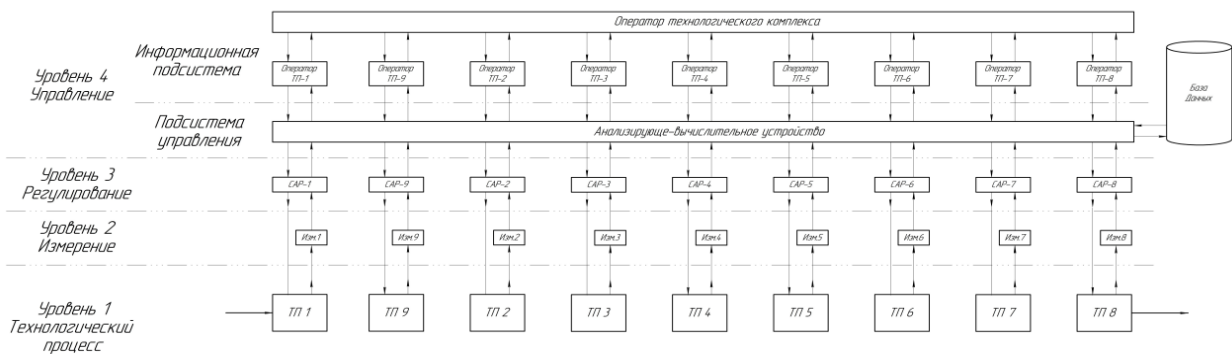
Помимо перечисленных параметров, на прочность сцепления влияют такие параметры, как поверхностная микротвердость, глубина залегания поверхностных остаточных напряжений, пористость покрытия и другие. В общем случае их можно разделить на три группы, соответствующие этапам ТП:  $P_e$  – параметры качества поверхности обработанного покрытия, обеспечивающие эксплуатационные свойства;  $P_c$  – параметры качества напыленного покрытия;  $P_b$  – параметры качества поверхности основы, на которую напыляется покрытие [1].

Все перечисленные показатели качества не формируются и не устанавливаются неизменными в рамках одного этапа технологического процесса, но меняются на протяжении всех этапов, что согласуется с теорией технологической наследственности. Таким образом, повышение эффективности технологического процесса в целом возможно только при комплексном подходе, при котором учитываются изменения показателей качества как в рамках отдельных этапов, так и на протяжении всего технологического процесса (от

разработана обобщенная схема системы управления технологическим процессом изготовления изделий с геотермическими покрытиями, представленная на рисунке 2. На рисунке: ТП 1 – механическая обработка основы; ТП 2 – термическая обработка основы; ТП 3 – очистка поверхности основы; ТП 4 – активация основы; ТП 5 – нанесение  $i$ -ого слоя покрытия; ТП 6 – термическая обработка покрытия; ТП 7 – механическая обработка покрытия; ТП 8 – упрочнение покрытия; ТП 9 – снятие покрытия.

На обобщенной схеме видно, что на каждом этапе происходит сбор информации о состоянии технологического процесса и измерение значений контролируемых параметров. Система автоматического регулирования при необходимости корректирует значения этих параметров и передает информацию на анализирующе-вычислительное устройство, которое проводит комплексную оценку параметров с разных этапов технологического процесса. Обработанная данным устройством информация поступает операторам, ответственным за отдельные этапы технологического процесса, и оператору технологического комплекса в целом, который принимает решения о корректировке технологического процесса.

Важно отметить, что предложенная система является гибкой и самообучающейся, что особенно важно в условиях мелкосерийного производства.



этапа к этапу).

Все вышеперечисленное, а также анализ релевантных литературных источников [8], в том числе посвященных автоматизации технологических процессов [6], [7], указывает на обоснованность проектирования системы управления технологическим процессом обработки деталей с газотермическими покрытиями. Такой подход является комплексным, поскольку позволяет в режиме реального времени совокупно контролировать различные параметры технологического процесса и показатели качества.

### Проектирование системы управления технологическим процессом изготовления изделий с геотермическими покрытиями

Автоматизированная система управления технологическим процессом (далее АСУТП) согласно ГОСТ 34.003–90 должна получать информацию о состоянии технологического объекта управления, проводить оценку полученной информации, определять необходимое управляющее воздействие и реализовывать его. В соответствии с этим и с учетом специфики производства деталей с газотермическими покрытиями

### Заключение

Таким образом, в рамках данной работы была обоснована целесообразность использования системы автоматического управления в технологическом процессе газотермического напыления. Перечислены параметры, влияющие на качество покрытия, разработана обобщенная схема системы САУ. Авторы данной работы планируют развивать предложенное направление исследования: определить специфику САУ, ее состав, уточнить информационные потоки, провести имитационное моделирование полученной системы в программном обеспечении AnyLogic.

1. Ковалев А.А. Влияние параметров газотермического напыления на прочность сцепления функциональных стойких покрытий / А.А. Ковалев, А.С. Краско // Проблемы машиностроения и надежности машин. – 2021. – № 3. – С. 31-39.
2. Роянов В.А., Серенко А.Н., Захаров С.В. Пути повышения прочности сцепления газотермических покрытий. // Технологии материалов. – 2000. – С. 1-4.
3. Кудинов В.В., Бобров Г.В. Нанесение покрытий напылением. Теория, технология и оборудование. Учебник для вузов. Металлургия, 1992. – 432 с.
4. Лобанов М.Л., Кардонина Н.И., Россина Н.Г., Юровских А.С.

- Защитные покрытия. Учебное пособие. Издательство Уральского университета, 2014. – 200 с.
5. Балдаев Л.Х. Газотермическое напыление: учебное пособие – М.: Маркет ДС, 2007. – 344 с.
  6. Новичков В.М. Автоматизированная система управления процессом напыления тензорезисторов на основе моносульфида самария. // Научно-технические достижения в космических исследованиях Земли. – 2019. – С. 58-65.
  7. Таран В.М. Автоматизация процесса плазменного напыления порошковых материалов на изделия машиностроительного производства. // Машиностроение и машиноведение. – 2014. – С. 4-5.
  8. Shuo Yin, Jan Cizek, Xinkun Suo, Wenya Li. Thermal Spray Technology // Journal of Thermal Spray Technology 25. – 2018.

## ВОЛНОВАЯ ДИНАМИКА ПРИ ВЫСОКОСКОРОСТНОМ ДВИЖЕНИИ ОБЪЕКТОВ ПО УПРУГИМ, ВЯЗКОУПРУГИМ И НЕЛИНЕЙНО-УПРУГИМ НАПРАВЛЯЮЩИМ

В.И. Ерофеев, С.И. Герасимов, Е.Е. Лисенкова

Институт проблем машиностроения РАН – филиал ФГБНУ «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова – Грехова РАН», Нижний Новгород, Россия, [erof.vi@yandex.ru](mailto:erof.vi@yandex.ru)

Излагаются результаты исследования динамики деформируемых направляющих, несущих высокоскоростные движущиеся объекты, представляющие собой одномассовые или многомассовые осцилляторы. Динамическое воздействие движущегося объекта на направляющую вызывает в ней колебания в виде бегущих волн. Рассматриваемые колебания могут быть неустойчивы вследствие аномального эффекта Доплера, который имеет место при движении объекта со скоростью, превышающей фазовую скорость возбуждаемой им волны.

При постановке экспериментов на ракетном треке по отработке новых перспективных видов изделий требуются всё более высокие скорости разгона полезной нагрузки. Для разгона полезной нагрузки на ракетном треке используются ракетные поезда, состоящие из нескольких ступеней. В некоторых случаях движение высокоскоростных ступеней ракетных поездов сопряжено с развитием колебаний в их поперечном движении, приводящих к износу рабочих поверхностей и разрушению опорных башмаков ступени, повреждению рельсовых направляющих ракетного трека. Возникновение упомянутых колебаний обусловлено возмущениями, вызываемыми объектом, движущимся по деформируемой направляющей (упругой, вязкоупругой или нелинейно-упругой). Динамическое воздействие движущегося объекта на направляющую вызывает в ней колебания в виде бегущих волн. Рассматриваемые колебания могут быть неустойчивы вследствие аномального эффекта Доплера, который имеет место при движении объекта со скоростью, превышающей фазовую скорость возбуждаемой им волны [1]. В этом случае излучаемая волна увеличивает энергию поперечных колебаний объекта, уменьшая при этом энергию, обеспечивающую его движение вдоль направляющей. Существенное влияние на развитие поперечных колебаний высокоскоростных объектов оказывает динамическая жёсткость в движущемся контакте рельсовых направляющих ракетного трека. На примере простейшей модели объекта, представляющего собой двухмассовый осциллятор, движущийся по одномерной упругой направляющей, рассмотрена устойчивость поперечного движения высокоскоростных объектов по рельсовой направляющей ракетного трека. Показана зависимость динамической жёсткости рельсовой направляющей в движущемся контакте от скорости движения объекта и частоты возмущения. Определены области неустойчивости поперечного движения двухмассовых осцилляторов, моделирующих движение реальных объектов. Проведено сопоставление с результатами экспериментов. Динамическая жесткость направляющей, лежащей на вязкоупругом основании, эквивалентна реакции сосредоточенного элемента, динамическая жесткость которого является комплексно-значной функцией частоты возмущения и скорости движения объекта. Действительная часть динамической жесткости отражает упруго-инерционные свойства, а мнимая — вязкостные [2]. Наличие отрицательной вязкости в движущемся контакте является необходимым условием возникновения неустойчивости

колебаний. Для двух типов осцилляторов проведены расчёты в диапазонах скоростей движения  $V$ : 500–2000 м/с и круговых частот воздействия:  $6000 \text{ с}^{-1}$ . Показано, что значки, отображающие опыты с объектами массой 211 кг при скоростях движения 1080–1480 м/с, расположены выше верхней границы области неустойчивости. Все реальные опыты с этими объектами были зачётными, аварийных опытов не было. Значки, отображающие опыты с объектами массой 50 кг при скоростях движения 1280–1340 м/с, расположены выше нижней и ниже верхней границ области неустойчивости, т. е. в области неустойчивости. Эти опыты были аварийные.

Известно, что в линейных средах с дисперсией средний поток энергии, переносимый волной, равен произведению средней плотности энергии на групповую скорость. В связи с этим групповую скорость трактуют как скорость движения энергии, переносимой волновым полем. Как показали проведенные исследования, для балки, лежащей на нелинейном основании, эти соотношения не выполняются. Для нелинейных систем, в отличие от линейных систем, выражение для групповой скорости содержит амплитуду волны. Приводятся зависимости скоростей переноса энергии и импульса, а также групповой скорости от параметров системы.

Работа выполнена при поддержке РФФ (проект № 20–19–00613).

- 1 Весницкий А.И. Волны в системах с движущимися границами и нагрузками. М.: Физматлит. 2001. 320 с.
- 2 Veritchev S.N. Instability of a Vehicle Moving on an Elastic Structure. The Netherlands. Delft Univ. Press. 2002. 192 p.

## МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ПОЛУЧЕНИЯ И ОБРАБОТКИ СИГНАЛОВ ПРИ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ ИСПЫТАНИЯХ МАТЕРИАЛОВ

Ерофеев М.Н.<sup>1</sup>, Уфимцев В.Г.<sup>2</sup>, Бодунов Д.М.<sup>1</sup>, Кириллов С.Н.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, Москва, Россия; info@imash.ru

<sup>2</sup>ООО «ВТИ», Москва, Россия

В работе представлена новая разработанная автоматизированная установка воспроизведения деформации при 1000С повышенной точности, позволяющая научным институтам метрологии и компаниям проводить входной контроль выпускаемой тензорезисторной продукции на высоких температурах и осуществлять первичную поверку производимой продукции перед началом ее эксплуатации.

Представленная разработка относится к области метрологии, а именно к средствам получения чистого изгиба эталонной балки для испытаний тензорезисторов. Устройство содержит силовую раму, систему нагружения балки и систему измерения прогиба балки (прогибомер). Рама выполнена сборной из деталей, изготовленных из листового металла, на которой закреплена пара нагружающих роликов (верхние ролики). В нижней части рамы размещён механизм нагружения с траверсой, на которой закреплена вторая пара роликов. Прогибомер выполнен независимым от силовой рамы и состоит из базы прогибомера и индикатора часового типа, опирающихся на балку тремя ножками. Прогибомер имеет направляющую, обеспечивающую его вертикальное перемещение и шарнирный подвес, обеспечивающий его самоустанавливание по балке. На ролики надеты втулки из жаропрочной керамики, что обеспечивает электрическую изоляцию балки от металлической рамы и позволяет осуществлять прямой нагрев балки пропусканием электрического тока.

В процессе эксплуатации удалось повысить технологичность конструкции установки, увеличить точность воспроизведения и измерения деформации, обеспечить испытания тензорезисторов при высоких температурах (до 1000°C и выше), снизить величину потребляемой мощности и обеспечить компактность высокотемпературной установки.

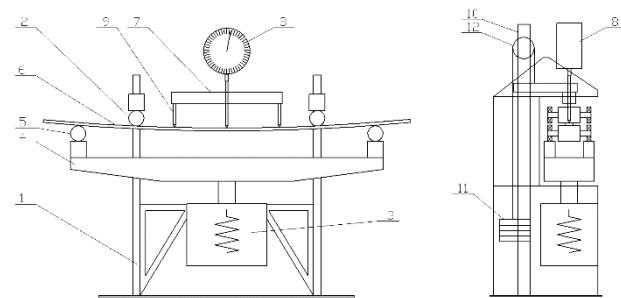
Известный способ получения чистого изгиба балки постоянного сечения и устройство для его осуществления, заключается в том, что в устройстве для получения чистого изгиба эталонной балки, содержащем станину, установленную в ней эталонную балку с системой измерения деформаций, систему нагружения балки с опорными роликами и движителем, в котором станина выполнена в виде стойки с закрепленной на ней горизонтальной распорной балкой, по концам которой установлены цилиндрические шарниры, служащие осями подвеса двух вертикально расположенных симметричных рычагов, нижние концы рычагов шарнирно соединены посредством противоположно направленных соосных тяг с общим для них дифференциальным «плавающим» движителем, а в верхней части каждого рычага попарно сверху и снизу от эталонной балки установлены четыре опорных ролика, причем между роликами и эталонной балкой, также сверху и снизу, размещены «подушки» в виде плоских пластин с полуцилиндрическими выступами на противоположных краях, контактирующих с эталонной балкой непосредственно по образующим цилиндрических поверхностей этих выступов, а точки контакта опорных роликов с плоскими сторонами

пластин-«подушек» попарно находятся на соответствующих нормалях к плоской поверхности пластин-«подушек». Основным недостатком этого метода является тот факт, что механизм нагружения не предназначен для воздействия высокими температурами, что дает возможность проводить испытания только при комнатных температурах.

Кроме того, известны конструкции установок для воспроизведения деформации при высокой температуре, представляющие собой печь, внутри которой размещён весь механизм нагружения балки.

Недостатком таких конструкций являются большие габариты, большое время нагрева и стабилизации температуры балки, а также то, что механизм нагружения подвержен воздействию высокой температуры, что ограничивает максимальную температуру испытания.

Принцип работы устройства (см. рис. 1) представлен ниже.



1 - сборная рама, 2 - верхние неподвижные ролики, 3 - подъёмный механизм, 4 - траверса, 5 - нижние подвижные ролики, 6 - балка, 7 - база, 8 - индикатор часового типа, 9 - опорные ножки, 10 - направляющая, 11 - груз, 12 - блок-ролик.

Рис. 1. Устройство обработки сигналов

Балку с испытываемыми тензорезисторами устанавливают на нижние ролики и поднимают траверсу при помощи подъёмного механизма до контакта балки с верхними роликами. При дальнейшем поднятии траверсы происходит изгиб балки. Для измерения величины изгиба балки на её поверхность опускают прогибомер. База прогибомера опирается на балку двумя боковыми ножками, а третья центральная ножка соединена со штоком индикатора часового типа, по шкале которого и производится отсчёт величины прогиба. Благодаря тому, что в устройстве используется прогибомер, независимый от силовой рамы, смещение линий контакта балки с роликами при изгибе балки не влияет на измерение прогиба балки.

Разработанное устройство дополнительно укомплектовано подсистемой нагрева балки, состоящей из силового трансформатора, силовых кабелей,

высокоточного терморегулятора и твердотельного реле, управляемого терморегулятором для поддержания заданной температуры балки. Верхние и нижние ролики выполнены из жаропрочной керамики, база прогибомера — из сплава с низким температурным коэффициентом линейного расширения (инвар,

суперинвар), а опорные ножки — из кварцевых стержней, также имеющих низкий температурный коэффициент линейного расширения и низкую теплопроводность для уменьшения нагрева базы прогибомера со стороны балки.

## ЭЛЕКТРОННАЯ КОРРЕКЦИЯ ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО БАЗИСА МНОГООСЕВЫХ ВИБРОДАТЧИКОВ

А.С. Жданов

Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, Москва, Россия, [alezhd@mail.ru](mailto:alezhd@mail.ru)

**Аннотация.** Описана новая технология, предлагающая решение проблемы устранения влияния поперечной чувствительности на точность измерений. Показано, что её можно практически полностью скомпенсировать описанным методом. Рассмотрены принципы и практический алгоритм калибровки трёхосевых вибродатчиков с ортогонализацией по методу последовательных приближений. Представлены результаты разработки трёхосевого вибродатчика совместно с электронным преобразователем.

**Введение.** В машиностроении надёжность и ресурс выпускаемой продукции, такой как энергетические установки с вращающимися и вибрирующими узлами, в значительной степени зависят от их вибрационного состояния. Повышенный уровень вибрации приводит не только к ускоренному износу элементов механизма таких как подшипники, упругие элементы амортизаторов, демпферов и др., но и опасным состояниям [1, 2, 3]. Системы виброконтроля обеспечивают исследование динамики происходящих в таких объектах процессов. От точности измерения вибрации зависит эффективность этих систем. При этом наиболее полную картину даёт измерение вектора вибрации. Это необходимо как в процессе совершенствования конструкции выпускаемой продукции, так и для её виброконтроля в период эксплуатации.

Погрешности вибродатчиков, и, в первую очередь, поперечная чувствительность, определяют в итоге точность измерения. В ИМАШ РАН разработан метод и средства повышения точности измерения вибрации многоосевыми вибродатчиками [4, 5]. Наибольшее применение в практике виброизмерений нашли трёхосевые датчики вибрации (ТДВ), позволяющие измерять вектор вибрации в заданной точке объекта. Их поперечная чувствительность появляется в результате механических погрешностей сборки. Обобщённая формула для оценки погрешности измерения с учётом реальных характеристик вибрационного процесса [6]:

$$\xi_{\Sigma} = \xi_0 + (a_n/a_o) S_n [1 + \Psi(f)\gamma], \quad (1)$$

где

$\xi_0$  – номинальная (паспортная) погрешность,

$S_n$  – поперечная чувствительность;

$a_n/a_o$  – отношение составляющих вибрации в поперечном и номинальном направлениях;

$\Psi(f)$  – относительный коэффициент, отражающий подъём АЧХ на частотах поперечного резонанса;

$\gamma$  – коэффициент от 0 до 1, отражающий резонанс,

$f$  – частота (Гц).

Отсюда видно, что поперечная чувствительность в реальных условиях может значительно превышать паспортную.

### Электронный преобразователь

Для устранения влияния поперечной чувствительности ТДВ необходим электронный преобразователь векторов чувствительности (ЭПВЧ) по структуре, изображённой на рис. 1 [7]. Он производит компенсацию помеховых сигналов в каналах, возникающих

вследствие наличия поперечной чувствительности ТДВ. Для этого из векторов чувствительности формируются линейные комбинации и затем производится их ортогонализация и нормализация.

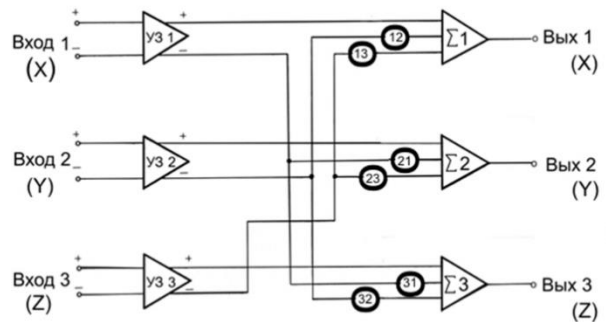


Рис. 1. Структурная схема ЭПВЧ (в кругах показаны матричные коэффициенты ортогонализации)

Структурная схема ЭПВЧ состоит из трёх усилителей заряда УЗ1, УЗ2 и УЗ3 и трёх суммирующих усилителей  $\Sigma 1$ ,  $\Sigma 2$ ,  $\Sigma 3$ , которые осуществляют разворот векторов чувствительности, до ортогонального базиса по методу последовательных приближений. В результате настройки мы получаем следующую матрицу чувствительностей:

$$S = \begin{bmatrix} S_{11} & 0 & 0 \\ 0 & S_{22} & 0 \\ 0 & 0 & S_{33} \end{bmatrix} \quad (2)$$

(Здесь и далее:  $S_{ii}$  – чувствительности вдоль измерительных осей,  $S_{ij}$  – поперечные составляющие, проникающие из оси  $j$  на ось  $i$ ). В ней все поперечные чувствительности равны нулю, то есть система измерительных осей стала ортогональной.

### Алгоритм настройки

Для разворота векторов по соответствующим входам сумматоров  $\Sigma 1$ ,  $\Sigma 2$ ,  $\Sigma 3$  устанавливаются весовые коэффициенты суммирования, равные коэффициентам при проекциях исходных векторов чувствительности. Ортогонализация осуществляется посредством регулировки коэффициентов перекрёстных связей. Для этого на вибростенде последовательно задают вибрацию по измерительным осям ТДВ. Можно начать с любой оси, например, задать вибрацию вдоль оси  $Z$  и регулировкой в сумматорах  $\Sigma 1$ ,  $\Sigma 2$



установить нули на выходах X и Y. Затем произвести аналогичную процедуру, задав вибрацию по осям X и Y. Ортогонализация способом последовательных приближений производится в несколько этапов, каждый из которых состоит из трёх шагов. Подробно алгоритм и процедура настройки описаны в [8,9].

Например, на первом этапе вибрацию направляем вдоль оси X. Регулировкой коэффициентов передачи ЭПВЧ k21 и k31, которые отображают соответствующие элементы матрицы чувствительностей, устанавливаются нулевые напряжения на выходах Y и Z преобразователя, чем устраняется влияние составляющих поперечных чувствительностей, проникающих из оси X. В результате, получаем следующую матрицу чувствительностей:

$$S1_{\text{этап1}} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} \\ 0 & S_{22} & S_{23} \\ 0 & S_{32} & S_{33} \end{bmatrix} \quad (3)$$

Далее задаём вибрацию вдоль оси Y. Теперь регулировкой коэффициентов k12 и k32 устанавливаются нулевые напряжения на выходах X и Z преобразователя, чем устраняется влияние составляющих поперечных чувствительностей, проникающих из оси Y. В результате получаем следующую матрицу чувствительностей:

$$S2_{\text{этап1}} = \begin{bmatrix} S_{11} & 0 & S_{13} \\ \Delta S_{21} & S_{22} & S_{23} \\ \Delta S_{31} & 0 & S_{33} \end{bmatrix}, \quad (4)$$

где  $\Delta$ - коэффициент в интервале от 0 до 1. Мы видим, что в результате второго этапа полностью устранены составляющие поперечных чувствительностей, проникающих из оси Y, но при этом появились составляющие поперечных чувствительностей, проникающих из оси X. Однако, их величина стала меньше исходных.

На третьем шаге задаём вибрацию вдоль оси Z. Регулировкой коэффициентов k13 и k23 устанавливаются нулевые напряжения на выходах X и Y преобразователя, чем устраняется влияние составляющих поперечных чувствительностей, проникающих из оси Z. В результате получаем следующую матрицу чувствительностей:

$$S3_{\text{этап2}} = \begin{bmatrix} S_{11} & \Delta\Delta S_{12} & 0 \\ \Delta\Delta S_{21} & S_{22} & 0 \\ \Delta\Delta S_{31} & \Delta\Delta S_{32} & S_{33} \end{bmatrix} \quad (5)$$

В результате первого этапа полностью устранены составляющие поперечных чувствительностей, проникающих из оси Y, но при этом остались составляющие поперечных чувствительностей, проникающих из осей X и Y. Однако, их величина стала меньше исходных. Таким образом, в результате трёх установок датчика на вибростенде и регулировок межканальных коэффициентов мы получили датчик с нулевыми поперечными чувствительностями, проникающими из канала Z, и уменьшенными, по сравнению с исходными, поперечными чувствительностями, проникающими из осей X и Y.

Если остаточные значения поперечных чувствительностей превышают требования, то производится второй этап ортогонализации алогично первому этапу. В результате, получаем следующие матрицы чувствительностей:

$$S1_{\text{этап2}} = \begin{bmatrix} S_{11} & \Delta S_{12} & \Delta S_{13} \\ 0 & S_{22} & S_{23} \\ 0 & S_{32} & S_{33} \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$S2_{\text{этап2}} = \begin{bmatrix} S_{11} & \Delta S_{12} & \Delta S_{13} \\ 0 & S_{22} & S_{23} \\ 0 & S_{32} & S_{33} \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$S3_{\text{этап2}} = \begin{bmatrix} S_{11} & \Delta\Delta S_{12} & 0 \\ \Delta\Delta S_{21} & S_{22} & 0 \\ \Delta\Delta S_{31} & \Delta\Delta S_{32} & S_{33} \end{bmatrix} \quad (8)$$

Как видим, в результате второго этапа мы получили датчик с нулевыми поперечными чувствительностями, проникающими из канала Z, и значительно уменьшенными, по сравнению с исходными и полученными после первого этапа, поперечными чувствительностями, проникающими из осей X и Y.

В результате большого числа проведенных экспериментов по ортогонализации измерительного базиса ТВД различной конструкции получены эмпирические данные, которые дают возможность оценить минимальное число этапов, позволяющее снизить поперечную чувствительность до необходимого уровня. В качестве грубой оценки можно принять, что в результате каждого этапа составляющие поперечной чувствительности уменьшаются на порядок исходной величины:

$$S_{ij}(n+1) \approx S_{ij}(n) \times S_{ij}(n), \quad (9)$$

где  $S_{ij}(n)$  – составляющая поперечной чувствительности, оставшаяся после завершения n-го этапа ортогонализации;

$S_{ij}(n+1)$  – составляющая поперечной чувствительности, оставшаяся после завершения (n+1)-го этапа ортогонализации.

Например, если исходная поперечная чувствительность равна 10%, то после первого этапа ортогонализации она уменьшается приблизительно до 1%, после второго этапа до 0,01% и так далее. Чем меньше исходная поперечная чувствительность, тем меньше требуется этапов. Практика показывает, что обычно достаточно 2–3 этапов. Испытания и калибровка с ортогонализацией серии этих датчиков в соответствии с приведённой выше методикой показали, что исходные поперечные чувствительности, находившиеся в пределах от 1,4% до 13,8%, были уменьшены практически до нуля на уровне шумов измерительной аппаратуры [10]. В ИМАШ РАН разработан трёхосевой помехоустойчивый вибродатчик типа ТСП-1, работающий совместно с электронным преобразователем УЗТ-ОН-2. Он имеет поперечную чувствительность по выходам ЭПВЧ менее 0,1%, коэффициент преобразования  $10 \text{ mV/ms}^{-2}$  и работает в диапазоне частот 0,1- 5000Hz.

## Выводы

Представленный в данной работе метод обладает высокой эффективностью и прошёл апробацию как для улучшения метрологических характеристик промышленных вибродатчиков, так и при разработке новых многоосевых датчиков, например, при создании вибродатчика на основе монолитного пьезоэлемента, датчика динамической силы и др.

## Заключение

Представленная методика показала свою эффективность и позволяет производить практически полное устранение влияния поперечной чувствительности многоосевых вибродатчиков на точность измерения вибрации и расширить его рабочий диапазон частот. Ортогонализация измерительного базиса трёхосевого вибродатчика методом последовательных приближений выполняется электронным преобразователем с наиболее простой структурой и обеспечивает максимальный динамический диапазон по шумам, а также быструю сходимость в 2–3 этапа. Поскольку она производится без разборки вибродатчика, то может производиться не только при его изготовлении, но и в процессе поверки в период эксплуатации, что увеличивает его срок службы. Использование описанной методики не только улучшает метрологические параметры датчиков вибрации, но и позволяет существенно снизить требования к точности изготовления их измерительной системы, что снижает издержки и себестоимость производства. Необходимо также отметить, что этот метод также весьма перспективен для создания не только новых высокоточных многоосевых датчиков вибрации, но и других многоканальных линейных датчиков физических величин.

Работа выполнена при поддержке Минобрнауки России. Экспериментальные исследования выполнены с использованием оборудования центра коллективного пользования ИМАШ РАН.

1. Ганиев Р. Ф. Нелинейные резонансы и катастрофы. Надёжность, безопасность и бесшумность / Научно-издательский центр «Регулярная и хаотическая динамика». 2013. С. 182, 292, 452, 453
2. Ганиев Р.Ф., Ковальчук П.С. Динамика систем твёрдых и упругих тел: (Резонансные явления при нелинейных колебаниях) / Машиностроение. 1980. 208С.
3. Ганиев Р.Ф., Балакшин О.Б., Кухаренко Б.Г. Бифуркация резонанса при флаттере лопаток ротора турбокомпрессора / Доклады Академии наук. 2012. Т. 444, №1. С. 35 - 37
4. Zhdanov A S., Morozov K.D. A new technology for improving vibration measurement accuracy with 3D piezoelectric transducers / Proceedings of the 10th International Congress on sound and vibration. – Stockholm, 2003. P. 943 – 950. (Жданов А.С., Морозов К.Д. Новый способ повышения точности измерения вибрации трёхосевыми пьезоакселерометрами. Доклад на 10-м международном конгрессе по вопросам акустики и вибрации / 2003. 7- 10 июля. Стокгольм. Швеция. С. 943 - 950 [in English] [Процитировано 28.10.2022]. Доступно: <http://vntr.ru/ftpgetfile.php?id=518>).
5. Жданов А.С. Повышение точности измерения пространственной вибрации трехкомпонентными пьезодатчиками на основе электронной ортогонализации векторов чувствительности / Вестник науч.-тех. развития. 2011. № 5. С. 13 – 19.
6. Жданов А.С. Влияние поперечной чувствительности пьезоакселерометров на точность измерения вибрации / Приборы. 2017. № 4(202). С. 1 – 6.
7. Жданов А. С. Предусилитель-компенсатор для трехкомпонентных вибродатчиков / Приборы. 2015. № 4(178). С. 19 – 24.
8. Жданов А.С. Ортогонализация измерительного базиса трехосевых вибродатчиков методом последовательных приближений / Заводская лаборатория. Диагностика. материалов. 2023. Т. 89. № 4. С. 29-37. DOI: 10.26896/1028-6861-2023-89-4-29-37.
9. Жданов А.С. Исследование фазовых характеристик вибродатчиков и условий ортогонализации их измерительного базиса для систем виброконтроля и виброиспытаний материалов / Заводская лаборатория. Диагностика. материалов. 2023. Т.89. №11. С. 34-43. DOI: 10.26896/1028-6861-2023-89-11-34-43.
10. Жданов А. С. Помехоустойчивый трехкомпонентный пьезоакселерометр на основе монолитного пьезоэлемента / Приборы. 2014. № 7(169). С. 1 – 5.

# ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ НОВЫХ КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ И ПРОЦЕССОВ ИЗГОТОВЛЕНИЯ СТУПИЦЫ НА НАДЁЖНОСТЬ И БЕЗОПАСНОСТЬ АВТОМОБИЛЯ

В.А. Зорин<sup>1</sup>, Буй Ван Тхань<sup>2</sup>

Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ), Москва, Россия  
[madi-dm@list.ru](mailto:madi-dm@list.ru), [buihanhmta.2023@gmail.com](mailto:buihanhmta.2023@gmail.com)

## Аннотация

В статье проводится анализ влияния конструкционных материалов на прочностные характеристики ступицы ходовой части машины с помощью программного обеспечения SolidWorks. Приведены результаты исследований и обоснования изготовления автомобильной ступицы из ПКМ методами аддитивных технологий. В результате исследований проведена оптимизация параметров технологического процесса изготовления ступицы ходовой части на основе современного программного обеспечения для 3D-печати.

## Введение

Изучение и моделирование влияния эксплуатационных свойств новых конструкционных материалов деталей ходовой части на надёжность и безопасность наземных транспортно-технологических машин имеет большое значение для науки и производства.

В настоящее время автомобильные ступицы традиционно изготавливаются из различных металлических сплавов, преимущественно чугуна. Расширяется производство ступиц из карбон-керамических соединений, однако основным материалом для производства остается чугун.

## Цель, объекты и методы исследований

В статье рассматриваются возможности изготовления ступицы автомобиля из полимерного композиционного материала (ПКМ). Проведён анализ преимуществ и недостатков ступиц, изготовленных из ПКМ.

Основные преимущества замены металлических материалов на ПКМ:

- снижение массы в 2–3 раза по сравнению с металлическими дисками;
- низкий уровень шума в процессе торможения;
- увеличенная стойкость к истиранию в сравнении с металлическими ступицами;
- улучшенные антикоррозионные свойства тормозного диска из ПКМ.

Недостатки:

- высокая стоимость изготовления ступиц из ПКМ до начала серийного производства;
- необходимость проектирования нового ПКМ с заданными свойствами;
- необходимость разработки нового технологического процесса и обоснования производственного оборудования для изготовления ступиц из ПКМ.

Применение ПКМ при производстве ступиц автомобилей открывает возможности использования аддитивных технологических методов создания трёхмерных объектов, путём послойного добавления материала. Реализация аддитивных технологических методов осуществляется с помощью 3D-принтеров, обеспечивающих практически безотходное производство.

Аддитивные технологические методы позволяют сократить трудоёмкость, сроки и себестоимость производства. Применение ПКМ в сочетании с аддитивными технологиями позволяет существенно улучшить характеристики изделий [1,2,3].

Сравнительный анализ результатов проведённых исследований продолжительности печати и перемещения головки экструдера с применением программ Cura (39 мин), IdeaMaker (43 мин) и PrusaSlicer (47 мин) показал существенную разницу во времени изготовления испытательных образцов с одинаковыми заданными параметрами. Предел прочности и модуль упругости образцов также значительно отличаются. (см. рис. 1).

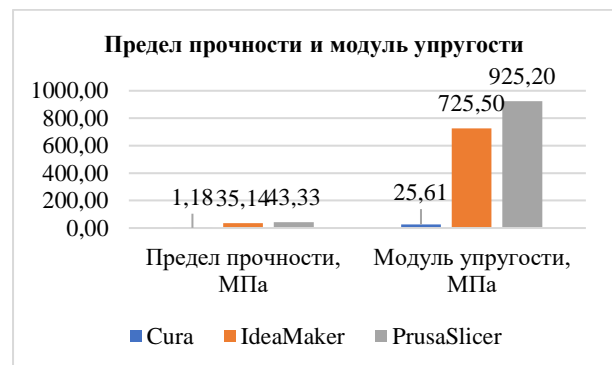


Рис. 1 Результаты испытаний образцов из ABS пластика по пределу прочности и модулю упругости, МПа

Результаты проведённых исследований позволяют обосновать выбор программного обеспечения для печати наиболее ответственных деталей транспортно-технологических машин. Это позволит обеспечить максимальную надёжность и высокое качество готовых изделий.[5]

**Материалы и методы исследований.** Формирование электронной модели ступицы производится с использованием программного обеспечения SolidWorks для трёхмерного моделирования "Ступица"

После создания 3D-объектной модели и экспорта её в файл STL производится обработка данных в программном обеспечении для 3D-печати Ultimaker Cura.

Имитация нагрузок при работе ступицы в программе SolidWorks проводится для выявления экстремальных режимов эксплуатации машины.

Для имитации использованы два типа расчетов, выполненных в пакете Simulation программного обеспечения SolidWorks: расчет прочности и расчет максимального перемещения.

Расчета выполнены с заданной рабочей температурой ступицы, равной 450°C, для двух типов материалов: сталь С45 и алюминий Н18.

При анализе прочности ступицы из материала сталь С45 минимальный коэффициент запаса прочности получился 0,456. При анализе прочности ступицы из материала алюминий Н18 минимальный коэффициент запаса прочности 0,130. Результаты расчетов показывают, что ступица из стали С45 имеет в 3,5 раза большую прочность, чем из алюминия Н18 при идентичных размерах.

Вторым видом расчета является расчет на максимальный изгиб. Расчет ступицы из стали С45, максимальный изгиб составил 0,561 мм.

Результат расчета ступицы, изготовленной из алюминия Н18, на максимальный изгиб составил 0,263 мм. Таким образом, результаты расчетов показывают, что ступица из стали С45 имеет максимальный изгиб в 2,13 раза меньше, чем из алюминия Н18, при идентичных размерах.

Целью проведенного расчета является сравнение прочности ступицы из стали С45 и алюминия Н18 с помощью программного обеспечения SolidWorks.

Дальнейшие исследования направлены на анализ возможности замены металлических материалов при изготовлении ступицы на полимерные композиционные. Изготовление ступицы планируется методом 3D-печати на основе программного обеспечения Ultimaker Cura из ABS-пластика с наполнителями.

Для ступицы с заданными параметрами, используя программу-слайсер, определим оптимальное расположение детали на столе принтера при печати.

При нескольких вариантах расположения детали (не более трех) и режимах печати определили продолжительность печати и расход материала.

### Результаты и их обсуждение

Результаты сравнения вариантов режимов печати ступицы приведены в табл. 1.

Таблица 1 - Результаты сравнения оптимальных вариантов режимов печати ступицы

Вариант печати	Расход материала, м	Время печати,
1	14,05	5 часов 4 мин
2	24,18	7 часов 47 мин
3	16,52	5 часов 38 мин

Таким образом, полученные результаты показывают, что в зависимости от положения детали при печати наиболее эффективной по производительности является печать ступицы по варианту 1: Печать детали в горизонтальном положении без поддержки. В этом случае продолжительность печати составила 5

ч. 4 мин. при расходе материала 14,05 м. Так же при таком расположении ступицы отмечается минимальный риск возникновения дефектов печати.

Оценка продолжительности печати и расхода материала при печати ступицы с заполнением от 40 до 100%, показана на рисунках 13–16.

Результаты исследования времени печати и расхода материала при печати ступицы с заполнением от 40 до 100% приведены в табл. 2.

Таблица 2 - Результаты исследования времени и расхода материала при печати ступицы с заполнением от 40 до 100%

Заполнение модели, %	Расход материала, м	Время печати
40	14,56	4 часов 28 мин
60	15,54	4 часов 44 мин
80	16,54	4 часов 55 мин
100	17,27	6 часов 13 мин

При заполнении материалом от 40 до 100 % время печати увеличивается с 4 ч. 28 мин до 6 ч. 13 мин. (на 28 %).

При этом расход материала увеличивается в 1,2 раза (с 14,56 м. до 17,27 м.).

### Расчет производственных возможностей SLM 500HL

Аддитивные технологии уже занимают определенное место в промышленном комплексе России в целом и в машиностроении, в частности. Традиционные технологические методы изготовления деталей типа ступица предусматривают механическую обработку заготовки резанием с использованием высокоточных высокоскоростных многокоординатных дорогостоящих станков с привлечением высоко квалифицированного персонала. Применение концентрированных источников энергии в качестве метода обработки конструкционного материала позволяет воспользоваться преимуществами неравновесных процессов, происходящих при кристаллизации ванны расплава. Это обстоятельство позволяет говорить о лазерных и электронно-лучевых аддитивных способах производства деталей машин, как о крайне интересных с точки зрения применения новых материалов и получения новых структур [2]. Проанализировав существующие установки для аддитивного производства (АП), можно сделать вывод, что 3D-принтер SLM 500HL на сегодняшний день обладает наибольшей технологичностью и широко применяется в машиностроении. Это связано с широким выбором конструкционных материалов для производства деталей, мощным лазером, наилучшей точностью и объемной камерой спекания, позволяющей изготавливать достаточно крупные детали с применением различных (в том числе металлических композиционных) материалов. В зависимости от требований к поверхности и точности изготовления, а также применяемого материала для изготовления, скорость печати принтера SLM 500HL может варьироваться от 10 см<sup>3</sup> / час до 100 см<sup>3</sup> / час [3,4,5].

### Выводы

1. Результаты моделирования и сравнительного анализа прочностных свойств ступиц, изготовленных из разных материалов с помощью программного обеспечения SolidWorks показывают, что ступица из стали С45 может выдерживать высокие напряжения и нагрузки и более долговечна, чем ступица из алюминия Н18. Общие результаты моделирования показывают, что применение программного обеспечения при проектировании и выборе материалов позволяет повысить безопасность при изготовлении и снизить затраты в эксплуатации деталей машин.

2. Применение полимерных композиционных материалов при изготовлении ступиц является перспективным и требует проектирования ПКМ с заданными свойствами.

3. Анализ технологических процессов 3D-печати детали машины в аддитивном производстве позволяет оптимизировать время изготовления изделия, обеспечить необходимый уровень качества и эффективности производства на основе современного программного обеспечения.

4. Обоснование выбора методов и технологического оборудования 3D-печати играет очень важную

роль, поскольку при 3D-печати они связаны с производственными затратами и эксплуатационными свойствами детали, такими как прочность, твердость, определяющими уровень надёжности и безопасности эксплуатации машины в целом.

1. Федоров, В. Н. Основы конструирования и расчета элементов машин: учебник / В. Н. Федоров. – Москва: Издательский центр "Академия", 2007. – 368 с.
2. Иванов П. Н. и др. "Применение аддитивных технологий в производстве автомобильных деталей" – М.: Автопром, 2007. – 112 с.
3. Цветков П. В. и др. "Методы 3D – печати в автомобилестроении" – М.: Наука, 2008. – 99 с.
4. Зорин В.А. Применение аддитивных технологий при изготовлении деталей автомобилей / В.А. Зорин, М.И. Тимченко // Грузовик. – 2018. – № 4. – С. 16. Зорин В.А. Применение аддитивных технологий при изготовлении деталей автомобилей / В.А. Зорин, М.И. Тимченко // Грузовик. – 2018. – № 4. – С. 16.
5. Варакин Д.А., Влияние параметров программ-слайсеров на качество деталей машин, изготовленных с помощью аддитивных технологий / Д.А. Варакин, В.А. Зорин, И.С. Нефёлов // «Высокие технологии в строительном комплексе» (ранее Научный вестник Воронежского государственного архитектурно-строительного университета. Серия «Высокие технологии. Экология»). - Воронеж: Воронежский государственный университет, 2024.

## ПОЛУЧЕНИЕ ПОРОШКОВОГО ПОКРЫТИЯ ИЗ ВЫСОКОЭНТРОПИЙНОГО Fe-Cr-Ni-Mn-Co СПЛАВА

А.Ю. Иванников, В. С. Юсупов

<sup>1</sup>Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН, Москва, Россия; [aivannikov@imet.ac.ru](mailto:aivannikov@imet.ac.ru)

Для получения высокоэнтропийного Fe-Cr-Ni-Mn-Co порошкового покрытия использовали механическое легирование элементных порошков. Полученный порошок смешивали с воском и наносили на цилиндрический образец из стали 09Г2С. Припекание порошкового покрытия к подложке осуществляли среднечастотным индуктором. Далее для искрового плазменного спекания порошкового высокоэнтропийного покрытия применяли горячее поверхностное пластическое деформирование с одновременным резистивным нагревом электрическим током. Выявили, что микротвердость порошкового покрытия  $180\pm 20$  HV, а после горячего поверхностного пластического деформирования микротвердость повысилась до  $230\pm 15$  HV.

В последние годы наибольшее внимание уделяется изготовлению деталей с покрытиями, обеспечивающими высокий комплекс физико-механических и эксплуатационных свойств поверхности. Применение покрытий позволяет использовать для изготовления деталей экономно легированные стали. А для покрытий выбирать коррозионностойкие и износостойкие сплавы.

В современной металлургии активно разрабатываются новые высокоэнтропийные сплавы, обладающие уникальными характеристиками, позволяющими использовать их в условиях низких температур, коррозионной среды и т.д. Одним из таких сплавов является эквиаомный сплав Кантора (хим.состав Fe-Cr-Ni-Mn-Co). Поэтому актуальным становится вопрос получения покрытий из данного сплава для защиты поверхности изделий, работающих при отрицательных температурах и в агрессивных средах.

### Цель

Получение порошкового покрытия из высокоэнтропийного Fe-Cr-Ni-Mn-Co сплава.

### Материалы и методы исследований

Для получения порошковой смеси использовали элементные порошки Fe, Cr, Ni, Mn, Co. Эквиаомную смесь помещали в размольные стаканы планетарной мельницы и подвергали механическому легированию 15 часов в среде аргона. Далее полученный порошок смешивали с воском и наносили на поверхность цилиндрической заготовки из стали 09Г2С диаметром 15 мм. Шликерное покрытие припекали к подложке в среднечастотном индукторе. Образец с порошковым покрытием устанавливали в центре токарного станка и обкатывали в трехроликовом приспособлении с усилием прижатия основного ролика 100 кгс. Для полученных припеканием и горячим поверхностным пластическим деформированием с одновременным резистивным нагревом покрытий осуществили обработку цилиндрической поверхности надфилем и наждачной бумагой для последующего измерения микротвердости на плоском участке при нагрузке 200 гс.

### Результаты и обсуждение

В процессе механического легирования элементных порошков в планетарной мельнице в результате многочисленных актов разрушения элементных порошков и прохождения последующей сварки полученных ювенильных поверхностей частиц порошков происходит образование многокомпонентного сплава с близким к эквиаомному составом. Смешение воска с полученным порошком обеспечивает получение шликерной пасты, которую технологически доступно равномерно нанести шпателем на поверхность подготовленного образца при его вращении на токарном станке. Далее нагрев в среднечастотном индукторе обеспечивает выгорание воска и спекание частиц порошка между собой, а также припекание порошкового покрытия к поверхности детали. Получаемое припеканием порошковое покрытие характеризуется высокой шероховатостью, остаточной пористостью. Поэтому для повышения плотности покрытия, его когезионной и адгезионной прочности требуется проведение дополнительной обработки.

Уплотнение покрытия в данной работе осуществили горячим поверхностным пластическим деформированием с одновременным резистивным нагревом. В процессе резистивного нагрева и пластического деформирования в порах формируется искровые разряды по аналогии с процессом искрового плазменного спекания на установках spark plasma sintering. Выгодным отличием примененного способа является возможность обкатки длинномерных деталей.

Горячая поверхностная пластическая деформация способствовала повышению микротвердости покрытия с  $180\pm 20$  HV до  $230\pm 15$  HV.

### Выводы

Горячее поверхностное пластическое деформирование пористого высокоэнтропийного порошкового покрытия обеспечивает повышение его микротвердости за счет уплотнения, сварки по границам частиц.

Работа выполнена в соответствии с государственным заданием 075-00320-24-00.

## СПЕЧЕННЫЕ ФРИКЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ: КОНЦЕПЦИЯ РАЗРАБОТКИ, ОПЫТ ВНЕДРЕНИЯ

А.Ф. Ильющенко, А.В. Лешок, А.Н. Роговой

<sup>1</sup>Институт порошковой металлургии имени академика О.В. романа, Минск, Беларусь; sdilav@tut.by

В работе представлен концептуальный подход в разработке спеченных фрикционных материалов и фрикционных дисков узлов трения, работающих со смазкой. Приведены частные варианты использования предложенного подхода в разрабатываемых фрикционных материалах в части выбора порошков, оценки влияния на триботехнические и эксплуатационные свойства. Приведен опыт применения разработанных составов фрикционных материалов в узлах трения автотракторной техники.

### Введение

Мировой рост в добыче и переработке природных ресурсов, разведке новых месторождений, развитии сельского и лесного хозяйств, строительстве дорог, в промышленности и сфере коммуникаций стимулирует повышенный спрос на автотракторную, дорожно-ремонтную и строительную технику, одним из важнейших узлов которых являются тормозные и передающие фрикционные узлы.

Современные технологии требуют создания машин и механизмов с более высокими показателями их рабочих характеристик, ресурсом работы и при этом быть более экономичными. Соответственно возрастают требования к эксплуатационным характеристикам комплектующих узлов, в том числе, и фрикционным дискам, работоспособность которых определяется свойствами фрикционных материалов и нагрузочно-скоростными режимами их работы. Даже в одной машине может содержаться несколько фрикционных дисков, работающих при существенно отличающихся условиях и выполняющих различные функции. В связи с этим все большую актуальность приобретают работы по созданию фрикционных дисков, эксплуатирующихся при скорости скольжения 5–15 м/с, давлении 2–6 МПа, температуре 80–150 °С, наличии или отсутствии смазки [1-4].

В настоящее время применяются фрикционные материалы с полимерной матрицей, на основе углерод-углеродной композиции, керамической основе, и другие, при этом достаточно широкое применение нашли фрикционные материалы на металлической основе (медной, железной, и др.), получаемые по технологии порошковой металлургии – спеченные фрикционные материалы [5-8].

Основными достоинствами спеченных фрикционных материалов на медной основе, работающих преимущественно в узлах трения при наличии смазки, являются: стабильное значение коэффициента трения; высокая износостойкость и теплопроводность; отсутствие зависимости коэффициента трения от климатических условий; долговечность (9000–10000 моточасов); экологическая чистота процесса получения, недефицитность и низкая стоимость исходных порошков и процесса изготовления фрикционного диска.

Удовлетворение заданных эксплуатационных свойств идет по пути повышения износостойкости и стойкости к формированию задира, прочности, термостойкости, величины и стабильности

коэффициента трения путем управления свойствами композиционной матрицы спеченного фрикционного материала и модификацией ее структуры введением различных функциональных добавок, повышением прочности соединения со стальной основой.

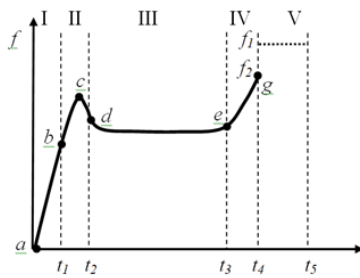
Имеющиеся в настоящее время данные по использованию добавок в спеченных фрикционных материалах носят разрозненный, и даже противоречивый характер. Отсутствует методологический подход к разработке конструкции фрикционного диска, состава спеченного фрикционного материала с учетом режимов работы и возможности возникновения аварийных ситуаций, а также отсутствует однозначное представление о критериях выбора функциональных добавок и оценки их влияния на триботехнические и эксплуатационные свойства.

### Цель

Разработка концептуально-методологического подхода при оптимизации составов спеченных порошковых материалов узлов трения, работающих со смазкой, и его реализация на практике.

### Результаты и обсуждение

Для анализа особенностей процесса кратковременного фрикционного взаимодействия при передаче крутящего момента при наличии эффекта скольжения (буксования) предложены динамические модели, адаптированные для инерционного испытательного стенда. Количественной характеристикой экспериментальной зависимости фрикционного взаимодействия пары трения, получаемой на инерционном стенде, является изменение коэффициента трения во времени. Зависимость отражает наиболее энергонагруженный режим при замыкании пары трения. Зависимость предлагается рассматривать как многостадийный процесс, состоящий из пяти фаз: выдавливание смазки, вхождение в контакт поверхностей трения, буксование, переход из динамического режима в статический, фазы передачи крутящего момента (рисунок 1).



Фазы трения: I – выдавливание смазки; II – вхождение в контакт поверхностей трения; III – буксование при граничной смазке; IV – переход из динамического режима в статический (замыкание пары трения); V – фаза передачи крутящего момента

Рис.1 - Диаграмма изменения коэффициента трения во времени, полученная при испытании ФММ на инерционном стенде

В общем случае, на характер изменения коэффициента трения в каждой фазе оказывает влияние исходная микрогеометрия поверхностей, структура поверхностного слоя, содержащего адсорбированные молекулы и модифицирующие включения, при этом управление ходом зависимости в каждой фазе возможно за счет изменения структуры композиционной матрицы фрикционного материала и использования порошков различной природы. Для оптимальной формы зависимости изменения коэффициента трения во времени, установлены требования к каждой фазе и положению критических точек: минимизация периода вхождения в контакт; сглаживание критических точек между периодами выдавливания смазки и буксования; линейная форма зависимости в фазе буксования; минимальный период перехода от динамического к статическому режиму с отсутствием скачкообразного изменения коэффициента трения. Несовершенство контактных площадей, гетерогенность структуры СФМ приводит к флуктуации коэффициента трения в каждой фазе, которое должно иметь минимальное значение от аппроксимированной кривой, исключая динамические нагрузки, вибрацию, шум. Снижение флуктуационного разброса может достигаться использованием порошков с различными физико-механическими свойствами и структурными характеристиками.

Для описания структуры спеченного фрикционного материала разработана структурно-классификационная модель, включающая композиционную матрицу, состоящую из металлической основы, углеродсодержащей добавки и пор, и функциональные добавки различной природы, позволяющие в широких пределах варьировать физико-механические триботехнические и эксплуатационные характеристики. Металлическая основа спеченного фрикционного материала обеспечивает необходимые механические, теплофизические свойства, адгезию со стальной основой фрикционного диска. Углеродсодержащая добавка способствует повышению коэффициента трения, износостойкости и стойкости к формированию задира. Поры обеспечивают подвод газовой защитно-восстановительной среды при спекании для успешного осуществления стадий формирования структуры, являются местами локализации продуктов износа и выполняют роль дополнительных источников смазки, а находясь в структуре фрикционного

материала являться демпферами.

Предложено свойства добавок в составе фрикционного материала  $A_d$  описать функцией, зависящей от структурно-количественных показателей матричного типа:

$$A_d = A_d(X_i, Y_j, Z_k, \dots) \{i, j, k\} = \{1 \div N; \% \} \subset \{N\}, \quad (1)$$

где  $X, Y, Z, \dots$  – структурно-количественных параметров матричного типа;

$N$  – множество целых чисел.

Содержащиеся в зависимости (1) структурно-количественные параметры матричного типа могут быть представлены в виде матриц  $X=\{X\}$ ,  $Y=\{Y\}$ ,  $Z=\{Z\}$  (рисунок 2), содержащих массивы количественных данных:

$$\{X\} = \begin{bmatrix} HB - \text{твердость} \\ E_m - \text{модуль упругости} \\ \lambda_m - \text{теплопроводность} \\ \dots \end{bmatrix}, \quad \{Y\} = \begin{bmatrix} d_m - \text{дисперсность} \\ \Phi_m - \text{фактор формы} \\ W_m - \text{фазовый состав} \\ \dots \end{bmatrix},$$

$$\{Z\} = \begin{bmatrix} C_m - \text{концентрация} \\ K_m - \text{модуль упругости} \\ \dots \end{bmatrix}, \quad (2)$$

либо семантических данных:

$$FP[S_n] = \begin{bmatrix} \text{Физико-механические} \\ \text{Триботехнические} \\ \text{Экономические} \\ \dots \end{bmatrix} \quad (3)$$

В практическом плане использование зависимости 1 сводится к реализации таблично-матричного представления (рисунок 2), в котором каждой добавке приписываются известные свойства, приводится степень влияния на функциональные свойства (по результатам анализа известных литературных данных). Оценка комплексного влияния добавки на предъявляемые функциональные свойства позволяет установить приоритет использования, предельно допустимый интервал концентрации.

Использование добавок в составе фрикционного материала должно носить систематизированный характер, для чего в качестве примера предложено классифицировать добавки по способности взаимодействия с металлической матрицей фрикционного материала с образованием вторичных соединений, по твердости, дисперсности, составу, форме. Предложенная классификация не окончательна, может дополняться в соответствии с требованиями, предъявляемыми к фрикционному материалу (к примеру: по способности оказывать влияние на объемные изменения материала при спекании, формированию вторичных поверхностных структур после трения, способности влиять на теплопроводность и прочность адгезии слоя ФМ к стальной основе) [9, 10].



Добавка	Физико-механические свойства	Дисперсно-фазовое состояние	Концентрация	Прочее	Функциональные свойства фрикционного материала
	X	Y	Z		
1	НВ <sub>1</sub> Е <sub>1</sub> λ <sub>1</sub>	d <sub>1</sub> НВ <sub>1</sub> Ф <sub>1</sub>	C <sub>1</sub> K <sub>1</sub>	...	триботехнические (β <sub>1</sub> )
2	НВ <sub>2</sub> Е <sub>2</sub> λ <sub>2</sub>	d <sub>2</sub> НВ <sub>2</sub> Ф <sub>2</sub>	C <sub>2</sub> K <sub>2</sub>	...	физико-механические (β <sub>2</sub> )
3	НВ <sub>3</sub> Е <sub>3</sub> λ <sub>3</sub>	d <sub>3</sub> НВ <sub>3</sub> Ф <sub>3</sub>	C <sub>3</sub> K <sub>3</sub>	...	экономические (β <sub>3</sub> )
...	...	...	...	...	...

Рис. 2 – Таблично-матричное представление вводимых добавок в состав спеченного фрикционного материала

При разработке технологических процессов изготовления фрикционных дисков использовался предложенный методологический подход, алгоритм выбора добавок порошков требуемого функционального назначения, учитывая данные по влиянию бронзовой матрицы, углеродсодержащей добавки, пор, добавок металлических, керамических порошков, их структурных превращений при спекании на физико-механические и триботехнические свойства.

Разработанные технологические процессы позволили изготовления фрикционных дисков гидромеханических коробок передач: самосвала БЕЛАЗ-7555 грузоподъемностью 55-60 тонн; погрузочно-доставочной машины МоАЗ-40751 грузоподъемностью (г/п) 16 тонн предназначенной для работы в подземных условиях; аэродромного тягача модели БелАЗ-74270 предназначенного для буксировки широкофюзеляжных воздушных судов пятой категории, имеющих взлетную массу 400-600 тонн; фронтального погрузчика модели БелАЗ-78240 с колесной формулой 4x4, предназначенного для доставки грузов массой до 60 тонн, механизации погрузочно-разгрузочных работ карьерных самосвалов, на ж/д станциях, предприятиях переработки сырья и материалов; гидромеханической коробки передач «Кировец» серии К-7 Петербургского тракторного завода с шарнирно-сочлененной рамой мощностью ДВС от 300 до 460 л.с.;

гидромеханической коробки передач техники специального назначения Минского завода колесных тягачей. Также изготовлены ФД для маслоохлаждаемых тормозов ведущего моста погрузчика «Амкордор»; бортового редуктора маслоохлаждаемого тормоза снегоуплотнительной машины «Беларус» МСУ-108; муфты сцепления тракторов семейства «Беларус».

Новизна разработанных составов фрикционных материалов и конструкций фрикционных дисков подтверждена 19 патентами на изобретение Республики Беларусь и России.

1. Крагельский И. В., Трение и износ, 2 изд., М.: Машиностроение, 1968. – 481 с.
2. Зельцерман И. М. Фрикционные муфты и тормоза гусеничных машин / И. М. Зельцерман, Д. М. Каминский, А. Д. Онопо. – М.: Машиностроение, 1965. – 240 с.
3. Федорченко, И.М. Композиционные спеченные антифрикционные материалы. / И.М. Федорченко, Л.И. Пугина – Киев: Наукова думка, 1980. – 404 с.
4. Федорченко, И. М. Современные фрикционные материалы / И. М. Федорченко, В. М. Крячек, И. И. Панаюти // Киев: Наукова думка, 1975. – 334 с.
5. Хренов О. В. Металлокерамические фрикционные материалы: учеб. пособие / О. В. Хренов, А. А. Дмитриевич, А. В. Лешок. – Минск: БНТУ, 2011. – 42 с.
6. Левинский, Ю.В. Металлические порошки и порошковые материалы. Справочник /Под ред. Ю. В. Левинского – М.: ЭКОМЕТ, 2005. – 520 с.
7. Кипарисов С. С. Порошковая металлургия. / С. С. Кипарисов, Г.А. Либенсон. – М.: Металлургия – 1991. – 432 с.
8. Шарипов В. М. Проектирование механических, гидромеханических и гидрообъемных передач тракторов. М.: МГТУ МАМИ, 2002. – 300 с.
9. Ильющенко А.Ф. Концептуальный подход к разработке перспективных спеченных порошковых материалов для высоконагруженных пар трения фрикционных систем сцепления / А.Ф. Ильющенко, П.А. Витязь, А.В. Лешок, О.О. Кузнецик, А.Н. Роговой, А.И. Лецко. - Порошковая металлургия. 2023. - №46. - 2-22 с.
10. Ильющенко А.Ф. Феноменологическая модель получения матрицы фрикционного материала путем спекания и припекания медно-оловянного порошкового слоя к омедненной стальной поверхности / А.Ф. Ильющенко, А.В. Лешок, А.Н. Роговой, А.И. Лецко, О.О. Кузнецик. – Порошковая металлургия. – 2023. - №46. – 53-67 с.

## ОЦЕНКА ПОВРЕЖДЕННОСТИ МЕТАЛЛА УЛЬТРАЗВУКОВЫМ МЕТОДОМ ПРИ ТЕРМО-СИЛОВОМ ВОЗДЕЙСТВИИ

П.В. Исхакова<sup>1\*</sup>, С.А. Баранникова<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, Томск, Россия; \* [iskhakova@ispms.ru](mailto:iskhakova@ispms.ru)

В работе проведено исследование вариаций скорости распространения рэлеевских волн и накопления поврежденности в процессе одноосного растяжения плоских образцов поликристаллического технического алюминия, с осью растяжения ориентированной вдоль направления прокатки. Проведена оценка изменения информативных параметров акустического контроля в процессе нагружения в температурном интервале от -60 до +45 °С. Установлено, что параметры рэлеевских волн зависят от степени общей деформации. Показано, что установленные зависимости скорости распространения рэлеевских волн могут быть использованы в задачах ранней оценки поврежденности материала. Результаты исследований влияния температуры на параметры рэлеевских волн служат основой для построения комплексного акустического метода определения физико-механических характеристик конструкционных материалов.

### Введение

Особую роль в задачах оценки степени поврежденности структуры материалов играет диагностика, ключевым элементом которой являются методы неразрушающего контроля. Проблема прогнозирования поведения нагруженных металлических конструкций в процессе эксплуатации является весьма важной, но далекой до окончательного решения. В настоящее время достаточно полно изучены возможные методы физической акустики в исследовании материалов, акустической структуроскопии и дефектоскопии [1, 2]. В литературе встречаются данные об измерении напряженного состояния с помощью ультразвукового контроля в железнодорожных колесах, трубопроводах, рельсах и др. стальных изделиях [3].

Однако, ввиду разрозненности частных исследований в разных сферах промышленной деятельности, актуальным остается вопрос получения обобщающих закономерностей изменения акустических параметров и их комплексного применения для широкого круга задач. Еще более острая и актуальная проблема настоящего проекта состоит в физическом обосновании наблюдаемых закономерностей, что также будет способствовать обобщению измеряемых величин для разных классов материалов и выработке единых критериев диагностики [4-7].

Целью настоящего исследования является поиск фундаментальных закономерностей изменения скорости распространения ультразвука в поликристаллах технического алюминия при термо-силовом воздействии.

### Материалы и методы

В качестве материала исследований использованы плоские образцы поликристаллического ГЦК металла: чистый алюминий (содержание Al – не менее 99,5 мас.%) с размером зерна ~ 10 мкм. Такой выбор определен возможностью реализации в Al при пластической деформации устойчивых стадий кривых течения  $\sigma(\epsilon)$ , определяемых специфическими микромеханизмами пластического течения [8].

Образцы с размерами рабочей части 50×5×2 мм растягивались на испытательной машине «Instron-1185» со скоростью  $3,3 \cdot 10^{-4} \text{ с}^{-1}$  в температурном интервале от -60 до +45 °С. Одновременно с регистрацией кривых нагружения производилась запись

изменения скорости ультразвуковых волн в исследуемом сплаве. Автоциркуляционный метод измерения этой величины описан в [3]. Скорость распространения рэлеевских волн определялась как отношение длины пути волны в образце ко времени задержки прихода сигнала на приемный преобразователь относительно излучающего [9,10]. Время задержки измерялось по осциллограмме, записанной с помощью цифрового осциллографа с частотой дискретизации 2 ГГц.

Интегральный объем микронесплошностей определяли по измерению разуплотнения методом тройного гидростатического взвешивания с погрешностью ~ 10<sup>-3</sup> %. Определяли относительное изменение плотности (дефект плотности  $\Delta\rho/\rho$ ) деформированных образцов по сравнению с их исходным состоянием.

### Результаты и их обсуждение

Информативным признаком, характеризующим деформируемость металлов, является скорость распространения поперечных ультразвуковых волн. Синхронная запись диаграмм растяжения  $\sigma(\epsilon)$  и измерений скорости рэлеевских акустических волн позволяет получить зависимости скорости распространения ультразвука от величины общей деформации  $V(\epsilon)$  (рис. 1). Характер изменения скорости рэлеевских волн с ростом общей деформации в исследуемом температурном интервале оказался качественно подобным. Тем не менее, следует отметить, что понижение температуры приводит к увеличению скорости ультразвука. При каждой температуре испытаний процесс пластического течения происходит по механизму дислокационного скольжения. Увеличение плотности дислокаций, увеличивающийся с понижением температуры, приводящий к увеличению локальных внутренних напряжений (напряжений II-го рода) и в итоге к уменьшению скорости ультразвука с ростом деформации и напряжения.

Как показано в работах [5-7], поврежденность, возникающая при силовом воздействии, интерпретируется как непрерывный процесс образования, роста и взаимодействия микродефектов различного уровня. Для описания поврежденности поликристаллических материалов разработаны различные модели [5-7], в которых в качестве параметра поврежденности может быть использована критическая плотность

дислокаций, концентрация микродефектов, уровень пластической деформации и др. В качестве повреждений рассматриваются поры, микротрещины, которые приводят к изменению модулей упругости, появлению анизотропии физико-механических свойств первоначально изотропных материалов. Учитывая зависимость скорости упругих волн от модулей упругости и плотности материала, в работах [1, 7] было предложено описывать изменение скорости упругих волн с учетом поврежденности среды.

Анализ развития микронесплошностей в процессе растяжения показал, что разуплотнение возникает уже на ранних стадиях пластической деформации в исследуемом температурном интервале.

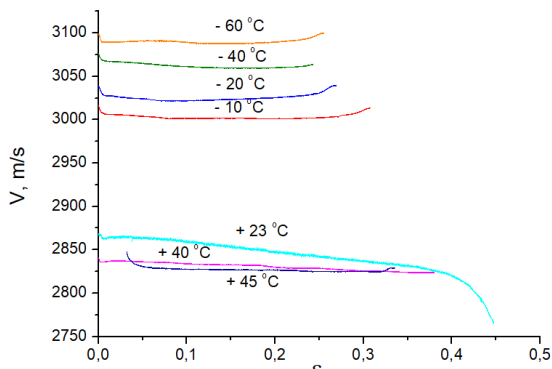


Рис. 1. Влияние температуры на изменение скорости волн Рэлея с ростом общей деформации образцов Al

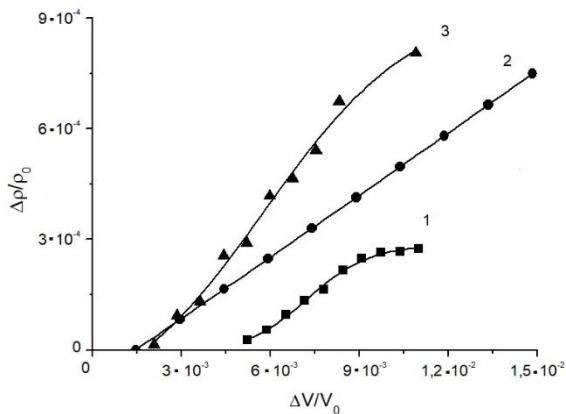


Рис. 2. Зависимость поврежденности от относительного изменения скорости волн Рэлея при температурах -60 (1), +23 (2) и +45 °C

Функцию поврежденности можно определить через изменение плотности материала  $\Delta\rho$ , которая, в свою очередь, зависит от концентрации микропор/микротрещин и среднего объема пор к исходной плотности  $\rho_0$  [7]

$$\psi = -\Delta\rho/\rho. \quad (1)$$

Поскольку скорость распространения упругих волн в среде зависит от упругих модулей и плотности среды, то величину скорости распространения

ультразвука можно также выразить через параметр поврежденности.

На рис. 2 показана зависимость функции поврежденности от относительного изменения скорости волн Рэлея в процессе растяжения образцов в исследуемом температурном интервале. Установленные зависимости скорости распространения рэлеевских волн могут быть использованы в задачах ранней оценки поврежденности материала.

## Заключение

В работе рассмотрена проблема оценки поврежденности образцов алюминия акустическим методом в условиях статического нагружения. Экспериментально наблюдаемый характер изменения скорости распространения волн Рэлея с ростом деформации указывает на изменение состояния напряженных областей в деформируемом образце. И данная зависимость связана с формированием структурных фрагментов с разным уровнем внутренних напряжений в объеме образца.

Исследование выполнено в рамках государственного задания ИФПМ СО РАН, тема № FWRW-2021-0011.

## Ссылки на использованные источники

1. Труэлл Р. Ультразвуковые методы в физике твердого тела / Р. Труэлл, Ч. Эльбаум, Б. Чик. – М.: Мир, 1972. – 307 с.
2. Блантер, М. С. Механическая спектроскопия металлических материалов / М. С. Блантер, И. С. Головин, С. А. Головин, А. А. Ильин, В. И. Саррак. – М.: МИА, 1994. – 254 с.
3. Муравьев, В. В. Скорость звука и структура сталей и сплавов / В. В. Муравьев, Л. Б. Зуев, К. Л. Комаров. – Новосибирск: Наука, 1996. – 184 с.
4. Зуев, Л. Б. О возможности оценки прочности металлов и сплавов неразрушающим ультразвуковым методом / Л. Б. Зуев, Б. С. Семухин, А. Г. Лунев // Прикладная механика и техническая физика. – 2002. – Т. 43, № 1(251). – С. 202-204.
5. Махутов, Н. А. Спектральный акусто-эмиссионный анализ процесса деформирования и повреждения / Н. А. Махутов // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2018. – Т. 84, № 10. – С. 53-58. – DOI 10.26896/1028-6861-2018-84-10-53-58.
6. Ботвина, Л. Р. Исследование кинетики разрушения сплава Д16ч методами акустической эмиссии, корреляции цифровых изображений и изучения реальной поврежденности / Л. Р. Ботвина, А. И. Болотников, И. О. Синев [и др.] // Металлы. – 2022. – № 4. – С. 15-23.
7. Хлыбов, А. А. Об использовании параметров структурного шума при контроле поверхностными акустическими волнами Рэлея стали 20ГЛ в процессе упругопластического деформирования / А. А. Хлыбов, А. Л. Углов // Дефектоскопия. – 2021. – № 7. – С. 3-10. – Б0! 10.31857/80130308221070010.
8. Фридляндер И. Н. Алюминиевые сплавы. Деформируемые сплавы / И. Н. Фридляндер. М.: Машиностроение, 1964. 224 с.
9. Зуев, Л. Б. От макро к микро. Масштабы пластической деформации / Л. Б. Зуев, С. А. Баранникова, А. Г. Лунев. – Новосибирск: Наука, 2018. – 132.
10. Баранникова, С. А. Исследование механических и акустических свойств деформируемых сплавов / С. А. Баранникова, М. В. Надежкин, П. В. Исхакова // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. – 2023. – Т. 66, № 2. – С. 162-167. – DOI 10.17073/0368-0797-2023-2-162-167.

## ВЫСОКОПРОИЗВОДИТЕЛЬНЫЕ СУРРОГАТНЫЕ МОДЕЛИ ПОДШИПНИКОВ ЖИДКОСТНОГО ТРЕНИЯ ДЛЯ ЗАДАЧ ГЛУБОКОГО ОБУЧЕНИЯ С ПОДКРЕПЛЕНИЕМ

Ю.Н. Казаков, И.Н. Стебаков, Д.В. Шутин

<sup>1</sup>Орловский государственный университет им. И.С. Тургенева, Орел, Россия; kazakyurii@yandex.ru

В статье представлен подход к построению быстродействующих суррогатных динамических моделей подшипников жидкостного трения на основе методов машинного обучения, в первую очередь искусственных нейронных сетей. Основным назначением таких моделей является ускорение решения задач расчета нелинейного движения ротора, в частности, при синтезе контроллеров активных подшипников на базе методов обучения с подкреплением. Подход подразумевает генерацию набора данных, описывающих силы подшипника скольжения, и последующее обучение суррогатной модели. Проведенные вычислительные эксперименты показали возможность ускорить расчеты практически в 50 раз по сравнению с численными моделями без существенной потери в точности расчетов.

### Введение

Ряд задач роторных систем с гидродинамическими подшипниками требуют расчетов с использованием достаточно сложных моделей и вычислительно затратных методов. Прежде всего, это касается гидродинамического эффекта, который во многом определяет основные свойства таких систем и часто описывается нелинейными зависимостями. Соответствующие дифференциальные уравнения чаще всего решаются численными методами, такими как метод конечных разностей, метод конечных объемов, методы возмущений. В этих задачах повышение точности решения за счет увеличения размерности расчетной сетки приводит к увеличению требуемых объемов вычислений. Учитывая значительную производительность компьютеров, это может быть приемлемо для решения основных вычислительных задач при проектировании роторных систем. Однако для других задач, например, требующих вычислений в реальном времени или больших объемов вычислений, это уже может стать существенным ограничением. К таким задачам относятся, например, задачи прогнозирования поведения роторных машин с использованием физических моделей [1, 2], задачи управления с использованием модельно-предсказывающих регуляторов [3, 4], задачи оптимального проектирования роторно-подшипниковых систем [5, 6]. Получение более быстрых моделей подшипников жидкостного трения без существенного снижения точности решений позволяет сократить время решения таких задач или реализовать их на менее мощном оборудовании. Одним из способов достижения этих целей является переход к использованию различных методов, основанных на данных, включая методы машинного обучения. Для создания более быстрых моделей используются ИНС и другие методы аппроксимации данных.

### Модель

В качестве объекта исследования рассматривается

$$h^3 \frac{\partial}{\partial \beta_1} \left( \beta_1 \frac{\partial p}{\partial \beta_1} \right) + \frac{1}{\beta_1} \frac{\partial}{\partial \beta_2} \left( h^3 \frac{\partial p}{\partial \beta_2} \right) = \mu u_2 6 \frac{\partial h}{\partial \beta_2} - \mu 12 u_3 \beta_1. \quad (1)$$

где  $u_i$  - компоненты вектора скорости движения жидкости,  $p$  - давление,  $h$  - функция зазора.

Силы подшипника могут быть рассчитаны путем

цилиндрический гидродинамический подшипник жидкостного трения. Схема подшипника представлена на рис 1.

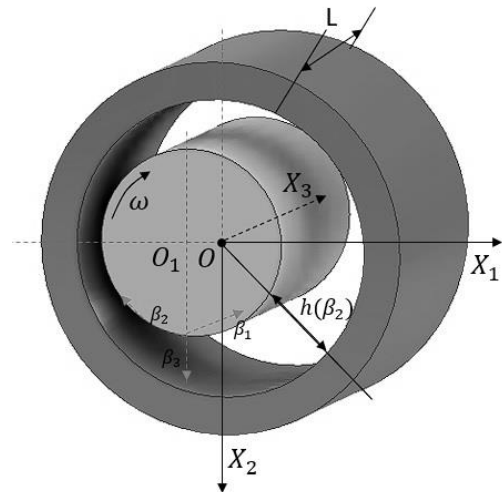


Рис. 1. Расчетная схема цилиндрического подшипника жидкостного трения

Рассматривалась модель короткого подшипника длиной  $L$  и радиусом  $R = r + h_0$ , где  $r$  — радиус вала,  $h_0$  — радиальный зазор. Вал вращается внутри подшипника с постоянной угловой скоростью  $\omega$ . Задача расчета сил в подшипнике решалась в изотермической постановке и для ньютоновской смазочной жидкости с постоянными значениями вязкости  $\mu$ , плотности  $\rho$  и температуры  $T$ . Течение жидкости между валом и подшипником моделировалось в цилиндрических координатах  $\beta_i$ , где  $\beta_1$ ,  $\beta_2$ ,  $\beta_3$  — радиальная, угловая и осевая координаты соответственно.

Распределение давления смазки в подшипнике определяется на основе модифицированного уравнения Рейнольдса, которое в цилиндрических координатах имеет следующий вид:

численного интегрирования поля давления.

Ротор в расчетах представлен одномокрой моделью, в рамках которой точечная масса движется в

подшипнике под действием совокупности сил, включая силу тяжести, силы подшипника и силы дисбаланса. Полученное уравнение движения центра масс принимает следующий вид:

$$m_r \begin{bmatrix} dV_1/dt \\ dV_2/dt \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_1 \\ R_2 \end{bmatrix} + m_u d\omega^2 \begin{bmatrix} \cos \omega t \\ \sin \omega t \end{bmatrix} + m_r \begin{bmatrix} 0 \\ g \end{bmatrix}, (2)$$

где  $R_1, R_2$  реакции смазочного слоя подшипника,  $V_1, V_2$  скорости движения центра ротора,  $m_u d$  - дисбаланс,  $t$  - время,  $g$  ускорение свободного падения,  $m_r$  - масса ротора.

Совместное численное решение уравнений (1) и (2) позволяет рассчитывать траектории движения ротора в подшипнике.

### Результаты и обсуждение

Для проведения значительного количества расчетов движения ротора описанная ранее численная модель расчета реакций смазочного слоя была аппроксимирована с использованием искусственных нейронных сетей (ИНС). Для этого применялись полностью связанные ИНС, поскольку они хорошо подходят для решения задач аппроксимации и классификации с небольшим количеством входных признаков, а также совместимы с большими наборами данных.

Модель на базе ИНС для расчета реакций смазочного слоя была обучена на наборе данных, полученном численным решением уравнения (1). Набор данных содержал 4 миллиона обучающих примеров, причем в качестве входных параметров использовались данные о положении и скорости ротора  $[X_1, X_2, V_1, V_2]$ , а в качестве выходных – реакции подшипника  $[R_1, R_2]$ .

Тестирование обученных моделей проводилось на базе расчета траекторий движения ротора при разных значениях дисбаланса ротора и внешнего воздействия. Пример сравнения полученных траекторий с эталонными, рассчитанными посредством базовой численной модели, представлен на рис. 2.

Результаты оценки точности суррогатных моделей на базе ИНС показывают хорошее соответствие с эталонными данными численных моделей. Так, среднее значение абсолютной ошибки изменяется от, порядка, 3 мкм для случаев с меньшими величинами дисбаланса, до, порядка, 6 мкм для больших его величин. В относительном выражении, приведенном к величине начального зазора подшипника, это значение не превышает 5% и сопоставимо с точностью типичных средств измерения положения вала в подшипниках, что говорит о достаточной точности расчетов с использованием таких моделей. Время расчета траекторий движения ротора при использовании

полностью связанной ИНС с 4 скрытыми слоями по 1024 нейрона в каждом из них сократилось более чем в 50 раз по сравнению с численной моделью с расчетной сеткой размером 30x30.

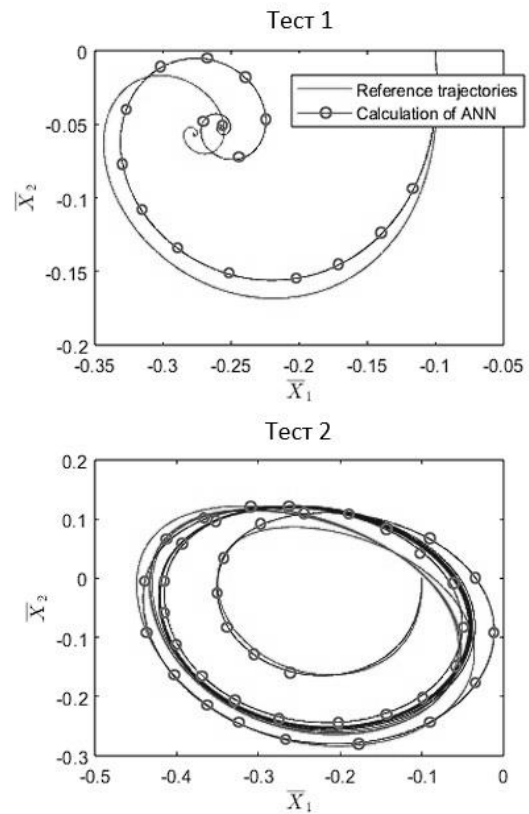


Рис. 2. Результаты тестирования модели на базе ИНС для разных вариантов дисбаланса

Представленный метод также может быть применен для моделирования регулируемых подшипников жидкостного трения. Однако для этого требуется внесение дополнительных параметров, описывающих управляющие сигналы. Так, при моделировании подшипника с изменяемой геометрией зазора, необходимо дополнительно использовать в качестве входного параметра ИНС степень изменения геометрии. При моделировании активных смазываемых подшипников следует в качестве входных параметров использовать давления в каналах подачи смазочного материала. В общем случае, вектор входных параметров ИНС примет следующий вид  $[u_1, u_2, X_1, X_2, V_1, V_2]$ . Вектор выходных параметров  $[R_1, R_2]$  остается неизменным.

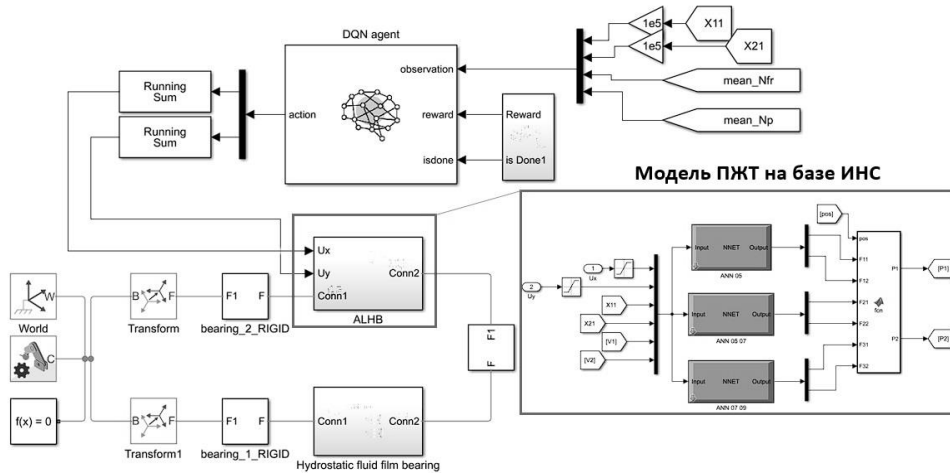


Рис. 3. Имитационная модель роторной системы с подшипниками жидкостного трения на базе ИНС

Обученная модель основе ИНС применялась в имитационной модели роторной системы, вариант реализации которой в среде разработки Simulink представлен на рис. 3. Модель включает в себя основные блоки, моделирующие также геометрические и динамические параметры ротора и нагрузки в системе. Представленная имитационная модель использовалась в качестве среды для обучения контроллера активно смазываемого подшипника методом обучения с подкреплением. Указанное повышение производительности более чем на порядок по сравнению с численными моделями позволяет значительно сократить затраты времени на синтез контроллеров. Это позволяет также эффективно тестировать более сложные стратегии управления, требующие большего количества итераций для достижения достаточного качества оптимизации политики управляющего агента.

Таким образом, применение представленных суррогатных моделей снимает ряд барьеров к внедрению интеллектуальных методов управления в роторно-опорные системы новых поколений.

### Заключение

Исследование представляет подход к построению быстродействующих суррогатных динамических моделей подшипников жидкостного трения, в том числе и активных опор, с использованием методов машинного обучения, в первую очередь искусственных нейронных сетей. Использование моделей на базе ИНС позволяет значительно, на порядки, ускорить решение задач расчета нелинейного движения

ротора. Результаты исследования показали возможность повышения скорости расчета задач движения ротора более чем в 50 раз по сравнению с численными моделями, при этом ошибка расчета траекторий ротора не превышала примерно 5% от значения зазора подшипника. Применение таких моделей позволяет существенно ускорить процесс обучения интеллектуальных контроллеров для активных опор роторов, использующих интеллектуальные алгоритмы управления на базе обучения с подкреплением.

**Финансовая поддержка.** Работа поддержана грантом РФФИ № 22-19-00789, <https://rscf.ru/en/project/22-19-00789/>.

1. Chen Z. и др. An Efficient Calculation Method of Nonlinear Fluid Film Forces in Journal Bearing // Mater. Today Proc. V.54. P.171–178.
2. S. Shen и др. A physics-informed deep learning approach for bearing fault detection // Eng. Appl. Artif. Intell. V. 103. P. 104295.
3. D. Shutin и др. Method for On-Line Remaining Useful Life and Wear Prediction for Adjustable Journal Bearings Utilizing a Combination of Physics-Based and Data-Driven Models: A Numerical Investigation // Lubr. 2023. V.11. P.33.
4. L. M. Castellanos Molina, A. Bonfitto и R. Galluzzi Offset-Free Model Predictive Control for a cone-shaped active magnetic bearing system // Mechatronics. V.78. P.102612.
5. S. Dettori и др. Nonlinear Model Predictive Control strategy for steam turbine rotor stress // Energy Procedia. V.158. P.5653–5658.
6. K. G. Ravindra, Rudresh B. M., P. Kumar M. K. Optimization of design parameters to evaluate the performance of journal bearing: ANN approach // Mater. Today Proc. V.54. P.171–178.

## ЦИФРОВОЙ ДВОЙНИК ЭЛЕКТРОБУСА С АСИНХРОННЫМ ДВИГАТЕЛЕМ И УЛЬТРАЗВУКОВЫМ ДАТЧИКОМ ДИСТАНЦИИ

А.О. Калибабчук<sup>1,2</sup>, М.П. Калибабчук<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана, Москва, Россия;  
armterrus@gmail.com

<sup>2</sup>Военная Академия Связи им. Маршала Советского Союза С.М. Буденного, Санкт-Петербург, Россия

В статье рассматривается разработка цифрового двойника электробуса с асинхронным двигателем, оснащённого ультразвуковым датчиком дистанции. Цифровой двойник позволяет моделировать и анализировать работу электробуса в различных условиях эксплуатации, оптимизировать его технические параметры и прогнозировать износ узлов. Особое внимание уделяется интеграции датчика дистанции для повышения безопасности при движении в условиях городского трафика.

### Цель

Математическая модель электробуса разрабатывалась в программной среде Matlab Simulink с целью симуляции поведения адаптивной системы круиз контроля, использующей в качестве датчика дистанции ультразвуковой сенсор дистанции. Эти симуляции позволяют определить целесообразность дальнейшей разработки подобной системы адаптивного круиз контроля для реального транспортного средства.

Подобная система призвана с наименьшими финансовыми затратами улучшить транспортную обстановку в крупных городах за счет снижения транспортных заторов [1].

### Основная часть

Электробус представляет из себя шестиколёсное транспортное средство, оснащенное двумя тяговыми асинхронными электродвигателями. Вал каждого из двигателей через редуктор соединен с двумя колесами.

Согласно документу [2] в математическую модель были занесены параметры электродвигателей и транспортного средства. Согласно книге [3] электрический автобус можно описать следующим набором формул (1):

$$\left\{ \begin{array}{l} M_{дв}(p) = \frac{2 \cdot k_{\beta} (\omega_0 - \omega)}{(T_{\beta} p + 1)}; \\ |k_{\beta}| = \frac{M_k}{s_k \cdot \omega_0}; \\ T_{\beta} = \frac{L_1 + L_2'}{R_1 + R_2'}; \\ M_{дв}(p) - M_n(p) = \left( 2 \cdot 1,4 \cdot J_{дв} + \frac{6 \cdot J_k}{i^2} \right) \cdot p \cdot \omega(p). \end{array} \right. \quad (1)$$

Для двигателей электробуса рассматриваемой модели получены следующие значения:  $T_{\beta} = 0,0075$  (с),  $k_{\beta} = 22,96$ . У рассматриваемого цифрового двойника трехфазного асинхронного двигателя имеется физическая обратная связь по скорости, а ошибка представлена в качестве скольжения асинхронного двигателя.

В качестве метода управления электродвигателем выберем способ варьирования частоты вращения электрического поля статора, то есть управление идет синхронной скоростью электродвигателя.

Уравнение (2) описывает блок формирования нагрузки на электродвигатели. Будем считать, что электробус движется прямолинейно по однородной поверхности, поэтому нагрузка распределяется равномерно между электродвигателями. Тогда нагрузка состоит из

инерции колес, электродвигателя, массы электробуса и аэродинамического сопротивления. Уравнение (2) сформировано согласно книге [5].

$$M_n(p) = a(p) \cdot \left( R_k \cdot (m_a + 6 \cdot m_k) + \frac{R_k \cdot C_x \cdot \rho \cdot F_a}{2000 \cdot p^2} \right). \quad (2)$$

В качестве датчика дистанции выберем HC-SR04. Выбор обусловлен широким распространением и высокой степенью проработанности этого датчика. Цифровой двойник ультразвукового датчика будет построен согласно статье [6].

Датчик управляется тремя сигналами, их осциллограмма показана на рисунке 1.

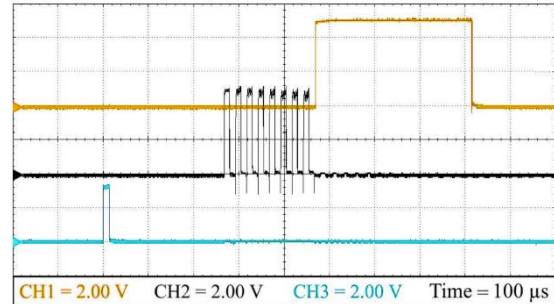


Рис. 1. Временная развертка сигналов датчика

Согласно спецификации датчика [7] можно вынести основные временные характеристики отправки импульсов для инициализации датчика. И это приводит к формированию дискретизации работы сигнала и задержке получения информации об измеренной дистанции. Структурная схема этого датчика показана на рисунке 2.

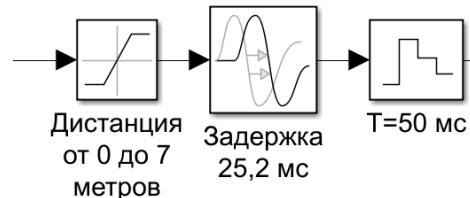


Рис. 2. Структурная схема датчика дистанции

При движении электробуса будем считать, что разгоне тяговый момент развивается электродвигателями, а при торможении тормозной момент только при помощи механической тормозной системы.

Для корректной работы системы, замкнутой по дистанции, внедрим в систему ПИД регулятор. И в итоге

будет получена структурная схема электробуса с датчиком дистанции и системой адаптивного круиз контроля, замкнутая по дистанции до впередиидущего автомобиля (рис. 3).

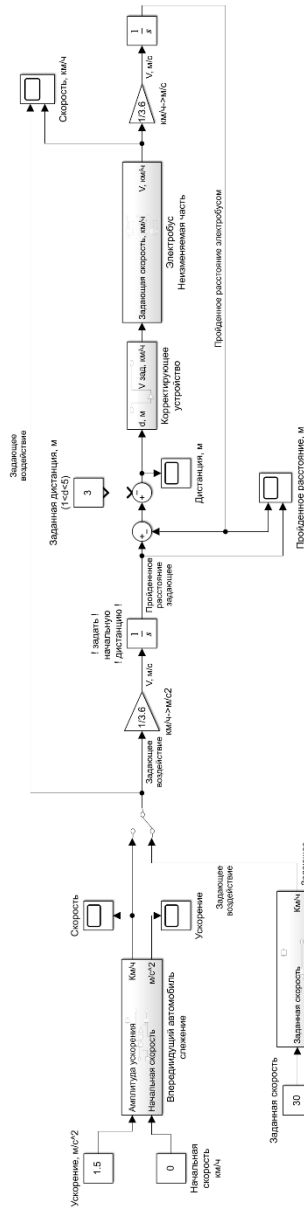


Рис. 3. Математическая модель электробуса

Система круиз контроля рассчитана на движение электробуса на скорости до 30 км/ч. В таком режиме график ошибки по дистанции представлен на рисунке 4., и ошибка дистанции составляет менее 20 сантиметров.

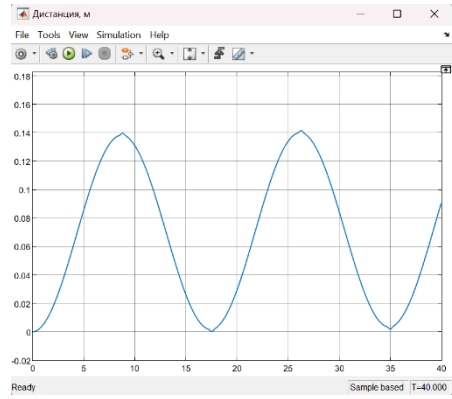


Рис. 4. Ошибка по дистанции в следящей системе

В результате работы был разработан цифровой двойник электробуса с интегрированным ультразвуковым датчиком дистанции, обеспечивающим функцию адаптивного круиз-контроля в условиях пробок. Модель предназначена для предварительного анализа возможности использования ультразвукового датчика в адаптивном круиз-контроле и готова к проведению тестирования. Благодаря её простоте эксперименты могут быть выполнены оперативно.

1. Flynn M. R., Kasimov A. R., Nave J.-C., Rosales R. R., Seibold B.: Self-sustained nonlinear waves in traffic flow // Physical Review E, arXiv:0810.2820v1 15 Oct 2008. URL: [https://www.researchgate.net/publication/235462852\\_Self-sustained\\_nonlinear\\_waves\\_in\\_traffic\\_flow](https://www.researchgate.net/publication/235462852_Self-sustained_nonlinear_waves_in_traffic_flow) (дата обращения 18.09.2024).

2. Устройство и техническое обслуживание электробуса: Учебное пособие для подготовки водителей транспортных средств категории «D» // Корпоративный университет Транспортного комплекса URL: <https://sop.mosmetro.ru/wp-content/uploads/2022/03/TK-voditel-D-ustrojstvo-elektrobusa.pdf> (дата обращения 18.09.2024).

3. Чернышев А.Ю. Электропривод переменного тока: учебное пособие / А.Ю. Чернышев, Ю.Н. Дементьев, И.А. Чернышев; Томский политехнический университет. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2011. – 213 с.

4. Анучин А.С. Системы управления электроприводов: учебник для вузов. – М.: Издательский дом МЭИ, 2015. – 373. С.: ил.

5. Нуждин Р. В. Тяговый расчёт автомобиля: метод. Указания к курсовому проектированию по дисциплине «Конструкция и потребит. Свойства автомобилей» / Владим. гос. ун-т им. А. Г. и Н. Г. Столетовых; сост. Р. В. Нуждин. – Владимир: Изд-во ВлГУ, 2018. – 36 с.

6. Жмудь В.А., Кондратьев Н.О., Кузнецов К.А., Трубин В.Г., Димитров Л.В. Ультразвуковой датчик измерения расстояния HC-SR04 // Автоматика и программная инженерия. 2017. №4(22) URL: <http://jurnal.nips.ru/sites/default/files/AaSI-4-2017-2.pdf> (дата обращения 18.09.2024).

7. HC-SR04 Ultrasonic Sensor Module User Guide // Handson Technology URL: <https://handsontec.com/dataspecs/HC-SR04-Ultrasonic.pdf> (дата обращения 18.09.2024).



## АНАЛИЗ РАБОТЫ И ПРИЧИНЫ ПОТЕРИ РАБОТОСПОСОБНОСТИ ЗАПОРНОЙ АРМАТУРЫ НЕФТЕПРОВОДОВ

С.В. Карцев<sup>1</sup>, Д.А. Гаврилов<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, Москва, Россия; [gavriuss@yandex.ru](mailto:gavriuss@yandex.ru)

### Аннотация

Представлен обзор крупнейших магистральных нефтепроводов России и их характеристики. Проведен анализ и причины потери работоспособности заборной арматуры магистральных нефтепроводов на примере крана шарового КШЗ-1050-5,0-Ф-ЭП-С-У1 и шиберной задвижки диаметром 1000 мм. Сверхнормативная изношенность деталей запорной арматуры магистральных нефтепроводов во многом может быть предотвращена в результате применения газотермических методов нанесения покрытий, как одних из наиболее эффективных, упрочняющих технологий.

### Введение

Увеличение темпов строительства магистральных нефтепроводов в России пришлось на 30-е годы XX века. К началу 40-х годов в нашей стране было введено в эксплуатацию более 2,5 тыс. км магистральных нефтепроводов. В 50-х годах началось интенсивное строительство нефтепроводов в главных нефтедобывающих районах России. В 60-х годах XX века введен в эксплуатацию самый крупный в Европе нефтепровод «Дружба» цель которого транспортировка нефти Урало-Поволжья в Восточно-Европейские страны. В 2000-х годах завершено строительство нефтепроводной системы «Восточная Сибирь - Тихий океан», посредством которого так же осуществляется транспортировка нефти в Китай.

Все магистральные нефтепроводы, сооруженные в СССР, сейчас находятся под ведением ПАО «Транснефть», с контрольным пакетом акций, принадлежащим Российской Федерации. Общая протяженность магистральных нефтепроводов ПАО «Транснефть» составляет более 67 000 км. Общие характеристики крупнейших магистральных нефтепроводов России представлены в таблице 1.

Таблица 1. Крупнейшие нефтепроводы России

Название магистрального нефтепровода	Диаметр, мм	Протяженность, км	Год ввода в эксплуатацию, г.
«Дружба» (1-я нитка)	530-1020	5500	1964
«Дружба» (2-я нитка)	530-1020	4500	1966
«Сургут-Горький-Полоцк»	1020	3250	1981
«Холмогоры-Клин»	1220	2430	1985
«Нижневартовск-Курган-Куйбышев»	1220	2150	1976
«Усть-Балык-Уфа-Альметьевск»	1220	2120	1973
«Восточная Сибирь – Тихий океан»	1020/1067	4740	2009
Балтийская трубопроводная система-1	1067	1439	2006
Балтийская трубопроводная система-2	1067	1000	2012
Тенгиз-Новороссийск»	1020/1067	1580	2001

Общая протяженность трасс магистральных нефтепроводов в России составляет 50 тыс. км. В систему магистральных нефтепродуктопроводов входят 28 пунктов налива в автотранспорт, 7 железнодорожных эстакад, морской терминал в

Новороссийске, резервуарный парк из 870 резервуаров общим объемом 4,8 млн. м<sup>3</sup>. Добыча нефти в России за 2023 год уменьшилась на 0,8% по отношению к 2022 году до 530,6 млн. тонн. Снижение добычи произошло из-за падения экспорта на 3,3%. В том числе поставки российской нефти в Европу уменьшились более чем на 40%, при этом суммарные поставки в Индию и Китай увеличились на 61% [1].

В соответствии с программой стратегического развития ПАО «Транснефть» обеспечение работоспособности эксплуатируемой системы магистральных трубопроводов является приоритетной задачей компании и обеспечивает направление ресурсов на поддержание наиболее «узких мест» основных фондов [2]. Структура финансирования программы представлена на рисунке 1.

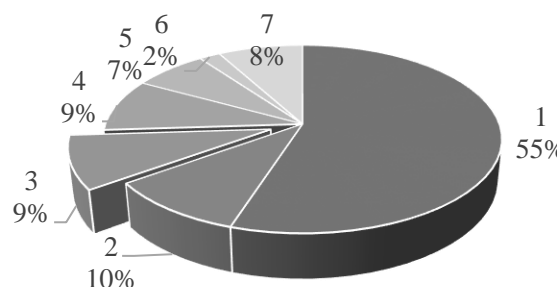


Рис. 1. Структура финансирования основных фондов ПАО «Транснефть»: 1 – линейная часть; 2 – резервуарные емкости; 3 – технологическое оборудование; 4 – энергетическое оборудование; 5 – автоматика и телематика; 6 – системы измерений количества и качества нефти; 7 – прочее.

Анализ показателей финансирования основных фондов ПАО «Транснефть» показывает, что капитальный ремонт и замена технологического оборудования, в том числе запорной арматуры занимает треть по значимости мероприятия (9%) и в численном эквиваленте составляет более 7750 единиц.

### Материалы и методы

Проведенный анализ и промышленный опыт эксплуатации магистральных нефтепроводов показали, что до 40% всех причин снижения пропускной способности приходится на износ деталей запорной аппаратуры, которая управляет потоками в магистральных нефтепроводах и выполняет запорно-регулирующие функции, такие как перекрытие, регулирование и распределение потоков посредством

затворного узла в своей конструкции.

Затворный узел в зависимости от конструктивно-технологических особенностей можно классифицировать на следующие типы исполнения:

- шаровые краны; - задвижки; - вентили.

В зависимости от технологического назначения запорная арматура подразделяется на полнопроходную и не полностью открывающуюся.

Основной аспект работы магистральных нефтепроводов и запорной арматуры в целом – это герметичность. Однако, транспортировка рабочей среды в нефтепроводах – процесс, связанный с высоким давлением, и требует регулярного проведения технического диагностирования магистральных и вспомогательных технологических трубопроводов в сроки, определенные нормативными документами [3].

Существует целый ряд причин выхода из строя запорной арматуры магистральных трубопроводов, их можно разделить на следующие типы: производственные, конструкционные и эксплуатационные. Первые два типа причин относятся непосредственно к проектированию и разработке конструкции запорных элементов. Эксплуатационными параметрами запорной арматуры являются:

-крутящий момент маховика (усилие на рукоятку управления);

-герметичность прокладок, сальников, затворов;

-пропускная способность предохранительного клапана.

Причины отказа связаны со способностью запорной арматуры, сохранять заданные эксплуатационные характеристики во время работы в допустимых пределах, указанных в технической документации.

Анализ работы запорной арматуры показал, что к основным механическим неисправностям элементов запорной арматуры и причинам их возникновения относятся.

1. Протечка рабочей среды при полностью закрытом запорном органе – потеря герметичности вследствие износа уплотнительных поверхностей корпуса: появление трещин, вмятин задигов или повреждения запорного органа.

2. Протечка рабочей среды через сальник – коррозийный износ поверхности шпинделя.

3. Потение или течь сквозь детали корпуса – корпус имеет дефекты, возникшие в процессе литья или его эксплуатации. На его поверхности присутствуют пустоты, поры, раковины, свищи. Возможны трещины в местах изменения радиуса корпуса.

4. Перемещение запорного органа со значительными задержками – износ направляющих клиньев.

5. Изменение гидравлической характеристики запорной арматуры – эрозионный износ в регулирующем органе (шибере, плунжере).

6. Работа электродвигателя на холостом ходу после поступления команды на пусковую кнопку - износ шпонки вала или червяка электродвигателя.

7. Протечки в месте соединения запорной арматуры и трубопровода – коррозия в местах фланцевого соединения с трубопроводом.

8. Прочие причины.

Сырье, транспортируемое по магистральным

трубопроводам, неизбежно содержит в своем составе механические примеси, абразивные частицы, сероводород, углекислый газ и воду. Для дальнейшего изучения на предмет возможности выполнения работ по внеплановому, текущему и капитальному ремонту запорной арматуры, для устранения результата воздействия на запорный орган и фланцевые соединения, связанного с влиянием коррозии и абразивным износом, рассматривалась следующая запорная арматура:

- кран шаровый КШЗ-1050-5,0-Ф-ЭП-С-У1;

- шибберная задвижка диаметром 1000 мм.

Общий вид запорной арматуры представлен на рисунке 1.



а) б)

Рис. 2. Запорная арматура нефтепроводов. Производитель АО «Усть-Каменогорский арматурный завод», Республика Казахстан:

а) - кран шаровый; б) - шибберная задвижка.

Сверхнормативная изношенность запорной арматуры нефтепроводов и другие негативные процессы, во многом могут быть предотвращены в результате применения газотермических методов нанесения покрытий, как одних из наиболее эффективных, упрочняющих технологий, позволяющих многократно повысить износостойкость и обеспечить полное восстановление работоспособности большинства изношенных деталей запорной аппаратуры.

Технология газотермического напыления заключается в нанесении функциональных покрытий и восстановлении размеров изношенных поверхностей элементов запорной арматуры с использованием металлических, керамических, металлокерамических, полимерных и других материалов, для получения заданных свойств покрытия [4].

Таким образом, очевидно, что разработка и внедрение универсальных высокоэффективных технологий, обеспечивающих повышение износостойкости деталей запорной аппаратуры за счет применения газотермических методов нанесения высококачественных покрытий, является важнейшей народнохозяйственной задачей, решение которой вносит значительный вклад в устойчивое развитие и функционирование магистральных нефтепроводов.

Параметры режима работы оборудования,

связанные с тепловой мощностью и скоростью истечения плазменной струи, выбираются с учетом коэффициента использования материала, адгезии, пористости, проплавляемости покрытия, количественного распределения оплавленных частиц по пятну напыления и других характеристик. Выбор материала для формирования покрытия определяется условиями эксплуатации, восстанавливаемой деталей, требованиями к его толщине и физико-механическим характеристикам после нанесения покрытия и обработки.

#### **Выводы.**

Проведенный анализ и промышленный опыт эксплуатации магистральных нефтепроводов показали, что до 40% всех причин снижения пропускной способности магистральных нефтепроводов приходится на износ деталей запорной аппаратуры.

Применение газотермических методов для ремонта и восстановления элементов запорной аппаратуры магистральных нефтепроводов, является перспективным направлением, которое позволит сократить сроки ремонта и увеличить срок службы деталей запорной аппаратуры.

Дальнейшей основной задачей работы по восстановлению работоспособности элементов задвижек и шаровых кранов запорной аппаратуры магистральных нефтепроводов является:

1. Проведение методом экспертной оценки значимости факторов по степени влияния на коррозионное изнашивание запорного органа и фланцевых соединений запорной аппаратуры магистральных нефтепроводов.

2. Построение физико-математической модели изнашивания элементов запорной аппаратуры магистральных нефтепроводов.

3. Подбор оптимального композиционного состава порошкообразного материала для нанесения

покрытия.

4. Разработка математической модели оптимизации контролируемых параметров процесса нанесения покрытий на элементы запорной аппаратуры магистральных нефтепроводов.

5. Проведение экспериментальных исследований качества нанесенных покрытий на изношенные детали запорной аппаратуры.

6. Разработка практических рекомендаций по восстановлению деталей запорной аппаратуры при техническом перевооружении и реконструкции магистральных нефтепроводов, а также дать технико-экономическую оценку эффективности разработанных технологий восстановления и упрочнения элементов запорной аппаратуры магистральных нефтепроводов.

Исследования выполнялись в рамках научной темы ИМАШ РАН (шифр: FFGU-2024-0024).

#### **Список использованных источников**

1. Нефтегазодобывающая и нефтеперерабатывающая промышленность: тенденции и прогнозы. 53-й выпуск. Итоги 2023 года. [Электронный ресурс]. URL:
2. <https://riarating.ru/images/63025/82/630258260.pdf>
3. (дата обращения: 02.07.2024).
4. Программа стратегического развития ОАО «АК «Транснефть» на период до 2020 года. [Электронный ресурс]. URL: <https://web.archive.org/web/20220103113155/https://www.transneft.ru/about/development-system/398/?print=1>
5. (дата обращения: 02.08.2024).
6. Приказ Ростехнадзора от 02.08.2018 г. №330 «Об утверждении Руководства по безопасности Техническое диагностирование трубопроводов линейной части и технологических трубопроводов магистральных нефтепроводов и нефтепродуктопроводов».
7. Карцев С.В. Восстановление и упрочнение деталей технологического оборудования свеклосахарного производства плазменным методом: дис. ... д-ра техн. наук: 4.3.1. / Карцев Сергей Васильевич. - Москва, 2023. - 425 с.

## ИССЛЕДОВАНИЕ ИЗНОСОСТОЙКОСТИ ТОНКОПЛЕНОЧНЫХ ПОКРЫТИЙ, СФОРМИРОВАННЫХ НА ОБРАЗЦАХ ИЗ СТАЛИ 65Г (PECVD ПРОЦЕСС)

С.В. Карцев<sup>1</sup>, А.Н. Свиящук<sup>1</sup>, О.И. Кулаков<sup>1</sup>, Н.Н. Свиящук<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Институт машиноведения им. А.А. Благодрава РАН, Москва, Россия; [a.n.idpo@mail.ru](mailto:a.n.idpo@mail.ru)

### Аннотация

Представлены результаты экспериментальных исследований на износостойкость тонкопленочных покрытий, сформированных на поверхности образцов из нелегированной специальной стали марки 65Г плазмохимическим осаждением из паровой фазы (PECVD процесс). В качестве присадочного материала использовали жидкие легко испаряющиеся химические реагенты отечественного производства на основе карбида и диоксида кремния. Определены триботехнические свойства тонкопленочных покрытий.

**Ключевые слова:** износостойкость, тонкопленочное покрытие, образец, плазмохимическое осаждение, триботехнические испытания.

### Введение

Технологическое оборудование, используемое в различных отраслях производства, работает в тяжелых условиях, при одновременном воздействии многих факторов влияющих на изнашивание деталей рабочих органов. Режущие кромки деталей рабочих органов такого технологического оборудования имеют весьма небольшой ресурс относительно всего оборудования. Для увеличения срока службы таких деталей широко применяются технологии нанесения функциональных покрытий с высокими физико-механическими свойствами [1]. Проведение исследований и конструкторско-технологических мероприятий по увеличению ресурса таких деталей является актуальной в настоящее время.

### Цели и задачи исследования

Основной целью настоящей работы является исследование триботехнических свойств тонкопленочных покрытий на основе карбида и диоксида кремния, сформированных в безвакуумном пространстве при атмосферном давлении, на поверхности образцов плазменным методом.

В соответствии с целью, поставлены следующие задачи исследования:

- сформировать кремнийорганическое покрытие на поверхности образцов из нелегированной специальной стали марки 65Г плазменным методом в безвакуумном пространстве при атмосферном давлении.
- провести экспериментальные исследования триботехнических свойств тонкопленочных покрытий на основе карбида и диоксида кремния.

### Материалы и методы исследования

Одним из экономически целесообразных, универсальных и широко распространенных методов формирования тонкопленочных покрытий является процесс разложения паров жидких легкоиспаряющихся химических реагентов, вводимых в дуговой разряд плазмотрона, с последующим прохождением плазмохимических реакций и образованием износостойкого тонкопленочного покрытия на поверхности детали (PECVD процесс). Особое значение указанная технологическая операция приобретает для деталей рабочих органов технологического оборудования, работающих в условиях интенсивного изнашивания. Наибольшее распространение в качестве

специальных составов получили тонкопленочные покрытия на основе карбида и диоксида кремния. Указанные покрытия характеризуются высокой износостойкостью и относительно малыми значениями предела выносливости [2]. Для расширения областей их применений и повышения указанных характеристик были проведены экспериментальные исследования по определению триботехнических свойств тонкопленочных покрытий.

Для проведения испытаний на износостойкость были изготовлены фрезерованием образцы из нелегированной специальной стали марки 65Г выпускаемой по ГОСТ 14959-2016. На рабочей поверхности образцов выполнялись операции шлифования и полирования.

В процессе нанесения тонкопленочного покрытия использовали плазменную установку отечественного производства. Технические характеристики установки представлены в таблице 1.

Таблица 1. Технические характеристики плазменной установки «PLASMACENTRE»

Наименование параметра	Значение параметра
Источник постоянного тока, кВт	Не более 5
Диапазон рабочего напряжения, В	36-40
Диапазон рабочего тока, А	50-200
Плазмообразующий газ	Аргон, азот
Расход плазмообразующего газа, м <sup>3</sup> /ч	2-2,7
Охлаждение плазмотрона	Жидкостное
Расход жидких реагентов, г/ч	0,5-1
Система управления режимами установки	Ручная
Длина коммуникаций плазмотрона, м	Не более 10
Масса оборудования, кг	Не более 50
Площадь, занимаемая оборудованием, м <sup>2</sup>	1-2

Тонкопленочное покрытие формировали на поверхности образцов плазменным методом без вакуумного пространства при атмосферном давлении.

В качестве жидких легкоиспаряющихся химических реагентов использовали кремнийорганическую жидкость отечественного производства выпускающую по ТУ 2637-192-44493179-2014 [2].

Для усиления адгезии покрытия и интенсификации процесса адсорбции осуществляли предварительный и сопутствующий подогрев поверхности образца. При этом температура изменялась от 20 до 200 °С, а время нанесения покрытия – от одной до двух минут. Это связано с протеканием химических реакций взаимодействия оксидов железа поверхности образца и оксидов кремния покрытия [3].

Образцы для испытаний на износостойкость с тонкопленочным покрытием представлены на рисунке 1.

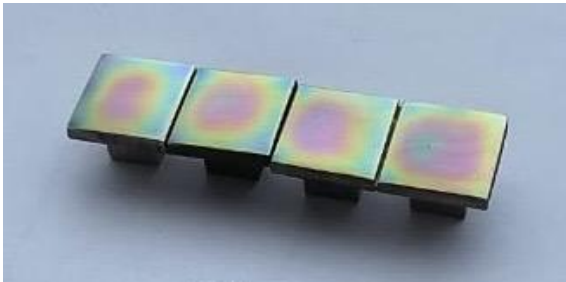


Рис. 1. Образцы с тонкопленочным покрытием для проведения испытаний

Триботехнические характеристики покрытий, нанесенных плазменным методом, оценивали в условиях возвратно-поступательного движения элементов трибосопряжения на установке ПРУ-1 в соответствии с методическими рекомендациями [4]. Для обеспечения максимального сопряжения поверхностей трения подвижный образец устанавливался в тензометрический держатель под углом  $90^\circ$  к поверхности неподвижного образца. Площадь рабочей поверхности подвижного образца составляла:

$$S_{\text{раб}} = 2,25 \text{ см}^2.$$

Установка для триботехнических испытаний материалов при возвратно поступательном движении обеспечивала:

- амплитуду движения подвижного образца: 80 мм;
- число циклов в минуту: 50;
- общее число циклов: 5000;
- скорость движения подвижного образца: 13,3 см/с;
- нагрузку на подвижный образец: 0,5 кгс/см<sup>2</sup>.

В качестве смазочно-охлаждающей жидкости использовалась технологическая смазка марки «Синапол-ЭКТ» в виде водной эмульсии концентрацией 2,5%. Эксперименты проводились при температуре окружающего воздуха  $21^\circ\text{C}$ .

### Результаты и их обсуждение

В процессе испытаний контролировали значения температуры и силу трения с учетом возникающих сил инерции. По изменениям массы испытуемых образцов оценивали износостойкость моделируемого трибосопряжения, рассчитывали значения параметров трения и интенсивности изнашивания. Результаты испытания образцов представлены в таблице 2.

Микрорельеф рабочих поверхностей образцов с тонкопленочным покрытием исследовали на оптическом микроскопе НЕОРНОТ-21. Микроструктура тонкопленочного покрытия представлена на рисунке 2.



Рис.2. Микроструктура тонкопленочного покрытия, нанесенного плазменным методом. Увеличение  $\times 100$ .  
1 - тонкопленочное покрытие.

Результаты исследования показали однородную шероховатость поверхности образцов, присущую поверхностям после плазменного упрочнения. Микрорельеф поверхностей до плазменного упрочнения имеет явно выраженные множественные риски от обработки поверхности шлифованием. Изменение рельефа поверхности после плазменного упрочнения является подтверждением того, что покрытие осаждается на микрорельеф поверхности, заполняя тем самым дефектные зоны, образованные после окончательной обработки поверхности образца.

Таблица 2. Результаты испытания образцов с тонкопленочным покрытием

№ образца	Масса образца до испытаний, мг	Масса образца после испытаний, мг	Износ, мг
1	9382,00	9378,85	3,15
2	9271,25	9270,50	0,75
3	9348,75	9348,65	0,10
4	9435,45	9434,35	1,10
5	9128,45	9128,25	0,20
6	9535,25	9534,70	0,55

Анализ данных, представленных в таблице, показывает, что все образцы имеют некоторую степень износа после испытаний. Масса образцов после испытаний уменьшилась по сравнению с исходной массой, что свидетельствует о наличии износа. Износ был рассчитан как разница между массой образца до и после испытаний. Из представленных данных (табл. 2) видно, что образцы с тонкопленочным покрытием (образцы № 2,3,4,5) и без покрытия с закалкой (образец № 6) имеют меньший износ по сравнению с образцами без покрытия (образец № 1). Это указывает на то, что тонкопленочное покрытие и закалка способствуют повышению стойкости к износу.

### Выводы.

Износостойкость тонкопленочных покрытий, полученных плазменным методом (PECVD процесс),

была экспериментально исследована. Результаты исследования подтверждают эффективность плазменного метода для создания тонкопленочных покрытий с повышенной износостойкостью. Этот метод может быть применен в различных отраслях производства, где требуется защита поверхностей трения от износа и повышение долговечности деталей. Дальнейшие исследования могут быть направлены на оптимизацию параметров процесса и изучение механизмов взаимодействия тонкопленочных покрытий с различными материалами.

Исследования выполнялись в рамках научной темы ИМАШ РАН (шифр: FFGU-2024-0024).

Работа выполнена с использованием оборудования

Центра коллективного пользования «Научноёмкие технологии создания машин будущего»

Институт машиноведения

им. А.А. Благодрава РАН

Москва, Россия.

#### Список использованных источников

1. Карцев С.В. Восстановление и упрочнение деталей технологического оборудования свеклосахарного производства плазменным методом: дис. ... д-ра техн. наук: 4.3.1. / Карцев Сергей Васильевич. - Москва, 2023. - 425 с.
2. Горленко А.О. Технология финишного плазменного упрочнения для повышения ресурса металлорежущего инструмента / А.О. Горленко, П.А. Тополянский, А.П. Тополянский, Н.А. Соснин // *Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии*. – 2013.– № 3 (299). – С. 66–74.
3. Клименко С.А. Формирование газотермических покрытий при производстве деталей / С. А. Клименко, Л.Г. Полонский, М.Ю. Харламов [и др.].- Минск: Беларуская навука, 2020. – 416 с.
4. Малышева Г.В. Исследование состава и структуры антипиренов на различных масштабных уровнях / Г.В. Малышева, О.И. Кулаков, Ю.Ю. Шимица [и др.] // *Все материалы. Энциклопедический справочник*. –2013.– № 9. – С. 43–48.

## Трибологические процессы, происходящие при эксплуатации колесно-рельсового транспорта в условиях отрицательных температур Арктического региона

А. М. Керопян, А.Т. Романова

ООО «Московский научно-исследовательский проектно-изыскательский институт технологий и инноваций»  
Российский университет транспорта, РУТ (МИИТ)  
Москва, Россия, [am\\_kerop@mail.ru](mailto:am_kerop@mail.ru)

**Аннотация.** Многочисленными исследованиями установлено, что эффективность работы колесо-рельсового транспорта зависит от его тяговой способности, которая зависит от многих факторов, и в первую очередь от коэффициента сцепления колесных пар локомотивов с рельсами, который в свою очередь зависит от более десятка факторов и в том числе от климатических условий эксплуатации. Следует отметить, что в условиях отрицательных температур есть возможность появления на рельсах ледяного налета, способ удаления которого не установлен.

**Ключевые слова.** Арктический регион, колесо-рельсовый транспорт, ледяной налет, отрицательная температура, твердость, трибологические процессы.

**Цель.** Известно, что колесо-рельсовый транспорт при эксплуатации в условиях отрицательных температур иногда может буксовать вследствие возникновения на рабочей поверхности рельсов ледяного налета. Целью настоящей работы является исследование прочностных характеристик трибологических процессов взаимодействия колеса локомотива с рельсом в зоне контакта системы колесо-рельс.

**Материалы и методы.** Учитывая, что температурный диапазон Арктического региона в зимний период может составлять в пределах - 40...- 60° С, необходимо определить прочностные характеристики ледяного налета в данном диапазоне температур, являющегося результатом наличия на рельсах производственных загрязнений и выяснить степень их влияния на реализуемый коэффициент трения.

Исследованиями, выполненными В.В. Богородский и В.П. Гаврило установлено, что «...при температуре плавления лед имеет твердость по Моосу 2 или меньше, но твердость увеличивается примерно до 4 при температуре - 44° С (- 47,2° F) и до 6 при температуре - 78,5° С (- 109,3° F)» [1]. В табл. 1 показаны результаты исследований, приведенные в работе [1].

Таблица 1. Сравнительные данные о твердости при сжатии различных минералов

Материал	Твердость, МПа	Твердость по Моосу
Гранит	12000	7
Ортоклаз	7950	6
Апатит	5360	5
Сталь 20	2400	4
Кальцит	1090	3

В табл.2 приведены результаты исследований, выполненных М.М. Хрущевым, которые практически совпадают с данными, приведенными в табл. 1 [2].

Таблица 2. Твердость минералов

Эталонный минерал	Твердость по шкале Мооса	Абсолютная твердость по М.М. Хрущеву, МПа
Тальк	1	24
Гипс	2	360
Кальцит	3	1090
Флюорит	4	1890
Апатит	5	5360
Ортоклаз	6	7967

**Результаты и их обсуждение.** Результаты, приведенные в таблицах 1, 2 позволяют построить графическую зависимость твердости ледяного налета от температуры. На рис.1 показана зависимость изменения твердости ледяного налета от температуры.

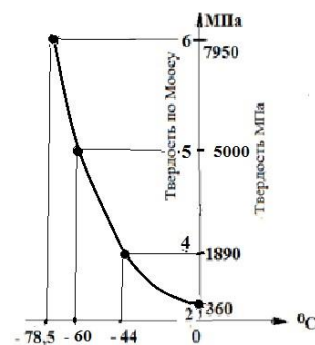


Рис. 1 Зависимость твердости льда от температуры

Анализ графика позволяет сделать вывод, что с понижением температуры трибологические характеристики ледяного налета на рельсах могут существенно измениться. В частности, может значительно повыситься твердость ледяного налета.

Далее, для расчета контактных напряжений в зоне контакта системы колесо-рельс следует определить

величину площадки контакта. В табл. 3 приведены результаты исследований, которые позволили рассчитать наибольшие контактные напряжения в зоне взаимодействия колеса локомотива с рельсом [3, 4, 5].

Таблица 3. Контактные напряжения в зоне площадки контакта пары колесо – рельс

Параметр (ссылка на источник)	Ед.изм.	[3,с.60]	[4,с.72]	[5, с.33]
Осевая нагрузка	кН	112,5	175,0	120,0
Площадь контакта (контур.)	мм <sup>2</sup>	296,0	193,0	102,2
Контактное напряжение	МПа	380,1	906,7	1174,2

Результаты, приведенные в табл. 3 показывают, что наибольшее контактное напряжение в зоне взаимодействия колеса с рельсом не превышает 1200 МПа. В табл. 4 показаны сравнительные значения параметров табл. 1, табл. 2 и рис. 1.

Таблица 4. Сравнительные показатели прочностных параметров ледяного налета на рельсах в зависимости от температуры и контактных напряжений в зоне взаимодействия системы колесо-рельс

№ №	Величина характеристики				
1	Температура, °С	0	- 44	- 60	-78
2	Твердость по Моосу	2	4	5	6
3	Твердость, МПа	300..360	1890 ... 2400	5000	7950
4	Контактное напряжение в зоне контакта колеса с рельсом (МПа*)	380,1 [4]			
5		906,7 [5]			
6		1174,2 [6]			

\*) Приведенные результаты получены при температурном диапазоне +25° ... -25°С.

Изучение показателей, представленных в табл. 4, показало, что при температуре - 40° С и ниже (что весьма характерно для климатических условий Арктического региона России) устранить ледяной налет с поверхности рельса катящимся колесом локомотива

либо другими механическими средствами не представляется возможным. Следовательно, для удаления ледяной корки с поверхности рельса целесообразно изыскать другие альтернативные средства (например, путем подвода в зону взаимодействия колеса с рельсом дополнительного тепла).

## Заключение

По прочности на сжатие механические свойства льда как материала в диапазоне отрицательных температур ниже -40° С имеют твердость, превышающие показатели некоторых керамических материалов, а иногда и металлов. Полученные результаты можно объяснить различиями на уровне атомных связей исследуемых материалов.

Прочностные характеристики ледяного налета, образованного в условиях низких температур Арктического региона свидетельствуют о том, что его удаление механическими способами не представляется возможным. Следовательно, удаление ледяного налета с рабочих поверхностей рельсов является актуальной задачей и может иметь не только экономическое (при освоении Арктического региона), но и стратегическое значение при создании резервного круглогодичного сухопутного сообщения вдоль Арктического побережья России, как альтернатива Северного морского пути.

1. Богородский В.В., Гаврило В.П. Лед. Физические свойства. Современные методы в гляциологии. Л.: Гидрометеоиздат, 1980, - 384 с.
2. Хрущев М.М. Абразивное изнашивание / М. М. Хрущев, М.А. Бабичев, АН СССР. НИИ машиноведения – М.: Наука, 1970. – 252 с.
3. Флячинский К.П. Влияние условий взаимодействия колеса и рельса на фрикционные процессы в зоне контакта. Дисс. на соискан. уч. ст. к.т.н. Коломна, 1993, 175 с.
4. Кротов В.Н. Повышение износостойкости пары трения колесо – рельс путем выбора рациональных профилей поверхностей контакта. Дисс. на соискан. уч. ст. к.т.н., Ростов-на Дону, 1998, 180 с.
5. Протасов А.В. Повышение коэффициента сцепления колес локомотива избирательной дозировкой вводимых в зону контакта магнитных порошков. Дисс. на соискан. уч. ст. к.т.н., Ворошиловград, 1984, 229 с.
6. Патент РФ на изобретение № 2504492 МПК В61С 15/10. Способ увеличения сцепления колеса с рельсом [Текст] / А. М. Керопян, Ю. М. Лужнов; заявитель и патентообладатель - М., ГОУ ВПО МГГУ и НИТУ «МИСиС» (RU) № 2012124483/11; заявл.14.06.12; опубл. 20.01.14 в Бюл. № 2.
7. А.М. Keropyan, A.Y. Albagachiev The degree of influence of the dominant factors in the area of contact with the rails of the working surfaces of the wheels of quarry locomotives on their traction capacity// Международный журнал ПРОБЛЕМЫ МАШИНОСТРОЕНИЯ И АВТОМАТИЗАЦИИ, РАН, №1, 2023, С. 4-9. ISSN 0234-6206. DOI 10.5261/02346206\_2023\_1\_4.



## ОЦЕНКА КАЧЕСТВА ФИНИШНОЙ ОБРАБОТКИ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЕЙ АКСИАЛЬНО-ПОРШНЕВЫХ ГИДРОМАШИН С НАКЛОННЫМ ДИСКОМ ПО ИНТЕНСИВНОСТИ ТЕПЛОТЫДЕЛЕНИЯ ПРИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ОБКАТКЕ

Д.В. Клеветов<sup>1</sup>, Р.Л. Мусатов<sup>1</sup> к.т.н., А.В. Аборкин<sup>2</sup> к.т.н., А.Л. Симаков<sup>3</sup> д.т.н.

<sup>1</sup>АО «Всероссийский научно-исследовательский институт Сигнал», Ковров, Россия; [denis\\_klevetov@list.ru](mailto:denis_klevetov@list.ru)

<sup>2</sup>Владимирский государственный университет им. А.Г. и Н.Г. Столетовых, Владимир, Россия

<sup>3</sup>Ковровская государственная технологическая академия им. В.А. Дегтярёва, Ковров, Россия

**Аннотация.** Финишной стадией технологического процесса по формированию окончательных геометрических параметров рабочих поверхностей пар трения аксиально-поршневых гидромашин с наклонным диском (АПГМНД) является технологическая обкатка на гидравлическом стенде. При этом происходит процесса приработки пар трения, оказывающий существенное влияние на долговечность деталей и КПД АПГМНД в целом. Снижение интенсивности приработки деталей возможно при получении более качественных геометрических параметров поверхности в процессе их изготовления или учета дополнительных критериев. Предлагается при финишной обработке учитывать параметр волнистость, оказывающий также негативное влияние на эксплуатационные характеристики, за счет формирования более жесткой схемы финишной механической обработки.

**Ключевые слова:** финишная обработка, тепловыделение, технологическая обкатка, доводка, распределитель.

### Введение

Как известно одним из явных проявлений процесса трения является энергетические потери. Для снижения потерь на трение полезно проведение исследований для конкретных объектов. В основу исследования положим постулат, что при уменьшении тепловыделения при прочих равных – уменьшаются потери механического КПД.

В рамках работы предлагается провести исследование процесса тепловыделения АПГМНД при технологической обкатке (ТО) на базе насоса рабочим объемом 33 см<sup>3</sup>/об. Именно процесс технологической обкатки сопровождается интенсивным процессом приработки пар трения внутри самого насоса и формированием установившихся геометрических параметров их поверхностного слоя. В процессе ТО насос подвергается различным знакопеременным нагрузкам.

Принимая во внимание то, что при меньшей интенсивности износа внутренние элементы АПГМНД будут более долговечны, и смогут обеспечить больший ресурс насоса, т.к. в меньшей степени будут подвержены механическому воздействию, то работа по исследованию процессов тепловыделения является актуальной.

### Источники тепловыделения АПГМНД

Для оценки влияния конкретных пар трения на интенсивность процесса тепловыделения в АПГМНД стоит отметить исследования распределения энергетических потерь по парам трения в модуле ходовых частей обобщенные в трудах Овчинникова Н.А. [1-3] как возможность оценки влияния геометрических параметров поверхностного слоя пар трения на процессы тепловыделения и оценки энергетических потерь. В частности, стоит обратить внимание на систему тепловыделения в гидромашин см. рис. 1., которая содержит как внутренние элементы АПГМНД, так и задействует внешнюю среду. Наряду с этим необходимо также понимание процесса интенсивности тепловыделения с распределением количественных показателей по парам трения АПГМНД, см. рис. 2 [3].

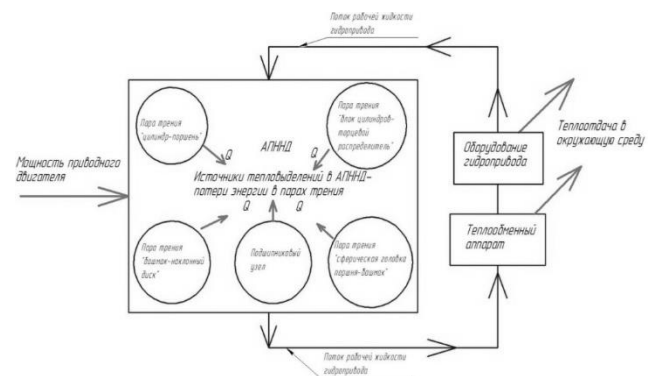


Рис. 1. Источники тепловыделения [3].

Из представленной диаграммы [3] видно, что наибольший удельный вес в процессе тепловыделения АПГМНД имеют пары трения с максимальной площадью взаимодействия: блок цилиндров – поршни (9 шт.) и торцевой распределительный узел.

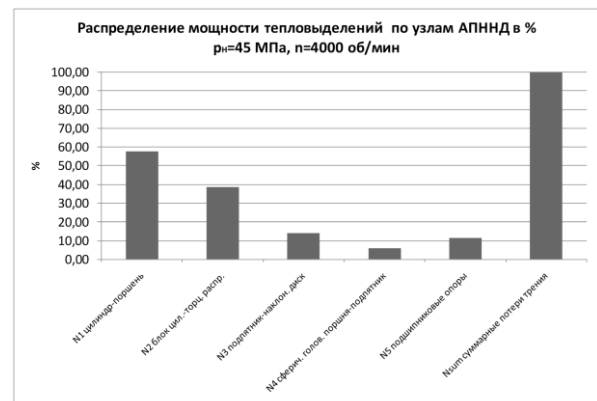


Рис. 2. Распределение мощности тепловыделения по узлам АПГМНД [3].

Дополнительно, стоит обратить внимание и на исследования Земскова А.М. [4], изложенные в его диссертационном исследовании. В исследовании приведена оценка степени влияния различных пар трения на состояние АПГМНД, в т.ч. полный КПД (см. рис. 3).

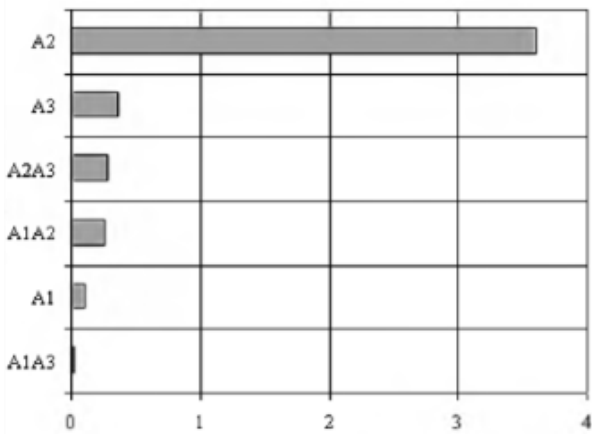


Рис. 3. Степень влияния факторов [4]. (A2 - суммарная площадь износа в распределительной паре; A3- зазор в поршневой паре; A1 - зазор в золотниковой паре клапанной коробки)

Учитывая приведенные исследования, стоит отметить, что наибольший удельный вес в факторах, оказывающих влияние на долговечность гидромашин, является пара между распределительными дисками.

### Процесс технологической обкатки

Для реализации ТО применяют специальное стендовое оборудование. Стенд, в том числе, служит и для осуществления комплексной проверки соответствия насоса тактико-техническим характеристикам. ТО с применением указанного стендового оборудования обеспечивается благодаря муфтовому присоединению насоса с приводным электродвигателем, обеспечивающим постоянное вращение на частоте 3000 об/мин. Управление силовым давлением, происходит в ручном режиме за счет наличия управляющих дросселей установленных в линии нагнетания и линии слива, в зависимости от направления потока рабочей жидкости. Нагружение испытуемого насоса происходит за счет наличия порошкового тормоза, который, по управляющему сигналу с пульта оператора, создает механическое воздействие на приводной вал, тем самым противодействуя вращению вала стендового гидромотора. Таким образом, постепенно происходит повышение давления в системе с учетом знакопеременного характера (реверса) движения потока рабочей жидкости. Обкатка АПГМНД составляет порядка 40 минут. Наряду с непосредственным временем обкатки, во время подготовки к проведению стендовых испытаний, происходит процедура разогрева рабочей жидкости. Для этого при максимальном положении люльки насоса осуществляется запуск приводного двигателя без подключения нагрузки. В этот момент происходит не только разогрев рабочей жидкости, но и обеспечивается очистка образовавшихся воздушных полостей – воздух выводится с утечками непосредственно в бак. Это так же необходимо для исключения возникновения явления кавитации. Данная процедура по факту осуществляется в пределах 5–10 минут, при этом температура рабочей жидкости повышается до 30–35 °С.

Для формирования силового давления в гидрوليнии в схеме имеется гидромотор, соединенный с

нагрузочным элементом (порошковым тормозом), обеспечивающим принудительное «торможение» потока рабочей жидкости. Благодаря возможности управления нагрузочным элементом стендовый гидромотор создает подпор в линии нагнетания испытуемого насоса. Таким образом, обеспечивает создание необходимого рабочего давления жидкости.

Для обеспечения реверса потока рабочей жидкости необходимо обеспечить управление люлькой испытуемого насоса. Управление люлькой испытуемого насоса осуществляется путем подачи знакопеременного управляющего сигнала на механизм управления насосом напряжением +10В+0,2В. При изменении полярности подаваемого сигнала люлька испытуемого прибора переводится из одного крайнего положения в другое.

В процессе обкатки активно происходит приработка пар трения в условиях граничного трения особенно на начальных стадиях. Режимы обкатки подобраны таким образом, чтобы постепенно увеличивая нагрузку обеспечить приработку всей площади взаимодействия сопрягаемых поверхностей. При этом на рабочих поверхностях пар трения снижается параметр шероховатости  $Ra_{max}$ , тем самым обеспечивается процесс формирования равновесной шероховатости двух контактирующих элементов.

В первую очередь начальное качество поверхностного слоя влияет на объем загрязнения рабочей жидкости при процессе приработки. Одновременно, появившиеся частицы в рабочей жидкости будут играть роль абразива и снижать качество поверхностного слоя, полученного путем финишных операций при механообработке. Таким образом, чем лучше подготовлена поверхность, тем меньше силы фрикционного взаимодействия и, как следствие, меньше загрязнения рабочей жидкости с последующим абразивным износом. Так же снижается вероятность локального перегрева при интенсивной приработке.

Однако, по данным исследований [5-6] при «очень качественной» подготовке поверхности наблюдаются явления схватывания поверхностей, поэтому необходимо четко соблюдать баланс качества подготовки поверхности во избежание появления процесса схватывания поверхностей. Это связано с теорией межмолекулярного взаимодействия. Таким образом, слишком «хорошая» (с улучшенными параметрами поверхностного слоя) поверхность так же негативна для гидромашин.

Процесс ТО гидромашин обеспечивает протекание процесса приработки по классическому закону Герсси-Штриббека.[7], который оканчивается формированием так называемой [8] установившейся шероховатости. При этом важно производить оценку не только параметров шероховатость и макроотклонений, но и параметра волнистость [9].

Для фиксации процесса тепловыделения при ТО испытуемого насоса применялся прибор Testo 870–2, являющийся поверенным средством измерения.

При проведении ТО производилась фиксация температуры в самой горячей точке испытуемого насоса. Допущения при эксперименте равносильны процессу, описанному в [2-3]. Результаты фиксации изображения представлены на рисунке 4.



Рис. 4. Результаты замеров тепловыделения АПГМНД при технологической обкатке

На рисунке 4 видна характерная область, имеющая самое большое тепловыделение. Это обусловлено конструктивной особенностью насоса, в частности наличия в данном месте пары трения латунный-стальной распределителя с самой большей площадью взаимодействия. При этом максимальная зафиксированная температура рабочей жидкости составила 68,5 °С.

С учетом проведенных исследований представляется возможным за счет более жесткой схемы финишной обработки (доводки) рабочей поверхности распределителя (плоскости) обеспечить «снижение» (уменьшение) пикового значения температуры рабочей жидкости для исключения локальных перегревов, а также меньшего износа прецизионных деталей. С учетом подхода к формированию нагрузки при доводке рабочей поверхности распределителя удалось снизить параметр «волнистость» в 2 раза. Предложенные мероприятия, в итоге, позволяют повысить надежность системы в целом за счет увеличения срока службы ответственных элементов.

После проведения финишной обработки с предложенными мероприятиями рабочей поверхности распределителей также была проведена серия экспериментов, по результатам которых максимально зафиксированная температура составила 62,4 °С.

Таким образом, с учетом проведенных мероприятий, удалось снизить пиковое значение температуры при технологической обкатке АПГМНД на 5 °С.

## Заключение

Экспериментально показано, что изменение геометрических параметров (в т.ч. параметр волнистость) ответственных поверхностей пар трения АПГМНД, полученных при финишной механической обработке (доводке), оказывает влияние на интенсивность тепловыделения при технологической обкатке. При этом выявлено, что по параметру волнистость зависимость носит прямой характер. В связи с этим интенсивность тепловыделения может применяться в качестве оценочного параметра качества финишной обработки.

1. Разработка и исследования аксиально-поршневой гидромашин с наклонным диском и перспективными параметрами 2 этап. Проведение предварительных расчетных исследований параметров гидромашин предложенной конструктивной схемы: отчет по НИР (заключ.): ФГБОУ ВПО «КГТА им. В.А. Дегтярева»; рук. Тимофеев М.Ю. – Ковров, 2014. – 143 с. – Исполн.: Воронов С.А., Косорукова О.В., Овчинников Н.А., Шпагин А.А., Казарина О.И., Зайцев И.А., Урядова Т.Е. – Библиогр.: с.139-143. – № ГР 01201371734.
2. Овчинников, Н.А. Разработка математической модели теплового состояния аксиально-поршневого насоса с наклонным диском / Н.А. Овчинников // Гидропневмоавтоматика и гидропривод – 2015 [Текст]: сборник научных трудов / под ред. д-ра техн. наук Е.М. Халатова. – Ковров: ФГБОУ ВПО «КГТА им. В.А. Дегтярева», 2015. С. 118-127.
3. Овчинников, Н.А. Анализ тепловыделений в узлах аксиально-поршневого насоса с наклонным диском / Н.А. Овчинников, Д.Н. Михайлова // Справочник. Инженерный журнал. – 2016. – № 4(229). – С. 25-30. – DOI 10.14489/hb.2016.04.pp.025-030. – EDN VSEWSV.
4. Земсков, А.М. Технология повышения долговечности объемного гидропривода (на примере ГСТ-112) : специальность 05.20.03 "Технологии и средства технического обслуживания в сельском хозяйстве": автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / Земсков Александр Михайлович. – Саранск, 2014. – 22 с. – EDN ZPMPJN
5. Крагельский, И.В. Основы расчетов на трение и износ [Текст] / И.В. Крагельский, М.Н. Добычин, В.С. Комбалов // Монография под общей редакцией И.В. Крагельского. М.: Машиностроение. 1977, С. 526.
6. Комбалов, В.С. Влияние шероховатости твердых тел на трение и износ [Текст] / В.С. Комбалов // М.: Наука, 1974. С. 111.
7. Мышкин, Н.К. Трибология. Принципы и приложения / Н.К. Мышкин, М.И. Петроковец. - Гомель: ИММС НАНБ, 2002. - 310 с.
8. Суслов А.Г. Технологическое обеспечение параметров состояния поверхностного слоя деталей. - М.: Машиностроение, 1987. - 208 с. EDN: WKSFTP
9. Клеветов, Д.В. О проблеме учета параметра «волнистость» в гидромашинках / Д.В. Клеветов // Будущее машиностроения России: сборник докладов: в 2 томах, Москва, 22–25 сентября 2020 года / Союз машиностроителей России, Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет). Том 2. – Москва: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2020. – С. 76-79. – EDN DJGYYJ.

## О ТРИБОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИКАХ ПОЛИМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Клюев В.А., Савенко В.И.\*

[\\*visavenko@rambler.ru](mailto:*visavenko@rambler.ru)

<sup>1</sup>Иститут физической химии и электрохимии им. А.Н. Фрумкина РАН, Москва, РФ.

В работе представлены результаты экспериментальных исследований экзоэмиссии электронов, возникающей при взаимном трении скольжения полимерных материалов в условиях вакуума. Рассмотрены зависимости интенсивности экзоэмиссии электронов от режимных факторов трения и их геометрических размеров. При анализе наблюдаемых закономерностей использованы современные представления о механизмах возникновения трибоэлектрических зарядов в полимерных материалах. Показано, что экзоэмиссия электронов в рассматриваемых случаях является автоэлектронной.

**Ключевые слова:** трибоэлектричество, полимеры, двойной электрический слой, экзоэлектронная эмиссия.

### Введение

Известно, что электризация материалов при их трении – многостороннее «полифоническое» явление. В общем случае оно включает функционирование совокупности микромеханизмов, действующих в приповерхностных слоях контактирующих тел при их трибоактивации [1-4]. Относительный вклад этих микромеханизмов в трибоэлектризацию материала зависит от его механических свойств, режимов трения, физико-химических свойств окружающей среды.

Анализ закономерностей трибоэлектрических явлений и их характеристик позволяет получить существенную информацию о характере структуры поверхностных слоев трибоматериала, а также о кинетике протекающих в ней химических реакций [5-6].

Среди трибоэлектрических явлений особое место занимает явление экзоэмиссии электронов (ЭЭЭ), возникающей с поверхности материалов в процессе трения скольжения. Повышенный интерес к этому явлению вызван не только возможностями его практического использования [7,8], но и необходимостью решения проблем, связанных с его природой и особенностями проявления [1,4-6]. Данная работа посвящена изучению основных характеристик ЭЭЭ пленок политетрафторэтилена (ПТФЭ) при их трибоиспытаниях в вакууме при различных граничных условиях. К таким характеристикам, прежде всего, относятся интенсивность ЭЭЭ, плотность поверхностного заряда (ДЭС), возникающего на межфазной границе контактирующих тел.

### Материалы и методика

Образцы представляли собой лентообразные пленки ПТФЭ площадью  $10 \times 1 \text{ см}^2$  и толщиной от 10 мкм до 5 мм. Выбор данного материала был обусловлен его широким использованием в промышленных узлах трения [8]. В качестве контртел

### ON TRIBOELECTRIC CHARACTERISTICS OF POLYMER MATERIALS

Klyuev V.A., Savenko V.I.\*

The paper presents the results of experimental study of electron exoemission arising from the mutual sliding of polymer materials in vacuum conditions. The dependences of the electron exoemission flux on the friction factors and their geometric dimensions are considered. To explain the observed patterns, modern views about the mechanisms of the occurrence of triboelectric charges in polymer materials are used. It is shown that electron exoemission in the considered cases is autotronic.

**Keywords:** triboelectricity, polymers, double electric layer, exoelectronic emission.

использовались прямоугольные пластинки природного (кератино-фиброинового) полимера - фетра (ГОСТ 11025-78) площадью  $A = 3 \times 1 \text{ см}^2$  и толщиной  $5 \div 10 \text{ мм}$ . Эксперименты проводили на специально сконструированном для этой цели приборе (рис. 1).

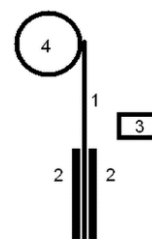


Рис. 1. Блок-схема прибора для исследования трибоэлектрических процессов. Пояснения обозначений в тексте

На рис. 1 представлена принципиальная схема узла трения скольжения, позволяющая регистрировать ЭЭЭ в динамическом режиме. 1 – пленка полимера, 2 – контртела, зажимающие пленку при давлении  $P = 0,5 \text{ Н/см}^2$ , 3 – детектор электронов. Трение происходило при вращении барабана (4), протягивавшего пленку через узел трения со скоростью  $1 \text{ см/с}$ .

Эмиссию электронов регистрировали в непрерывном режиме по выходе пленки из трибоконтакта. В качестве детектора использовался вторично-электронный умножитель канального типа ВЭУ-6 [9]. Стимулированные ЭЭЭ электрические сигналы поступали с ВЭУ на соответствующую электронно-пересчетную аппаратуру и регистрировались в виде скорости счета импульсов  $I$  (имп/с).

Часть экспериментов проводилась в условиях «композиционного» трения. В этом случае одна из сторон пленки контактировала с движущейся с той же скоростью заземленной металлической лентой 5.

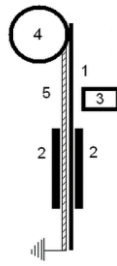


Рис. 2. Модифицированный узел трения. Обозначения те же, что и на рис. 1

В экспериментах была предусмотрена возможность одновременного измерения потока эмитированных электронов и плотности  $q$  поверхностного заряда, распределенного на эмитирующем участке пленки. Величину  $q$  измеряли при помощи емкостного вибрационного преобразователя [10].

Все эксперименты проводились в камере, выполненной на базе вакуумного поста ВУП-2К при остаточном давлении  $P \leq 10^{-3}$  Па.

#### Экспериментальные результаты.

На рис. 3 представлены зависимости интенсивности ЭЭЭ  $I$  (1) и плотности поверхностного заряда  $q$  (2) от толщины пленки полимера  $d$  при трении в условиях вакуума.

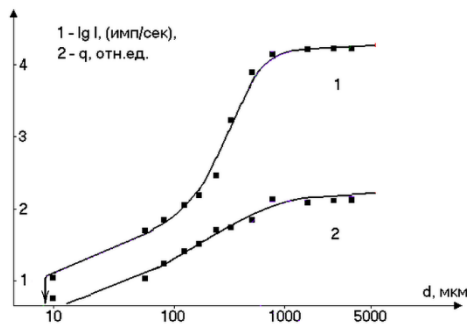


Рис. 3. Зависимость интенсивности  $I$  (1) и плотности поверхностного заряда  $q$  (2) от толщины  $d$  в пленки ПТФЭ при ее трении между двумя фетровыми контртелами в вакууме

Эксперименты показали, что эмиссии электронов возникает лишь при толщине пленок  $d \geq 10$  мкм (см. рис. 3, кривая 1). С ростом значений  $d$  она постепенно увеличивается. Однако при  $d \approx 1000$  мкм значения интенсивности  $I$  выходит на плато и в дальнейшем практически не изменяются. Величина  $q$  в области этих же толщин  $d$  также достигает насыщения (см. рис 3, кривая 2). Таким образом, существует заметная положительная корреляция между значениями  $I$  и  $q$ .

При трении тех же полимерных пленок на воздухе при атмосферном давлении наличия ЭЭЭ, или поверхностного заряда не обнаружено

Для выяснения влияния граничных условий на поверхности пленки, находящейся в трибоконтакте на противоположной ее стороне, были поставлены эксперименты по трению полимерных пленок в условиях «композиционного» трения в вакууме. Полученные результаты представлены на рис. 4.

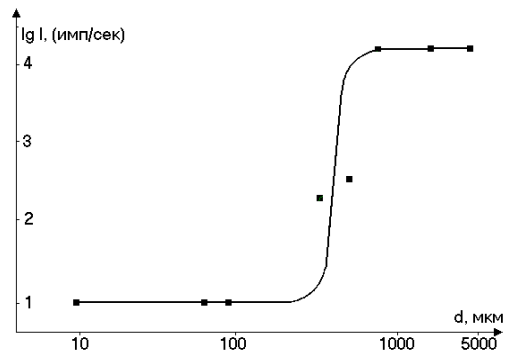


Рис. 4. Зависимость потока эмитированных электронов  $I$  от толщины  $d$  пленки ПТФЭ при ее трении в контакте с подложкой из алюминиевой фольги толщиной 0,5 мм

Аналогичный вид имеет зависимость плотности электрического заряда  $q$  на рабочей поверхности пленке от ее толщины  $d$  в условиях тех экспериментов.

Полученные экспериментальные данные свидетельствуют о взаимосвязи эмиссии электронов с полимерных пленок с наличием на их поверхностях отрицательного электрического заряда. Возможность управлять величиной потока ЭЭЭ с помощью наведенного металлической подложкой электрического поля  $E_{ex}$  свидетельствует об автоэлектронной природе этого явления.

#### Обсуждение результатов

При анализе природы ЭЭЭ в полимерах обычно используются два инструментария: электростатическая теория адгезионной связи [11], и квантово-механическое приближение, учитывающее представления зонной теории твердых тел и существование в энергетическом спектре полимера поверхностных состояний (см., например, [12]).

Согласно электростатической теории адгезии в результате донорно-акцепторных переходов между поверхностными атомами (молекулами) контактирующих тел на их межфазной границе образуется двойной электрический слой (ДЭС) и возникает контактная разность потенциалов. Донорные или акцепторные свойства этих атомов/молекул, а, следовательно, знак заряда их поверхностей определяются различными значениями энергии ионизации и/или сродства к электрону этих наночастиц. Скорость установления термодинамического равновесия в таких системах может быть очень высока из-за малого числа высокоэнергетических носителей зарядов на поверхности диэлектрика.

В рамках квантово-механического описания зонной структуры полимерных материалов (диэлектриков) ДЭС на межфазной границе образуется благодаря выравниванию их уровней Ферми, а полярность ДЭС определяется соотношением их работ выхода. Согласно обеим теориям на межфазной границе формируется ДЭС, однако результаты анализа его экспериментально найденных характеристик не всегда позволяют сделать соответствующий выбор.

Данные, приведенные на рис. 3 и 4, позволяют сделать заключение о том, что электрические поля, возникающие при «симметричной», схеме трения (рис. 1) на противоположных сторонах полимерной пленки, перестают влиять друг на друга при толщинах пленки  $d_c \approx 500-600$  мкм. Полагая, что толщина

ДЭС, образующегося на трибопаре ПТФЭ/фетр, по порядку величины должна составлять  $d_e \ll d_c \approx 400-600$  мкм, можно получить приближенную оценку для  $d_e \approx 5$  мкм.

В этом случае емкость  $C_A$  плоского конденсатора, который образует ДЭС в трибоконтакте:  $C = \epsilon_0 \epsilon_r A / d_e C_A = \epsilon_0 \epsilon_r \approx 0,53$  нф. Здесь  $A = 3 \cdot 10^{-4}$  м<sup>2</sup>,  $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$  Ф/м,  $\epsilon_r = 1$ . Тогда разность потенциалов ДЭС  $U_{ДЭС} \approx C/Q = 1,2 \cdot 10^3$  В. Здесь  $Q = q \cdot A$ ,  $q = 2,4 \cdot 10^{-2}$  кул/м<sup>2</sup>. Полученное значение близко по порядку величины к значениям  $U$ , характерным для адгезии типичных полимерных пар [10].

На рис. 5 представлены данные рис. 3, обработанные в предположении об автоэмиссионной природе ЭЭЭ при трении вышеуказанных материалов.

Они свидетельствуют о присутствии на поверхности ПТФЭ центров ЭЭЭ двух видов, существенно различающихся по величине работы выхода:  $\phi_1 = 0,29 \pm 0,03$  эВ и  $\phi_2 = 2,2 \pm 0,3$  эВ. Можно полагать, что природа центров  $\phi_1$  связана с энергетическими уровнями, обусловленными созданными трением дефектами решетки в кристаллических блоках ПТФЭ, и/или с поверхностными уровнями Тамма-Шокли [14].

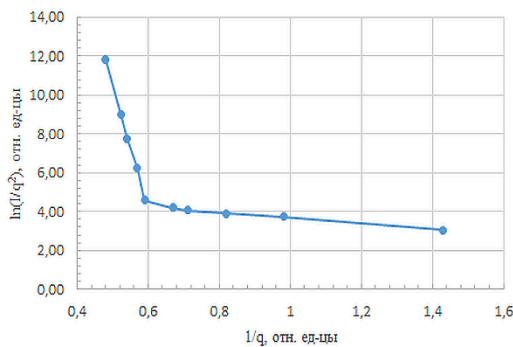


Рис. 5. Зависимость характеристик ЭЭЭ для трибопары ПТФЭ/фетр в координатах Фаулера - Нордгейма [13]

Значение работа выхода электронов для центров  $\phi_2$  достаточно близко к энергии сродства к электрону фторуглеродного комплекса  $C_xF_y$  [15], который

является повторяющейся структурной единицей (олигомером) макромолекулы ПТФЭ.

### Заключение

Полученные при трении трибопары ПТФЭ/фетр количественные характеристики процесса ЭЭЭ позволяют успешно прогнозировать поведение аналогичных полимерных трибосопряжений, применяемых в промышленных приборах и устройствах.

1. Евдокимов В.Д., Семов Ю.И. Экзоэлектронная эмиссия при трении. – М.: Наука, 1973. – 184 с.
2. Постников С.Н. Электрические явления при трении и резании. – Горький: Волго-Вятское кн. Из-во, 1975. – 280 с.
3. Лучейкин Г.А. Полимерные электреты. – М.: Химия, 1976. – 224 с.
4. Nakayama, K. Triboemission, triboelectric generation, and tribochemistry. //In: Wang, Q.J., Chung, Y.W. (eds). Encyclopedia of Tribology. Boston, MA: – Springer, 2013. – P. 3750-3760.
5. Zou H., Guo L., Xue H. et al. Quantifying and understanding the triboelectric series of inorganic non-metallic materials. //Nature Communications. – 2020. – №. 11:2093. – P. 1-7.
6. Крылова И.В. Экзоэмиссия. Химический аспект. // Успехи химии. – 1976. – Т. 45. – вып. 12. – P. 2138–2167.
7. Vochu L. et al. Innovative integration of triboelectric nanogenerators into signature stamps for energy harvesting, self-powered electronic devices, and smart applications //Eng. – 2024. – Т. 5. – №. 2. – С. 958-966.
8. Паншин Ю.А., Малкевич С.Г., Дунаевская Ц.С. Фторопласты. – Л.: Химия, 1978. – 238 с.
9. Бараночников М.Л. Приемники и детекторы излучений. – М.: ДМК Пресс, 2012. – 640 с.
10. Вершина Г.А., Жарин А.Л., Тявловский А.К. Исследование накопления заряда статического электричества на поверхности изделий из фторопласта-4 методом вибрирующего конденсатора. // Наука и техника. – 2012. – № 1. – С. 26-32.
11. Дерягин Б.В., Кротова Н.А., Смилга В.П. Адгезия твердых тел. – М.: Наука, 1977. – 280 с.
12. Xu C. et al. On the electron-transfer mechanism in the contact-electrification effect //Advanced materials. – 2018. – Т. 30. – №. 15. – С. 1706790.
13. Fursey G.N. Field emission in vacuum microelectronics. NY.: Kluwer AP. 2005. - 205 p.
14. Davison S.G.; Steslicka M. Basic Theory of Surface States. – N.Y.: Clarendon Press, 1996. – 223 p.
15. Гурвич Л.В., Карачевцев Г.В., Кондратьев В.Н., Лебедев Ю.А. и др. Энергия разрыва химических связей. Потенциалы ионизации и сродство к электрону. – М.: Наука, 1974. – 351 с.

## ИССЛЕДОВАНИЕ ИЗНОСОСТОЙКОСТИ ПОКРЫТИЙ НА ОСНОВЕ КАРБИДА ХРОМА С НИКЕЛЬ-ХРОМОВОЙ СВЯЗКОЙ, ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДОМ ВЫСОКОСКОРОСТНОГО ГАЗОПЛАМЕННОГО НАПЫЛЕНИЯ, ПОСЛЕ ИХ ШЛИФОВАНИЯ

А.А. Ковалев<sup>1</sup>, Н.В. Рогов<sup>2</sup>, О.И. Кулаков<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия;

<sup>2</sup>Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия;  
[nikolayrogov\\_24@mail.ru](mailto:nikolayrogov_24@mail.ru)

<sup>3</sup>Институт машиноведения им. А.А. Благодрава РАН, Москва, Россия

В статье приводятся исследования износостойкости деталей двигателей летательных аппаратов с покрытиями из карбида хрома с никель-хромовой связкой, нанесёнными методом высокоскоростного газопламенного напыления. Анализируется влияние параметров последующего шлифования на микротвёрдость и шероховатость сформированных покрытий. Установлено, что мелкозернистые алмазные шлифовальные круги снижают микротвёрдость сильнее, чем крупнозернистые, но обеспечивают лучшую шероховатость поверхности.

### Введение

По мере развития машиностроения всё более высокие требования предъявляются к изделиям с точки зрения обеспечения эксплуатационно-технических характеристик (ЭТХ). Одной из основополагающих групп ЭТХ являются требования к надёжности изделия [1, 2]. Применительно к двигателям внутреннего сгорания (ДВС), используемым в летательных аппаратах, наиболее важными и влияющими на работоспособность изделия являются такие показатели надёжности, как наработка до отказа и вероятность безотказной работы. Эти показатели, в свою очередь, в значительной мере определяются комплексом физико-механических свойств материалов, используемых при изготовлении двигателей [3]. Среди этого комплекса свойств целесообразно выделить износостойкость, т.к. эксплуатация ДВС характеризуется работой основных его деталей в парах трения, от интенсивности изнашивания материалов которых зависит продолжительность безотказной работы двигателя.

Обеспечение износостойкости возможно посредством использования таких технологических методов упрочнения поверхностного слоя как термическая обработка, химико-термическая обработка, поверхностно-пластическое деформирование и нанесение функциональных покрытий. В условиях серийного многономенклатурного производства, к которым относится производство ДВС летательных аппаратов, наиболее перспективным методом представляется обеспечение износостойкости путём нанесения газотермических покрытий [4]. Одним из таких покрытий является полученное методом высокоскоростного газопламенного напыления (ВГН) покрытие  $\text{Cr}_3\text{C}_2$  со связкой  $\text{NiCr}$  [5].

Целью настоящего исследования является обеспечение износостойкости деталей посредством нанесения покрытия  $\text{Cr}_3\text{C}_2$  со связкой  $\text{NiCr}$  методом ВГН и его последующего шлифования.

Для достижения заданной цели требуется решение следующих задач.

1. Определить методы исследований и перечень параметров, позволяющих оценить износостойкость покрытия после его нанесения и шлифования.

2. Провести количественную оценку износостойкости покрытия на основании значений параметров, выявленных в процессе исследований.

### Материалы и методы исследований

Основными параметрами, от которых зависит износостойкость материала, согласно [6] являются:

- микротвёрдость материала;
- шероховатость поверхностного слоя;
- форма, опорная площадь и направление штрихов микронеровностей после обработки;
- напряжённое состояние поверхностных слоёв материала (остаточные напряжения).

Сформированные покрытия имеют неоднородные физико-механические свойства по глубине, в связи с чем микротвёрдость поверхности может существенно изменяться в процессе шлифования покрытия, а также эксплуатации детали в составе изделия [7]. Поверхность газотермических покрытий непосредственно после нанесения имеют высокую шероховатость, поэтому для обеспечения износостойкости деталей с такими покрытиями необходимо при выборе режимов шлифования учитывать получаемую результирующую шероховатость. Таким образом, среди приведённого перечня параметров для рассматриваемых покрытий наиболее важны микротвёрдость и шероховатость.

Исходя из вышесказанного можно предположить, что износостойкость газотермического покрытия напрямую зависит от режимов его окончательной обработки, в частности шлифованием.

Вследствие того, что в настоящее время корпусные детали ДВС изготавливаются из алюминия, при подготовке образцов будет использован такой же материал с последующим нанесением покрытий. Эскиз образцов представлен на рис. 1.

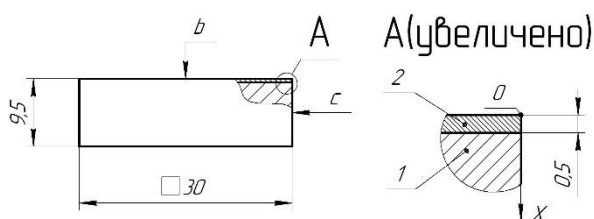


Рис. 1. Эскиз образцов:

1 – основной материал образца; 2 – материал покрытия

Изменяемыми параметрами при изготовлении образцов являются режимы алмазного шлифования, значения которых выбраны на основании рекомендаций [8, 9] и приведены в табл. 1. Шлифование образцов проводилось на плоскошлифовальном станке Proth PSGS-3060GB алмазными кругами 400x25x6x127 40/28 и 125/100. Общий припуск, удаляемый в процессе шлифования, для всех образцов составлял 0,15 мм. Обозначения, принятые в табл. 1:

$v$  – скорость резания;

$t$  – глубина резания.

Измерения микротвёрдости выполнялись по методу Виккерса на твердомере Металаб 502 при нагрузке 4,9 Н с выдержкой 10 с. Измерения шероховатости проводились на профилометре MarSurf PS 10.

Таблица 1. Режимы шлифования образцов

№ образца	$v$ , м/с	$t$ , мм	Зернистость шлифовального круга
1	25	0,005	40/28
2	25	0,005	125/100
3	25	0,020	40/28
4	25	0,020	125/100
5	35	0,005	40/28
6	35	0,005	125/100
7	35	0,020	40/28
8	35	0,020	125/100

Микротвёрдость образцов измерялась как на поверхности (см. рис. 1, направление  $b$ ), так и на шлифованном торце (см. рис. 1, направление  $c$ ), причём на поверхности измерения проводились только после шлифования ввиду того, что непосредственно после напыления поверхность образцов непригодна для измерения микротвёрдости по методу Виккерса. Координата измерения микротвёрдости на торце определяется по оси  $X$  (см. рис. 1), причём начало координат совпадает с поверхностью образца до шлифования.

### Результаты и обсуждение

В табл. 2 приведены результаты измерений микротвёрдости и шероховатости (см. рис. 2 и 3) образцов. Шероховатость  $Ra$  до шлифования для всех образцов в среднем составила 2,95 мкм. Шероховатость после шлифования для каждого из образцов приведена в табл. 2.

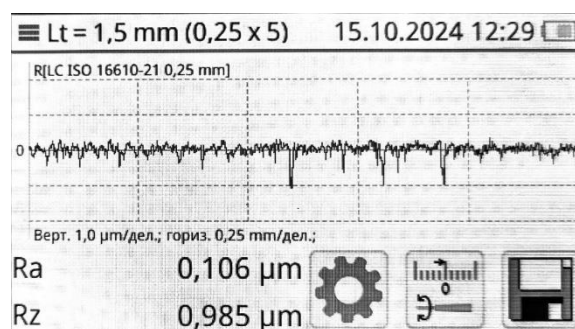


Рис. 2. Измерение шероховатости образца №5

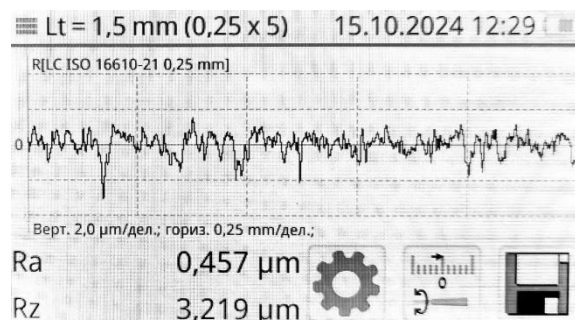


Рис. 3. Измерение шероховатости образца №6

Таблица 2. Микротвёрдость образцов HV0,5

№ обр.	Стадия	Направл. $b$	Направление $c^*$				$Ra$ , мкм
			0,12	0,20	0,42	0,45	
1	до шлиф.	–	792,3	–	434,3	–	2,95
	после шлиф.	832,0	–	888,9	–	434,9	0,09
2	до шлиф.	–	895,5	–	319,3	–	2,95
	после шлиф.	971,1	–	910,0	–	134,5	0,39
3	до шлиф.	–	835,7	–	111,8	–	2,95
	после шлиф.	900,1	–	1 019,0	–	148,2	0,09
4	до шлиф.	–	853,4	–	332,5	–	2,95
	после шлиф.	908,4	–	882,4	–	185,1	0,61
5	до шлиф.	–	843,1	–	308,6	–	2,95
	после шлиф.	899,3	–	883,3	–	136,9	0,11
6	до шлиф.	–	909,8	–	897,7	–	2,95
	после шлиф.	881,9	–	720,9	–	495,7	0,46
7	до шлиф.	–	836,7	–	703,2	–	2,95
	после шлиф.	904,4	–	932,5	–	433,4	0,11
8	до шлиф.	–	856,1	–	108,9	–	2,95
	после шлиф.	834,2	–	931,4	–	105,3	0,44

\*Приведены значения уровней измерений по оси  $X$  в мм.

Из табл. 2 очевидно, что сильнее всего микротвёрдость снижается после шлифования мелкозернистым кругом, при этом на этих образцах получена наилучшая шероховатость (образцы №1, 3, 5 и 7).

Для сравнительного анализа качества шлифовальной обработки с различными режимами приведены фотографии с микроскопа для образцов №6 (рис. 4,



1) и №5 (рис. 4, 2).

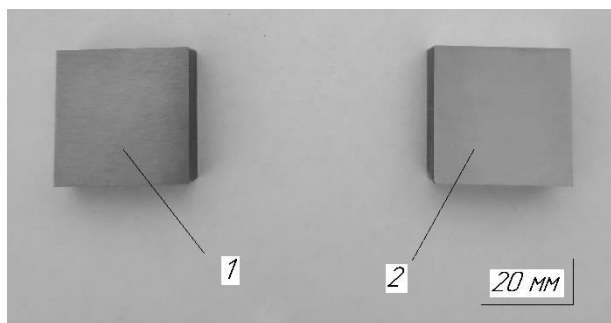


Рис. 4. Фото образцов с покрытиями:

1 – образец №6; 2 – образец №5

Фотографии, представленные на рис. 4, подтверждают худшее качество поверхности образца №6, обработанного шлифовальным кругом с более крупной зернистостью, по сравнению с образцом №5, обработанным мелкозернистым шлифовальным кругом.

### Выводы

На основании анализа литературных источников были определены основные параметры, влияющие на износостойкость материала: микротвёрдость поверхности и шероховатость. Были проведены исследования, в результате которых получены количественные значения выбранных параметров после шлифования образцов с покрытием  $\text{Cr}_3\text{C}_2$  со связкой NiCr.

Было установлено, что шлифование образцов кругами с более крупной зернистостью приводит к меньшему снижению значений микротвёрдости поверхности, чем шлифование мелкозернистыми кругами (в среднем после шлифования крупнозернистым кругом микротвёрдость на 100 HV выше), при этом значение шероховатости таких образцов получается более высокая (в среднем в 4-6 раз больше), однако необходимо отметить, что на текущий момент количество экспериментальных данных недостаточно, чтобы сделать достоверный вывод о характере влияния скорости шлифования и глубины резания на изменение микротвёрдости образцов. Таким образом, требуется дальнейшее проведение исследований.

На основании обработанных экспериментальных данных требуется построение регрессионных моделей, позволяющих более точно оценивать количественные изменения микротвёрдости и шероховатости покрытия в зависимости от режимов его шлифования. Кроме того, целесообразно проведение ускоренных испытаний газотермических покрытий  $\text{Cr}_3\text{C}_2$  со связкой NiCr на износостойкость с целью подтверждения её взаимосвязи с микротвёрдостью и шероховатостью. Как было указано ранее, помимо исследуемых в данной работе параметров необходимо оценить влияние геометрических характеристик микрорельефа поверхности, а также напряжённо-деформированного состояния материала покрытия после напыления и последующего шлифования на результирующую износостойкость.

1. Проников, А. С. Надежность машин / А. С. Проников. – М.: Научно-техническое издательство «Машиностроение», 1978. – 592 с.
2. Кучеренко, Д. Е. Проблема надёжности и ее значение для современной техники / Д. Е. Кучеренко, Р. Е. Кучеренко, Д. К. Трифонов // Проблемы научной мысли. – 2022. – Т. 6, № 5. – С. 70-73.
3. Мамаева Е. И. под ред. Машиностроение. Энциклопедия. Физико-механические свойства. Испытания металлических материалов. Т. II-1 / Е.И. Мамаева. – М.: Машиностроение, 2010. – 852 с.
4. Албагачиев, А. Ю. Выбор метода упрочняющей обработки деталей машин в условиях автоматизированного мелкосерийного производства / А. Ю. Албагачиев, А. А. Ковалев, А. С. Краско // Проблемы машиностроения и автоматизации. – 2021. – № 2. – С. 4-12.
5. Дружнова, Я. С. Развитие методов газотермического напыления упрочняющих покрытий на основе карбидов вольфрама и хрома (обзор) / Я. С. Дружнова // Труды ВИАМ. – 2022. – № 10(116). – С. 100-115.
6. Крагельский И.В. и др. Основы расчетов на трение, износ. – М.: Машиностроение. 1977. – 526 с.
7. Ковалев, А. А. Обеспечение равномерности распределения твёрдости в покрытиях, полученных высокоскоростным газопламенным методом, после их напыления и последующего шлифования / А. А. Ковалев, Н. В. Рогов // Современное машиностроение. Наука и образование. – 2024. – № 13. – С. 708-720.
8. Ярославцев, В. М. Обработка газотермических покрытий резанием / В. М. Ярославцев. – М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2013. – 92 с.
9. Справочник технолога-машиностроителя в 2-х тт: справочник / В. И. Аверченков, А. В. Аверченков, Б. М. Базров [и др.]; под редакцией А. С. Васильева, А. А. Кутина. – 7-е изд. испр. – М.: Машиностроение, 2023. – 1574 с.

## ИССЛЕДОВАНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ СВОЙСТВ БРОНЗОВЫХ ПОКРЫТИЙ, НАНЕСЕННЫХ НА СТАЛЬНЫЕ ДЕТАЛИ, РАБОТАЮЩИЕ В УСЛОВИЯХ ТРЕНИЯ СКОЛЬЖЕНИЯ ПРИ ВЫСОКИХ НАГРУЗКАХ

Д.А. Козлов

Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, Москва, Россия; [koslov74@mail.ru](mailto:koslov74@mail.ru)

В статье рассмотрены триботехнические характеристики покрытий из бронз БрАЖМц10-3-1,5 и БрМцФ3-6, нанесенных на конструкционную сталь методом электроискрового легирования. Показано, что для установившегося режима изнашивания коэффициент трения равен 0,10–0,13 при давлении 200–250 МПа, а износостойкость стали с покрытием увеличивается в два раза. Сталь с покрытием из бронзы БрАЖМц10-3-1,5 обладает более высокой несущей способностью, с покрытием БрМцФ3-6 – большей антифрикционностью.

Эксплуатационные свойства различных узлов и механизмов часто являются одним из основных факторов, от которых зависит работоспособность технических изделий. Поэтому в настоящее время актуальной задачей является создание и разработка мероприятий, которые формируют свойства поверхности, отвечающие современным требованиям надежности и безотказности работы изделий. В связи с этим задачи по разработке новых технологических процессов, направленных на улучшение характеристик узлов трения, являются перспективными и востребованными. В настоящее время разработаны различные методы модификации поверхности с целью повышения ресурса работы различных узлов и агрегатов за счет целенаправленного изменения свойств поверхности. Среди существующих методов изменения свойств поверхности весьма значительную часть занимают методы нанесения покрытий.

Среди методов нанесения покрытий широко используются методы обработки поверхностей, основанные на применении концентрированных потоков энергии, к которым относится электроискровое легирование (ЭИЛ). Метод основан на взаимодействии двух электродов, одним из которых является обрабатываемая деталь, а вторым – наносимый на поверхность материал. Формирование покрытия на обрабатываемой поверхности производится за счет переноса материала электрода во время горения электрической дуги. При нанесении покрытия происходит не только модификация поверхности, но и подповерхностного объема материала за счет диффузии металла как в поверхностный слой, так и в основную твердую фазу. Состав покрытия может отличаться от материала электродов (легированного и легирующего сплавов), кроме того, покрытие обладает уникальным комплексом физических и механических свойств. Варьируя материал электрода и параметры процесса, можно изменять состав, структуру и свойства поверхности обрабатываемой детали [1].

Примерами эффективного применения метода электроискрового легирования могут служить инструментальное производство, где метод ЭИЛ применяется для увеличения ресурса работы твердосплавного инструмента [2,3], кузнечно-штамповое производство, где на рабочие поверхности штампов наносят покрытия с целью их защиты и увеличения ресурса работы [4]. В последнее время методом электроискрового легирования наносят покрытия на поверхности деталей из конструкционных материалов с целью повышения их триботехнических свойств. В конструкциях различных механизмов, как правило, первостепенное значение уделяют вопросам прочности и надежности узлов и агрегатов, поэтому применяют материалы, выдерживающие

значительные нагрузки, но которые зачастую не отвечают в значительной мере требованиям по износостойкости [5]. Поэтому для повышения триботехнических свойств таких материалов, как правило, применяют либо создание износостойких покрытий, либо применение специальных смазочных материалов, формирующих в зоне контакта антифрикционные вторичные структуры [6].

Одним из таких примеров является применение конструкционной стали 30ХГСН2А в трибосопряжениях, несущих значительные контактные нагрузки, с нанесением на поверхность покрытием из бронз марок БрАЖМц10-3-1,5 и БрМцФ3-6, поэтому целью данной работы является изучение износостойкости и антифрикционных свойств покрытий из указанных бронз, нанесенных на сталь 30ХГСН2А методом электроискрового легирования.

**Материалы и методы исследований.** Для нанесения покрытия на образцы и детали из стали 30ХГСН2А электроискровым методом использовалась модифицированная установка ЕЛФА-512М. В состав установки ЕЛФА-512М входит генератор электроискровых импульсов и устройство, осуществляющее вращение детали, а также продольное перемещение электрода вибрационной головки относительно оси вращения [7].

Покрытие наносилось на внешнюю поверхность цилиндрических втулок из стали 30ХГСН2А диаметром 18 и длиной 20 мм. Образцы перед нанесением покрытия подвергали термической обработке, включающей нагрев до 900-910<sup>0</sup>С, охлаждение в масле и отпуск при температуре 210-215<sup>0</sup>С в течение 2–2,5 часов.

Для нанесения покрытий использовали компактные электроды из бронз марок БрАЖМц10-3-1,5 и БрМцФ3-6. Электрод выполнен из прутка диаметром 3мм и длиной 35мм. Рабочий конец электрода затачивали на конус с углом при вершине 60-65°. Электрод перед началом процесса нанесения бронзового покрытия размещали так, что его ось составляла с осью обрабатываемой втулки угол 30-33°. Схема испытаний приведена на рисунке 1.

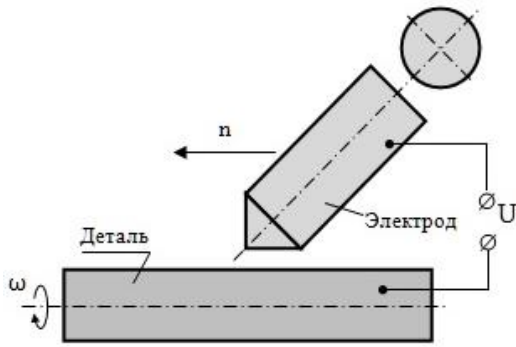


Рис.1. Схема нанесения покрытия

При нанесении покрытия величина рабочего тока импульса изменялась в пределах 0,7...1,3 А, а величина продольной подачи (продольное перемещение детали на один оборот) в пределах 0,5...1,8 мм/об. Остальные постоянные параметры процесса приведены в таблице 1.

Таблица 1. Параметры режима нанесения бронзового покрытия электронным методом

кол-во импульсов тока имп/мин	емкость конденсаторов, мкФ	скорость вращения детали, об/мин	кол-во слоев покрытия, шт.
~530	10	1,2	4

С целью оценки триботехнической эффективности покрытий испытания проводили по двум схемам. Испытания на установке УМТ-1 по схеме палец-штука при ступенчатом повышении нагрузки в условиях сухого трения для оценки коэффициента трения. Контртелом служил палец, изготовленный из стали 30ХГСН2А. Перед каждым испытанием образцы прирабатывали при скорости 0,2 м/с и давлении 5 МПа до получения заданной микрогеометрии поверхности трения и равных для исследуемых пар площадей контакта. В каждом эксперименте с помощью компьютера осуществлялась запись момента силы трения, который служил экспериментальной основой для расчета коэффициента трения. Далее контактное давление дискретно увеличивали через каждый час работы на 25 МПа до предельной величины 350 МПа. После испытаний с помощью металлографического микроскопа изучали качественное состояние поверхности стали 30ХГСН2А с нанесенным на нее антифрикционным покрытием в зависимости от прилагаемой нагрузки. Испытания с целью оценки износостойкости проводили по схеме двух перекрещивающихся цилиндров на универсальной машине КЕ-4. Эталонные валы диаметром 100 мм испытывали в паре с цилиндрическими образцами диаметром 11,3 мм. Валы и образцы изготовлены из стали 30ХГСН2А. Вал вращался с постоянной окружной скоростью 0,06 м/с. Образец после приработки в процессе испытаний прижимался к валу с постоянной нагрузкой 250 МПа.

Для оценки износостойкости испытания проводили по схеме двух перекрещивающихся стальных цилиндров на универсальной машине КЕ-4 в условиях трения без смазки. В качестве контртела использовались образцы из той же стали с закалкой, но без имплантации. Нагрузка в процессе испытания составляла 250 МПа.

**Результаты исследований.** На рисунке 2 представлены результаты оценки коэффициента трения пары без смазочного материала. Из экспериментальных данных видно, что во всем диапазоне внешних давлений коэффициент трения пары с покрытием БрАЖМц10-3-1,5 выше, чем с покрытием БрМцФ3-6. При этом обе кривые проявляют минимум коэффициента трения в функции внешнего давления. Для образцов с покрытием БрМцФ3-6 минимальные значения коэффициента трения (~0,10) наблюдаются при давлении 150–200 МПа; для образцов с покрытием из БрАЖМц10-3-1,5 наименьшие значения коэффициента трения (~0,13) наблюдаются при давлении 200–250 МПа. Следовательно, на основании данных зависимости коэффициента трения от давления на стальную пару трения с бронзовым покрытием можно говорить о большей несущей способности покрытия из высокопрочной бронзы БрАЖМц10-3-1,5 в условиях сухого трения по сравнению с покрытием БрМцФ3-6; однако последняя обладает более высокими антифрикционными свойствами.

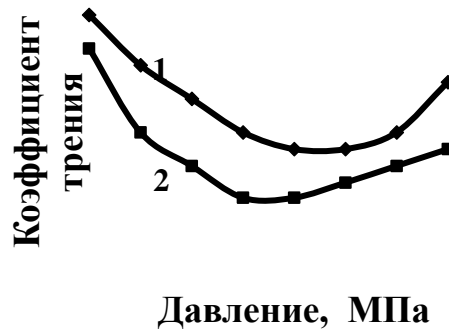


Рис. 2. Зависимость коэффициента трения пары сталь-сталь с покрытием от величины внешнего давления: 1 – покрытие БрАЖМц10-3-1,5; 2 – БрМцФ3-6

Качественный металлографический анализ поверхностей трения [9,10] и результаты оценки их износа (рисунок 3, кривая 1) показали, что на поверхности трения испытываемых образцов пары сталь 30ХГСН2А – сталь 30ХГСН2А без покрытия образуются глубокие вырывы металла, происходит интенсивная пластическая деформация [8] и развивается процесс схватывания с характерным разрушением поверхности трения при эксплуатации реальных узлов. При этом режим установившегося трения не достигается. Для пары трения с покрытием на кривой изнашивания (рисунок 3, кривая 2) наблюдается участок установившегося режима трения в интервале 18–54 м, Переход в режим повреждаемости (путь трения более 54м) происходит с невысокой интенсивностью роста

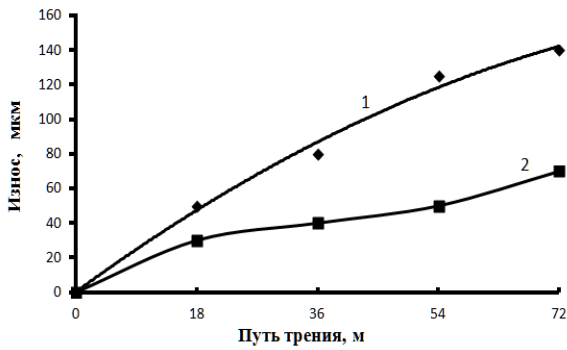


Рис. 6. Зависимость толщины изношенного слоя от пути трения: 1 – сталь 30ХГСН2А; 2 – сталь 30ХГСН2А с покрытием БрМцФ3-6

износа, что предопределяет значительный резерв работоспособности сопряжения сталь 30ХГСН2А с покрытием – сталь 30ХГСН2А без покрытия в условиях высоконагруженного контакта.

Приведенные на рисунке 2 и 3 экспериментальные результаты свидетельствуют о весьма высокой работоспособности бронз БрАЖМц10-3-1,5 и БрМцФ3-6, когда они находятся в состоянии тонкопленочного покрытия на стали 30ХГСН2А. При этом относительная износостойкость стали с покрытием при давлении 250 МПа существенно возрастает (до  $\approx 2.4$  раз), а заданный ресурс работы в исследуемом эксперименте на пути трения 72 м далеко не исчерпан. Характер кривой изнашивания 2 на рис.3 свидетельствует о том, что существенную роль в увеличении износостойкости сыграл подповерхностный слой. Он является модифицированным в процессе обработки за счет диффузии элементов электрода в стальную основу. Можно предположить, что роль собственно самого покрытия сводится к приработочным эффектам, обеспечивающим совместимость трущихся поверхностей и достижения установленного режима трения. Дальнейшую работоспособность пары обеспечивает модифицированный подповерхностный слой стали. Исходя из приведенных данных можно утверждать, что целенаправленное изменение состава и свойств поверхности изнашиваемого или сопряженного образца (контртела) служит дополнительным средством повышения работоспособности сопряжения в целом.

**Выводы.** Приведенные характеристики трения и износа стальной пары с антифрикционными бронзовыми

покрытиями, полученными методом электроискрового легирования, показывают, что бронзы марок БрАЖМц10-3-1,5 и БрМцФ3-6 могут быть рекомендованы в качестве материала покрытий на стали 30ХГСН2А для тяжело нагруженных узлов трения. При этом очевидна целесообразность специального модифицирования поверхности сопряженных образцов из стали 30ХГСН2А для повышения приспособляемости пары контакта, его антифрикционных свойств, долговечности и несущей способности тяжело нагруженного контакта.

1. С.Н. Химухин, Хосен Ри, Э.Х. Ри. Структура и свойства металлов и сплавов при электроискровом воздействии. – Хабаровск: Изд-во Тихоокеан. Гос. ун-та, 2015. – 127С.
2. Кайгородов Н.Г. Электроискровое легирование как способ повышения стойкости инструмента // Сб. материалов III Международной научно-практической конференции «Научно-технический прогресс: актуальные и перспективные направления будущего (г. Кемерово, 11-12 августа 2016 г.). Кемерово: ООО «Западно-Сибирский научный центр». – 2016. – Т.2. – С.119-123.
3. Купцов С.Г., Фоминых М.В., Мухинов Д.В., Магомедова Р.С., Николенко Е.А., Плещев В.П. Электроискровое легирование твердых сплавов ВК8, Т15К6 // Расплавы. – 2015. – № 4.– С. 87-89.
4. Иванов В.И. Электроискровое легирование кузнечного производства: Ч.2. Элементы технологии // Сельскохозяйственная техника: обслуживание и ремонт. – 2015. – №9. – С. 23-26.
5. Канарчук В.Е., Венедиктов В.А., Соловейкина А.К. Повышение износостойкости и уровня выносимости деталей и узлов авиационной наземной техники // Трение и износ. – 1985. – Т.VI. – № 3. – С. 493-498.
6. Дякин С.И. Методы повышения несущей способности тяжело нагруженных пар / Задачи нестационарного трения в машинах, приборах и аппаратах. М.: Наука, 1978. – 202 с.
7. Патент 64121 РФ МПК51 В23Н 9/00. Устройство для механизированной электроискровой обработки в виде тел вращения [текст] / Козлов Д.А., Овчинников В.В. – № 200612 8809/22; заяв. 09.08.06; опубл. 27.06.07. Бюлл. № 18.
8. Куксенова Л.И., Герасимов С.А., Лаптева В.Г. Износостойкость конструкционных материалов. М.: МГТУ им.Н.Э.Баумана, 2011, 237с.
9. Куксенова Л.И., Козлов Д.А., Алексеева М.С. Исследование эксплуатационных свойств стальных пар трения с антифрикционными покрытиями из медных сплавов, полученных методом электроискрового легирования // Трение и износ. – 2021. – № 4.– С. 31-41.
10. Куксенова Л.И., Козлов Д.А. Триботехнические свойства бронзовых покрытий, нанесенных на конструкционную сталь электроискровым легированием / Труды XXI Международной научно-практической конференции «Металлургия: технологии, инновации качество» в 2-х ч. Ч.2. – С.294-300.

## АКТИВАЦИЯ ТЕРМОДИФфуЗИОННОГО НАСЫЩЕНИЯ НИЗКОУГЛЕРОДИСТОЙ СТАЛИ МЕТОДОМ ОКИСЛЕНИЯ ПОВЕРХНОСТИ

В.М. Константинов<sup>1</sup>, В.А. Лешок<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь; [leshok.vlad@bntu.by](mailto:leshok.vlad@bntu.by)

Проведен сравнительный анализ двух групп образцов из низкоуглеродистой высококачественной стали 08А. Каждая из которых подвергалась одинаковой термодиффузионной порошковой цементации по известным режимам. Одну группу образцов дополнительно подвергали предварительному оксидированию в окислительной атмосфере печи. Установлено, что предварительное оксидирование поверхности ускоряет последующую цементацию. При предварительном оксидировании при 450...550 °С достигается максимальная степень интенсификации 14...17 %.

### Введение

Энергетические затраты при проведении процессов как поверхностного, так и объемного упрочнения сталей и сплавов высоки. Изделия машиностроительной отрасли имеет повышенную энерго- и ресурсоемкость. Актуальными являются разработки в области снижения энергетических и временных затрат при проведении упрочняющих обработок [1].

Нахождение изделий при повышенных температурах в термических печах с окислительной атмосферой вызывает газовую коррозию на поверхности изделий [2]. В этих условиях протекающие окислительные процессы в приповерхностных объемах сталей и сплавов чаще всего в промышленности считаются отрицательным явлением, которого следует избегать. Существуют методы защиты от газовой коррозии изделий в термическом оборудовании: создание защитной или нейтральной атмосферы, получение вакуума и др. Однако, существует области производства, где изделия специально подвергают окислению: пассивирующие оксидные покрытия; оксидные выпрямители; катализаторы на основе оксидов и др.

Существует мнение, что управление окислительно-восстановительным процессом при цементации позволит воздействовать на скорость протекания химико-термической обработки [3, 4]. В связи с этим, предложено оценить влияние регламентированного предварительного окисления поверхности на последующую цементацию.

### Материалы и методы исследований

Предметом исследования являлись образцы диаметром 3 мм, длиной 10 мм. Для исключения влияния легирующих элементов и примесей на процессы предварительного окисления была выбрана низкоуглеродистая высококачественная сталь 08А (таблица 1).

С целью оксидирования поверхности образцы помещали в разогретую термическую электропечь СНО 12.15/11 с окислительной атмосферой. Температура печи варьировалась от 200 до 700 °С с шагом 50 °С. Время выдержки при каждой из температур составляло 45 минут.

Термодиффузионное насыщение стали углеродом (цементация) проводили в порошковом карбюризаторе (таблица 2). На дно контейнера из нержавеющей стали толщиной 20 мм высыпалась насыщающая смесь, выше укладывались образцы, сверху проводилась засыпка толщиной 20 мм. На каждом этапе засыпка утрамбовывалась. Для герметизации

контейнера засыпались по очереди слои: кварцевого песка толщиной 15 мм, борного ангидрида ( $B_2O_3$ ) 10 мм. Контейнер сверху закрывался крышкой и помещался в разогретую до температуры насыщения ( $t_{нас}=950$  °С) электропечь СНО 12.15/11. Изотермическая выдержка составляла 3 часа. Борный ангидрид выступал в роли плавкого затвора, путём расплавления при температуре насыщения и герметизации контейнера. После окончания времени выдержки контейнер доставался и охлаждался на воздухе до комнатной температуры, распаковывался.

После термодиффузионного насыщения проводилась закалка в воду с температуры 920 °С для выявления науглероженного слоя. Время выдержки составляло 10 минут с целью выравнивая температуры по сечению и полноты протекания реакции образования аустенитной структуры.

ДюрOMETрические исследования проводились на микротвердометре ПМТ-3М по методу Виккерса. Нагрузка на алмазный индентор составляла 200 г. Для исключения статистической ошибки, одной точке исследования соответствует 5 измерений.

### Результаты и обсуждение

Таблица 1. Химический состав стали 08А

C, %	Mn, %	Si, %	P, %	S, %
≤0,10	0,35–0,60	≤0,03	≤0,03	≤0,03

Таблица 2. Состав порошкового карбюризатора

Углекислый барий ( $BaCO_3$ ), %	Древесный уголь, %
20–25	Остальное

С целью оценки активации термодиффузионного насыщения (цементации) методом окисления поверхности были подготовлены две группы образцов. Первая подвергалась порошковой цементации и закалке по режимам, наиболее широко применяемым на предприятиях машиностроительного профиля. Вторая группа подвергалась комплексной обработке: предварительное оксидирование, цементация и закалка.

В зависимости от температуры окисления, образцы, прошедшие предварительное оксидирование, можно разделить на три группы. В интервале температур 200...350 °С на поверхности образцов обнаруживаются цвета побежалости различного цветового спектра. Интервал температур 400...550 °С характеризуется образованием черного оксида с хорошей адгезией к поверхности. При 600...700 °С обнаруживаются трещины в оксидном слое, происходит его

частичное отслоение.

За эффективную толщину термодиффузионного слоя берётся значение твердости полупереходной зоны 50 HRC. Согласно стандарту ASTM E140-07 величине твердости 50 HRC соответствует твердость по Виккерсу 513 HV для конструкционных неаустенитных сталей при испытаниях с нагрузкой 200 г.

Установлено, что эффективная толщина науглероженного слоя ( $h_{эфф}$ ) больше у образцов, прошедших предварительное окисление, в сравнении с группой без окисления. Степень относительного увеличения толщины цементованного слоя ( $\epsilon$ ) зависит от температуры предварительного окисливания ( $t_{окс}$ ) (таблица 3). Обнаружено, что предварительное окисливание в интервале температур 450...550 °C позволяет достигнуть максимальной степени интенсификации 14...17 %.

Таблица 3. Анализ интенсификации цементации предварительным окисливанием

$t_{окс}$ , °C	$h_{эфф}$ , МКМ	$\epsilon$ , %
без окисливания	809	–
200	817	1
250	825	2
300	857	6
350	865	7
400	889	10
450	922	14
500	930	15
550	946	17
600	873	8
650	841	4
700	840	4

Примечание.  $t_{окс}$  – температура предварительного окисливания;  $h_{эфф}$  – толщина цементованного слоя;  $\epsilon$  – относительное увеличение толщины цементованного слоя.

Механизм протекания окислительно-восстановительных реакций в приповерхностных объемах стальных образцов объясняет причину ускорения последующего термодиффузионного насыщения. Предварительное окисливание позволяет сформировать на поверхности стальных образцов слой оксидов железа. Кислород, находящийся в атмосфере печи, адсорбируется на поверхности и диффундирует вглубь. По мере протекания процесса окисления увеличивается содержание кислорода в твердом растворе железа  $\alpha$ -Fe. При достижении концентрации кислорода к стехиометрическому содержанию в оксиде происходит фазовое превращение твердого раствора внедрения (O в  $\alpha$ -Fe) в оксиды. Согласно диаграмме фазового равновесия системы «Fe–O» существует возможность формирования оксидов трёх типов: FeO – вюстит, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – гематит, Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> – магнетит.

Образованные окислы разрыхляют приповерхностные объемы стальных образцов. Причём,

глубина разрыхления больше, чем размеры оксидного слоя. Процесс окисления характеризуется движением двух потоков, направленных навстречу друг к другу. Извлекаемые из объема образца катионы железа движутся к поверхности. В свою очередь, с поверхности к центральной части направлен поток вакансий. При последующем термодиффузионном насыщении поток вакансий захватывает адсорбированные частицы углерода и ускоренно перемещает их к центру образца.

Процесс цементации характеризуется восстановлением оксидной пленки на поверхности насыщаемого изделия. При восстановительной реакции на поверхности образуется активированный слой железа. Который выступает в роли катализатора реакции распада угарного газа (CO). В свою очередь, скорость диссоциации CO является лимитирующим фактором времени цементации в целом. Повышая скорость распада угарного газа на поверхности с помощью катализатора, происходит ускорение термодиффузионного насыщения углеродом.

## Выводы

Проведен сравнительный анализ двух групп образцов из низкоуглеродистой высококачественной стали 08A. Каждая из которых подвергалась одинаковой термодиффузионной порошковой цементации по известным режимам. Одну группу образцов дополнительно подвергли предварительному окисливанию в окислительной атмосфере печи при температурах 200...700 °C с шагом измерения 50 °C. Установлено:

- 1 - предварительное окисливание поверхности ускоряет последующую цементацию;
- 2 - интервал температур 450...550 °C позволяет достигнуть максимальной степени интенсификации 14...17 %;
- 3 - ускорение последующей цементации связано с механизмом окислительно-восстановительных реакций в приповерхностных объемах.
- 4 - анализируемый положительный эффект активации порошковой цементации требует дополнительных опытно-технологических работ.

1. Константинов, В.М., Кукареко В.А. Пути энергосбережения при термической и химико-термической обработке сталей за счет ускорения диффузионных процессов / В.М. Константинов, В.А. Кукареко // Литье и металлургия. – 2023. – № 4. – С. 72–80.
2. Эванс, Ю.Р. Коррозия и окисление металлов / Ю.Р. Эванс. – М.: Машгиз, 1962. – 855 с.
3. Воронцов, Е.С. Успехи химии неорганических пленок и метод интерференционных индикаторов / Е.С. Воронцов, В.К. Алтухов, А.Н. Корнеева, Н.П. Пекшева // Успехи химии. – 1973. – Т. 42, № 7. – С. 1325–1351.
4. Priegnitz, H. Wplyw odweglania i utleniaania powierzchniowego stali przed jej naweglaniem na mikrostrukture warstwy naweglonej / H. Priegnitz // Biul. Inst. Mech. Prec. – 1970. – № 1. – С. 27–31.

## ВЛИЯНИЕ ДЛИТЕЛЬНОСТИ ИМПУЛЬСНОГО ТОКА НА ДЕФОРМИРУЕМОСТЬ ТИТАНОВОГО СПЛАВА ВТ6

О.Е. Корольков<sup>1</sup>, У.Х. Угурчиев<sup>1</sup>, Н.Н. Новикова<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Институт машиноведения им. А.А.Благонравова РАН, Москва, Россия; 41zh1k@mail.ru

**Аннотация.** Целью работы является определение режима электропластической деформации титанового сплава ВТ6 при трехточечном изгибе, а также последующее применение найденных режимов к деформации заготовки имплантата. Оценивалось влияние температуры, плотности тока и длительности импульса при постоянной скважности.

Социально-экономической проблемой для населения РФ является высокий уровень инвалидности вследствие травм, связанных с осложненными переломами костей верхних и нижних конечностей. Ежегодно в РФ регистрируется более миллиона случаев, из них более 40 % - производственные травмы, из которых почти две трети - переломы костей верхних и нижних конечностей. Ежегодно проводится около 500 тысяч операций с использованием методов остеосинтеза. Многие пациенты проходят длительный амбулаторный этап послеоперационного лечения. Негативный экономический эффект от невозможности работать на этапе реабилитации очевиден.

Изготовление внутрикостных протезов и временных фиксаторов, передающих и воспринимающих нагрузки, возникающие при движении, предъявляет определенные требования ко всем типам имплантатов, такие как высокая биосовместимость, усталостная прочность, коррозионная стойкость и технологичность. Высокая коррозионная стойкость титана обусловлена быстрым образованием на его поверхности оксидной пленки, которая прочно сцепляется с основным металлом и исключает прямой контакт металла с коррозионно-активными средами. Титан и его сплавы, которые активно вытесняют медицинские нержавеющие стали, наиболее полно отвечают этим требованиям благодаря своей высокой биосовместимости, хорошей коррозионной стойкости, высокой удельной прочности и низкому модулю упругости (110-125 МПа) по сравнению с другими сплавами и сталями, а также низкой стоимости.

Трудности изготовления изделий из титановых сплавов, объясняются тем, что при комнатной температуре они плохо деформируются, а повышение рабочей температуры выше 350 °С приводит к увеличению толщины оксидной пленки (образованию окарины). Пленка впоследствии удаляется при помощи операций ручного шлифования и пескоструйной обработкой. Длительный нагрев при высоких температурах также приводит к ухудшению механических свойств [1]. Использование ЭПЭ для формирования полуфабрикатов имплантатов [2] при температурах ниже 350 °С может потенциально снизить трудозатраты при производстве имплантатов за счет исключения части технологических операций, связанных с обработкой поверхности, что позволит ускорить процессы формообразования имплантов без использования нагрева.

Целью данного исследования является выбор технического режима тока для гибки титанового сплава ВТ6 и использование полученного режима для изготовления полуфабрикатов медицинских имплантатов (ключичных пластин).

Для испытаний на изгиб использовались плоские образцы из титанового сплава ВТ6 размером 2x20x84 мм<sup>3</sup>. Для гибки полуфабриката имплантата была использована предварительно вырезанная электроэрозионным методом форма пластины.

На рис. 1 модель испытания на трехточечный изгиб, которое проводилось на горизонтальной испытательной машине И-5081 со скоростью 1 мм/мин. Оснастка состояла из пуансона с радиусом скругления 15 мм и углом 45° и раздвижной матрицы, выставленной на расстояние в 36 мм. Процесс гибки останавливался, когда смещение пуансона достигало 20 мм (деформация 15 %). Для оценки угла пружинения измерялся угол согнутой заготовки под нагрузкой и в ее отсутствии. Для оценки теплового вклада тока, изогнутую часть образца нагревали до температуры, соответствующей наиболее сильному режиму тока, с помощью технического фена. Температура контролировалась при помощи хромель-алюмелевой термопары, расположенной в центре образца (рис. 1). На рис. 1 показаны две возможные схемы подключения тока – через образец (схема 1) и через пуансон с матрицей (схема 2). Для настоящего эксперимента была использована схема 2.

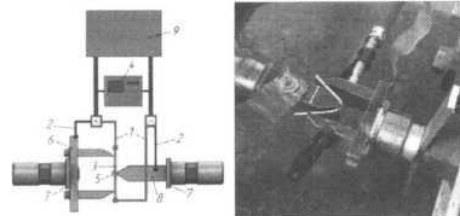


Рис. 1. Модель испытания на трехточечный изгиб (а) и вид оснастки (б): 1 – ток вдоль образца; 2 – ток через пуансон и матрицу; 3 – образец; 4 – осциллограф; 5 – термопара; 6 – раздвижные опоры; 7 – изолятор; 8 – пуансон; 9 – генератор импульсного тока

Зависимость «напряжение изгиба-деформация» образца из титанового сплава ВТ6 представлена на рис. 2. При изгибе образца без тока (рис. 2, кривая 1) образуются трещины. Использование импульсного тока с плотностью  $j = 20 \text{ А/мм}^2$  (рис. 2, кривая 2) позволило снизить напряжение течения на 17 % по сравнению с испытанием без тока. При увеличении длительности импульса до  $\tau = 500 \text{ мкс}$  при сохранении плотности тока  $20 \text{ А/мм}^2$  (рис. 2, кривая 3) напряжение течения удалось снизить на 41 %. Дальнейшее увеличение длительности импульса и плотности тока не производилось, поскольку температура выросла до  $360 \text{ }^\circ\text{C}$ , что превышает установленный температурный предел для увеличения толщины оксидной пленки. При увеличении плотности тока до  $30 \text{ А/мм}^2$  и уменьшении длительности импульса до  $\tau = 100 \text{ мкс}$  (рис. 2, кривая 4) напряжение течения снизилось на 19 %. При испытаниях феном при температуре  $360 \text{ }^\circ\text{C}$  (рис. 2, кривая 5) напряжение течения снизилось на 11 %.

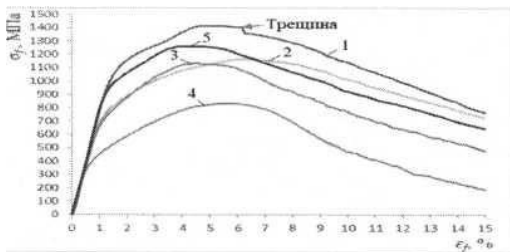


Рис. 2. Зависимости «напряжения изгиба-деформация» при изгибе титанового сплава ВТ6: образец 1 – без тока; образец 2 –  $j = 20 \text{ А/мм}^2$ ,  $\tau = 100 \text{ мкс}$ ,  $T = 270 \text{ }^\circ\text{C}$ ; образец 3 –  $j = 20 \text{ А/мм}^2$ ,  $\tau = 500 \text{ мкс}$ ,  $T = 360 \text{ }^\circ\text{C}$ ; образец 4 –  $j = 20 \text{ А/мм}^2$ ,  $\tau = 100 \text{ мкс}$ ,  $T = 370 \text{ }^\circ\text{C}$ ; образец 5 – фен,  $T = 360 \text{ }^\circ\text{C}$

Во всех испытаниях удалось избежать образования трещин при использовании тока и нагрева от

внешнего источника. При приблизительно одинаковой температуре увеличение длительности импульса было более эффективным, чем увеличение плотности тока. Несмотря на то, что температура испытания была больше на  $10 \text{ }^\circ\text{C}$  чем планировалось, окалина не образовалась. Испытания при изотермических температурах с использованием технического фена показали, что вклад ЭПЭ в изгиб титанового сплава ВТ6 был больше, чем вклад от теплового нагрева. Этот режим был использован для изгиба полуфабрикатов имплантов.

После формообразования имплантата и полного смыкания пуансона и матрицы на импланте не было обнаружено следов побежалости (рис. 3).

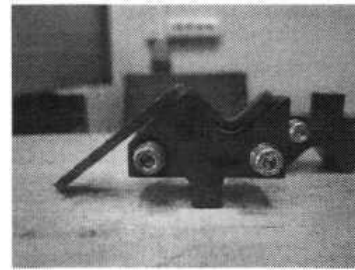


Рис. 3. Заготовка фигурной крючковидной пластины для ключицы, согнутая с использованием тока  $j = 20 \text{ А/мм}^2$ ,  $\tau = 500 \text{ мкс}$ , скважность  $Q = 10$

1. Титановые сплавы. Металловедение титана и его сплавов / С.П. Белов, М.Я. Брун, С.Г. Глазунов и др.: под ред. Б.А. Колачева, С.Г. Глазунова. М.: Металлургия. 1992. 352 с.
2. Корольков О.Е., Пахомов М.А., Столяров В.В. Электропластический эффект в титановых сплавах при их растяжении / Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2022. Т.88. № 10. С. 73-82. DOI: [10.26896/1028-6861-2022-88-10-73-82](https://doi.org/10.26896/1028-6861-2022-88-10-73-82).



## РАЗРАБОТКА НОВЫХ СОСТАВОВ ПОРОШКООБРАЗНЫХ КОМПОЗИЦИЙ ДЛЯ ПЛАЗМЕННОГО НАПЫЛЕНИЯ ИЗНОСОСТОЙКИХ ПОКРЫТИЙ НА РАБОЧИЕ ПОВЕРХНОСТИ ДЕТАЛЕЙ МАШИН И ОБОРУДОВАНИЯ

И.Н. Кравченко<sup>1</sup>, С.Ю. Жачкин<sup>2,3</sup>, Г.И. Трифонов<sup>2</sup>, П.А. Федюнин<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Институт машиноведения имени А.А. Благонравова РАН, Москва, Россия; [kravchenko-in71@yandex.ru](mailto:kravchenko-in71@yandex.ru)

<sup>2</sup>Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина», Воронеж, Россия

<sup>3</sup>Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра I, Воронеж, Россия

**Аннотация.** В работе представлены результаты исследований инновационных материалов на основе твердых порошковых сплавов, используемых для плазменного напыления и наплавки функциональных покрытий на рабочие поверхности деталей машин и оборудования. Проведены лабораторные испытания физико-механических и эксплуатационных свойств покрытий, полученных из исследуемых порошковых композиций. Сделаны выводы о перспективах дальнейшего развития данного направления научных исследований и возможном практическом применении полученных результатов.

**Цель** – исследование существующих твердых порошковых составов, используемых для плазменного напыления износостойких покрытий, а также разработка новых механических смесей, особенностью которых является учет размеров и концентрации наполнителя.

### Введение

В рамках стратегии импортозамещения большое внимание должно уделяться вопросам восстановления и ремонта деталей машин и технологического оборудования, обеспечивающих повышение их надежности и долговечности [1]. Технологии восстановления разрабатываются на основе передовых достижений отечественной науки и техники. Одним из наиболее экономичных и универсальных методов восстановления и упрочнения изношенных поверхностей деталей машин является плазменное нанесение и упрочнение покрытий [2, 3].

Для эффективного применения данной технологии необходимо проведение научных исследований, направленных на создание новых инновационных материалов [4, 5]. В то же время известно, что рациональное использование технологических процессов и их оптимизация напрямую зависят от глубокого понимания физико-химических процессов. В связи с этим возникает технологическая задача разработки новых порошковых композиций, которые можно использовать для восстановления и упрочнения рабочих поверхностей деталей машин и технологического оборудования плазменным методом.

При создании новых материалов для плазменного напыления износостойких покрытий обычно используют высоколегированные сплавы на основе никеля или железа [6, 7]. Однако в настоящее время научные исследования в области нанесения композиционных покрытий на стальные рабочие поверхности деталей, работающих в условиях абразивного изнашивания, находятся на начальной стадии. В связи с этим особое значение приобретает проблема упрочнения и восстановления рабочих поверхностей различных деталей машин и оборудования.

Для достижения цели определены следующие задачи исследования:

- разработка новых порошковых составов для плазменного напыления износостойких покрытий;
- проведение лабораторных испытаний, направленных на подтверждение эффективности

предлагаемых составов.

### Материалы и методы исследования

В настоящее время существуют различные материалы для нанесения покрытий. При этом известны и широко используются в производстве следующие порошкообразные композиции [8]:

- композиционный порошок для плазменного напыления, содержащий частицы титана, плакированные слоем никеля, с размером частиц композиционного порошка 45–120 мкм (частицы титана дополнительно содержат слой алюминия, расположенный непосредственно на слое никеля) при следующем соотношении компонентов в составе порошка, мас.ч: алюминий (Al) 5–20%, никель (Ni) 20–70%, остальное титан (Ti);

- порошкообразный материал для напыления износостойких покрытий, содержащий 55–65% порошка на основе никеля ПР-НХ17 и 35–45% порошка на основе железа ПР-Х4ГСР;

- самофлюсующийся порошок ПР-НХ17СР4 на основе никеля и хрома с флюсующими добавками бора. Покрытие, полученное путем напыления порошка ПР-НХ17СР4, имеет твердость 55–60 НRC, прочность сцепления покрытия с основой 110 МПа, а также стойкость к абразивному и эрозионному износу за счет высокопрочной фазы  $Cr_7C_3$ ;

- самофлюсующийся сплав на железной основе ПР-Х4ГСР, характеризующийся сформированным покрытием с повышенной твердостью и высокой стойкостью к абразивному износу в водной среде и стойкостью к фрикционному износу при высоких скоростях скольжения.

К недостаткам указанных материалов для напыления можно отнести:

- низкую микротвердость покрытия. Так как толщина покрытия составляет  $2 \text{ мм} \pm 0,5$ , то его микротвердость резко уменьшается от периферии в глубину образца, на котором оно сформировано, что напрямую оказывает большое влияние на износостойкость и качество покрытия;

- низкая износостойкость сформированного

покрытия, обусловленная тем, что при износе верхнего слоя покрытия обнажается менее упрочненный слой и интенсивность изнашивания резко возрастает.

Как следует из работ [9, 10], посвященных созданию новых композиционных порошков (механических смесей), процесс их разработки характеризуется рядом особенностей:

1. При выборе состава материала необходимо тщательно проанализировать химические и физико-механические свойства всех компонентов, входящих в состав порошка.

2. Важно учитывать возможные фазовые переходы, происходящие в процессе формирования покрытия, принимая во внимание, как их структуру, так и химический состав.

3. Необходимо учитывать диапазоны режимов процесса плазменного напыления, которые будут использоваться.

Результаты анализа материалов для напыления и представленные критерии создания композиций позволили теоретически и экспериментально обосновать новый состав материала для плазменного напыления металлматричного композита [11]: карбид титана фракцией 63–80 мкм (73,6 мкм) – 23,5%; порошок ПР-НХ17СР4 фракцией 40–64 мкм – 76,5%.

Микрошлифы показали высокую плотность, однородную структуру, отсутствие трещин и прочное сцепление покрытия с основой. При этом отчетливо видна слоистая структура покрытия, образовавшаяся в процессе его нанесения (рис. 1).

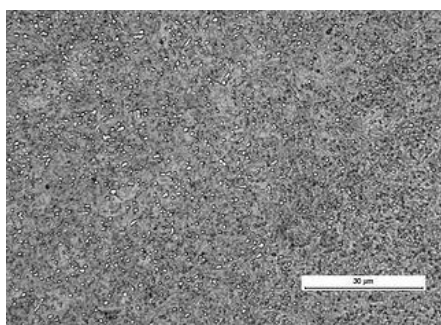


Рис. 1. Микроструктура покрытия

Полученные образцы были испытаны на прочность сцепления, а также твердость и износостойкость с использованием специализированного и сертифицированного оборудования.

Прочность сцепления покрытия с основой измеряли методом оценки покрытий путем анализа царапин под нагрузкой 34 Н [12]. После испытаний на образцах не обнаружено критических участков разрушения и трещин. Твердость покрытия исследовалась с использованием неразрушающего метода испытания твердости материалов. Заданная нагрузка составляла 50 Н.

В результате получено значение твердости, равное 64–66 НРС. Относительную износостойкость покрытия измеряли в соответствии с установленными методами испытаний и расчетными алгоритмами, значение которой составило 3,39.

На основе твердого сплава ПР-ФБЮ1-4 разработан новый состав для плазменного метода нанесения покрытий [13]. В состав предложенной композиции

входит 20–23% самофлюсующегося порошка ПР-Н70Х17С4Р4 с размером частиц 40–64 мкм; 70–73% твердого сплава ПР-ФБЮ1-4 с размером частиц 40–100 мкм; 3–4% порошкового алюминия с размером частиц 30–40 мкм.

В ходе анализа микроструктуры покрытия получен автоматический отчет с обработанным изображением (рис. 2).

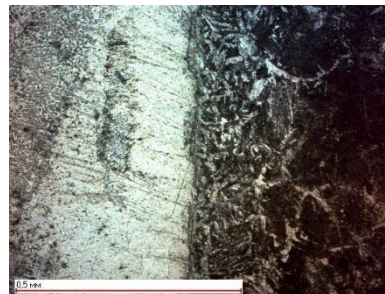


Рис. 2. Микроструктура зоны металла с покрытием

Согласно полученным данным, твердость покрытия, полученная из разработанного порошкового материала при заданных технологических условиях, составила 64,3 НРС. Износостойкость покрытия в 4,88 раза выше, чем у образца из стали 45 без покрытия. Ударная прочность составляет 2,8 МДж/м<sup>2</sup>, что ниже, чем у некоторых других порошковых смесей, подвергнутых аналогичному комплексу исследований.

Однако, несмотря на широкое применение сплавов на основе железа, они имеют ряд существенных недостатков. Во-первых, эти сплавы характеризуются низкой твердостью и имеют мягкие поверхности, что обуславливает низкую трибокоррозионную стойкость и, как следствие, ограничивает их применение из-за повышенного износа. В связи с этим возникает необходимость поиска путей улучшения физико-механических свойств покрытий на основе железа и выявления ключевых факторов, которые могли бы расширить область их применения.

## Результаты и обсуждение

В результате проведенных исследований разработан новый состав материала для напыления, включающий 88,7% порошка на железной основе ПР-Х11Г4СР с размером фракции 20–63 мкм и 11,3% порошка карбида титана с размером фракции 43–44 мкм. Следует отметить, что выбор второго компонента порошковой смеси (порошка карбида титана) основан на анализе результатов работ [14–16].

На основании предварительных экспериментов получено регрессионное уравнение, описывающее зависимость прочности сцепления от фракционного размера частиц карбида титана ( $X_1$ ) и его концентрации ( $X_2$ ):

$$C=91,49+4,33X_1-0,05X_1^2+2,04X_2-0,09X_2^2. \quad (1)$$

Графическая интерпретация функции (1) в виде изолиний желательности наглядно показывает зависимость прочности сцепления покрытия с основой от исследуемых параметров (рис. 3).

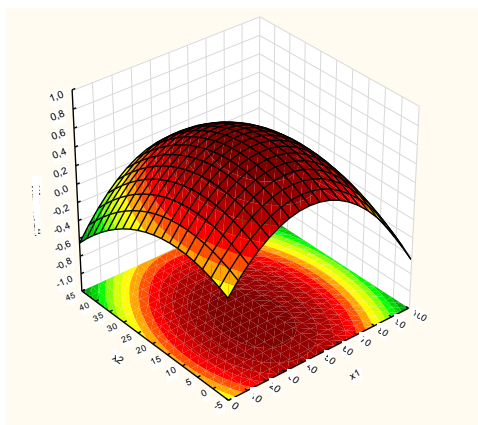


Рис. 3. График функции желательности

Определен центр оптимума результирующей функции (1). Для этого была решена система уравнений в программном комплексе «MathCad».

Установлено, что среднее значение микротвердости покрытия составляет  $703 \pm 17$  HV, тогда как твердость подложки  $\approx 250$  HV. Результаты расчета значений средней скорости кавитационной эрозии по глубине для подложки и покрытия составили 8,72 и 3,66 мкм/ч соответственно.

### Заключение

1. Разработаны новые порошковые составы для плазменного нанесения износостойких покрытий. Эффективность предлагаемых композиционных составов подтверждена с использованием современных методов исследования свойств покрытий.

2. Нанесение покрытий с использованием разработанных порошковых материалов методом плазменного напыления позволяет получать покрытия с высокими эксплуатационными характеристиками.

### Финансирование работы

Данная работа финансировалась за счет средств федерального бюджета в рамках FFGU-2024–0024 по результатам исследований, выполненных с использованием оборудования ЦКП ИМАШ РАН.

3. Лялякин В.П. Восстановление деталей машин – важное направление импортозамещения в агропромышленном комплексе // Ремонт. Восстановление. Модернизация. 2019. № 9.

С. 3—5.

4. Кравченко И.Н. Ресурсосберегающие плазменные технологии при ремонте перерабатывающего оборудования / И.Н. Кравченко, М.А. Глинский, С.В. Карцев [и др.]. М.: ИНФРА-М, 2021. 200 с.
5. Пантелеенко Ф.И. Аспекты создания многослойных покрытий методом плазменного напыления / Ф.И. Пантелеенко, В.А. Оковитый, О.Г. Девойно [и др.] // Наука и техника. 2023. Т. 22, № 3. С. 179—185.  
<https://doi.org/10.21122/2227-1031-2023-22-3-179-185>
6. Каблов Е.Н., Антипов В.В. Роль материалов нового поколения в обеспечении технологического суверенитета Российской Федерации // Вестник РАН. 2023. Т. 93, № 10. С. 907—916.
7. Мирлобов Д.И., Габдуллин Т.Р. Инновационные материалы в машиностроении // Техника и технология транспорта. 2019. № 3 (14). С. 1.
8. Девойно О.Г. Технология формирования износостойких покрытий на железной основе методами лазерной обработки / О.Г. Девойно, М.А. Кардаполова, А.С. Калинин [и др.]. Минск: Белорусский национальный технический университет, 2020. 280 с.
9. Жачкин С.Ю., Трифонов Г.И., Пустоветов А.В. Повышение износостойкости композиционного покрытия на основе железа при восстановлении специального оборудования // Вестник ВСГУТУ. 2024. № 2 (93). С. 92—99.
10. Патент RU 2337178, МПК С23С 4/08. Порошкообразный материал для напыления износостойких покрытий. №2007101045/02; опубл. 27.10.2008. Бюл. № 30.
11. Новые материалы // Кол. авторов; под ред. Ю.С. Карабасова. М.: МИСИС, 2002. 736 с.
12. Иванов Д.А. Композиционные материалы / Д.А. Иванов, А.И. Ситников, С.Д. Шляпин; под ред. А.А. Ильина. М.: Юрайт, 2024. 253 с.
13. Патент RU 2797988. МПК С22С 32/00. Порошкообразный материал для плазменного напыления композиционных покрытий. № 2022108222; опубл. 13.06.2023. Бюл. № 17.
14. Трифонов Г.И. Металломатричное композитное покрытие для восстановления и упрочнения поверхностей деталей плазменным напылением // Упрочняющие технологии и покрытия. 2023. Т. 19, № 5(221). С. 225—230.
15. Патент RU 2803173. МПК С23С 4/08. Композиционный состав порошкообразного материала для плазменного напыления. № 2022128164; опубл. 07.09.2023. Бюл. № 25.
16. Ширяева Л.С., Гарбузова А.К., Галевский Г.В. Производство и применение карбида титана (оценка, тенденции, прогнозы) // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. 2014. № 2 (195). С. 100—108.
17. Иванов С.Г., Гурьев М.А., Иванова Т.Г., Кошелева Е.А. Формирование диффузионного покрытия на титане из смеси на основе карбида бора // Ползуновский альманах. 2015. № 2. С. 165—168.
18. [Hui Li, Shuailing Ma, Lixue Chen, Zhuo Yu. Carbon-Deficient Titanium Carbide with Highly Enhanced Hardness // Frontiers in Physics. 2020. Vol. 8. <https://doi.org/10.3389/fphy.2020.00364>](https://doi.org/10.3389/fphy.2020.00364)

## РОЛЬ ЭФФЕКТА РЕБИДЕРА В ФОРМИРОВАНИИ СТРУКТУРНО-МЕХАНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ПОВЕРХНОСТНЫХ СЛОЕВ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ ТРИБОТЕХНИЧЕСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ

Л.И.Куксенова<sup>1,2</sup>, В.И.Савенко<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Институт машиноведения им. А.А. Благонравова Российской академии наук; lkukc@mail.ru

<sup>2</sup> Институт физической химии и электрохимии им. А.Н. Фрумкина Российской академии

Представлены закономерности влияния эффекта Ребиндера на формирование износостойкой структуры поверхностных слоев антифрикционных металлических материалов. Проанализирована связь феноменологических и микроструктурных характеристик эксплуатационных слоев сопряжения. Приведены примеры влияния эволюции структурно-механических состояний этих слоев на работоспособность трибосопряжений, функционирующих в поверхностно-активных смазочных средах.

### Введение

В условиях контактного взаимодействия, образования поверхностных связей и последующего относительного перемещения поверхностей под действием внешних сил в поверхностном слое металла возникает упруго - пластическая деформация, которая является основным процессом работы внешнего трения. В свою очередь процесс упруго - пластической деформации инициирует возникновение множества производных физических, химических и механических процессов на поверхностях и в приповерхностных микрообъемах, трущихся тел. Условия для преобладающего развития тех или иных ведущих процессов в зоне контактного взаимодействия металлов определяются внешними механическими воздействиями, смазочной средой и составом материалов трущихся пар.

Опыт эксплуатации реальных трибосопряжений показывает, что особая роль принадлежит структурно-механическому состоянию поверхностных слоев, формирующемуся при деформации антифрикционного материала, влияющего на изменение его эксплуатационных свойств. Природа смазочного действия оказывает определяющее влияние на формирование свойств поверхности, а в основе этого влияния лежит создание износостойкой структуры в приконтактной зоне трибоматериала. Наибольший положительный триботехнический эффект имеет место при наличии в смазочных материалах поверхностно-активных веществ (ПАВ), компоненты которых в процессе контактной деформации вызывают адсорбционное пластифицирование тонкого поверхностного слоя (эффект Ребиндера) [1].

Опыт применения эффекта Ребиндера в трибологии и триботехнике имеет давнюю историю. Эффектом Ребиндера называют явление адсорбционного понижения прочности твердых тел, облегчение их деформации и разрушения вследствие обратимого физико-химического воздействия окружающей среды. Термодинамически эффект Ребиндера обусловлен уменьшением работы образования новой поверхности при деформировании твердого тела в результате понижения его свободной поверхностной энергии под влиянием активной среды. Молекулярная природа эффекта Ребиндера состоит в облегчении разрыва и перестройки межатомных (или межмолекулярных) связей в твердом теле в присутствии инородных атомов, молекул или ионов.

В физико-химической механике твердых тел рассматривают две основные формы эффекта

Ребиндера [2]. Первая форма – охрупчивающее действие среды, в результате которого многократно падает прочность твердого тела; вторая – пластифицирующее действие среды, которое проявляется в виде снижения макроскопического предела текучести, в уменьшении коэффициента упрочнения (при активном силовом нагружении образца) или в увеличении скорости деформации при испытаниях на ползучесть под действием постоянной нагрузки. В практике повышения триботехнической эффективности смазочных материалов наиболее важна вторая форма эффекта – пластифицирование.

Вместе с тем известно, что поверхностно-активная среда может оказывать на реологическое поведение материала не только пластифицирующее, но и упрочняющее влияние. Выражается это в повышении предела текучести и/или коэффициента упрочнения, в уменьшении скорости ползучести материала под постоянной нагрузкой. На молекулярном уровне упрочняющее действие среды обусловлено уменьшением подвижности приповерхностных дислокаций в результате их адсорбционной блокировки, тормозящего действия оксидных и пассивирующих пленок и электрохимических явлений на поверхности твердых тел, протекающих в таких средах [3]. В реальных трибосопряжениях в качестве присадок к смазочным материалам используют активные вещества, которые в зависимости от величины и типа механических напряжений, скорости деформации и температуры испытаний могут оказывать как поверхностно-пластифицирующее, так и поверхностно-упрочняющее действие.

**В работе** представлены результаты исследований структурно-механических характеристик поверхностных слоев антифрикционной пары трения медный сплав-сталь с позиций критериальных подходов, основанных на сопоставительном анализе временной эволюции макроскопического интегрального критерия (интенсивности изнашивания) и изменений микроструктурных характеристик трибоматериала (физического уширения рентгеновских линий зоны контактной деформации, периода кристаллической решетки, элементного состава поверхностного слоя трибопары) с целью установления их совместного влияния на работоспособность узлов трения, содержащих поверхностно-активные смазочные среды.

## Материалы и методы исследования

Основным объектом исследования служила пара реверсивного трения скольжения медный сплав – сталь. В качестве антифрикционного сплава использовали медь, сплавы на основе Cu-Zn (латуни с разной концентрацией цинка), сплавы на основе Cu-Al (бронзы с разной концентрацией алюминия и легированные Mn, Fe, Ni), сплавы на основе Cu-Sn (бронзы с разным содержанием Sn). В качестве смазочного материала применяли медицинское вазелиновое масло, глицерин, минеральные масла, гидравлические жидкости на основе глицерина и пластичные смазочные материалы, в состав которых входили ПАВ. Триботехнические испытания проводили на машине реверсивного трения МТ-8 в диапазоне давлений 5–40 МПа и средней скорости скольжения 0,19 м/сек. Микроструктурные исследования проводили с помощью рентгеноструктурного анализа методом неразрушающего послыоного облучения зоны контактной деформации в диапазоне 0,5–10 мкм в Co-K $\alpha$  излучении.

## Результаты и обсуждение.

Анализ изменений физического уширения  $\beta_{(hkl)}$ , периода кристаллической решетки  $a$  до и после трибоконтактного воздействия в совокупности с вариациями микротвердости образцов по толщине зоны контактной деформации для трибообразцов, испытанных в разных смазочных средах, с позиций функциональных взаимосвязей показателей  $S = f(\gamma, \delta)$ ,  $\delta = f(\beta_{(hkl)})$ ,  $H_{\mu} = f(\delta)$ ,  $H_{\mu} = f(\beta_{(hkl)})$  [4], характеризующих структуру и механические свойства металла, свидетельствует о том, что активная добавка в смазочной среде влияет на деформационные процессы в приконтактной зоне трибоматериала и вызывает формирование в нем модифицированного эксплуатационного слоя. При этом одновременно реализуются два процесса: *первый процесс* – формирование стационарного макроскопического диффузионного потока атомов примесных элементов и их переход в смазочную среду (изменение величины  $a$ ), что приводит к созданию поверхностной пленки меди, и *второй процесс* – понижение плотности неподвижных (сидячих) дислокаций в материале зоны деформации (уменьшение величины  $\beta_{(hkl)}$ ), что указывает на эффект пластифицирования материала (снижение предела его текучести). В результате этих процессов трибоматериал, выходящий из приконтактной зоны, будет существенно отличаться от исходного по характеристикам напряженного состояния, структуры и физико-механических свойств.

В наиболее распространенных трибосопряжениях антифрикционный материал, как правило, представляет собой двойной или многокомпонентный медный сплав замещения. Рассмотрены изменения элементного состава его приповерхностного слоя при трении под действием смазочной среды. После первых циклов контактного взаимодействия и деформирования в активной смазочной среде любого модифицирующего типа в приповерхностном слое трибоматериала возникают диффузионные потоки вакансий, атомов примесных и/или легирующих элементов, наблюдается «восходящая диффузия» [3]. Показано,

что только за счет восходящей диффузии может быть достигнуто пятидесятипроцентное изменение предела текучести приповерхностного трибоматериала, что для случая поверхностно-пластифицирующей среды обеспечивает условия формирования износостойкого структурно-механического состояния.

Проанализированы стратиграфические и временные изменения микро- и макроскопических характеристик поверхностного слоя бронз и латуней разного состава после трения в неактивных средах и средах, содержащих поверхностно-активные вещества. Анализ зависимостей  $\beta = f(h)$ , где  $h$  – толщина анализируемого приповерхностного слоя, указывают на три основных процесса, одновременно происходящих при деформации медно-алюминиевого сплава. Во-первых, плотность дислокаций в микрослоях, прилегающих к свободной поверхности трибообразцов, возрастает при трении в масле М9С по сравнению с исходным состоянием. Это значит, что при трибодформации образцов в неактивной смазочной среде в условиях, когда плотность подвижных дислокаций много меньше, чем сидящих, наблюдается упрочняющий эффект. Во – вторых, присутствие дисперсионной фазы в смазочной системе обеспечивает систематическое понижение плотности деформационных (в основном неподвижных) приповерхностных дислокаций по сравнению с исходным состоянием. Таким образом, в результате воздействия ПАВ смягчаются энергосиловые граничные условия в трибоконтакте, и в приповерхностном слое трибоматериала реализуется пластифицирующий эффект. В – третьих, в приповерхностном слое трибообразца вблизи межфазной границы «металл/смазка» создается положительный концентрационный градиент атомов алюминия и, соответственно, положительный градиент механических свойств трибоматериала в целом, являющийся предпосылкой для формирования режима повышенной износостойкости такого материала. Есть основания полагать, что процессы диффузии атомов легирующих элементов одновременно как в смазочный материал, так и в глубину трибоматериала обеспечивают снижение уровня упрочняющего эффекта в приповерхностном слое бронзовых образцов при их трибоиспытаниях в масле, содержащей ПАВ. Однако наблюдающееся при этом увеличение концентрации атомов алюминия в относительно более глубоко залегающих подповерхностных слоях трибоматериала (наличие максимума концентрации алюминия на глубине  $h \approx 5$  мкм) приводит к формированию в глубине зоны деформации сплава пластинчатых концентрационных неоднородностей с повышенным содержанием алюминия. В соответствии с лепестковой моделью механизма износа [5] это может являться причиной снижения износостойкости антифрикционного материала в целом.

На основе результатов испытаний медно-оловянных сплавов выявлена роль локальных диффузионных явлений в квазиспинодальных фазовых переходах, наблюдающихся в приповерхностных слоях сплавов в процессе их трибодформации. Показано, что среди промышленных медных сплавов наибольшей износостойкостью в поверхностно-активных

смазочных средах обладают латуни типа Л90, алюминиевые бронзы БрА5, БрА7, оловянные бронзы – БрОФ4-0,25, БрОФ6,5-0,15. Приведены примеры реализации в парах трения явления избирательного переноса. Даны рекомендации по его применению в узлах трения машин и приборов.

### **Заключение**

Представлены результаты экспериментально-теоретического анализа структурно-механического состояния поверхностных слоев антифрикционных материалов - латуней и бронз при их трении по стали в инертных средах и средах, включающих добавку ПАВ. Сформулированы основополагающие представления о роли поверхностно-активной смазочной

среды в создании в материалах узлов трения пластифицирующего и упрочняющего трибоэффекта. Сформулированы рекомендации по выбору составляющих антифрикционных пар трения.

### **Список использованных источников**

1. Щукин Е.Д., Савенко В.И., Малкин А.И. Лекции по физико-химической механике. М.: Нобель пресс. 2015. 680 с.
2. Лихтман В.И., Щукин Е.Д., Ребиндер П.А. Физико-химическая механика металлов. М.: АН СССР. 1961. 304 с.
3. Савенко В.И. Роль эффекта ребиндера в реализации режима безызносности в триботехнике //Эффект безызносности и триботехнологии. 1994. №3-4. С.26-38.
4. Рыбакова Л.М., Куксенова Л.И. Структура и износостойкость металла. М.: Машиностроение. 1982. 212 с.
5. Suh N.P. An overview of the delamination theory of wear. // Wear. 1977. V. 44. N.1. P. 1-16.

## ВЛИЯНИЕ НАНОМОДИФИКАТОРОВ НА ОСНОВЕ СЕРПЕНТИНА В ИНДУСТРИАЛЬНОМ МАСЛЕ В УСЛОВИЯХ ВОЗРАТНО-ПОСТУПАТЕЛЬНОГО ТРЕНИЯ

О.И. Кулаков, А.Д. Фролов, Г.Ю. Иванов

Институт машиноведения им. А.А.Благонравова РАН, Москва, Россия; [kulakov@imash.ru](mailto:kulakov@imash.ru)

В работе представлен анализ применения наномодификаторов трения на основе серпентина в промышленном масле И-20А. Проведено сравнение двух наномодификаторов, отличающихся величиной измельчения серпентина, а также промышленных пластичных смазок в одинаковых условиях в условиях невысоких нагрузок в узлах трения скольжения. Установлено, что наименьшие коэффициенты трения при умеренном износе достигаются при добавлении в масло наномодификаторов с меньшим размером зерна.

### Введение

Правильный подбор смазочных материалов, используемых при режимах граничной и смешанной смазки, исключая значительную силу трения покоя, и функциональных присадок к ним непосредственно влияет на износ деталей [1].

Одним из апробированных путей улучшения свойств масел и пластичных смазок является ввод в них противоизносных и антифрикционных добавок из высокодисперсных порошков минералов группы серпентина, слоистых гидросиликатов в основном магния, описываемых формулой  $Mg_6(Si_4O_{10})(OH)_8$ , где магний частично замещается алюминием, никелем, железом [2]. Композиции порошков этих минералов, названных геомодификаторами трения (ГМТ), обеспечивают существенное повышение противоизносных и антифрикционных свойств смазочных композиций, а также обеспечивают ремонтно-восстановительный эффект.

Материалы для направляющих скольжения металлорежущих станков обычно выбираются с учетом их износостойкости, фрикционных характеристик и совместимости с сопрягаемыми материалами.

Индустриальные масла широко применяются в системах смазки металлорежущих станков, в том числе направляющих скольжения разной конфигурации.

В данной работе оценивалось влияние серпентинных наномодификаторов трения на износостойкость модельных направляющих скольжения в условиях смазки промышленным маслом.

### Материалы и оборудование

Для проведения ресурсных испытаний модельных направляющих скольжения была использована возвратно-поступательная машина трения ПРУ (ИМАШ РАН), представленная на рис. 1. Количество циклов испытаний измерялось с помощью счётчика импульсов ОВЕН СИ-10, температура в испытательной камере контролировалась измерителем-регулятором ОВЕН ТРМ-1 и датчиком ТСП-100П. Для измерения силы трения использовался специально изготовленный тензометрический датчик-образцедержатель, подключенный к крейтовой измерительной системе LCard LTR-EU-8.

Амплитуда движения подвижного образца составила 80 мм (размах 160 мм), нагрузка на подвижный образец – 7.18 кгс/см<sup>2</sup> при рабочей площади 64 мм<sup>2</sup>. Скорость движения составила 13,3 см/сек (50

циклов/мин). Испытания проводились при температуре в камере 25 °С.

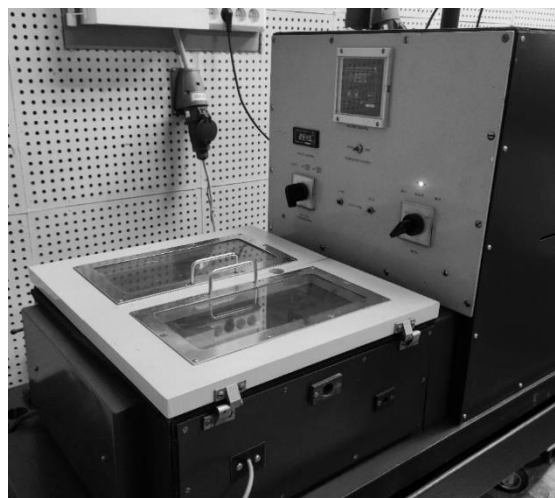


Рис. 1. Машина трения ПРУ

Для каждой пары образцов проводилось 6000 циклов испытаний. Подвижные образцы устанавливались в тензометрический держатель под углом оси 90° к поверхности неподвижного образца для обеспечения максимального сопряжения поверхностей трения. Образцы были изготовлены фрезерованием из стали 45. Для каждой пары образцов проводилось 6000 циклов испытаний. В качестве базовой смазки использовалось промышленное масло И-20А ГОСТ 20799-88. Испытания также проводились в условиях смазки неразбавленными наномодификаторами трения на основе серпентина (№1 и №2), при этом при изготовлении модификатора №2 серпентин перемалывался до более мелкой фракции. Наномодификаторы также перемешивались с маслом И-20А с помощью ротационной мешалки РМ-1 в течение 2 часов. Применялась капельная система смазки, при этом смазка поступала непосредственно в зону трения. Дополнительно были проведены испытания с широко применяемыми пластичными смазками Литол-24 и ЦИАТИМ-201. Массовый износ подвижных образцов измерялся с помощью весов ВЛР-200. Также были проведены измерения микротвёрдости рабочей поверхности подвижных образцов с помощью микротвердомера MicroVicky VM1010H.

### Результаты

Результаты измерения массового износа

образцов, среднего коэффициента трения и интенсивности изнашивания приведены в табл. 1. Значения износа и средние значения коэффициента трения весьма близки в заданных условиях. Установлено, что базовое масло без наномодификаторов показало худший результат. Масло, перемешанное с наномодификаторами, показывает износ, сравнимый с чистыми наномодификаторами, а также пластичными смазками. Также установлено, что масло, смешанное с наномодификатором №2 (с меньшим размером зерна) позволяет добиться ещё меньших средних значений коэффициента трения.

Таблица 1. Результаты испытаний

Смазка	Износ, мг	Ср. к. тр.	$I, *10^{-8}$ , мг/мм
И-20А	0,45	0,06	6,25
м №1	0,25	0,05	5,21
м №2	0,20	0,05	5,21
И-20А+м №1	0,30	0,04	4,17
И-20А+м №2	0,20	0,03	3,13
Литол-24	0,30	0,04	4,17
ЦИАТИМ-201	0,30	0,04	4,17

Примечание. м №1, м №2 – наномодификаторы №1 и №2, соответственно.

Измерения микротвердости рабочих поверхностей образцов показали некоторый рост среднего значения с 398HV0,1 до 437HV0,1, при этом для образца, испытанного со смазкой И-20А + м №2 микротвёрдости выросла до 511HV0,1.

## Выводы

Установлено, что модификаторы трения на основе серпентина, разбавленные в индустриальном масле, разумно использовать в направляющих станков с целью снижения их износа, и, соответственно продления межремонтных интервалов. Степень измельчения серпентина в модификаторе влияет на трибологические характеристики смазываемого узла трения. Вследствие незначительной разницы в полученных значениях износа и коэффициентов трения, имеет смысл провести дополнительные исследования, например, при больших или меньших контактных давлениях и при повышенных температурах.

## Благодарности

Работа выполнена с использованием оборудования Центра коллективного пользования «Научно-ёмкие технологии создания машин будущего» Института машиноведения им. А.А. Благонравова РАН (Москва, Россия).

19. Мугаев, К. М. Использование серпентина в смазочном масле / К. М. Мугаев, М. Ю. Колобов // Новые материалы и технологии в машиностроении. – 2016. – № 24. – С. 43-46.
20. Серпентины – как добавки к маслам: эффективность и механизм смазочного действия / А. Ю. Албагачиев, И. А. Буяновский, А. В. Дунаев [и др.] // Проблемы машиностроения и надежности машин. – 2021. – № 5. – С. 97-107.



## ВЛИЯНИЕ ОРИЕНТИРОВАНИЯ СЛОЁВ ПРИ 3D-ПЕЧАТИ НА ФРИКЦИОННЫЕ СВОЙСТВА PLA ПОЛИМЕРОВ

О.И. Кулаков<sup>1</sup>, А.Д. Фролов, Г.Ю. Иванов

Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, Москва, Россия; <sup>1</sup>[kulakov@imash.ru](mailto:kulakov@imash.ru)

В статье исследуется влияние ориентации слоев при 3D-печати на фрикционные свойства полимеров на основе PLA. Экспериментальные образцы, напечатанные с использованием различных методов укладки слоев, были подвергнуты фрикционному износу. Результаты исследования показывают, что ориентация слоев влияет на износостойкость материалов.

### Введение

В мире современных технологий производство и тестирование материалов играют ключевую роль в разработке инновационных продуктов. Одним из самых перспективных направлений в этой области является аддитивное производство, которое предоставляет возможность создания сложных деталей с уникальными свойствами. В рамках этой статьи исследуется влияние параметров нанесения слоев на износостойкость изделий. Описанный подход позволяет более глубоко понять процессы изнашивания материалов и оптимизировать их свойства для различных применений.

PLA (полилактид) — это биоразлагаемый пластик, который производится из природных источников, таких как кукурузный крахмал или сахарный тростник. Этот материал является биоотдельным, что означает, что он может разлагаться естественными процессами в окружающей среде при определенных условиях, таких как наличие влаги и микроорганизмов. Экологическая дружелюбность PLA делает его привлекательным выбором для использования в различных отраслях, где важно сокращение использования нефтепродуктов и снижение экологического воздействия.

Однако PLA также обладает отличными механическими свойствами, что делает его полезным для широкого спектра применений. Он легко поддается 3D-печати, что делает его популярным материалом для создания прототипов, концептуальных моделей, игрушек, упаковки и других изделий. PLA обладает высокой прочностью и стойкостью к износу, что делает его хорошим выбором для функциональных применений, таких как детали для машин, зубчатые колеса и другие механические компоненты.

Важно отметить, что хотя PLA обладает многими преимуществами, он также имеет некоторые ограничения. Например, он может подвергаться деформации при высоких температурах, что ограничивает его применение в некоторых отраслях. Кроме того, его биоразлагаемость требует определенных условий для эффективного разложения, что означает, что использование PLA не всегда является идеальным решением для сокращения отходов. Однако при правильном использовании и управлении этими факторами PLA остается важным материалом с уникальными свойствами и широким спектром применений.

В процессе 3D-печати объект создается путем последовательного наложения слоев материала на

основании, обычно начиная с нижнего слоя и заканчивая верхним. Этот метод известен как «наплавление» или «наложение слоев». Каждый слой представляет собой плоскость или срез будущего объекта, и совокупность всех слоев формирует окончательную трехмерную модель.

Процесс начинается с создания виртуальной модели объекта при помощи специального программного обеспечения, которое разбивает модель на тонкие горизонтальные срезы. Затем принтер использует эти срезы в качестве указаний для наложения соответствующих слоев материала.

Каждый слой может быть наложен различными способами, в зависимости от типа принтера и используемого материала [1]. Например, при использовании пластиковых материалов, таких как PLA или ABS, слой материала может быть нанесен путем нагрева пластичной проволоки и ее осаждения на предыдущий слой. Для смол и других жидких материалов может использоваться метод полимеризации при воздействии ультрафиолетового или лазерного излучения.

Качество и прочность окончательного изделия во многом зависят от параметров наложения слоев, таких как толщина слоя, скорость печати, температура материала и другие. Подбор оптимальных параметров является важным этапом процесса 3D-печати и может существенно влиять на качество, точность и прочность изготавливаемых объектов.

В процессе 3D-печати направление слоев играет важную роль в механических и фрикционных свойствах и общей прочности изготавливаемого объекта при различных значениях заполнения внутренней структуры [2]. Направление слоев определяется ориентацией, в которой материал наслаивается при формировании каждого последующего слоя.

Выбор оптимального направления слоев зависит от конкретных требований к изделию, его формы, функциональности и механических свойств [3]. Оптимизация направления слоев может помочь достичь лучшего качества печати и повысить производительность изготовленных деталей.

### Материалы и методы исследований

Для проведения испытаний были изготовлены образцы из материала eSun PLA+ с помощью 3D-принтера при плотности заполнения 100%, толщиной слоя 0,2 мм, со скоростью печати 230 мм/с.

Все группы образцов были напечатаны разными методами заполнения. Одним из самых распространённых способов заполнения является «прямолинейный», он часто является стандартным во многих программах слайсерах. Суть метода это заполнение модели прямыми линиями под заданным углом. В данном исследовании были использованы образцы с ориентацией линий под углами 0°, 90° и 45°.

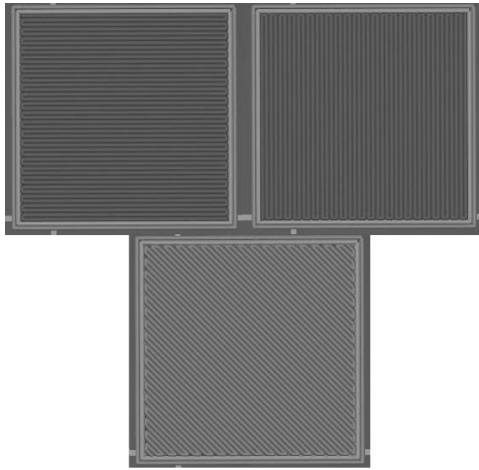


Рис. 1. Визуализация прямолинейного метода под углами 0°, 90° и 45°

Остальные группы образцов были напечатаны, используя более сложные методы заполнения. Такие как: кривая Гилберта, концентрический метод, метод архимедовых аккордов и метод спирального октаграма (рис. 2).

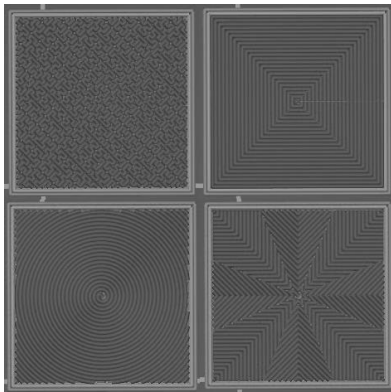


Рис. 2. Визуализация методов Кривой Гилберта, концентрического метода, метода архимедовых аккордов и метода спирального октаграма

Испытания на фрикционные характеристики проводились на горизонтальной возвратно-поступательной машине трения ПРУ.

Эксперимент проводился в условиях сухого трения при температуре окружающей среды 20°C с использованием следующих параметров:

- амплитуда перемещения подвижного образца: 80 мм;
- частота возвратно-поступательных движений: 50 циклов в минуту;
- общее количество циклов: 10 000;
- скорость перемещения подвижного образца: 13,3 см/с;

- удельная нагрузка на подвижный образец: 7,18 кгс/см<sup>2</sup>.

## Результаты и обсуждение

После завершения испытаний был проведён анализ каждой группы образцов, включающий измерение массового и линейного износа. Массовый износ представлен в «табл. 1», линейный износ представлен в «табл. 2».

Таблица 1. Массовый износ образцов

Метод заполнения	Масса $\mu$ образцов до испытаний, мг	Масса $\mu$ образцов после испытаний, мг	Износ, мг
Прямолинейный 0°	2 047,45	2 042,23	5,22
Прямолинейный 90°	2 046,73	2 043,45	3,28
Прямолинейный 45°	2 126,03	2 123,78	2,25
Метод архимедовых аккордов	2 026,57	2 025,00	1,57
Кривая Гилберта	2 020,52	2 016,95	3,57
Концентрический метод	2 114,50	2 112,93	1,57
Метод спирального октаграма	2 007,47	2 005,83	1,63

Таблица 2. Линейный износ образцов

Метод заполнения	Высота $\mu$ образцов до испытаний, мм	Высота $\mu$ образцов после испытаний, мм	Разница, мм
Прямолинейный 0°	6,89	6,82	0,07
Прямолинейный 90°	6,85	6,80	0,05
Прямолинейный 45°	6,81	6,95	-0,15
Метод архимедовых аккордов	6,95	6,94	0,00
Кривая Гилберта	6,84	6,84	-
Концентрический метод	6,84	6,93	-0,09
Метод спирального октаграма	6,81	6,85	-0,05

Из всех групп образцов наименьший массовый износ показали образцы, полученные методами архимедовых аккордов и концентрическим методом. Наивысший износ показали образцы, полученные прямолинейным методом под углом в 0°. Наиболее часто используемый метод заполнения под 45° показал средние результаты, что может говорить о том, что данный метод не всегда оптимален несмотря на его относительную популярность.

Оценка линейного износа затруднена в связи с неравномерным деформированием образцов, полученных различными методами. В связи с этим отдельные образцы после испытаний увеличивали свою высоту, хотя и теряли в массе. Основываясь на этих данных, можно предположить, что использование некоторых методов заполнения может привести к образованию излишних напряжений.

## Выводы

Проведённые исследования показали, что ориентация слоёв при 3D-печати оказывает значительное влияние на фрикционные характеристики PLA-полимеров. Изменение метода заполнения слоёв существенно влияет на износостойкость материалов, что проявляется в различиях как в массовом, так и в линейном износе образцов. Полученные результаты подтверждают, что оптимизация параметров 3D-печати может повысить эксплуатационные свойства полимерных изделий, особенно в условиях сухого

трения. Это открывает перспективы для улучшения долговечности и надёжности изделий, изготовленных методом аддитивных технологий, в различных областях применения.

## Ссылки на использованные источники

1. Daminabo, Samuel & Goel, Saurav & Grammatikos, Sotirios & Yazdani Nezhad, Hamed & Thakur, Vijay. (2020). FDM-based Additive Manufacturing (3D Printing): Techniques for Polymer Material Systems. *Materials Today*. 10.1016/j.mtchem.2020.100248.
2. Zivic, Fatima & Mitrovic, Slobodan & Grujović, Nenad & Jovanovic, Zivana & Dzunic, Dragan & Milenković, Strahinja. (2021). Influence of 3D Printing Infill and Printing Direction on Friction and Wear of Polylactic Acid (PLA) under Rotational Sliding. *Trenie i Iznos*. 42. 170-177. 10.32864/0202-4977-2021-42-2-170-177.
3. Prozhega, Maksim & Reschikov, Egor & Shirshov, Alexander & Yakovenko, Nikolay. (2020). 3D Printing Polymers Frictional Properties in Vacuum. *Trenie i Iznos*. 41. 760-767. 10.32864/0202-4977-2020-41-6-760-767.

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ КОНЦЕНТРАЦИИ СОЖ НА КОЭФФИЦИЕНТ ТРЕНИЯ

О.И. Кулаков, А.Д. Фролов, Г.Ю. Иванов

Институт машиноведения им. А.А.Благонравова РАН, Москва, Россия;

МИРЭА – Российский технологический университет, Москва, Россия;

[kulakov@imash.ru](mailto:kulakov@imash.ru)

В работе представлен анализ влияния концентрации СОЖ на силы трения в сравнении с индустриальным маслом И-20А, часто применяемым в качестве недорогой СОЖ. Предложен способ экспресс-оценки свойств СОЖ для токарной обработки на компактных машинах трения возвратно-поступательного действия. Установлены наиболее оптимальные концентрации СОЖ марки Синапол для заданных условий обработки.

### Введение

Правильный выбор смазочно-охлаждающих жидкостей при обработке резанием позволяет уменьшить возникающие силы резания и снизить износ режущего инструмента. Обычно для оценки пригодности СОЖ требуется проведение трудоёмких станочных испытаний [1].

Для разных видов лезвийной обработки производители СОЖ рекомендуют менять концентрацию жидкости. Для экспресс-оценки смазочных свойств СОЖ разных концентраций возможно проведение модельных испытаний на машинах трения с подбором конфигурации пар трения.

В данной работе представлена оценка влияния концентрации СОЖ на фрикционно-износные характеристики пары трения, имитирующей в первом приближении трение резца по заготовке.

### Материалы и оборудование

Для проведения испытаний СОЖ была использована возвратно-поступательная машина трения ПРУ (ИМАШ РАН), представленная на рис. 1. Количество циклов испытаний измерялось с помощью счётчика импульсов ОВЕН СИ-10, температура в испытательной камере контролировалась измерителем-регулятором ОВЕН ТРМ-1 и датчиком ТСП-100П. Для измерения силы трения использовался специально изготовленный тензометрический датчик-образцедержатель, подключенный к крейтовой измерительной системе LCard LTR-EU-8.

Амплитуда движения подвижного образца составила 80 мм (размах 160 мм), нагрузка на подвижный образец – 7.18 кгс/см<sup>2</sup> при рабочей площади 64 мм<sup>2</sup>. Скорость движения составила 16.6 см/сек (100 циклов/мин). Испытания проводились при температуре в камере 50 °С.

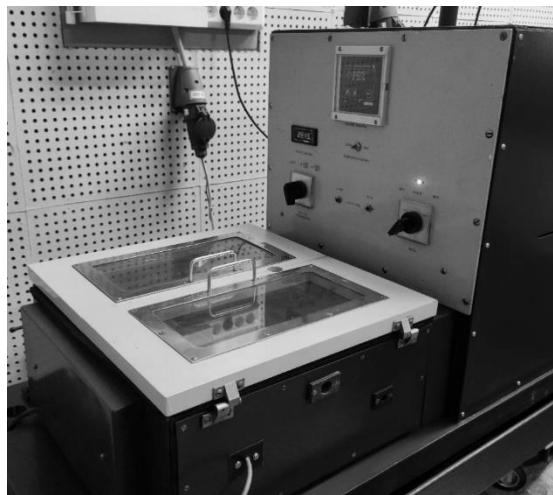


Рис. 1. Машина трения ПРУ

Для каждой пары образцов проводилось 3000 циклов испытаний. Подвижные образцы устанавливались в тензометрический держатель под углом оси 90° к поверхности неподвижного образца для обеспечения максимального сопряжения поверхностей трения. Подвижные образцы были изготовлены фрезерованием из Р6М5, неподвижные – из стали 45. В качестве базового аналога СОЖ использовалось индустриальное масло И-20А ГОСТ 20799-88. Испытания также проводились в условиях постоянной подачи СОЖ марки Синапол при концентрациях 1,5%, 3%, 6%. Для разбавления концентрата использовалась дистиллированная вода при температуре 20 °С. Дополнительно после разведения СОЖ полученные составы перемешивались с помощью ротационной мешалки РМ-1 в течение 2 часов. Применялась капельная система смазки, при этом смазка поступала непосредственно в зону трения. Массовый износ подвижных образцов измерялся с помощью весов ВЛР-200.

### Результаты

Результаты измерения массового износа образцов и средней силы трения приведены в табл. 1. Значения износа и средние значения коэффициента трения весьма близки в заданных условиях. Установлено, что масло И20А показало худший результат. Оптимальным сочетанием свойств обладает СОЖ с концентрацией 1,5% (по износу и силе резания). Установлено, что повышение концентрации СОЖ в данных условиях приводит к заметному уменьшению сил трения, но также к налипанию продуктов износа на

подвижный образец, т.е. в натуральных условиях – к налипанию стружки на резец.

Таблица 1. Результаты испытаний

СОЖ	Износ, мг	Ср. Ф. тр., гс
И-20А	2,55	283
Синапол 1,5%	0,75	267
Синапол 3%	0,65	287
Синапол 6%	-2,90	240

## Выводы

Подтверждено, что применение индустриального масла И-20А является нецелесообразным в качестве СОЖ. Установлено, что в моделируемых условиях разумно применение СОЖ с концентрацией 1,5% - 3%. При дальнейшем увеличении концентрации СОЖ до 6% наблюдается налипание продуктов износа на имитатор резца при одновременном снижении сил трения (резания). Для подтверждения возможности использования показанного метода экспресс-оценки свойств СОЖ при резании рекомендуется провести дополнительные исследования, например, при больших или меньших контактных давлениях и при повышенных

температурах, а также при меньшей рабочей площади подвижного образца.

## Благодарности

Данное исследование было проведено в связи с доведением РТУ МИРЭА Государственного задания № 075-00701-24-07 от 03.04.2024г. и заключением дополнительного соглашения к Соглашению о предоставлении субсидии из федерального бюджета на финансовое обеспечение выполнения государственного задания на оказание государственных услуг (выполнение работ) от 05.04.2024г. №075-03-2024-077/8 по теме "Исследование методов пассивации поверхностей в процессах механической обработки и эксплуатации" (шифр "Наука")

Работа выполнена с использованием оборудования Центра коллективного пользования «Научноёмкие технологии создания машин будущего» Института машиноведения им. А.А. Благодирова РАН (Москва, Россия).

1. Метод прогнозирования снижения силы резания при токарной обработке заготовок из конструкционных сплавов с применением СОЖ / А. Г. Кисель, Ю. В. Титов, Г. Б. Тодер, Д. Ю. Белан // Вестник машиностроения. – 2020. – № 10. – С. 50-54.

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРНЫХ И СИЛОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ПРИ СВЕРЛЕНИИ

О.И. Кулаков

Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, Москва, Россия; [kulakov@imash.ru](mailto:kulakov@imash.ru)  
МИРЭА-Российский технологический университет

Предложена и теоретически обоснована модель распределения сил резания и температуры вдоль режущей кромки сверла с учетом изменения геометрии инструмента и коэффициента усадки стружки. Проведено математическое моделирование температурного поля сверла и предложены варианты совершенствования и углубления модели.

### Введение

Сила резания  $P$  складывается из силы  $P_{ПЛ}$ , необходимой для пластической деформации по передней поверхности, сил трения по передней  $P_{mn}$  и задней  $P_{mз}$  поверхностям, силы  $P_y$ , производящей упругую деформацию по задней поверхности, и силы сдвига перемычки  $P_{ПР}$ .

Силы  $P_{ПЛ}$ ,  $P_y$ ,  $P_{mn}$ ,  $P_{mз}$  находятся по формуле:

$$P_{ПЛ} + P_y + P_{mn} + P_{mз} = \beta \sigma_s a b k_c^m (\cos \delta + \sin \alpha + \mu_1 \sin \delta + \mu_2 \cos \alpha), \quad (1)$$

где:  $a$  и  $b$  – толщина и ширина срезаемого слоя, мм;  
 $\beta$  – коэффициент Лоде-Надаи, для ортогонального резания  $\beta = 1,155$ ;

$\sigma_s$  – условный предел текучести обрабатываемого материала, МПа;

$k_c$  – коэффициент усадки стружки;

$m$  – показатель политропы сжатия;

$\mu_1$  и  $\mu_2$  – коэффициенты трения по передней и задней поверхностям;

$\delta = 90^\circ - \gamma$ ,  $\gamma$  – передний угол инструмента;

$\alpha$  – задний угол инструмента.

Сила сдвига перемычки  $P_{ПР}$  рассчитывается по формуле:

$$P_{ПР} = 0.5 \beta \sigma_s a \left(1 - e^{-\frac{\epsilon_p}{2.31}}\right) \frac{k_c - \sin \gamma}{\cos \gamma}, \quad (2)$$

где:  $\epsilon_p$  – деформация разрушения;

При сверлении толщину срезаемого слоя определяют по выражению:

$$a[\text{м}] = 0.06 \frac{s}{n}, \quad (3)$$

где:  $s$  – подача, мм/сек;

$n$  – частота вращения шпинделя, об/мин;

У спиральных сверл передний угол  $\gamma$  изменяется по длине режущей кромки и зависит от угла наклона винтовой канавки  $\omega$  и угла в плане  $\phi$ . Передний угол  $\gamma$  в данной точке  $x$  в нормальном сечении к режущей кромке, определяется по формуле, выведенной в работе [7]:

$$\text{tg}(\gamma) = \frac{r_x}{R} \text{tg}(\omega) \frac{(1 - \sin^2(\mu_x) \sin^2(\phi))}{\sin(\phi) \cos(\mu_x)} - \cos(\phi) \text{tg}(\mu_x), \quad (4)$$

где:  $r_x$  – расстояние от оси сверла;  $R$  – наружный радиус

$\mu_x$  – угол между радиусом  $r_x$  и проекцией режущей кромки  $\sin \mu_x = a_n / r_x$

$a_n$  – ширина перемычки (для стандартной заготовки  $a_n = 0,15 * R$ )

У стандартных сверл из быстрорежущей стали  $\omega = 30^\circ$ ,  $\phi = 60^\circ$ ,  $\sin \mu_x = 0.15 R / r_x$ .

Коэффициент усадки стружки в зависимости от переднего угла может быть вычислен по формуле из работы [5]:

$$k_c = u \cos^2(\gamma) * \left\{ 2\mu(1 - \text{tg}(\mu)) + \sqrt{\frac{[2\mu(1 - \text{tg}(\mu))]^2 + 4\mu}{[\text{ucos}(\gamma) + 1 - 2\mu] \cos^2(\gamma)}} \right\}, \quad (5)$$

где:  $\mu$  – коэффициент трения материалов инструмента и заготовки;

$u$  – коэффициент распространения деформации

$$\begin{cases} u = 1 & \text{при } \gamma \geq 0; \\ u = 1 - \sin \gamma & \text{при } \gamma < 0. \end{cases} \quad (6)$$

Из формул (1), (4) и (5) следует, что составляющие силы резания  $P_{ПЛ}$ ,  $P_{mn}$ ,  $P_y$ ,  $P_{ПР}$  изменяются в зависимости от расстояния до центра сверла. Изменение главной составляющей силы резания по длине режущей кромки можно описать коэффициентом:

$$Kp = k_c^m (\cos \delta + \mu_1 \sin \delta)$$

Процесс сдвига вносит основной вклад в теплообразование. Генерация и распространение тепла при сдвиге описываются дифференциальным уравнением теплопроводности:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = a \frac{\partial^2 \theta}{\partial z^2} \quad (7)$$

с начальным условием  $\theta = 0$  при  $t = 0$  и граничным условием:

$$-\lambda \frac{\partial \theta}{\partial z} = \frac{P_{ПР} V}{A}, \quad (8)$$

$\theta = 0$  при  $z \rightarrow \infty$

где:  $P_{ПР}$  – сила резания при образовании трещины, [Н];

$V$  – скорость резания,  $V = 2\pi r n / 60 * 1000$  [м/с];

$a$  – температуропроводность, [м<sup>2</sup>/с];

$A$  – поперечное сечение срезаемой стружки [м<sup>2</sup>];  
 $z$  – расстояние от места сверления, [м].

Температура при сдвиге в зависимости от времени ( $t$ ) определяется решением уравнения (7), которое приведено в работах [5] и [8]:

$$\theta = \frac{P_{\text{пр}} V \sqrt{a}}{\sqrt{\pi A \lambda}} \sqrt{t} \exp\left(-\frac{z^2}{4at}\right) \quad (9)$$

Площадь сечения стружки определяется как:

$$A[\text{м}^2] = \frac{sR}{n} 0.6 \cdot 10^{-4} \quad (10)$$

где:  $R$  – радиус сверла, мм.

Таким образом, получено следующее выражение:

$$\theta = 0.03 \frac{n\beta\sigma_s\sqrt{a}}{\lambda} \left(1 - e^{-\frac{ep}{2.31}}\right) * \frac{r_x k_c - \sin \gamma}{R \cos \gamma} \sqrt{t} e^{-\frac{z^2}{4at}} \quad (11)$$

Из формулы (11) следует, что изменение температуры вдоль режущей кромки характеризуется коэффициентом:

$$k_\theta = \frac{r_x k_c - \sin(\gamma)}{R \cos(\gamma)} \quad (12)$$

Вычисленные значения переднего угла, коэффициента усадки стружки и их соотношений на различных расстояниях от центра сверла приведены в таблице 1.

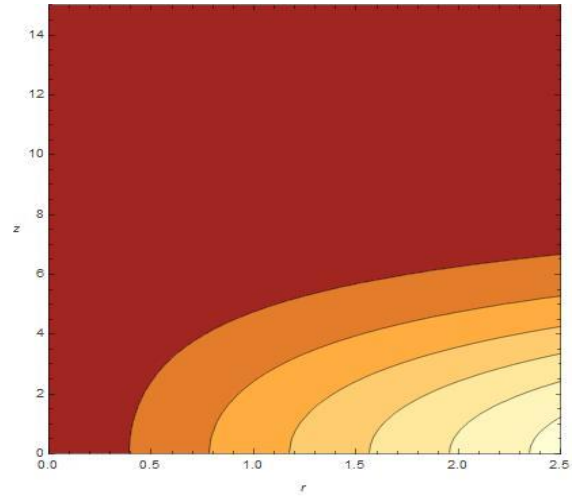


Рис. 1. Моделирование тепловой нагруженности в теле сверла.

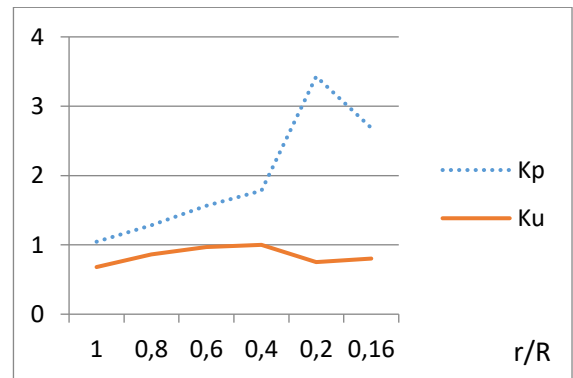


Рис. 2. Изменение коэффициентов силы и температуры вдоль режущих кромок.

По данным таблицы 1 и графика на рисунке 2 можно сделать вывод, что максимальная сила резания будет наблюдаться на расстоянии 0,2  $r$ , а максимальная температура на расстоянии 0,4  $r$  от центра сверла.

Моделирование температурного поля (рис. 1) показывает, что модель требует повышения точности, поскольку расчёт (рис. 2) и модель совпадают не полностью. Дальнейшее развитие математической модели связано с повышением точности расчёта, учётом большего количества параметров и возможностью визуализации температурных и силовых нагрузок в режиме реального времени с последующим нахождением оптимальных параметров сверления для каждого заданного случая.

Таблица 1. Вычисленные параметры.

$l = r_x/R$	$\gamma_x$	$k_c$	$Kp = k_c^m (\cos \delta + \mu_1 \sin \delta)$	$\frac{k_c - \sin(\gamma)}{\cos(\gamma)}$	$k_\theta = \frac{r_x k_c - \sin(\gamma)}{R \cos(\gamma)}$
1	30.47°	1.09	1.045	0.677	0.68
0.8	23.4°	1.38	1.281	1.07	0.86
0.6	14.8°	1.82	1.563	1.62	0.97
0.4	3.15°	2.54	1.779	2.5	1
0.2	-24.15°	3.01	3.428	3.8	0.75
0.16	-33.1°	2.27	2.687	4.9	0.8

### Благодарности

Данное исследование было проведено в связи с доведением РТУ МИРЭА Государственного задания № 075-00701-24-07 от 03.04.2024г. и заключением дополнительного соглашения к Соглашению о предоставлении субсидии из федерального бюджета на финансовое обеспечение выполнения государственного задания на оказание государственных услуг (выполнение работ) от 05.04.2024г. №075-03-2024-077/8 по теме "Исследование методов пассивации поверхностей в процессах механической обработки и эксплуатации" (шифр "Наука")

1. Резников А.Н. Теплофизика процессов механической обработки. –М.: Машиностроение, 1981.
2. Грановский Г.И., Грановский В.Г. Резание материалов. –М.: Высшая школа, 1985. -304 с.
3. Даниелян А.М. Теплота и износ инструмента при резании металлов. –М.: Машгиз, 1954. -276 с.
4. Спиридонов А.А. Планирование эксперимента при исследовании технологического процесса. –М.: Машиностроение, 1981.
5. Воронцов А.П., Султан-Заде Н.М., Албагачиев А.Ю. –М.: Вестник машиностроения 2008г. №5, стр. 61-69.
6. Виноградов В.Н., Сорокин Г.М., Албагачиев А.Ю. Изнашивание при ударе. –М.: Машиностроение, 1982.
7. Родин П.Р. Металлорежущие инструменты. –Киев: Высшая школа, 1974. –400 с.
8. Окулик М.А. Разработка математической модели расчета оптимальных режимов резания при сверлении труднообрабатываемых металлов. –Донецк: ДонНТУ, 2011.



## ЦИФРОВОЙ ДВОЙНИК ГЕРОТОРНОГО МОТОРА

А.П. Кушнир

Институт машиноведения им. А.А.Благонравова РАН, Москва, Россия; [89169521579@ya.ru](mailto:89169521579@ya.ru)

Статья посвящена разработке цифрового двойника героторного мотора. Цифровая модель выполнена в среде Матлаб-Симьюлинк и включает в себя подсистему источника давления постоянного и переменного давлений, имитирующего работу распределителя, а также подсистему героторного гидромотора, позволяющую моделировать работу как в статическом, так и в динамическом режимах. Приведены результаты сравнения расчетных данных с опытными значениями.

В связи с современной цифровизацией производства особую роль приобретает создание цифровых двойников - виртуальных прототипов реальных объектов или процессов.

При описании гидравлических машин, которые получили очень широкое распространение в машиностроении, возникают проблемы, связанные со сложностью процессов, происходящих в гидравлическом тракте этих машин. Применение систем динамического моделирования, к которым относятся такие программные продукты, как Матлаб-Симьюлинк, Симинтек и др., позволяет решить многие из этих задач путем использования аппарата решения дифференциальных уравнений, описывающих гидродинамические процессы, происходящие в гидромашинах.

Одним из распространенных видов гидромашин являются героторные гидромоторы, рис. 1.

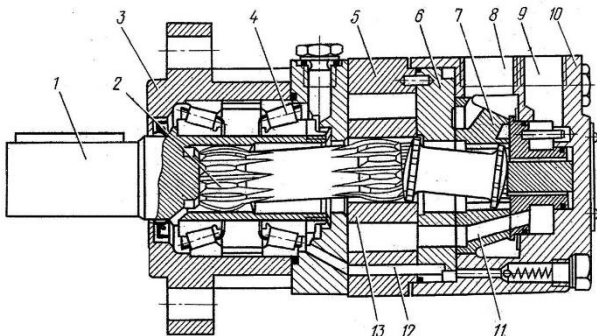


Рис. 1. Общий вид героторного гидромотора

Относительная простота конструкции в сочетании с высокими характеристиками обусловили широкое применение данного типа гидромоторов в специальных строительных и дорожных машинах, в дробилках, буровых установках и другой технике, где требуется высокий крутящий момент при сравнительно невысокой потребляемой мощности.

Героторные гидромоторы имеют удельный объем до 800 см<sup>3</sup>, способны при небольших габаритах развивать крутящий момент до 2 кНм и обеспечивают стабильную и бесшумную работу при давлениях до 25 МПа, в том числе при малых угловых скоростях. Могут работать как закрытых, так и в открытых системах, способны воспринимать радиальные и осевые нагрузки.

Сравнительные механические характеристики гидромоторов различных типов приведены на рис. 2.

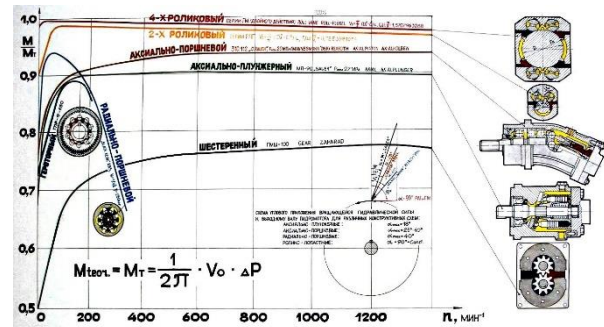


Рис. 2. Сравнительные характеристики ГМ

Цифровая модель системы распределитель-гидромотор выполнена в виде маскированных подсистем и представлена на рис. 3.

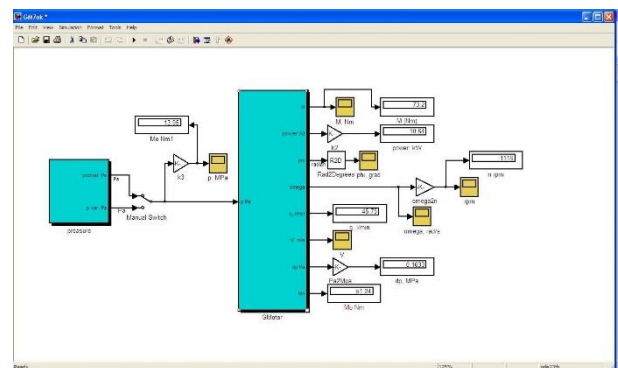


Рис. 3. Цифровая модель системы распределитель-гидромотор

На рис. 4, 5, соответственно, приведены внутренние структуры распределителя и героторного гидромотора.

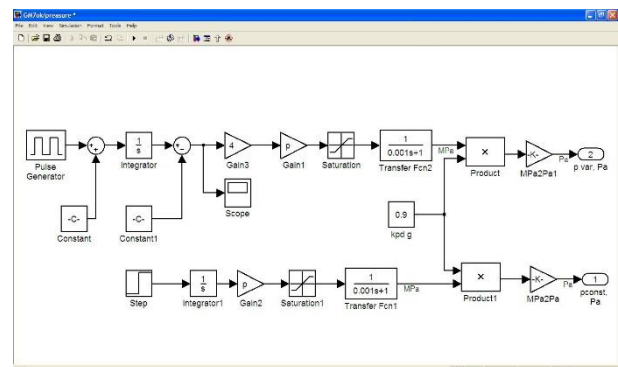


Рис. 4. Цифровая модель распределителя

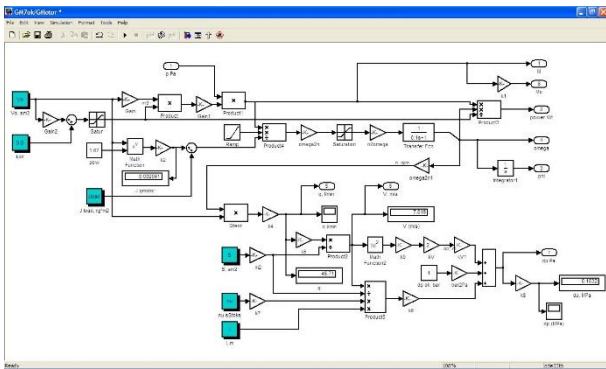


Рис. 5. Цифровая модель системы распределитель-гидромотор

Модель охватывает типоразмеры промышленных гидромоторов пределах от 10 см<sup>3</sup> до 700 см<sup>3</sup>, рис. 6.

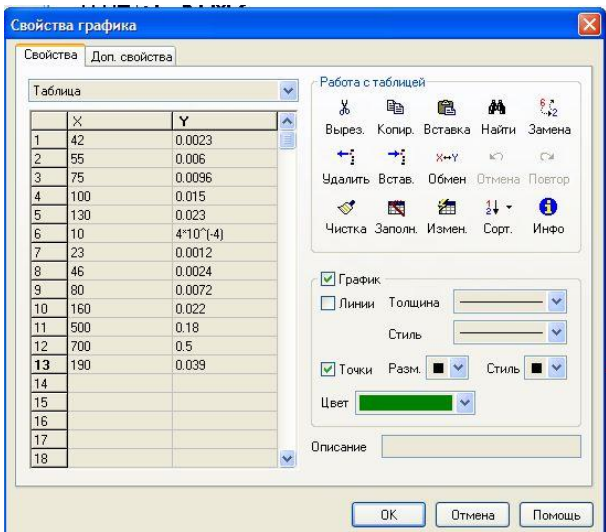


Рис. 6. Моменты инерции героторных гидромоторов

На основании опытных данных (рис. 6) методом регрессионного анализа была подобрана зависимость для расчета моментов инерции героторных гидромоторов, рис. 7, 8.

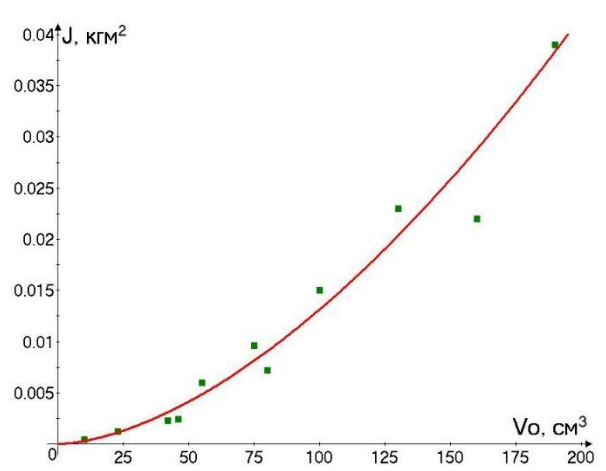


Рис. 7. Оцифровка моментов инерции ГМ

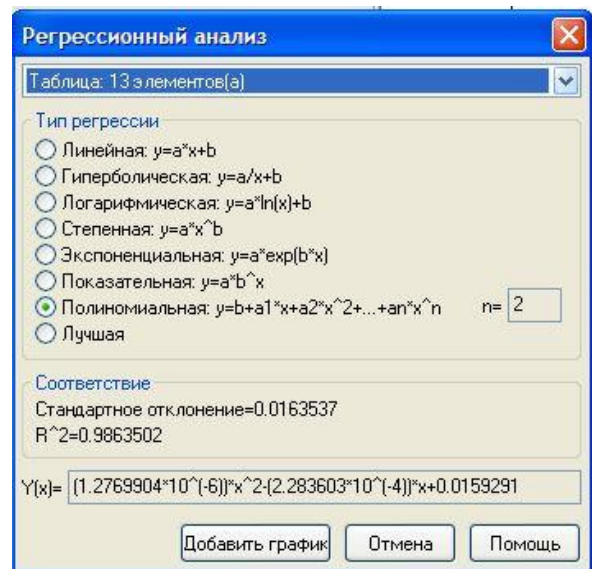


Рис. 8. Варианты регрессионного анализа

На рис. 9 показаны исходные данные для моделирования системы, а в табл. 1 - результаты сравнения расчетных и экспериментальных данных по частоте вращения, моменту, давлению и мощности.

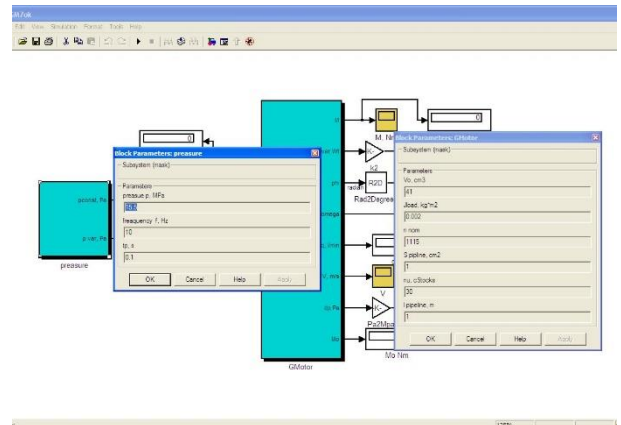


Рис. 9. Исходные данные для моделирования

Таблица 1. Расчетные и экспериментальные данные

Моторы серии TE	n об/мин	q, л/ мин	p МПа	M Нм	N кВт	Мпус к Нм
<b>TE/TJ 36 (экспер)</b>	<b>930/ 1160</b>	<b>35/40</b>	<b>14/ 19</b>	<b>55/ 71</b>	<b>9</b>	<b>44/ 52</b>
Расчет 1	1160	41,8	14,5	60,1	9,1	42
Расчет 2	960	34,6	17,5	72,5	9,1	50,8
<b>TEПJ 390 (экспер)</b>	<b>152/ 190</b>	<b>60/ 75</b>	<b>8,5/ 12</b>	<b>445/ 628</b>	<b>13</b>	<b>348/ 462</b>
Расчет 1	170	66,6	10	471	10	330
Расчет 2	190	74,5	12	566	13,4	396

1. Sauer Dahfoss. Героторные гидромоторы. <https://www.hydropart.ru/upload/files/382d122224f73aa05529795ac566e73b.pdf?ysclid=m1w5p2prn983624424>
2. Orbital motors. <https://project-hts.by/wp-content/uploads/2023/02/gidromotory-gertornye-orbitalnye-katalog-na-russkom.pdf?ysclid=m1w5tymtt2498891709>

## УЧЕТ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ НОМЕНКЛАТУРЫ ВЫПУСКА ДЛЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ГПС

В.С. Лагута<sup>1</sup>

<sup>1</sup>МГТУ им. Н.Э.Баумана, Москва, Россия; [ipilp@mail.ru](mailto:ipilp@mail.ru)

В статье представлен метод формализации параметров базовой номенклатуры для проектирования ГПС на основе вектора относительных частот переходов, который представляет совокупность последовательности формообразующих воздействий в маршрутном процессе изготовления деталей. Представленная модель номенклатуры выпуска позволяет сформировать концепцию для выбора основного технологического оборудования проектируемой ГПС.

### Цель

Сформулировать модель номенклатуры выпуска создаваемой гибкой производственной системы (ГПС) с учетом неопределенности параметров базовых деталей и данных по перспективам изменения производственной ситуации. Модель предполагается использовать для выбора состава основного технологического оборудования (ОТО) ГПС механообработки.

### Постановка задачи

Реальное многономенклатурное производство характеризуется значительной неопределенностью параметров, на основании которых, собственно, и создается производственная система (ПС). В лучшем случае некоторые параметры можно описать вероятностными методами или использовать метод аналогий. Однако такой подход не позволяет "описать" всю планируемую номенклатуру в целом в том числе на будущий период, не говоря уже о вариантах календарных заданий (вплоть до сменно-суточных) с учетом возможных изменений в производстве, таких как отказы оборудования, брак, и т.п. В худшем случае невозможность учета на стадии проектирования подобных вероятных изменений и производственных ситуаций может привести к "провалу" в реализации бизнес-плана, а все заложенные технические решения окажутся просто законсервированным имуществом на балансе предприятия.

### Построение модели

Каждый компонент исходной номенклатуры необходимо декомпозировать по принципу последовательных укрупненных операций формообразования что соответствует (характеризует) типы станочного оборудования [1]. Для этого можно использовать библиотеки базовых технологических процессов и/или материалы, обобщающие накопленный опыт профильного производства. По сути, такое описание представляет собой вариацию вариантов формообразования или изменения свойств элементов поверхности деталей при реальном функционировании ПС. Использование электронных моделей анализируемых деталей дает еще одну очень важную возможность - получение оценочного времени обработки (иногда используют термин "станкоемкость") для принятой декомпозиции процесса формообразования.

При построении модели необходимо учитывать параметры, описываемые в модели динамического заказа [2], такие как

- плановые (временные), то есть интенсивность поступления заказов - шт./ ед. времени;
- вариативность объемов заказов - шт.;
- периодичность (вероятность) прерывания (изменения) и последующего продолжения выпуска запланированных заказов.

Эти параметры определяются и задаются системой управления жизненным циклом (СУЖЦ) верхнего уровня для исполнительной ПС [2].

**Вектор интенсивности переходов** характеризует интенсивность "применения" соответствующих методов формообразования для базовой номенклатуры. Поскольку в маршрутном процессе изготовления деталей реализуется последовательность формообразующих воздействий (обработка на соответствующем ОТО), можно говорить о характеристике номенклатуры в виде **вектора относительной частоты переходов (ВОЧП)** между отдельными технологическими позициями. Возможны два варианта задания вектора:

1. Когда известна (или задана) программа выпуска по деталям базовой номенклатуры. В этом случае нормирование элементов вектора осуществляется с учетом нормативной загрузки ОТО по каждому из видов формообразования.

2. Когда программа выпуска неизвестна. В этом случае нормирование осуществляется с учетом только интенсивности (количества) соответствующих элементов формообразования для базовой номенклатуры.

Рассмотрим построение векторов относительных частот переходов  $\{L_i\}$ ,  $i=1, \dots, N$ ,

где  $N$  - количество деталей представителей групп согласно проведенной ранее классификации базового (проектного) варианта номенклатуры.

Для каждой группы деталей или её детали-представителя осуществляем дифференциацию маршрутного технологического процесса по принципу последовательных укрупненных операций формообразования - токарная/ фрезерная/ сверлильная /расточная/ резбонарезная и др. [1]. То есть согласно параметрам, которые характеризуют в том числе типы станочного оборудования для последующего подбора. В том числе с учетом точностных требований - допуски, значения шероховатости и т.п. Например - тонкое точение/ черновое шлифование и т.д. В настоящее время разработаны и могут быть

использованы в этих целях соответствующие инструментальные средства, например [3].

**Первый этап.**

На множестве конструкторско - технологических элементов (КТЭ) представленных в документации необходимо определить следующие параметры, характеризующие базовую номенклатуру:

- габариты заготовок;
- конфигурации заготовок для деталей по классификации [3];
- категории групповых наладок, возможных к использованию на ОТО [4-8].

Для упрощения процедуры формирования модели номенклатуры базового заказа выделим группы КТЭ по видам требуемых технологических операций для их выполнения [1].

**Первая – стандартные технологические операции и процессы.**

Эта группа характеризуется использованием стандартных инструментов, приспособлений (например УСП), режимов обработки. Кроме того, операции на технологической позиции выполняются за один установ.

Для первой группы с точки зрения используемого ОТО характерны следующие требования:

- обеспечиваемые качества на обработку в диапазоне от 7-го и выше;
- обеспечиваемые характеристики шероховатости поверхности Ra не ниже 3,2 для токарно-фрезерной группы операций и не ниже 0,4 для шлифовальной;

**Вторая группа – операции требующие разработки каких-либо элементов системы СПИД (Станок-Приспособление- Инструмент-Деталь).**

Для этой группы с точки зрения используемого ОТО характерны следующие технологические признаки:

- обеспечиваемые качества на обработку в диапазоне до 7-го;
- обеспечиваемые характеристики шероховатости поверхности Ra не выше 3,2 для токарно-фрезерной группы операций и не выше 0,4 для шлифовальной.

**Третья группа – специальные технологические операции и процессы.**

Эта группа как правило включает выносные операции маршрутного технологического процесса, такие как гравировка, термообработка, слесарная обработка, покрытия, контрольные операции ОТК и т.п. Для реконструируемых производств (задачи реинжиниринга) это могут быть технологические операции на непрофильном оборудовании, например электроэрозия, электрохимия, хонингование и др.

Примем допущение что в наличии имеются заготовки и/или полуфабрикаты, не требующие предварительной обработки ("обдирки") для выполнения технологической операции на рассматриваемых позициях.

Тогда для каждой i-й группы, начиная с первой по списку, можно сформировать последовательность  $M_i$  видов формообразования и, соответственно, рассчитать нормативное время выполнения для  $m_i$  - соответствующей операции формообразования -

$T_{обр_i}$ . Важно отметить, что выделяемые виды обработки (начиная с первой группы) используются и для последующих групп. Увеличение количества видов обработки производится по мере включения в анализ следующих групп деталей из базового списка.

Результатом такого построения является матрица, где по строкам фиксируются детали-представители анализируемой номенклатуры, а по столбцам - виды формообразования (соответствующая концепция ОТО), необходимые для выполнения соответствующих операций маршрутного технологического процесса. Каждый элемент такой матрицы это планируемое время выполнения операции для i-ой детали на j-ой позиции -  $T_{обр_{ij}}$ :

$$(MN) = \begin{bmatrix} T_{обр_{11}} & \dots & T_{обр_{M1}} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ T_{обр_{1N}} & \dots & T_{обр_{MN}} \end{bmatrix},$$

$$M = \max(m_i),$$

Далее рассчитываем суммарное время, приходящееся на  $m_i$  вид обработки (ОТО):

$$T_{обр_{mi}} = \sum_{j=1}^k T_{обр_{j}},$$

где k- количество планируемых операций в маршрутных технологических процессах для i-го вида обработки (ОТО) по всей номенклатуре (N).

И наконец последний шаг этого этапа - нормирование полученного ряда  $T_{обр_{mi}}$  и формирование вектора относительных частот переходов по всей номенклатуре (N):

$$li = \frac{T_{обр_{mi}}}{\sum_1^M T_{обр_{mi}}},$$

Заметим, что в случае, когда программа выпуска по анализируемой номенклатуре известна, матрица (MN) преобразуется умножением на вектор программ выпуска по базовой номенклатуре (N).

Поскольку каждый из векторов сформирован для своего класса деталей, каждый элемент вектора содержит необходимые данные для формирования представительной выборки возможного ОТО из общедоступной информационной базы данных по оборудованию (в т.ч. сети интернет) в предположении минимальной стоимости либо другого заданного критерия, например доступность приобретения, предпочтения ЛПР, нормативная загрузка ОТО; средняя производительность ПС и другие.

В результате удается представить анализируемую номенклатуру в виде **модели производственного заказа**, а именно множеством соответствующих векторов требуемых технологических позиций обработки (формообразования).

Направление подбора оборудования осуществляется в соответствии с технологическим принципом

от максимальной дифференциации операций к максимальной концентрации [1]. При этом на заданном периоде времени (эксплуатационном периоде) для выполнения производственной программы оборудование ПС должно обеспечить полученную интенсивность переходов.

Осуществив предварительное группирование КТЭ деталей (или процессов) базовой номенклатуры, можно перейти непосредственно к этапам выбора оборудования ГПС на этапе формирования концепции производственной системы используя, например методику и программное обеспечение, разработанное в МГТУ им.Н.Э.Баумана [9].

### Заключение

Изложенный подход целесообразно использовать для случая, когда планируемая номенклатура выпуска имеет значительную неопределенность либо исходная производственная программа носит временный характер. Для бизнес-проекта это как правило точка "старта" либо точка "завершения", когда бизнес-программа выполнена и задача трансформируется в формирование новой производственной программы за счет реконфигурации "отработавшей" ПС.

Рассмотренная модель номенклатуры позволяет не только сформировать технический состав ПС, но "показать" проектировщику (или заказчику разработки) какие из формобразующих операций (а значит и конкретных деталей из базовой номенклатуры) нецелесообразно включать в производственную программу проектируемой ГПС

На эксплуатационной стадии подобная модель номенклатуры позволяет анализировать состав поступающих заказов на изготовление (в системе СУЖЦ) и осуществлять предварительный отбор для собственного производства или передачи для изготовления по кооперации стороннему производству.

1. Дальский А.М., Косилова А.Г., Мещерякова Р.К., Сулова А.Г. Справочник технолога-машиностроителя в 2-х томах. - Т.1 Изд-во:Машиностроение, 2003, - 912с.
2. Лагута В.С., Ясиновский С.И. Проектирование компьютерно-интегрированных производств в составе систем управления жизненным циклом высокотехнологичной продукции в машиностроении // Вопросы инновационной экономики - 2020. - №3 (том 10). - С. 1246-1257.
3. Зиннатуллин И.А., Горяинов Д.С. Метод автоматизированного распознавания конструкторско-технологических элементов детали. // [Известия Самарского научного центра Российской академии наук: Машиностроение и машиноведение](#), вып:4-2, - т.18, 2016. - С.257-261.
4. Технологический классификатор деталей машиностроения и приборостроения. Общероссийский классификатор ОК021-95 / М.: ИПК Издательство стандартов, 2004, - 75 с.
5. *Технологический классификатор деталей машиностроения и приборостроения. Общероссийский классификатор ОК021-95.* Москва, Изд-во стандартов, 2004, 75с.
6. Б.М. Базров Классификация станочных приспособлений. *Станки и инструменты*, 1998, №3, с.26-31.
7. Кузнецов Ю. И., Маслов А. Р., Байков А. Н. *Оснастка для станков с ЧПУ: справочник.* Москва, Машиностроение, 1990, 512 с.
8. *Инструмент и приспособления для машиностроения. Классификация и условные обозначения. Нормы машиностроения. МН 74-59, МН 81-59.* Москва, Изд-во стандартов, 1962, 27с.
9. Овсянников М.В., Буханов С.А. Управление конфигурацией методом программирования в ограничениях. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2012, № 14, С. 70-75.

## ПРОБЛЕМАТИКА ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ ПОДШИПНИКОВ ОСЕЙ САТЕЛЛИТОВ ПЛАНЕТАРНЫХ МУЛЬТИПЛИКАТОРОВ МОЩНЫХ ВЕТРОГЕНЕРАТОРОВ

Ло Юань<sup>1</sup>, Ю.Н. Казаков<sup>1</sup>, Чжоу Иньчунь<sup>2</sup>, Ли Шенбо<sup>3</sup>, Л.А. Савин<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Орловский государственный университет им. И.С. Тургенева, Орел, Россия; [kazakyurii@yandex.ru](mailto:kazakyurii@yandex.ru)  
<mailto:stepanov@imash.ru>

<sup>2</sup>SF Oilless Bearing Group Co. LTD., Цзясин, Китай

<sup>3</sup>Сямыньский технологический университет, Сямынь, Китай

Проведен анализ особенностей применения гидродинамических подшипников в качестве опор осей сателлитов планетарных мультипликаторов мощных ветровых турбин. Рассмотрены вопросы моделирования ГДП на основе решения УГД-задачи смазки в условиях вращения втулок и относительно неподвижных осей. Представлены результаты расчета и экспериментальных исследований несущей способности и потерь мощности на трение в тяжело нагруженных подшипниках приводов ветрогенераторов.

### Цель

В настоящее время наблюдается быстрое развитие производства ветровых энергетических установок, при этом отмечается достижение определенного предела в совершенствовании отдельных компонентов, в частности, приводных турбин, конструкций генераторов, тормозных устройств и т.д. Одним из направлений развития ветроэнергетики является использование в приводах вращения синхронных генераторов многоступенчатых коробок скоростей. В установках большой мощности целесообразно применять приводы вращения с планетарными мультипликаторами (рис. 1), в которых в качестве опор осей сателлитов 1-й и 2-й ступени целесообразно использовать гидродинамические подшипники (ГДП), что требует решения комплекса научно-технологических задач по обеспечению заданной грузоподъемности и длительного ресурса в режиме жидкостной смазки при больших нагрузках и невысоких частотах вращения [1-3]. Один из важных вопросов проектирования подшипниковых узлов связан с учетом влияния упругих деформаций осей под действием распределенных гидродинамических сил при расчете несущей способности и выборе технологических параметров рабочих поверхностей. При использовании косозубых зубчатых передач необходимо также учитывать изгибающий момент от действия осевых сил. На начальном этапе решения задачи был выполнен анализ уровня упругих деформаций элементов. Пиковая радиальная нагрузка на подшипник оси сателлита первой планетарной ступени ветрогенератора мощностью 6.8 Мпа составляет порядка 2200 кН. Предварительные расчеты упругих деформаций стальной оси и установленной на ней бронзовой втулки с внешним диаметром  $D = 335$  мм и длиной  $L = 470$  мм в системе АПМ показали, что максимальная величина прогиба оси (рис. 2) при действии распределенной гидродинамической реакции смазочного слоя и изгибающего момента  $M_z$  около 80 кНм составляет в пределах 70 мкм, что соизмеримо с величиной радиального зазора и оказывает значительное влияние на формирование полей давлений в

смазочном слое, момент трения и грузоподъемность подшипника. Задача проведения данных исследований заключалась в оценке потенциальной возможности функционирования ГДП при заданных геометрических, кинематических и силовых параметрах в условиях ограниченной возможности подачи смазочного материала в рабочую зону опор осей сателлитов. В основу моделирования смазочных процессов была положена упруго-гидродинамическая (УГД) постановка, предполагающая совместное решение уравнений гидродинамической смазки и теории упругости [4-5].

Несимметричность линии перемещений поверхности оси связана с различием жесткости опорных частей вала, в которых крепится сателлит. Для устранения негативного влияния изменения величины зазора предлагается профилирование рабочей поверхности подшипника таким образом, чтобы для предотвращения износа антифрикционного слоя поверхность оси была эквидистантна ответной внутренней поверхности сателлита при работе на критических режимах. Решение этой задачи основывалось на последовательном проведении процедур расчета деформации упругой линии оси с последующим подбором формы базового профиля опорной поверхности подшипника.

Расчет давлений в смазочном слое проводился на основе решения модифицированного уравнения Рейнольдса (1), полученного путем интегрирования потока жидкой смазки в конфузурно-диффузурном зазоре подшипника с подвижной втулкой и щелевым дросселированием смазки [6]. В соответствие с рис. 1 радиус втулки равен  $R(z) = r(z) + h_0$ , где  $r(z)$  радиус внутренней неподвижной оси, а  $h_0$  – средний радиальный зазор. Функция радиального зазора имеет вид:  $h(\varphi, r) = h_0 \cdot (1 - e \cos(\beta)) \cdot \cos(\alpha)$ .

$$h \frac{\partial}{\partial r} \left( r h^3 \frac{\partial p}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2 \sin^2 \alpha} \frac{\partial}{\partial \varphi} \left( h^3 \frac{\partial p}{\partial \varphi} \right) = 6 \omega \mu \frac{\partial h}{\partial \varphi}, \quad (1)$$

где  $p$  – давление в смазочном слое;  $r$  – радиус оси;  $e$  – эксцентриситет;  $\mu$  – динамическая вязкость масла;  $\omega$  – угловая скорость вращения сателлита.

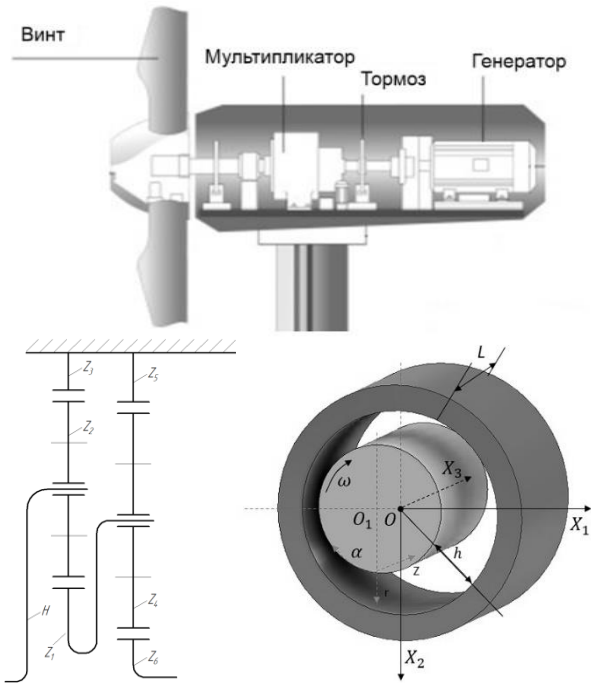


Рис. 1. Схема привода ветрогенератора, планетарного мультипликатора и подшипника

Значения гидродинамических сил в проекциях на оси координат и момент силы трения:

$$F_1 = - \int_{\beta_2^-}^{\beta_2^+} \int_{\beta_1^-}^{\beta_1^+} p \cos \varphi \beta_1 d\beta_1 H_2 d\beta_2, \quad (2)$$

$$F_2 = - \int_{\beta_2^-}^{\beta_2^+} \int_{\beta_1^-}^{\beta_1^+} p \sin \varphi \beta_1 d\beta_1 H_2 d\beta_2.$$

$$M = -r \int_{\beta_2^-}^{\beta_2^+} \int_{\beta_1^-}^{\beta_1^+} \left( \frac{\partial p}{\partial \beta_2} \frac{h}{2\beta_1} + \frac{u_2 \mu}{h} \right) \beta_1 d\beta_1 H_2 d\beta_2. \quad (3)$$

Численная реализация полученных расчетных соотношений проводилась с использованием методов решения дифференциальных уравнений в системе Matlab. При проведении расчетов в качестве исходных данных были использованы параметры ГДП оси сателлита второй ступени мультипликатора ветрогенератора фирмы GoldWind с диаметром втулки  $D = 260$  мм, длиной  $L = 311$  мм, радиальным зазором  $h_0 = 100 \dots 200$  мкм, шероховатостью опорных поверхностей  $Ra = 0,4 \dots 0,63$ , давлением подачи смазочного материала в зону трения  $P_0 = 0,3$  МПа. Величина окружной силы на ось составляет на режимах с максимальной нагрузкой примерно 1340 кН. Это означает, что для обеспечения жидкостного режима смазки реакция смазочного слоя должна быть не меньше этого значения. На рисунке 3 представлены результаты расчетов грузоподъемности гидродинамического подшипника с профилированной поверхностью втулки при угловой скорости  $\omega = 8,7$  р/с, температуре масла  $T = 40^\circ\text{C}$  и относительными эксцентриситетами  $\epsilon = 0,5 \dots 0,95$ . Наблюдается резкое повышение грузоподъемности подшипника при относительных эксцентриситетах более 0,95. Режим жидкостного трения подшипника с нагрузкой  $F = 1340$  кН может быть обеспечен с радиальным зазором 100 мкм при относительных

эксцентриситетах более 0,85; с зазором  $h = 150$  мкм при эксцентриситетах 0,92, а с зазором  $h = 200$  мкм эксцентриситет  $\epsilon = 0,95$ . Подшипник фактически работает в переходной зоне между жидкостной и граничной смазкой, для которой важнейшим показателем является минимальный зазор, расчетное значение которого определяется  $h_{\min} = h_0(1 - \epsilon)$ . При  $h_0 = 150$  мкм и относительном эксцентриситете 0,95 минимальный зазор будет равен 7,5 мкм. Расчетное значение минимального зазора должно быть больше технологического значения  $h_{t,\min} = (Ra_1 + Rz_2)k$ , зависящего от шероховатости опорных поверхностей. Для заданных значений параметров шероховатости согласно рабочему чертежу сопрягаемых деталей  $h_{\min} = (0,8 + 0,63) \cdot 4 = 5,72$  мкм, что соответствует режиму жидкостной смазки. Был также проведен расчет сил, максимальных давлений и радиальных зазоров с использованием специализированной программы DLAP [7], который показал хорошее согласование полученных результатами.

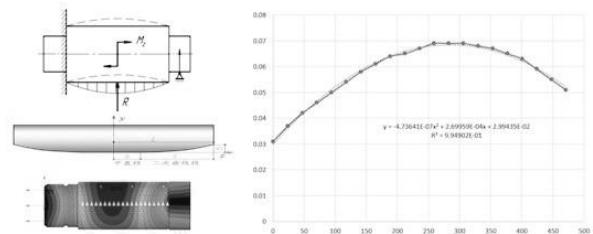


Рис. 2. Схема действия нагрузок, эпюра напряжений, форма профиля и линия перемещений оси

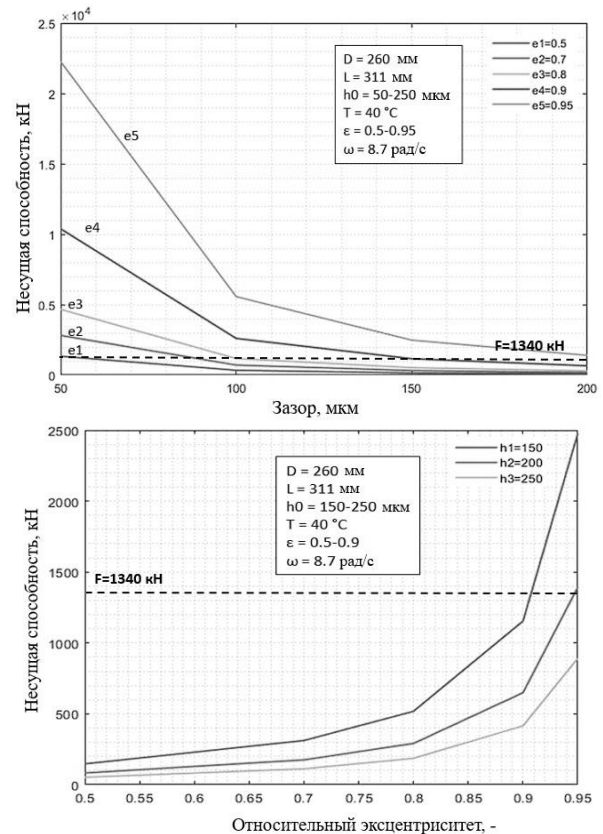


Рис. 3. Грузоподъемность в зависимости от зазора и эксцентриситета

Результаты расчетов на режимах максимальных нагрузок показали, что режим жидкостного трения при заданных геометрических размерах реализуется только при значениях относительных эксцентриситетов  $\varepsilon = 0.93-0.98$ , которым соответствуют минимальные зазоры 7–8 мкм. Технологически допустимые минимальные зазоры при шероховатости  $Ra = 0.6 \dots 0.8$  также находятся в этих пределах. По сути дела, в данном случае имеет место переходный режим полужидкостной смазки. Был выявлен высокий уровень перемещений поверхностей трения при изгибных деформациях под действием гидродинамических сил, что негативно сказывается на несущей способности подшипников и приводит к необходимости выполнения процедуры профилирования антифрикционных поверхностей, способствующей предотвращению износа и повышению ресурса жидкостных подшипников ветровых энергетических установок. Следует отметить, что режимы критических нагрузок на практике реализуются на небольшом временном интервале, составляющем за десятки лет эксплуатации порядка нескольких часов. Если для повышения несущей способности подшипника и обеспечения жидкостного режима нет возможности увеличить диаметр подшипника, использовать масло с более высоким коэффициентом динамической вязкости или поддерживать определенный

температурный режим процесса смазки, рекомендуется использовать износостойкие антифрикционные элементы и/или покрытия опорных поверхностей.

**Финансовая поддержка.** Работа поддержана Проекты зарубежного сотрудничества в рамках программы науки и технологий провинции Фуцзянь, Китай (№ 2024I0044).

1. Polinder H. Overview of and trends in wind turbine generator systems // IEEE Power and Energy Society General Meeting. 2011. P. 1–8.
2. Diepeveen N. F. B. On the application of fluid power transmission in offshore wind turbines. PhD Thesis, Delft University of Technology, Delft, 2013.
3. Wang X. F. Design, Modeling and Simulation of a Geared Infinitely Variable Transmission // Journal of Mechanical Design. 2014. V.136 (7). P. 1–9.
4. Рождественский Ю.В., Хозенюк Н.А. УГД задача смазки сложнагруженных опор скольжения//Авиационная ракетно-космическая техника, 2009. – С. 57-62.
5. Piffeteau S., Souchet D. Influence of Thermal and Elastic Deformations on Connecting-Rod Big End Bearing Lubrication Under Dynamic Loading// Journal of Tribology. 2000. V.122(1). P.181-191.
6. D. Shutin, Y. Kazakov, I. Stebakov и L. Savin Data-driven and physics-informed approaches for improving the performance of dynamic models of fluid film bearings // Tribol. Int. 2024. V.191. P.109136.
7. Luo Yuan, Li Shengbo, Zhou Yinchun, et al.Tolerance Fit Based Lubrication Clearance Design for Sliding Bearings in High Power Wind Turbine Gearboxes // Journal of Mechanical Transmission. 2024. P.1-7.



## THE RESEARCH ON THE DAMPING EFFECT OF MULTILAYER STEEL SHEET ELASTIC DAMPERS IN ROTOR SYSTEMS

Liu Yifan<sup>1</sup>, Li Shengbo<sup>2</sup>, Yu.N. Kazakov<sup>1</sup>, L.A. Savin<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Orel State University, Orel, Russia: kazakyurii@yandex.ru

<sup>2</sup>Xiamen University of Technology, Xiamen, China

A dynamic model of a rotor system supported by a combined bearing assembly, which integrates a conical multi-layer steel damping device with conical hybrid hydrostatic/hydrodynamic bearings, has been developed. The analysis of the effectiveness of the conical steel damping device within the combined support system reveals that the conical multi-layer steel damping device exhibits excellent damping and vibration reduction properties.

### Contents

As the rotational speed of the rotor system increases, it can lead to significant instability throughout the entire system. Bearings and dampers, as crucial components of the rotor system, can enhance system stability. The combined support structure of bearings and dampers can effectively suppress the amplitude of vibration during the operation of the rotor system, improving its stability in both the critical speed region and higher-order critical speed regions [1-2].

Based on the designed multi-layer steel elastic damper, this paper presents a rotor system supported by a combined bearing assembly that integrates the damper with conical hybrid hydrostatic/hydrodynamic sliding bearings. Both in-depth theoretical research and experimental verification have been conducted on this combined support rotor system. Theoretical analysis is carried out on the dynamic characteristic parameters of the conical multi-layer steel damper, deriving expressions for its equivalent radial stiffness and equivalent radial damping. A mathematical model for the conical hybrid hydrostatic/hydrodynamic sliding bearing is established, and its Reynolds equation and flow balance equation are derived. These equations are solved using the finite difference method and actual boundary conditions to analyze the static and dynamic characteristics of the sliding bearing. Based on the lumped mass method, the dynamic equations for the combined support rotor system are constructed.

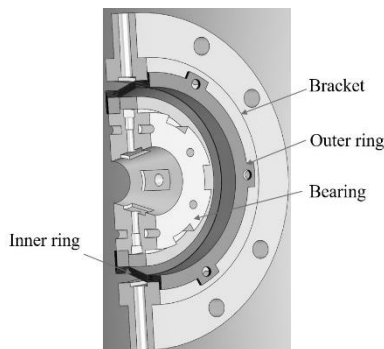


Fig. 1. The structure of combined bearing system

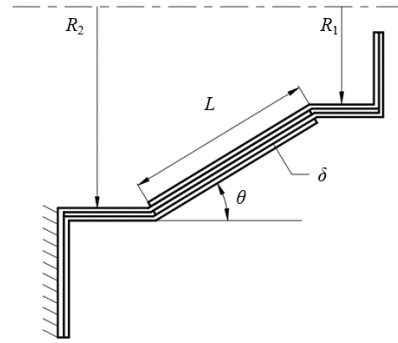


Fig. 2. Side view of multi-layer steel elastic damper

As shown in fig. 1 and fig. 2, the damping inner ring element and the damping outer ring element are staggered and stacked sequentially in the conical part, and the damping inner ring element and the outer ring element are closely matched with each other, so that the inner and outer rings slip with each other during the vibration of the rotor and the dry friction effect occurs, and the friction damping force is formed.

When the thickness of the layer of radius  $r$ , the cone part can be considered as a thin-walled ring, which allows the consequence of the symmetry of the ring to use reduced versions of the calculation relations. According to the theory of elasticity, the basic equation can be written as follows

The stiffness and damping coefficient of the damper are calculated using the thin-walled circle theory and the Coulomb friction theory:

$$k = \frac{4En\delta}{\pi^2-8} \quad c_d = \frac{(n-1)\mu F \cos \theta}{8\pi\omega L} \quad (1)$$

$$k = \frac{4En\delta}{\pi^2-8} \quad (2-8)c_{eq} = \frac{(n-1)\mu F \cos \theta}{8\pi\omega L}$$

Where;  $n$ -layers;  $\delta$ -layer thickness;  $\theta$ -conic angle;  $\omega$ -vibration frequency;  $L$ - busbar length.

Table 1. Stiffness of the damper

thickness(mm)	layers	stiffness calculated	stiffness experimental
0,3	4	2 013,97	2139,78
0,3	8	4 475,49	4 423,16
0,5	4	3 499,87	3 469,83

Table 2. Energy dissipation factor of the damper

thickness(mm)	Energy dissipation factor calculated	Energy dissipation factor experimental
0,3	2,9424	3,4364
0,5	1,0001	1,0677
0,7	0,8265	0,8351

To calculate the effect of the elastic damper, establish the rotor dynamics equations (fig. 3) [3].

$$\begin{aligned} F_1 &= - \int_{\beta_2^-}^{\beta_2^+} \int_{\beta_1^-}^{\beta_1^+} p \cos \varphi \beta_1 d\beta_1 H_2 d\beta_2, \\ F_2 &= - \int_{\beta_2^-}^{\beta_2^+} \int_{\beta_1^-}^{\beta_1^+} p \sin \varphi \beta_1 d\beta_1 H_2 d\beta_2. \end{aligned} \quad (2)$$

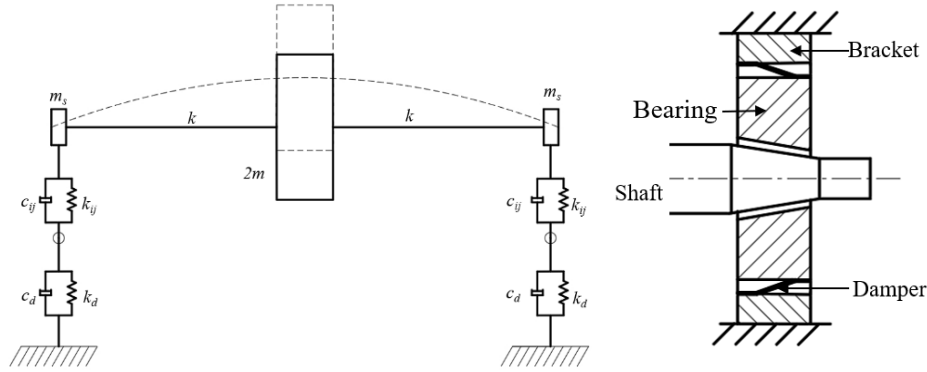


Fig. 3. Dynamical equations of combined supported rotor system

For calculating the oil film reaction force in Eq.(2), the Reynolds equation[4-5] is necessary for the conical dynamic and static bearings (fig. 4).

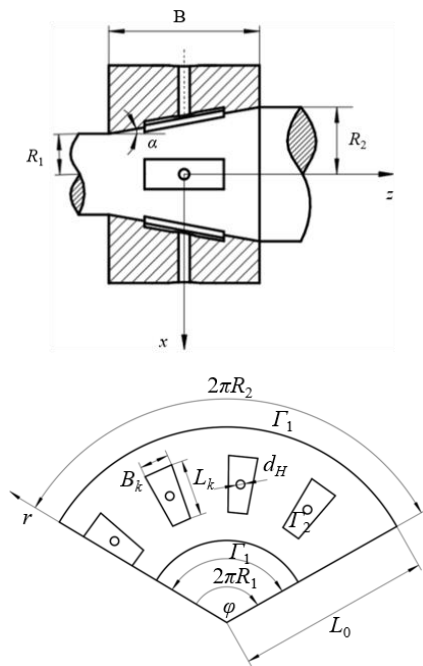


Fig. 4. Conical dynamic and static bearing

$$F_1 = - \int_{\beta_2^-}^{\beta_2^+} \int_{\beta_1^-}^{\beta_1^+} p \cos \varphi \beta_1 d\beta_1 H_2 d\beta_2, \quad (3)$$

$$F_2 = - \int_{\beta_2^-}^{\beta_2^+} \int_{\beta_1^-}^{\beta_1^+} p \sin \varphi \beta_1 d\beta_1 H_2 d\beta_2.$$

$$F_1 = - \int_{\beta_2^-}^{\beta_2^+} \int_{\beta_1^-}^{\beta_1^+} p \cos \varphi \beta_1 d\beta_1 H_2 d\beta_2, \quad (4)$$

$$F_2 = - \int_{\beta_2^-}^{\beta_2^+} \int_{\beta_1^-}^{\beta_1^+} p \sin \varphi \beta_1 d\beta_1 H_2 d\beta_2.$$

Where x and y represent horizontal and vertical displacements. The subscripts b, s and non-subscript represent bearing, shaft, and rotor; m-mass;  $F_{x|y}$ -oil film reaction force; e-rotor mass eccentricity;  $\Omega$ -rotor angular velocity; k-half stiffness of shaft.

$$\begin{aligned} F_1 &= - \int_{\beta_2^-}^{\beta_2^+} \int_{\beta_1^-}^{\beta_1^+} p \cos \varphi \beta_1 d\beta_1 H_2 d\beta_2, \\ F_2 &= - \int_{\beta_2^-}^{\beta_2^+} \int_{\beta_1^-}^{\beta_1^+} p \sin \varphi \beta_1 d\beta_1 H_2 d\beta_2. \end{aligned} \quad (5)$$

where p-oil pressure; r - axis radius;  $\mu$  - dynamic oil viscosity;  $\Omega$  - angular velocity of satellite rotation; h-clearance; q-flowrate; R-Throttle liquid resistance ratio.

The reduction of the clearance leads to a significant increase in the oil film pressure. At high rotational speeds, the dynamic pressure effect of the oil film exceeds the static pressure effect and dominates the oil film reaction force.

It can be seen that the journal is simple harmonic vibration in each direction, the overall periodic vortex state, the axis trajectory close to the elliptic. Under high speed, the vibration amplitude can still be controlled within a reasonable range, and the vibration state can still be kept stable.

The conical steel plate elastic damper combination bearing exhibits a critical speed of approximately 3500 rpm and can effectively traverse the oil film oscillation speed range. At 10000 rpm, beyond its critical speed, it can control the amplitude of the rotor system to within 50 micrometers. Between 10000 and 14000 rpm, the amplitude remains within 70 micrometers. This theoretical analysis comprehensively validates the damping capabilities of the conical multilayer steel sheet damper.

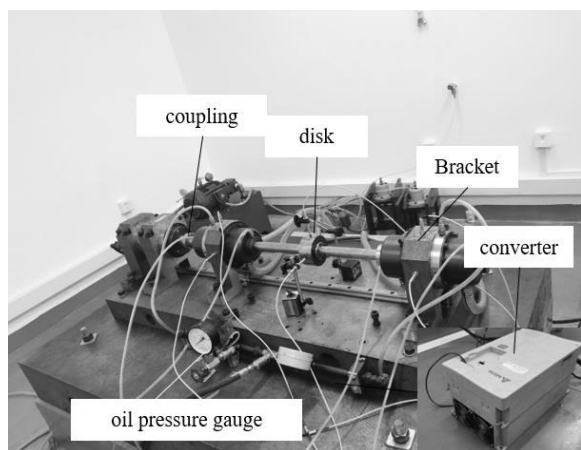


Fig. 5. High-speed rotor test facility

In order to verify the correctness of the calculation results of the dynamics of the conical multilayer steel sheet elastic damper combination support, the experimental facilities were designed as shown in fig. 5. The dynamic characteristics of a tapered multilayer steel disc damper and tapered plain bearing combination support were tested, and a control test was conducted with a rotor system under rigid support.

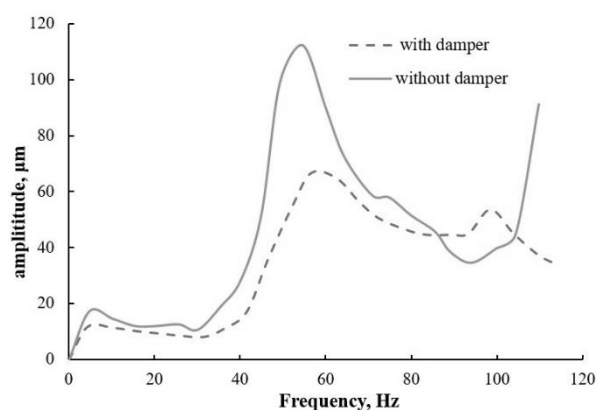


Fig. 6. Amplitude comparison experiment of rotor system with and without damper

The first critical speed of bending vibrations of the rotor is about 55 Hz (3300 rpm) (fig. 6). In this zone there is a significant increase in the amplitudes of vibrations due to the appearance of the resonance mode and the proximity of the natural frequency of transverse vibrations. It should be noted that damping in supports changes the values of critical frequencies of rotor oscillations. In this case, a slight change in the zone of maximum amplitudes is observed, which may be due to the difference in the stiffnesses of the shaft, bearing and damper. A significant (about 40%) reduction of the maximum amplitude of vibrations of the rotor system at the critical frequency with a dampener in comparison with rigid supports should be noted, which characterizes good damping properties of this type of support.

**Financial support.** This work was supported by Overseas Cooperation Projects under the Science and Technology Programme of Fujian Province, China (No. 2024I0044).

1. Kelzon A. S. Dynamics of rotors in elastic supports / A. S. Kelzon, Yu. P. Tsimansky, V. I. Yakovlev - Moskva: Nauka. - 1982. -280c.
2. Dmitrenko A. I. Elastic-damper rotor support / A. I. Dmitrenko, P. V. Yakubenko // Patent RF No. 2099606C1 - 1997.
3. Yoon S. Y. et al. Introduction to rotor dynamics //Control of Surge in Centrifugal Compressors by Active Magnetic Bearings: Theory and Implementation. - 2013. - C. 17-55.
4. Chasalevris A., Sfyris D. Evaluation of the finite journal bearing characteristics, using the exact analytical solution of the Reynolds equation //Tribology International. - 2013. - T. 57. - C. 216-234.
5. Miyan M. Different phases of Reynolds equation //International Journal of Applied Research. - 2016. - T. 2. - №. 1. - C. 140-148.

## ИЗГОТОВЛЕНИИ КОРПУСНОЙ ДЕТАЛИ БИОНИЧЕСКОГО ПРОТЕЗА С ПРИМЕНЕНИЕМ SLA

Д.А. Мельникова<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Московский технологический университет «МИРЭА», Москва, Россия; daria.m9020@mail.ru

При помощи современных технологий был рассмотрен вопрос изготовления протезов с применением аддитивных технологий. Было проведено сканирование объекта, для создания цифровой копии. Далее на основе полученных данных, была разработана модель, которая может использоваться для производства протеза.

### Цель

Проектирование и создание различных типов протезов для улучшения качества жизни людей. Искусственные конечности нового поколения становятся не только более функциональными, но и реалистичными и эстетически приятными.

Создание протеза должно включать в себя 3 пункта, на которые нужно обращать особое внимание:

1. материал для протезов и его особенности
2. метод изготовления корпусной детали протеза
3. эксплуатация корпусной детали протеза

Из-за изменений человеческого тела с течением времени, изменения роста или веса протезные конечности необходимо время от времени менять или корректировать. Замена или ремонт могут стать дорогостоящими, если материал, из которого изготавливают протезы, дорогой. Обычно используют следующие материалы: углеродное волокно, стекловолокно, полипропилен, усиленное углеродное волокно, кевлар и т.д., свойства которых отвечают требованиям. В соответствии с требованиями, предъявляемым к протезам, а также с учетом физико-механических свойств материалов, выбирается подходящий материал

Протез, изготовленный полностью из полимерных материалов, обладает низким модулем упругости, однако низкая прочность ухудшает удобство его использования. Характеристики металлической искусственной конечности также часто оказываются неудовлетворительными для пользователей. Полимер, армированный волокнами, обладает низким модулем упругости и высокой прочностью, а также устойчивостью к коррозии и усталостным характеристикам. Процесс проектирования протезов во многом зависит от качества проведенного предварительного обследования человека для определения характеристик будущего изделия. Это помогает разрабатывать дальнейший дизайн протеза после создания его прототипа.

Для изготовления и проектирования качественного бионического протеза исследователю необходимо обеспечить выполнение целого ряда критериев, таких как: наличие достаточного количества степеней свободы, возможность интуитивного управления, внешнее сходство устройства с здоровой конечностью, максимальная энергонезависимость и габаритные размеры. Более того, учитывая среду применения данного типа устройств, для его дальнейшей медицинской имплементации

разработчику необходимо придерживаться ряда требований и критериев, присущих медицинским изделиям, в частности – по токсичности используемых в изготовлении материалов и веса готового устройства.

Наиболее распространенным методом организации системы управления бионическим протезным устройством является использование в качестве управляющего сигнала, полученный методом электромиографии.

Корпусная деталь бионического протеза служит для нескольких задач:

1. обеспечение расположения деталей относительно друг друга
2. точное закрепление (базирование) деталей
3. защита внутренних механизмов и электроники от внешнего воздействия
4. эстетический вид протеза

Следовательно- материал корпусной детали должен быть устойчив к механическим воздействиям, к перепадам температур и выдерживать определенные динамические нагрузки.

К тому же немалое значение имеет вес данной детали — это корпус, добавляем к нему механическую и электронную составляющую получаем общий вес изделия. Учитываем, что протез не должен быть лёгким, чтобы не вызвать атрофию мышц и не должен быть тяжелым, чтобы устройством можно было управлять без перегруза для тех же мышц.

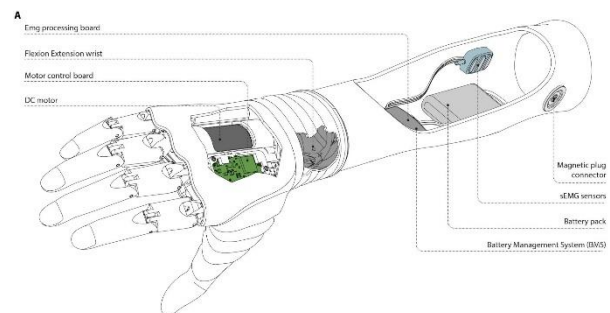


Рис. 1. Устройство бионического протеза

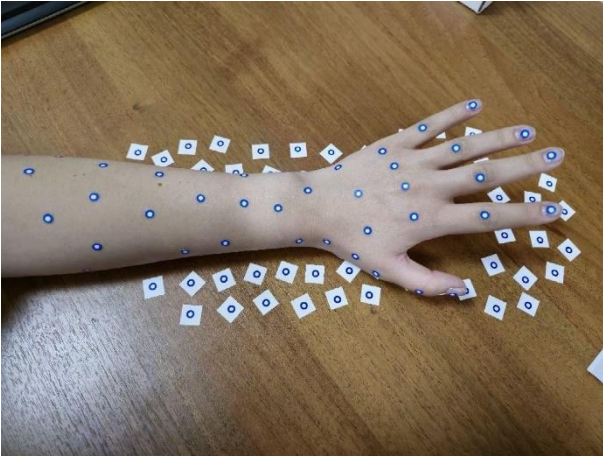


Рис. 2. Объект сканирования с установленными метками для захвата сканером Calibri

В ходе сканирования ручным сканером Calibri выяснилось, что таким сканером затруднительно исследовать поверхность руки и затем обрабатывать полученные результаты из-за длительного времени и неудобства использования данного сканера. Для подобных исследований нужно специальное приспособление, которое будет прочно закреплять объект сканирования и проводить измерения одновременно с 4х сторон руки.

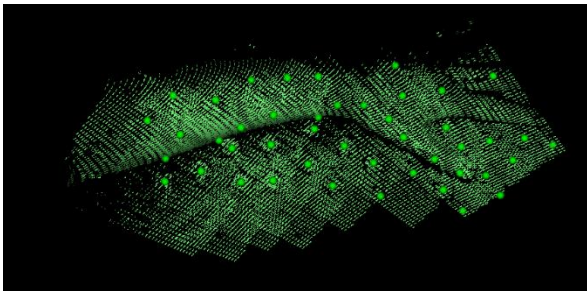


Рис. 3. Окно сканирования в ПО Calibri Nest

Поэтому для исследования берем запястье и обрабатываем деталь в программе для полигонального

моделирования и экспортируем в формат stl для последующей печати на 3д принтере.

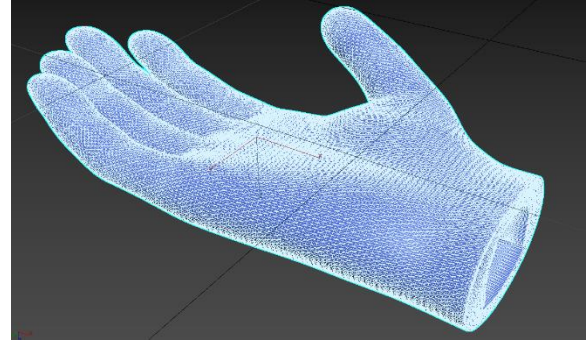


Рис. 4. Запястье в формате stl

### Заключение

В результате печати выяснили, что модель запястья для бионических протезов из SLA можно использовать как прототип.

Как готовый корпус для протеза возможно использовать лишь частично.

1. Применение технологий обратного проектирования для получения цифровых моделей в машиностроении / А. В. Лутьянов, А. В. Кислова, С. В. Скрипник // Оптические технологии, материалы и системы («Оптотех 2022»): Сборник докладов конференции, Москва, 05–10 декабря 2022 года. – Москва: МИРЭА - Российский технологический университет, 2022. – С. 345-350.
2. Исследование зависимости качества поверхности и детализации времени химической обработки / Е. В. Преображенская, С. В. Скрипник, О. В. Сарибекян // Оптические технологии, материалы и системы (Оптотех - 2023): Сборник докладов Международной научно-технической конференции, Москва, 11–15 декабря 2023 года. – Москва: МИРЭА - Российский технологический университет, 2023. – С. 344-347.
3. Особенности сканирования отверстий с помощью лазерного сканера / А. В. Кислова, В. В. Зуев, Т. Н. Боровик, С. В. Скрипник // Национальная научно-техническая конференция с международным участием. Перспективные материалы и технологии (ПМТ-2022): Сборник докладов конференции Института перспективных технологий и индустриального программирования РТУ МИРЭА, Москва, 11–15 апреля 2022 года / Под редакцией А.Н. Юрасова. Том 1. – Москва: МИРЭА - Российский технологический университет, 2022. – С. 147-149

## ОСОБЕННОСТИ ПРОЯВЛЕНИЯ ДЕФОРМАЦИОННЫХ МАРТЕНСИТНЫХ ПРЕВРАЩЕНИЙ В СПЛАВАХ НА ОСНОВЕ TiNi В ПРОЦЕССЕ ПРОКАТКИ С ИМПУЛЬСНЫМ ТОКОМ

А.А. Мисоченко

<sup>1</sup>Институт машиноведения им. А.А.Благонравова РАН, Москва, Россия; ls3216@yandex.ru

В работе изучены особенности проявления деформационных мартенситных превращений в сплавах  $Ti_{50.0}Ni_{50.0}$  и  $Ti_{49.2}Ni_{50.8}$  в процессе прокатки с одновременным воздействием импульсного тока. С использованием рентгеноструктурного фазового анализа изучен фазовый состав в образцах сплавов после различных степеней деформации ( $\epsilon=0; 0,4; 0,8; 1,2$ ). Показана возможность стабилизации высокотемпературной аустенитной В2 фазы в сплаве  $Ti_{49.2}Ni_{50.8}$ , а также проявление циклично-протекающего мартенситного превращения в сплаве  $Ti_{50.0}Ni_{50.0}$ .

### Введение

Сплавы с эффектом памяти формы (ЭПФ) TiNi обладают сложным набором механических и функциональных свойств, включая биосовместимость, коррозионную стойкость, низкую плотность, высокую удельную прочность, термическую стабильность и пластичность, память формы и сверхупругость [1]. В работах [2,3] показано, что основные характеристики эффекта памяти формы и сверхупругости могут быть значительно улучшены посредством прокатки с током за счет повышения деформационной способности. Особенности влияния тока при различных схемах деформирования в разных металлах и сплавах описаны в [4]. Однако применительно к сплавам с ЭПФ ток также может влиять на температуры и характер проявления мартенситных превращений (МП). Хотя тепловой эффект от прокатки с током (при плотности не более  $100 \text{ А/мм}^2$ ) сплавов TiNi не превышает  $50\text{-}70 \text{ }^\circ\text{C}$  [5], является локальным и незначительным для прохождения процессов динамической рекристаллизации, эта температура может оказать существенное влияние на протекание МП.

### Цель

Целью работы является исследование особенностей структуры и проявления мартенситных превращений, в том числе деформационных, в сплавах на основе TiNi в процессе прокатки с током.

### Материалы и методы

Исследование проводилось на горячекатаных прутках из сплавов  $Ti_{50.0}Ni_{50.0}$  и  $Ti_{49.2}Ni_{50.8}$  с размерами  $\approx 6 \times 100 \text{ мм}^2$ . Средний размер зерна составляет  $25\text{-}30 \text{ мкм}$  для  $Ti_{50.0}Ni_{50.0}$  и  $60 \text{ мкм}$  для  $Ti_{49.2}Ni_{50.8}$ . После закалки ( $800^\circ\text{C}/\text{вода}$ ) при комнатной температуре сплавы имели преимущественную структуру В19' мартенсита и аустенита В2, соответственно.

Образцы подвергали прокатке с током до достижения истинной деформации  $\epsilon=0,4; 0,8$  и  $1,4$  ( $\epsilon = \ln S0/Sf$ , где  $S0$  - истинная деформация, а  $S0$  и  $Sf$  - начальная и конечная площади поперечного сечения до и после деформации соответственно). Прокатку вели на прокатном стане с калиброванными валками. Размер калибров варьировался от  $1$  до  $7 \text{ мм}$ . Прокатный стан был оснащен генератором импульсного тока. Ток подавался в зону деформации с помощью скользящего контакта (отрицательный полюс) и одного из валков (положительный полюс). Использовался

импульсный однополярный ток плотностью  $j=100 \text{ А/мм}^2$ , длительностью импульса  $100 \times 10^{-6} \text{ с}$ , частотой  $1000 \text{ Гц}$ , скоростью  $5 \text{ см/мин}$  и разовым обжатием за проход  $50 \text{ мкм}$ . Температура оценивалась с помощью термопары при пропускании тока, но без деформации и составила не более  $50\text{-}70 \text{ }^\circ\text{C}$  в момент прохода. Образец находился под током не более  $2$  секунд. После каждого этапа образцы охлаждали в воде, чтобы избежать дополнительного нагрева. Температуры мартенситных превращений изучали методом дифференциальной сканирующей калориметрии (ДСК) на аппарате "Mettler Toledo 822e". Калориметрические кривые были получены в диапазоне температур от  $-150$  до  $150^\circ\text{C}$  со скоростью нагрева/охлаждения  $10^\circ\text{C/мин}$ . Рентгеновские дифрактограммы были получены в  $\text{Cu-K}\alpha$ -излучении в диапазоне углов  $2\theta = 30 - 56 \text{ }^\circ\text{C}$  на рентгеновском дифрактометре «Rigaku».

### Результаты и их обсуждение

Прокатка с током приводит к возникновению двустадийного МП (через промежуточную R-фазу) как в сплаве  $Ti_{49.2}Ni_{50.8}$ , так и в  $Ti_{50.0}Ni_{50.0}$  (рис.1). При этом смещения температур начала МП ( $B2 \rightarrow R$ ) не наблюдается, однако заметно смещение перехода  $R \rightarrow B19'$ . Этот эффект наблюдается также при сравнении прокатки с током с исходным недеформированным состоянием.

Особенностью сплавов на основе TiNi является проявление мартенситного перехода (МП) не только при охлаждении и нагреве, но и в процессе деформационного воздействия [6]. Сравнение фазового состава при различных степенях деформации в процессе прокатки с током выявило еще одну особенность – проявление циклично протекающего МП в сплаве  $Ti_{50.0}Ni_{50.0}$ .

Согласно рентгеноструктурному анализу, все пики дифрактограммы в исходном закаленном состоянии соответствуют мартенситной фазе В19' с моноклинной решеткой (рис.2а). Холодная прокатка без тока приводит к прямому мартенситному переходу – основной фазой становится В2 аустенит, пики от мартенсита присутствуют в небольшом количестве (рис.2б). С повышением степени деформации количество аустенитной фазы постоянно увеличивается, циклично-протекающего МП не наблюдается.

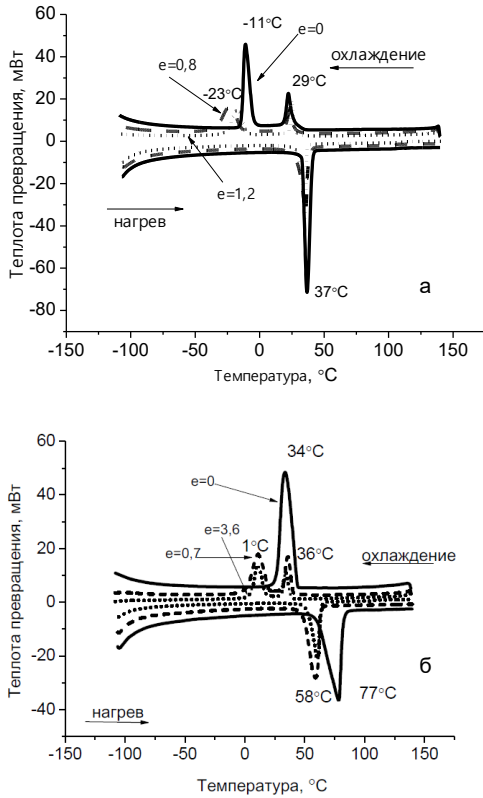


Рис. 1. ДСК-кривые для сплавов Ti50.0Ni50.0 (а) и Ti49,2Ni50,8 (б) после прокатки с током и отжига при 450 °С

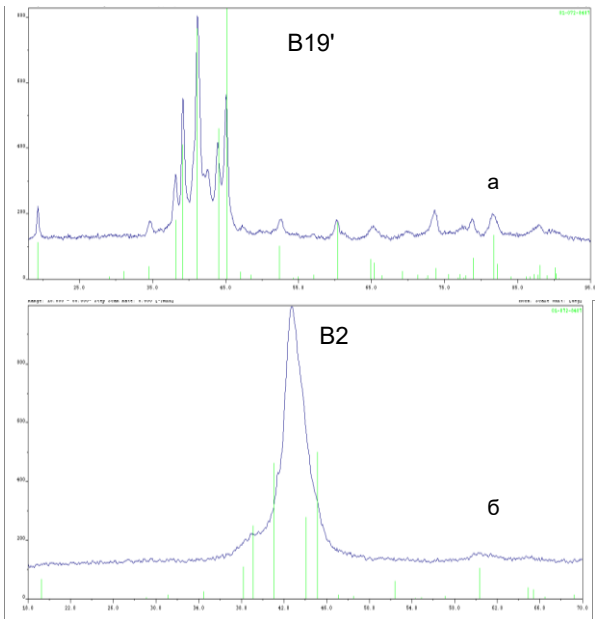


Рис. 2. Дифрактограмма образца сплава Ti50,0Ni50,0 после закалки (а) и холодной прокатки до  $\epsilon=0,7$  (б) с наложением табличных данных соответствия фазе B19' (зеленые линии)

Эта особенность так же не была обнаружена и в сплаве Ti<sub>49,2</sub>Ni<sub>50,8</sub> – при всех исследуемых промежуточных степенях деформации основной фазой оставался B2-аустенит, как и в исходном закаленном состоянии (рис.3). При этом отсутствует деформационно образовавшийся мартенсит, который как правило наблюдают в сплавах данного состава в процессе деформации [6]. Возможной причиной может быть кратковременный разогрев от тока. Поскольку

характеристические температуры МП являются чувствительными даже к небольшому разогреву, локального кратковременного нагрева может оказаться достаточно для стабилизации аустенита. По-видимому, в этом случае тепловое действие тока доминирует над механизмами образования деформационно индуцированного мартенсита и приводит к стабилизации высокотемпературной B2 фазы.

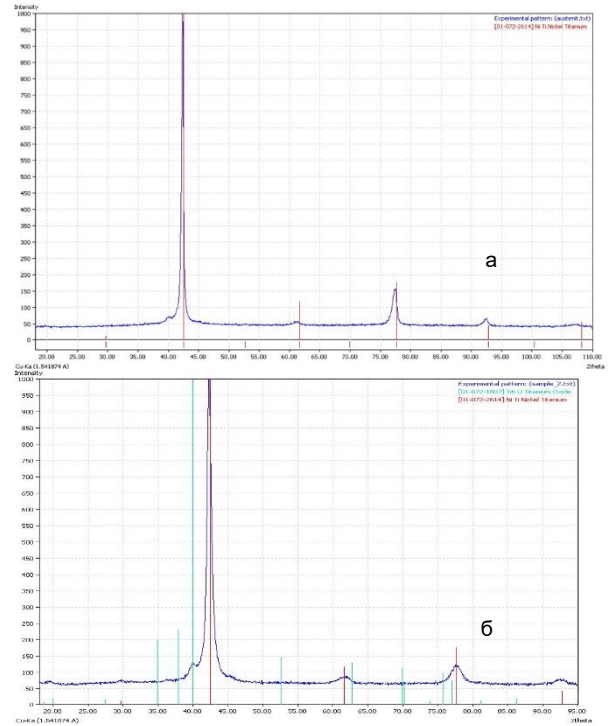


Рис. 3. Дифрактограмма образцов сплава Ti49,2Ni50,8 после закалки (а) и прокатки с током до  $\epsilon=0,4$  (б) с наложением табличных данных соответствия фазе B2 (красные линии) и частиц Ti<sub>3</sub>Ni<sub>4</sub> (зеленые линии)

Отличительной особенностью дифрактограмм образцов после прокатки с током является наличие хорошо выраженного уширения основного максимального пика (рис.4а,б) после деформации, а также пика, соответствующего фазе Ti<sub>3</sub>Ni<sub>4</sub>, которая характерна для сплавов данного состава и может выделяться при нагреве или деформации (рис.3б).

В сплаве Ti<sub>50,0</sub>Ni<sub>50,0</sub> при прокатке с током до  $\epsilon=0,4$  наблюдается обратное превращение МП (мартенсит→аустенит), основной фазой становится B2 (рис.5). Возможность обратного МП в сплавах на основе TiNi в процессе деформации обнаруживалась и ранее и по мнению авторов [7] может быть объяснена действием ротационных мод деформации, когда исчерпаны возможности деформации двойникованием и скольжением. По мнению [8] B2 фаза является более устойчивой к большим деформациям, в то время как B19' способна к разупорядочению при накоплении дефектов кристаллического строения. В случае применения в процессе прокатки импульсного тока обратное превращение может происходить также вследствие энергетического воздействия тока и возможного локального разогрева.

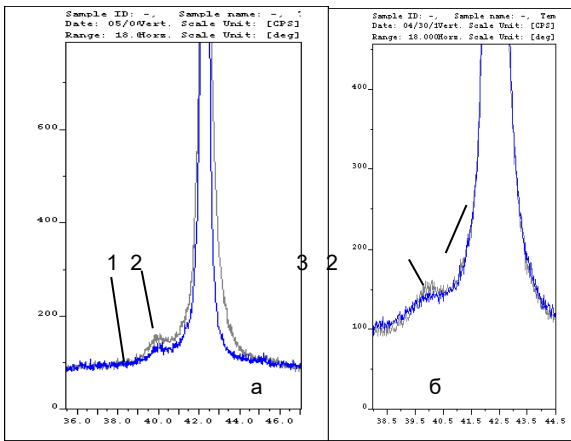


Рис. 4. Уширение рентгеновского пика В2 (110) в сплаве  $Ti_{49,2}Ni_{50,8}$ : 1- закалка с 800 °С (вода) (а); 2- прокатка с током,  $\epsilon=0,4$  (а) ; прокатка с током,  $\epsilon=1,2$  (б)

Дальнейшее повышение деформации сплава  $Ti_{50,0}Ni_{50,0}$  при прокатке с током с  $\epsilon=0,4$  до 0,8 вновь приводит к частичному протеканию прямого МП (аустенит В2 → мартенсит В19'), обусловленного увеличением напряжения в образовавшейся аустенитной фазе. Интенсивность пиков мартенситной фазы на дифрактограмме при этом значительно повышается, а ее доля становится сравнима с аустенитной (рис.5).

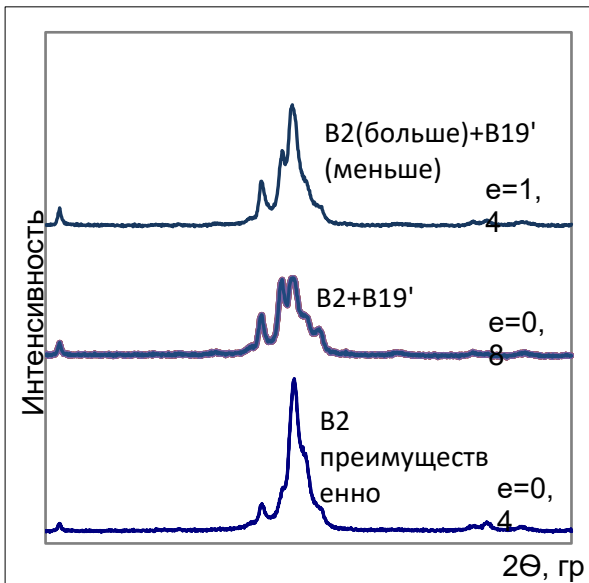


Рис. 5. Дифрактограмма образцов сплава  $Ti_{50,0}Ni_{50,0}$  после прокатки с током до различных степеней деформации

Последующее повышение деформации до  $\epsilon=1,4$  вновь приводит к тому, что В2 аустенит становится преобладающей фазой. То есть имеет место прямое деформационное МП из ранее образованного мартенсита, механизмы которого доминируют над тепловым действием тока.

### Заключение

Таким образом, особенностью структурообразования сплава  $Ti_{50,0}Ni_{50,0}$ , подвергнутого прокатке с током, является цикличность протекания прямого В2 → В19' и обратного В19' → В2 превращений в процессе деформирования. Особенностью влияния импульсного тока при прокатке на мартенситные превращения в сплаве  $Ti_{49,2}Ni_{50,8}$  является, напротив, отсутствие деформационно-индуцированного мартенсита В19' и стабилизация высокотемпературной аустенитной В2 фазы.

1. Brailovski V., Prokoshkin S., Terriault P. and Trochu F. Shape Memory Alloys: Fundamentals, Modelling and Applications. Montreal: University of Quebec. 2003. 844p.
2. Potapova A.A., Resnina N.N., Stolyarov V.V. Shape Memory Effects in TiNi-based Alloys Subjected to Electroplastic Rolling // Journal of Materials Engineering and Performance. 2014. V.23. №7. P. 2391-2395.
3. Potapova A.A., Stolyarov V.V. Relaxation effect of pulse current on  $Ti_{50,0}Ni_{50,0}$  structure during rolling // Materials Science and Technology. 2015. V. 31. No. 13a. P. 1541-1544.
4. Stolyarov V., Misochenko A. A Pulsed Current Application to the Deformation Processing of Materials // Materials. 2023. V. 16. No.18. P. 627.
5. Мисоченко А.А., Столяров В.В. Тепловое действие импульсного тока в сплавах с различными теплофизическими свойствами // Станкоинструмент. 2023. № 4(33). С. 34-41.
6. Пушин В.Г., Кондратьев В.В., Хачин В.Н. Предпереходные явления и мартенситные превращения // Екатеринбург: УрО РАН, 1998. 368с.
7. Зельдович В.И., Фролова Н.Ю., Пилюгин В.П. и др. Формирование аморфной структуры в никелиде титана при пластической деформации // ФММ. 2005. Т.9. №4. С. 90-100.
8. Сурикова Н.С., Литовченко И.Ю., Корзникова Е.А. Структурные превращения в монокристаллах никелида титана при интенсивной пластической деформации // Вестник Тамбовского университета. Серия: Естественные и технические науки. 2013. Т. 18, № 4-2. С. 1966-1967



## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ФУЛЛЕРЕНОВ НА СМАЗОЧНЫЕ СВОЙСТВА МОТОРНОГО МАСЛА

А.В. Михеев<sup>1</sup>, М.А. Тананов<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Институт машиноведения им. А.А.Благонравова РАН, Москва, Россия;

[Alexmichdm@gmail.com](mailto:Alexmichdm@gmail.com)

Представлены экспериментальные исследования триботехнических характеристик моторных масел с фуллереновыми добавками. Испытания проводились на модернизированном вертикально-реверсивном стенде ВРС-1. Полученные данные позволили определить влияние концентрации фуллеренов на коэффициент трения, при граничном режиме трения.

Основной характеристикой смазки является способность снижать трение между трущимися элементами. Характеристикой, определяющей антифрикционные свойства, является коэффициент трения. Данный показатель напрямую характеризует энергетические затраты на холостой привод механизмов. На трибологические и эксплуатационные характеристики смазочного материала значительное влияние оказывают присадки. В настоящее время большой интерес вызывает применение нанокремниевых присадок (фуллеренов C<sub>60</sub>) [1].

Для исследования использовались полусинтетическое моторное масло Mobil Ultra 10W-40 с добавкой наноразмерных частиц. Данный материал использовался как смазочная композиция. Использовался порошок фуллеренов C<sub>60</sub> (99,9%) производства Merck KGaA (г. Дармштадт, Германия). Процентное содержание добавки варьировалось. Максимальное содержание присадки в моторном масле не превышало 2 %. Смазочную композицию, представляющую собой масляную суспензию фуллерена получали путем многократной обработки масляно-фуллереновой системы на ультразвуковом диспергаторе.

В работе [2] Приведены результаты испытаний масла с добавкой фуллеренов при трении скольжения по схеме плоскость – цилиндр. Эта схема редко встречается на практике и отличается малым значением площади контакта. Для анализа применимости углеродных присадок в технике больше подходит схема плоскость - плоскость.

### Материалы и методы исследований

Для определения свойств смазки был применён модернизированный вертикальный реверсивный стенд. Стенд позволяет задавать нагрузку, частоту рабочих ходов и амплитуду перемещений. Во время испытаний производится непрерывное измерение силы трения и нормальной нагрузки с записью результатов в цифровой форме. Предусмотрена возможность контроля размерного износа образцов.

Испытания производились по схеме плоскость-плоскость. Подвижный образец в форме параллелепипеда совершает возвратно-поступательные перемещения, а два неподвижных образца прижаты с заданной нормальной нагрузкой к боковым граням подвижного. Эскизы образцов и схема нагружения показаны на рисунке 1.

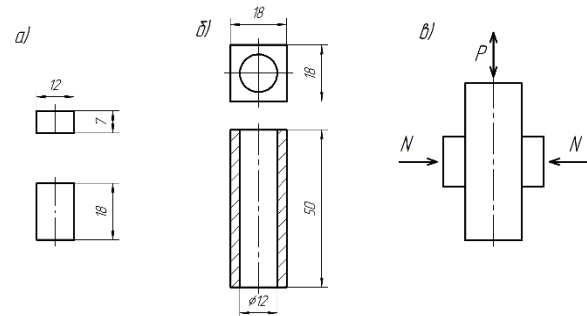


Рисунок 1: а – неподвижный образец, б – подвижный образец, в – схема нагружения.

Конструкция стенда показана на рисунке 2. Подвижный 1 образец приводится в движение при помощи штока 10 установленного в направляющих скольжения. Шток связан с кривошипно-ползунным механизмом, состоящим из ползуна 11, направляющих 12, шатуна 13 с сферическими подшипниками 14, коленчатого вала 15 и эксцентрика 16. Коленчатый вал установлен в шарикоподшипниках 17 и получает вращения от электродвигателя через клиноременную передачу (шкив 18 и ремень 19). Величина хода штока регулируется перемещением эксцентрика в пазах фланца коленчатого вала. При работе эксцентрик фиксируется установочными винтами. Сферические подшипники в шатуне компенсируют неперпендикулярность оси вала к плоскости ползуна. Неподвижные образцы 2 установлены в держателях 3, оснащенных сферическими шарнирами для обеспечения самоустановки по плоскостям подвижного образца. Нормальная нагрузка на неподвижные образцы создается при помощи пружины 8 через рычаги 7, оси 6 и тензобалки 4. На тензобалках с четырёх сторон размещены резистивные тензодатчики 5. Необходимое сжатие пружины создается винтовой передачей. Горизонтальные тензодатчики измеряют силу трения, вертикальные – нормальную нагрузку. Для передачи сил реакций с образцов на основание 24 применены радиально-упорные подшипники скольжения. Величина износа определяется индикатором часового типа по изменению расстояния между рычагами. Частота вращения определяется датчиком 21, подсчитывающем прорези в диске 21, закреплённом на шкиве. Число рабочих ходов подсчитывается датчиком 23, реагирующим на пластину 21, закреплённую на валу.

При работе стенда скорость перемещения изменяется по синусоидальному закону.

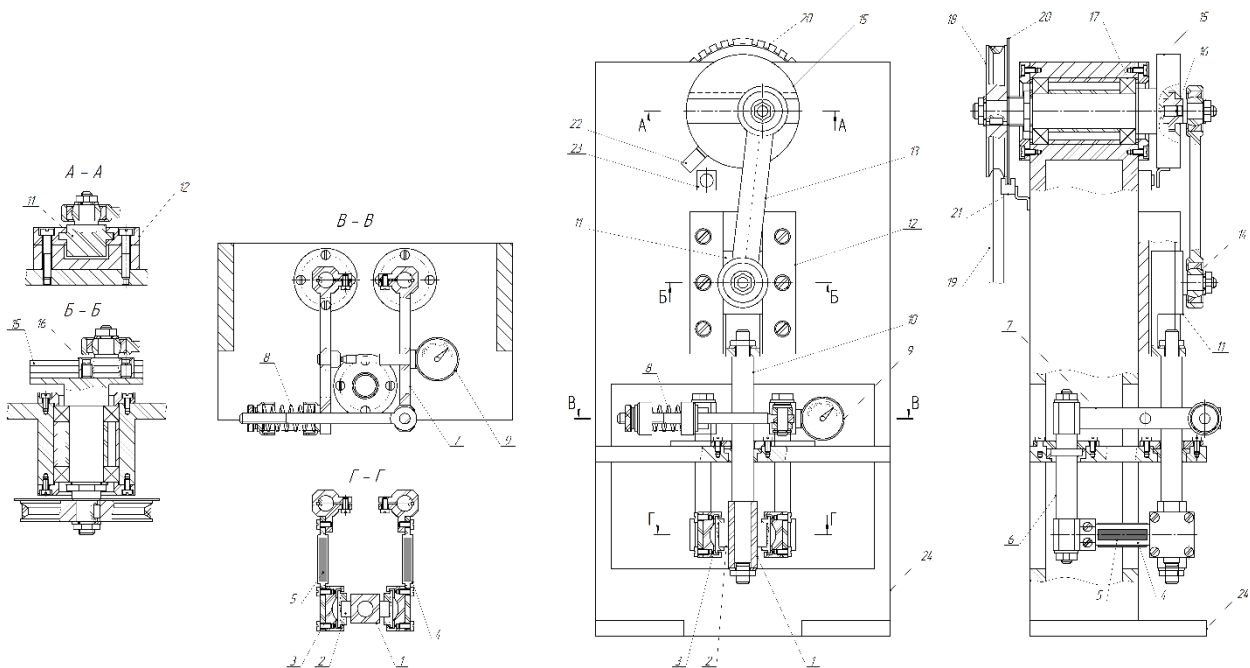


Рис. 2 – конструкция стенда ВРС-1. Обозначения на рисунке: 1 – подвижный образец; 2 – неподвижный образец; 3 – держатель; 4 – тензобалка; 5 – тензодатчик; 6 – ось держателя; 7 – рычаг; 8 – пружина; 9 – индикатор часового типа; 10 – шток; 11 – ползун; 12 – направляющая; 13 – шатун; 14 – сферический подшипник; 15 – коленвал; 16 – эксцентрик; 17 – шарикоподшипник; 18 – шкив; 19 – клиновидный ремень; 20 – диск с пазами; 21 – датчик частоты вращения; 22 – пластина; 23 – датчик числа циклов; 24 – основание.

Блок-схема ВРС-1 показана на рисунке 3. Вал приводится во вращение двигателем постоянного тока, подключенного к тиристорному приводу, осуществляющему плавный запуск и регулировку частоты вращения. Для стабилизации оборотов применена обратная связь по ЭДС двигателя. Фактическое значение частоты вращения определяется по частоте импульсов оптического датчика при помощи электронносчётного частотомера. Число циклов подсчитывается программируемым счётчиком по импульсам, приходящим от второго оптического датчика на

кривошипно-ползунном механизме. При достижении заданного числа ходов счётчик вырабатывает сигнал отключения электропривода. Сила трения и нормальная нагрузка измеряются резистивными тензодатчиками, включенными по схеме «полный мост». Сигналы тензодатчиков усиливаются и переводятся в цифровую форму многоканальным модулем LTR212, подключенным к компьютеру (ПЭВМ) с программным обеспечением L-Graph2, производящем построение графиков и запись результатов в файл в табличной форме.

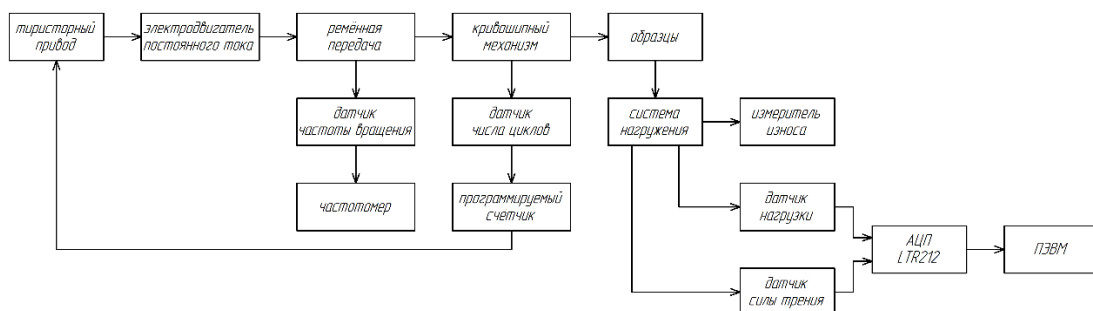


Рис. 3 – блок-схема испытательного стенда

Для сравнения и оценки разработанных присадок были исследованы зависимости коэффициента трения от приложенной нагрузки и концентрации фуллеренов. Коэффициент трения получен методом тестирования пар трения на специальной машине трения с возвратно-поступательным перемещением.

Параметры образцов:

- Материал неподвижных образцов – низкоуглеродистая сталь 10, подвижного образца углеродистая сталь 45;
- Твёрдость неподвижных образцов 24 HRC, подвижного – 42HRC;
- Шероховатость всех образцов Ra1,6мкм.

Режим испытаний:

- Линейная скорость перемещения – 16 м/мин;
- Амплитуда перемещения – 11мм;
- Частота возвратно-поступательных перемещений – 730 двойных ходов/мин;
- Время испытаний во всех случаях - 5мин;
- Нормальная нагрузка: 18Н и 72Н.

Нагрузки и скорость выбраны из условия получения граничного режима трения. Для исключения влияния помех, погрешностей измерения и неточности изготовления образцов каждое испытание было

проведено по 4 раза с последующим усреднением результатов.

### Результаты

Измеренные величины силы трения представлены в таблице 1. В таблице 2 и графике на рисунке 4 отражена полученная зависимость коэффициента трения от концентрации присадки и нагрузки. На всех образцах доступный для измерения размерный и массовый износ отсутствовал.

Таблица 1 - Сила трения [Н] в зависимости от нагрузки и содержания фуллеренов

Нагрузка, Н	Содержание фуллеренов, %					
	0	0,1	0,2	0,6	1	2
18	2,22	1,91	1,82	1,6	1,15	1,46
72	7,91	6,89	4,59	5,36	6,12	7,65

Таблица 2 – Коэффициент трения в зависимости от нагрузки и содержания фуллеренов

Нагрузка, Н	Содержание фуллеренов, %					
	0	0,1	0,2	0,6	1	2
18	0,111	0,095	0,091	0,088	0,057	0,073
72	0,11	0,096	0,064	0,076	0,085	0,106

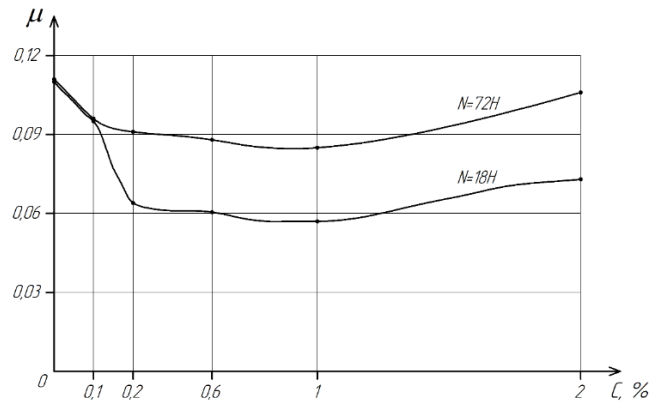


Рис. 4 – график зависимости коэффициента трения от содержания фуллеренов

### Выводы

Анализируя представленные зависимости, можно сделать вывод, что введение в качестве присадки к полусинтетическому моторному маслу фуллеренов приводит к снижению коэффициента трения смазочного слоя в диапазоне исследованных концентраций. При этом максимальное снижение коэффициента трения и температуры характерно для концентрации фуллеренов 1%. Дальнейшее увеличение концентрации присадки вызывает повышение коэффициента трения. Нелинейная зависимость подтверждает результаты, полученные в статье [3].

1. Войтов В.А., Кравцов А.Г., Цымбал Б.М. Оценка триботехнических характеристик трибосистем при наличии фуллеренов в смазочном материале // Трение и износ. 2020. № 6 (41). Р. 704.
2. Тохметова А.Б., Михеев А.В., Тананов М.А. Исследование трибологических свойств моторного масла с содержанием фуллеренов // Проблемы машиностроения и надёжность машин. 2022. №4. с. 108.
3. Гиндзбург Б. М., Байдакова М. В., Киреенко О. Ф. [и др.]. Влияние фуллеренов С60, фуллереновых саж и других углеродных материалов на граничное трение скольжение металлов // Журнал технической физики. — 2000 (70), № 12, 87—97.



уменьшением времени контакта пуансона с горячим металлом. На основании проведенных исследований при штамповке выдавливанием поковок с глубокими полостями рекомендуется использовать предварительное выдавливание полости на глубину 0,3-0,5 от глубины полости готовой поковки.

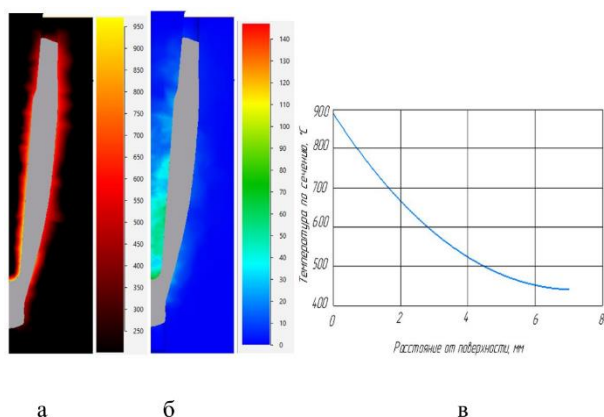


Рис. 3. Распределение температуры (а, в) и среднего напряжения (б) по сечению и на поверхности основания прошивного пуансона на третьем переходе

### Заключение

1. Разработан технологический процесс горячей штамповки поковок с глубокими полостями и обратным конусом типа оправок косовалковых

прошивных станов за 4 перехода.

2. Выполнено цифровое моделирование и определены оптимальные параметры технологических переходов разработанного процесса горячей штамповки оправок. Определены силовые параметры процесса по переходам.

3. Полученные результаты свидетельствуют о возможности использования в промышленности технологии горячей объемной штамповки оправок прошивных станов.

1. Власов А.В., Биба Н.В., Стебунов С.А. и др. Опыт использования QFormDirect для проектирования предварительных переходов при горячей объемной штамповке // Заготовительные производства в машиностроении. 2022. Т. 20. № 11. С. 501–506.
2. Myshechkin A.A., Yusupov V.S., Preobrazhenskaya E.V. et al. Simulation of the Hot Forging Process of Mandrels for Piercing Mill // Steel in Translation. 2022. Vol. 52. No. 10. P.974–978.
3. Мышечкин А.А., Кравченко И.Н., Зуев В.В. и др. Исследование и выбор оптимальных параметров процесса горячей объемной штамповки поковки типа «крестовина» путем моделирования в программном комплексе QForm // Технология металлов. 2022. № 9. С. 27–35.
4. Мышечкин А.А., Юсупов В.С., Скрипник С.В. Определение оптимальных параметров процесса горячей объемной штамповки оправки прошивного стана моделированием в программе QFORM// Прокатное производство. Приложение к журналу "Технология металлов". 2023. № 21. С. 9-16.

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ГИБРИДНЫХ ПОДШИПНИКОВ ЖИДКОСТНОГО ТРЕНИЯ

Т.Х. Нгуен, Ю.Н. Казаков, А.В. Поликарпов

<sup>1</sup>Орловский государственный университет им. И.С. Тургенева, Орел, Россия; havcn@mail.ru

Проведен анализ особенностей гибридных и комбинированных опор ротора. Рассмотрены классификации гибридных подшипников жидкостного трения. Учтены конструктивные схемы, формирование поля давления в жидкостных подшипниках с коническими и цилиндрическими опорными поверхностями. Разработаны математическая модель и алгоритм расчета гидродинамического давления в цилиндро-коническом смазочном слое подшипника при осевом нагнетании масла. Приведены конструктивные схемы, математические модели и результаты расчета поля давления, максимального давления, грузоподъемности, энергетических характеристик гибридных подшипников.

### Введение

Гибридные цилиндрические конические подшипники скольжения вызывают большой интерес в высокотехнологичных приложениях, таких как высокоскоростные компрессоры и высокопроизводительные насосные системы. Применение этого типа подшипника может помочь уменьшить габариты, снизить потери энергии и улучшить производительность машины. Однако исследования и практическое применение этого типа подшипников пока ограничены [1]. Поэтому в этой статье основное внимание уделяется построению подробной расчетной модели, проведению имитационных экспериментов и анализу результатов, чтобы лучше понять характеристики конических цилиндрических гибридных подшипников скольжения.

### Модель

Рассмотрим математическую модель, рассчитывающую поле давления в смазочном слое и интегральные характеристики гибридных конических роликоподшипников методом распознавания гидростатической нагрузки. На рис. 1 показана простая модель цилиндрического конического подшипника скольжения, в которой подшипник имеет длину  $L$ , а длины цилиндрической и конической частей равны  $B_c$  и  $B_k$  соответственно. Где  $r_1$  — малый радиус конической части подшипника,  $r_2$  — радиус цилиндрической части подшипника, соединенной с конической частью.  $h_0$  — начальный радиальный зазор. Два радиуса гибридного подшипника скольжения  $R_2=r_1+h_0$  и  $R_1=r_1+h_0$ . Вал вращается внутри подшипника с постоянной угловой скоростью. Поток жидкости между валом и подшипником моделируется в цилиндрических координатах, где  $r, \varphi, z$  — радиальная, угловая и осевая координаты соответственно [3,4].

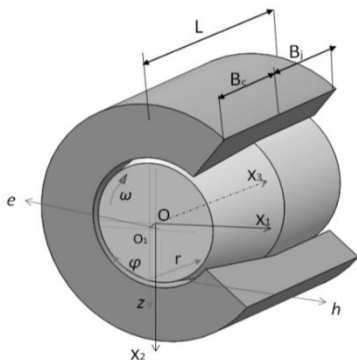


Рис. 1. 3D модель подшипника и вала

Одной из особенностей разработанной математической модели является то, что базовое уравнение для расчета давления может быть использовано как для конических роликоподшипников, так и для цилиндрических роликоподшипников с нулевым углом конусности. В модели использованы широко принятые в теории гидродинамической смазки допущения, в частности, смазка представляет собой смазку. Ньютоновская жидкость с изотропными свойствами, толщина слоя опорной смазки мала по сравнению с другими размерами смазочного подшипника, гладкая, что обеспечивает постоянство реологических свойств во всем подшипнике, изменения теплофизических свойств смазки в опорной пленке незначительны, центральная положение опоры вала во втулке фиксированное, режим течения смазки — многослойный. Эти условия позволяют использовать модифицированное уравнение Рейнольдса для расчета давления, которое для конических и цилиндрических подшипников в цилиндрических координатах имеет вид:

$$\frac{\partial}{\partial r} \left( r h^3 \frac{\partial p}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2 \sin^2 \alpha} \frac{\partial}{\partial \varphi} \left( h^3 \frac{\partial p}{\partial \varphi} \right) = 6\omega \mu \frac{\partial h}{\partial \varphi} \quad (1)$$

Функция зазора:

$$h(\varphi, r) = h_0 (1 - \varepsilon \cos \beta) \cos \alpha \quad )$$

$$\text{де } \beta = \frac{\varphi}{\sin \alpha}.$$

Когда  $\alpha=0$ , выражение (2) используется для расчета зазора в цилиндрическом подшипнике. Значения зазора и эксцентриситета в конической области (перпендикулярно опорной поверхности) и цилиндрической области считаем равными.

Модель подшипника скольжения проверена сравнением с расчетами других авторов. Результаты показывают, что была достигнута хорошая точность [2]. На рис. 2 показано поле давления жидкой мембраны с различными геометрическими и эксплуатационными параметрами.

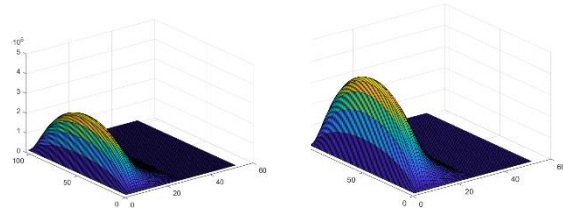


Рис. 2. Поле давления гибридного подшипника с различными рабочими параметрами и геометрией

На основе расчета поля давления можно определить интегральные характеристики цилиндрического

конического гибридного подшипника скольжения [2].  
Формула для расчета значения гидродинамической силы на соответствующих осях координат:

$$\begin{aligned} R_x &= \int_{r_1}^{r_2} \int_0^{\varphi_k} rp \sin \beta \cos \alpha d\varphi dr; \\ R_y &= \int_{r_1}^{r_2} \int_0^{\varphi_k} rp \cos \beta \cos \alpha d\varphi dr; \\ R_z &= \int_{r_1}^{r_2} \int_0^{\varphi_k} rp \sin \alpha d\varphi dr. \end{aligned} \quad (3)$$

Где  $r_1 = \frac{R_1}{\sin \alpha}$ ,  $r_2 = \frac{R_2}{\sin \alpha}$ .

Суммарную несущую способность составной опоры и несущую способность секций будем определять исходя из следующего выражения:

$$\begin{aligned} W_k &= \sqrt{R_{kx}^2 + R_{ky}^2 + R_{kz}^2}, \\ W_c &= \sqrt{R_{cx}^2 + R_{cy}^2}, \end{aligned} \quad .)$$

$$\begin{aligned} W_{sum} &= \sqrt{(R_{kx} + R_{cx})^2 + (R_{ky} + R_{cy})^2 + R_{kz}^2} \end{aligned}$$

где  $W_{sum}$  – общая несущая способность,  $W_k$  – несущая способность конической части,  $W_c$  – несущая способность цилиндрической части.

Далее, учитывая радиальное и осевое направления, существуют следующие формулы несущей способности:

$$\frac{W_{radial}}{(R_{kx} + R_{cx})^2 + (R_{ky} + R_{cy})^2}, W_{axial} = \sqrt{R_{kz}^2} = R_{kz} \quad 5)$$

Полный момент трения определяется как сумма моментов на коническом и цилиндрическом сечениях. Момент трения в смазке можно определить по формуле:

$$M_{mp} = \int_{r_1}^{r_2} \int_0^{\varphi_k} r \sin \alpha \frac{h}{2} \frac{\partial p}{r \partial \varphi} r d\varphi dr. \quad 5)$$

Потери мощности на трение определяются по формуле:

$$\Delta N = M_{mp} \omega \quad 7)$$

$$M_{mp} = M_{mp\_k} + M_{mp\_c}$$

где

## Результаты и обсуждение

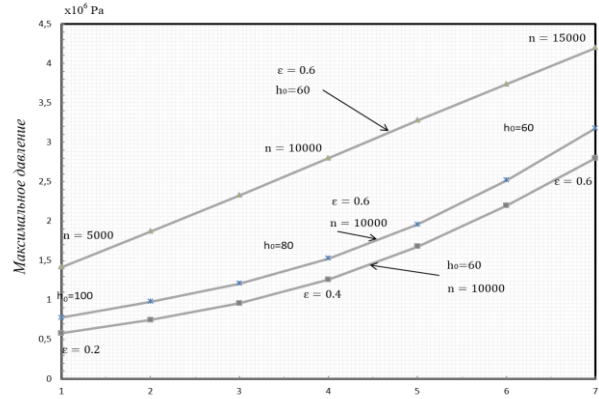


Рис. 3. Максимальное давление гибридного подшипника с различными параметрами

Как видим, максимальное давление для указанных выше переменных показано на рисунке 3. Прямая имеет фиксированное значение  $h_0=60$  мкм,  $\epsilon=0,6$ , а скорость вращения оси  $n$  постепенно увеличивается от 5000 до 15000 об/мин. Максимальное давление также линейно пропорционально. Подобно фиксированной линии  $h_0=60$  мкм и  $n=10000$  об/мин, при постепенном увеличении значения относительного эксцентриситета  $\epsilon$  от 0,2 до 0,6 видно, что максимальное давление также увеличивается. При начальном значении радиального зазора, уменьшающемся со 100 до 60 мкм, при фиксированных эксцентриситете и скорости вращения мы имеем постепенно увеличивающееся максимальное давление.

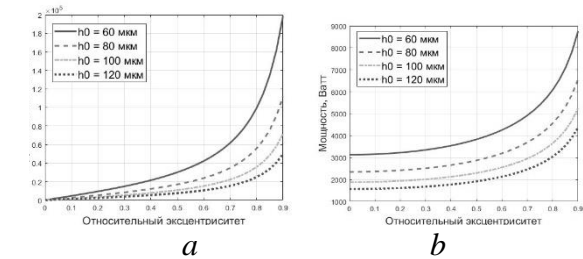


Рис. 4. – Зависимость грузоподъемности и потерь мощности от относительного эксцентриситета при разных зазорах

Зависимость радиальной грузоподъемности и потерь мощности гибридного конического подшипника от различных значений контролируемых параметров представлена на рисунке 4. Радиальная грузоподъемность подшипника увеличивается с увеличением относительного эксцентриситета. Нелинейный характер этого эффекта более выражен при значениях эксцентриситета больше 0,7. График включает четыре линии зависимости несущей способности от эксцентриситета, каждая линия соответствует разному среднему расстоянию (от 60 мкм до 120 мкм с шагом 20 мкм). Аналогичная зависимость характерна для потерь мощности в опорной колонне (рис. 4, б). Зависимость радиальной грузоподъемности и потерь мощности гибридного конического подшипника от различных значений контролируемых параметров представлена на рисунке 8-10. Радиальная несущая способность подшипника увеличивается по мере увеличения относительного

эксцентриситета. Нелинейный характер этого эффекта более выражен при значениях эксцентриситета больше 0,7. Аналогичная зависимость характерна для потерь мощности в опорной колонне (рис. 4, б). Отметим, что при работе с относительными эксцентриситетами, превышающими значение 0,8, возможен переход от жидкостного трения к граничному трению, что будет сопровождаться повышенным износом.

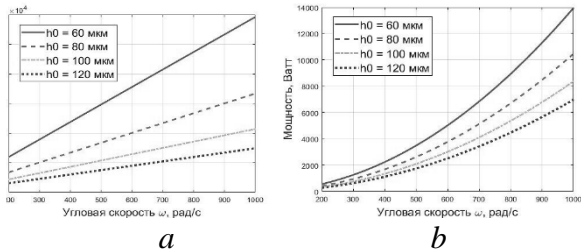


Рисунок 5 – Зависимость несущей способности и потерь мощности от угловой скорости при различных значениях зазора

На рис. 5а представлена зависимость несущей способности от угловой скорости ротора при различных значениях среднего зазора. Диаграмма охватывает диапазон скоростей от 200 до 1000 радиан в секунду. Обратите внимание, что зависимость между грузоподъемностью и угловой скоростью ротора линейна. При этом чем меньше значение среднего расстояния, тем быстрее увеличивается грузоподъемность в зависимости от скорости. На рис. 5б показана зависимость потерь мощности от угловой скорости: чем выше угловая скорость, тем сильнее потери на трение, эта зависимость нелинейна.

### Заключение

В данной статье на основе обобщенного модифицированного уравнения Рейнольдса представлены характеристики гидродинамических конических цилиндрических гибридных подшипников скольжения. Кроме того, после математического моделирования поля

давления были выполнены расчеты несущей способности и рассеяния энергии за счет трения. Полученные результаты показывают существенную зависимость несущей способности и энергии, рассеиваемой при трении в смазочном слое, от частоты вращения, размера подшипника, типа жидкости, радиального зазора и степени несостности положения центра опоры вала.

Объединение осевой и радиальной нагрузки в одном подшипниковом узле дает ряд преимуществ: компактный размер, простая система охлаждения и смазки, повышенная несущая способность и повышенная энергоэффективность. Наша модель, подтвержденная экспериментальными данными, показывает, что гибридные подшипники способны выдерживать значительные нагрузки в различных условиях эксплуатации, что демонстрирует их применимость в сложных условиях, требующих одновременной передачи радиальных и осевых усилий.

1. Марахин Н.А., Нгуен Тхай Ха, Лю Ифань, Казаков Ю.Н., Савин Л.А./ Гибридные Подшипники Жидкостного Трения/ Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии/ № 6 (362) 2023/ с. 35
2. Нгуен Тхай Ха/ Влияние структурных параметров на формирование полей гидродинамических давлений в радиально-упорных подшипниках жидкостного скольжения/ Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии DOI: 10.33979/2073-7408-2024-367-5-44-51/ с. 41.
3. Korneev A.Yu. Steady Characteristics of the Water-Lubricated Conical Bearings / S.B. Li, H.R. Ao, H.Y. Jiang, A.Yu. Korneev, L.A. Savin // Journal of Donghua University (English Edition), 2012, 29(2), pp. 115 – 122 (Scopus).
4. W.M. Hannon and M.J. Braun Numerical Solution of a Fully Thermally Coupled Generalized Universal Reynolds Equation (GURE) and its Application. Part 1: Conical Bearing / W.M. Hannon and M.J. Braun // Tribology Transactions – 2007, doi:10.1080/10402000701631742 (2007).
5. Korneev, A.Yu., Savin, L.A., and Solomin, O.V., Konicheskie podshippniki zhidkostnogo treniya (Conical Liquid\_Friction Bearings), Moscow: Mashinostroenie\_1, 2008.
6. Solomin, O.V. and Korneev, A.Yu., Numerical Determination of the Pressure Field in Conical Liquid\_Friction Bearings, Vestn. Mashinostr., 2005, no. 8, pp. 46–50.



## ФОРМИРОВАНИЕ СТРУКТУРЫ И МАГНИТНЫХ СВОЙСТВ МАРТЕНСИТНОСТАРЕЮЩЕЙ СТАЛИ 21НКМТ В ПРОЦЕССЕ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ

Нефёдкин Д.Ю. \*, Севальнёв Г.С.

Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Национального исследовательского центра «Курчатовский институт», Москва, Россия. \*[d.nefedkin@mail.ru](mailto:d.nefedkin@mail.ru)

Исследовано влияние этапов термической обработки на магнитные свойства и зёрненную структуру мартенситностареющей стали 21НКМТ. Значения коэрцитивной силы предположительно могут быть использованы для оценки магнитомеханической составляющей внутреннего трения. Установлено, что более мелкодисперсная структура на образцах приводит к повышению коэрцитивной силы образцов, а также понижению индукции насыщения.

### Введение

При создании упругих чувствительных элементов, формирующих систему упругих колебаний, отдельным критерием оценки является способность выбранного материала рассеивать энергию упругих колебаний – внутреннее трение материала. В частности, при создании резонаторов твёрдотельных волновых гироскопов (ТВГ), применяемых в инерциальных средствах навигации, внутреннее трение материала вносит значительный вклад в формирование добротности механических колебаний ( $Q$ ) – основного критерия работоспособности резонатора [1; 2].

Внутренним трением называется способность материала рассеивать энергию упругих колебаний и переводить ее в тепловую энергию. Внутреннее трение, как механизм демпфирования шума и вибрации, был изучен в ряде работ [3, 4]

Согласно классификации, приведенной в работе [5], в сталях основное влияние на способность рассеивать механические колебания оказывают два механизма внутреннего трения: магнитомеханический и микропластический.

Магнитомеханический механизм основан на затуханиях упругих колебаний за счёт необратимого смещения стенок доменов. Согласно исследованию, представленному в работах [6; 7], магнитомеханическая составляющая рассеяния колебаний имеет корреляцию с магнитными свойствами ферромагнетика и прямо зависит от структуры и фазового состава сплава. Так, спинодальный распад, протекающий при медленном охлаждении сплава, препятствует перемещению доменных стенок, чем повышает коэрцитивную силу, что приводит к уменьшению внутреннего трения.

Микропластическая составляющая внутреннего трения основана на рассеянии упругой деформации за счёт возникновения очагов микропластической деформации. Данный механизм рассеяния упругих колебаний изучен в ряде работ, посвященных разработке и изучению сплавов высокого демпфирования [8; 9].

Описанные выше механизмы были подробно изучены на конструкционных сталях, а также на бинарных Fe-Cr и Fe-Al сплавах с целью повышения демпфирующей способности для поглощения шума и вредных вибраций. На материалах, применяемых

в производстве резонаторов ТВГ, формирование внутреннего трения и степень влияния различных механизмов демпфирования колебаний изучены не были.

Для производства резонаторов ТВГ применяется мартенситностареющая сталь 21НКМТ системы Fe-Ni-Co-Mo-Ti. Стали данной системы легирования активно применяются в авиационном машиностроении благодаря высоким прочностным и технологическим свойствам [10]

Также благодаря высокому содержанию никеля и кобальта и применению специальной термической обработки сталь 21НКМТ приобретает высокие упругие и близкие к элинварным низкие температурные коэффициенты модуля упругости и частоты [11; 12], благодаря которым сталь 21НКМТ нашла своё применение в производстве резонаторов ТВГ.

Поскольку сталь 21НКМТ также проявляет ферромагнитные свойства и в процессе термомеханической обработки приобретает сложную поликристаллическую структуру, внутреннее трение данной стали может оказывать значительное влияние на добротность механических колебаний резонатора ТВГ.

Поэтому измерение степени магнитомеханической и микропластической составляющих внутреннего трения позволит провести сравнительную оценку и прогноз величины внутреннего трения полуфабриката стали 21НКМТ, а также влияния отдельных параметров материала на добротность механических колебаний резонатора ТВГ.

### Материалы и методы

В качестве материала исследования были взяты прутки из стали 21НКМТ после горячей деформации.

Термическая обработка проводилась по основному для изготовления резонаторов ТВГ режиму: закалка с 950 °С, обработка холодом и старение 600 °С [13].

Также был предложен экспериментальный режим термической обработки: закалка с температуры Ac3+20 °С, обработка холодом и старение при 600 °С

Металлографический анализ заключался в обработке изображения методом монохроматической бинаризации с помощью программного обеспечения с открытым исходным кодом ImageJ (Рис. 1).

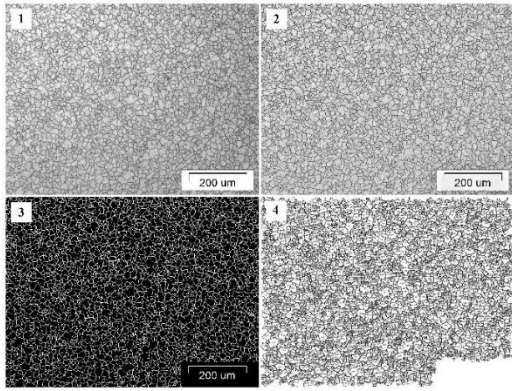


Рис. 1. Обработка изображения методом монохроматической бинаризации в программном обеспечении ImageJ

Измерение магнитных свойств проводилось на кольцевых образцах методом циклического намагничивания в постоянном магнитном поле по методике, представленной в ГОСТ 8.377 (Рис. 2).

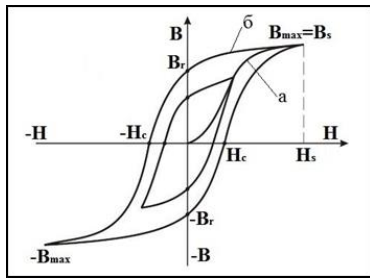


Рис. 2. Зависимость индукции  $B$  от напряженности магнитного поля  $H$ : а - основная кривая намагничивания, б – семейство петель гистерезиса с предельной петлей

Магнитные характеристики были получены на каждом этапе основного и экспериментального режима термической обработки.

### Результаты и их обсуждение

В результате металлографического анализа были определены средние размеры зёрен:  $13,7 \pm 6,1$  мкм после горячей деформации,  $21,7 \pm 9,8$  мкм после закалки с  $950$  °С и  $15,8 \pm 7,1$  мкм после закалки с  $A_{c3}+20$  °С. Плотность распределения размеров зёрен представлена на рис. 3

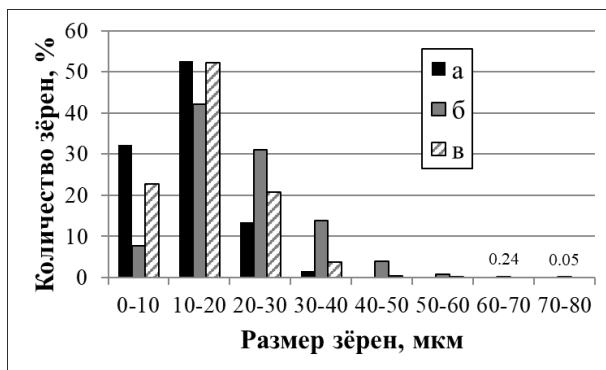


Рис. 3. Плотность распределения размеров зёрен после горячей деформации (а), закалки с  $950$  °С (б) и закалки с  $A_{c3}+20$  °С (в)

В процессе выдержки перед закалкой с  $950$  °С происходит рекристаллизация с увеличением среднего размера зерна за счёт роста зёрен  $20-50$  мкм (рис. 3, б).

Снижение температуры закалки до  $A_{c3}+20$  °С приводит к замедлению процесса рекристаллизации и сохранению структуры высокой дисперсности после горячей деформации. Средний размер зерна меняется незначительно.

Результаты магнитных измерений представлены на рис. 4 и 5.

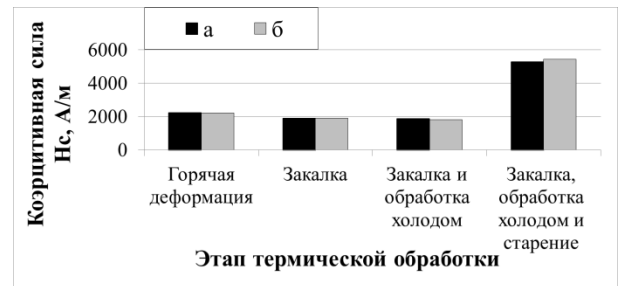


Рис. 4. Коэрцитивная сила  $H_c$  образцов стали 21НКМТ на каждом этапе основного (а) и экспериментального (б) режимов ТО

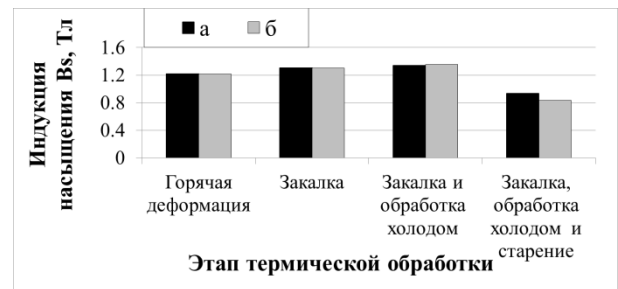


Рис. 5. Индукция насыщения  $B_s$  образцов стали 21НКМТ на каждом этапе основного (а) и экспериментального (б) режимов ТО

Анализ изменения коэрцитивной силы  $H_c$  и индукции насыщения  $B_s$  в процессе термической обработки даёт представление об изменении фазового состава на разных ее этапах. Снижение коэрцитивной силы и повышение индукции насыщения на этапах закалки и обработки холодом можно объяснить повышением процентного содержания мартенситной фазы. При этом в результате закалки с температуры  $950$  °С и с температуры  $A_{c3}+20$  °С в стали 21НКМТ формируется структура с одинаковым фазовым составом, о чем говорят одинаковые значения магнитных свойств.

При старении наблюдается резкий рост коэрцитивной силы и снижение индукции насыщения. В процессе старения при температуре  $600$  °С происходит обратный  $\alpha$ - $\gamma$  переход и образование реверсивного аустенита, что, в свою очередь, приводит к снижению магнитной фазы, что объясняет снижение индукции технического насыщения. Повышение коэрцитивной силы же говорит о том, что образовавшийся реверсивный аустенит препятствует смещению стенок доменов.

При этом, снижение температуры закалки до  $A_{c3}+20$  °С способствует сохранению более

мелкозернистой структуры, что также снижает подвижность стенок доменов. При этом, это может быть связано как с увеличением плотности дефектов, чем являются границы зёрен, так и с более активным выделением реверсивного аустенита, поскольку вместе с увеличением коэрцитивной силы также происходит снижение индукции насыщения на 10 %, что свидетельствует о снижении доли магнитной фазы.

1. Распопов В.Я., Волчихин И.А., Волчихин А.И. и др. Волновой твердотельный гироскоп с металлическим резонатором. Под ред. В.Я. Распопова. – Тула : ТулГУ. 2018. – 189 с.
2. X. Xi, Y. L. Wu, D. B. Xiao, Y. M. Zhang, X. Z. Wu A New Metallic Coriolis Vibratory Gyroscope (CVG) with Multiple-shell Structure // Inertial Sensors and Systems, Karlsruhe, Germany, 2016 1-10 P.
3. A.K. Mohamed, M.Yu. Zadorozhnyy, D.V. Saveliev, I.B. Chudakov, I.S. Golovin Damping capacity, magnetic and mechanical properties of Fe-18Cr alloy // Journal of Magnetism and Magnetic Materials 494 (2020) 165777
4. А.В. Иванов, М.Н. Письмаров, А.А. Куфтин Исследования демпфирующих свойств конструкционных металлических материалов для защиты бортовой аппаратуры// Известия ТулГУ. Технические науки. 2019. Вып. 8 С.304-311
5. С.А. Головин, А. Пушкар, Д.М. Левин Упругие и демпфирующие свойства конструкционных металлических материалов //М.: Металлургия, 1987 г. 190 с.
6. A.K. Mohamed, M.Yu. Zadorozhnyy, D.V. Saveliev, I.B. Chudakov, I.S. Golovin Damping capacity, magnetic and mechanical properties of Fe-18Cr alloy // Journal of Magnetism and Magnetic Materials 494 (2020) 165777
7. L. Duan, D. Pan, H. Wang, J. Wang, Investigation of the effect of alloying elements on damping capacity and magnetic domain structure of Fe-Cr-Al based vibration damping alloys, Journal of Alloys and Compounds (2016), doi: 10.1016/j.jallcom.2016.10.297.
8. Xinbao Liu, Susumu Takamori, Yoshiaki Osawa, Fuxing Yin Low-temperature damping behavior of cast iron with aluminum addition // Journal of Materials Science 40 (2005) P.1773–1775
9. Потехин Б.А., Деревянкин Е.В. Демпфирующие свойства Fe-Cr-Al сталей и их применение // Демпфирующие металлические материалы. - Киров: КирПИ, 1991. - С.79.
10. Покровская Н.Г., Маркова Е.С., Шалькевич А.Б. Высокопрочные конструкционные мартенситостареющие стали в авиастроении// Авиастроение промышленность. 2014. №1. С. 24-28
11. Перкас М.Д., Струг М.Д., Русаненко В.В. Эливарные мартенситостареющие стали с высоким пределом упругости // МиТом, 1991-№8. с40-41
12. Молотилев Б.В. Прецизионные сплавы. Справочник. 2-е изд. /Б.В. Молотилев - М.: Металлургия , 1983, 439с.
13. В. Я. Распопов, А. В. Ладонкин, В. В. Лихошерст Конкурентоспособный волновой твердотельный гироскоп с металлическим резонатором // Мехатроника, автоматизация, управление, Том 19, № 12, 2018 с 777-787

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ РЕЖИМОВ 3D-ПЕЧАТИ И СПОСОБОВ ПОСТОБРАБОТКИ НА ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ИЗДЕЛИЙ, ИЗГОТОВЛЕННЫХ ИЗ ТЕРМОПЛАСТИЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ МЕТОДОМ 3D-ПЕЧАТИ

И.С. Нефёлов

ФГБОУ ВО «Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ)»,  
Москва, Россия; [ijjanefelov@yandex.ru](mailto:ijjanefelov@yandex.ru)

**Аннотация.** По технологии 3D-печати методом послойной экструзии термопластичного материала на подложку (FDM) в настоящее время изготавливается огромное число деталей различного назначения. К некоторым из этих деталей предъявляются особые эксплуатационные требования, касающиеся в том числе герметичности. В работе рассмотрены результаты исследований влияния параметров режима печати на герметичность изделий, напечатанных по технологии FDM. Представлены рекомендации по выбору параметров печати и ориентации детали в рабочей зоне 3D-принтера.

### Цель

Особенностями аддитивных технологий, чаще упоминаемых как 3D-печать, является возможность изготовления деталей сложной геометрической формы, изготовление которых традиционными методами производства было невозможным или экономически нецелесообразным. Также за счет технологических особенностей аддитивного производства возможно получать материал с нужной структурой, что позволяет получать определенные физико-механические свойства изделия в целом. Однако, помимо физико-механических свойств материала, важное значение имеют и эксплуатационные характеристики изделия, которые зависят в том числе от технологии изготовления [1,2].

Целью данного исследования является установление влияния режимов 3D-печати и способов постобработки на такие эксплуатационные свойства как герметичность и химическая стойкость к различным агрессивным средам.

### Материалы и методы

Для испытаний на герметичность были изготовлены образцы габаритными размерами 30×30 и толщиной (1, 2, 3 мм) с различными режимами 3D-печати. 3D-печать осуществлялась в вертикальном и горизонтальном положении образцов. В качестве материала использовались ABS и GFmax (PETg+12%GF) пластики. Изменяемыми параметрами режима печати являлись высота слоя (0,1; 0,2; 0,3 мм), процент заполнения (10%, 50%, 100 %) и количество линий в структуре стенки образца (1, 2, 3).

Образцы размещались в специально изготовленной оснастке и закреплялись при помощи прижимной крышки. Таким образом закрепленный образец выполнял функцию одной из стенок герметичной камеры. В эту камеру подавался воздух от компрессора через дроссель с диапазоном значений давления от 0 до 0,8 МПа. Контроль давления в камере осуществлялся при помощи манометра. В центр стенки образца упирался наконечник индикатора часового типа для измерений деформации в зависимости от давления (рис. 1).

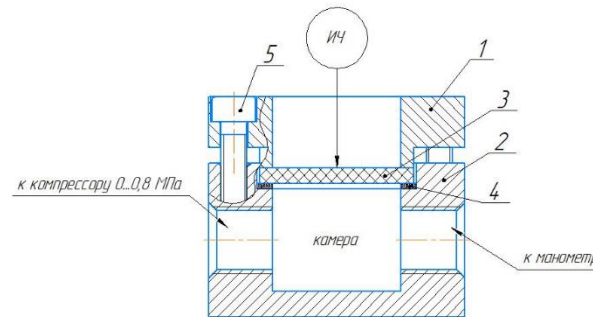


Рис. 1. Приспособление для проверки на герметичность:

1 – крышка; 2 – корпус; 3 – образец; 4 – уплотнительная прокладка; 5 – винты крепления крышки (4 шт.); ИЧ – индикатор часового типа

Нарушения герметичности образцов определялись по показаниям манометра (интенсивность падения давления в камере), а также визуально при наличии видимого дефекта. Для облегчения визуального контроля месторасположения дефекта, пространство, образуемое образцом и внутренними боковыми стенками крышки, заполнялось водой.

Испытания на химическую стойкость проводились над образцами с габаритными размерами 30×30×5, 10% заполнения и высотой слоя 0,1 мм. При печати образцы располагались вертикально, для того чтобы создать ярко выраженную слоистую структуру наружного слоя, характерную для деталей, изготовленных аддитивными технологиями. Толщина образца 5 мм и плотность заполнения внутренней структуры в 10% позволила создать образцы с пустотой внутри.

Изготовленные образцы из ABS и GFmax пластика подвергались различным способам постобработки: механической ручной абразивной, химической и нанесением лакокрасочного покрытия. Также были изготовлены контрольные образцы, которые не подвергались постобработке.

Механическая обработка образцов осуществлялась с поочередным использованием наждачной бумаги разной зернистости в порядке уменьшения зернистости: P240, P400, P1000. Это позволило достичь почти полного сглаживания всех слоев. Образцы из ABS пластика наиболее легко подвергаются механической обработке [3,4]. Для образцов из GFmax характерно перенесение абразивных частиц в

основной материал образца. При обработке наждачной бумагой необходимо контролировать усилие нажатия и интенсивность движений, чтобы не перегреть образцы из-за возникающих сил трения.

Химическая обработка термопластичных материалов после 3D-печати является одним из наиболее распространенных способов декоративной постобработки. Этот способ позволяет получать глянцевые поверхности для ABS пластика, а для других материалов сглаживать лицевые поверхности. Для различных пластиков применяются разные растворители. ABS пластик чаще всего обрабатывается ацетоном, а GFmax незначительно может быть обработан дихлорметаном [5,6,7]. Обработка образцов из ABS пластика осуществлялась в так называемой ацетоновой бане, и заключалась в выдержке образцов в герметичной таре с насыщенной подогретыми парами ацетона среде. Выдержка составляла 15 минут. Такой способ постобработки влияет на твердость поверхностного слоя материала []. Поэтому до и после выдержки в ацетоновой бане выполнялся контроль твердости дюрометрами Шора.

GFmax пластик в силу своего химического состава является весьма стойким к большинству растворителей. Дихлорметан является одним из немногих растворителей, который реагирует с PETg пластиком, составляющим основу GFmax. Однако с его помощью невозможно добиться такой глянцевой поверхности, как у ABS после ацетоновой бани. Нанесение дихлорметана осуществлялось кистью. Волоски кисти сглаживали слои пластика, немного размягченные растворителем.

Нанесение лакокрасочного покрытия является одним из наиболее распространенных способов защиты деталей от агрессивных сред [8]. Для пластмассовых деталей применяются специальные краски, имеющие хорошую адгезию к материалу. Образцы из ABS и GFmax предварительно механически обрабатывались для снижения шероховатости поверхности, затем обезпыливались и обезжиривались. После высыхания обезжиривателя осуществлялась покраска эмалью для пластиковых деталей.

Образцы, подвергшиеся нескольким видам постобработки, были помещены в различные агрессивные среды. Выбор агрессивных сред был обусловлен наиболее часто встречающимися жидкостями при эксплуатации машин: вода, бензин, моторное масло, тормозная жидкость и охлаждающая жидкость. Перед погружением образцов в емкости с агрессивными средами, они были взвешены и измерены их геометрические размеры. Выдержка образцов составила 30 суток. По окончании выдержки образцы были извлечены, просушены в течение суток, взвешены и измерены их геометрические размеры.

#### Результаты и их обсуждение

В ходе анализа результатов испытаний на герметичность было установлено, что наиболее прочные детали, выдерживающие давление 0,8 МПа и не имеющие проблем с герметичностью, возможно изготовить на следующих режимах 3D-печати:

- толщина образца 3 мм;
- высота слоя от 0,2 мм;
- 100 % заполнение структуры;

- минимум 3 линии в стенке детали.

Образцы с толщиной менее 3 мм деформируются до 1,2 мм при давлении 0,8 МПа. Уменьшение высоты слоя до 0,1 мм позволяет получить более сплошную структуру с минимальным количеством пор через которые может быть утечка воздуха. Процент заполнения оказывает влияние на деформацию образца под воздействием высокого давления только при толщине образца 3 мм и выше. Причем, следует отметить, что образцы толщиной 3 мм, 10% заполнением и напечатанные в вертикальной ориентации на столе 3D-принтера не выдержали полной нагрузки и разрушились при давлении менее 0,3 МПа, в то время как горизонтальные образцы выдержали 0,8 МПа.

Образцы из ABS пластика более хрупкие, чем из GFmax. Наиболее опасным дефектом для деталей, к которым предъявляются требования по герметичности, является недоэкструзия материала. В случае обнаружения недоэкструзии, такие детали следует однозначно выбраковывать, так как почти невозможно определить наличие недоэкструзии на внутренних слоях, только если не выполнять непрерывный видеоконтроль процесса 3D-печати.

Для наиболее ответственных деталей необходимо выполнять выходные испытания герметичности. Это позволит не допустить попадания в эксплуатацию деталей, имеющих скрытые дефекты и не соответствующие предъявляемым техническим требованиям.

По результатам проведенного испытания на изменение химической стойкости образцов из-за различных видов постобработки было установлено, что при отсутствии какой-либо постобработки возможна работа таких деталей в среде воды. Для деталей, которые в процессе эксплуатации контактируют с моторным маслом, лучше всего подходит химическая обработка. Этот способ обработки позволяет получить поверхностный однородный слой и заполнить поры, которые могли образоваться при 3D-печати. Это препятствует проникновению масла внутрь структуры детали. В среде охлаждающей жидкости можно применять метод окрашивания. Но следует внимательно подбирать материал детали, так как температура охлаждающей жидкости при аварийных ситуациях может достигать 120°C.

Для деталей, контактирующих с тормозной жидкостью, не подошел ни один из рассмотренных способов постобработки. Произошло проникновение тормозной жидкости в структуру всех образцов. При этом следует отметить, что для химически обработанных образцов из ABS пластика на поверхности появилась сетка из трещин поверхностного слоя.

Образцы из GFmax пластика не смог защитить ни один из способов постобработки от влияния моторного масла, тормозной и охлаждающей жидкости.

Лакокрасочный слой всех образцов, помещенных в тормозную жидкость, полностью сошел с материала образцов. Это может быть обусловлено низкой химической стойкостью самого лакокрасочного материала.

При выборе способов постобработки следует учитывать условия эксплуатации детали, а также

требования, предъявляемые к поверхностному слою детали. Немаловажное значение имеет материал детали. Правильно подобранные режимы 3D-печати также способны снизить количество дефектов, которые могут привести к ухудшению эксплуатационных свойств изделий.

Материал подготовлен в рамках научных исследований по проекту №FSFM-2024-0001.

1. Александров, И. О. Исследование зависимости прочности изделий, напечатанных с использованием аддитивных технологий, от степени заполнения при 3D-печати / И. О. Александров // Перспективные материалы и высокоэффективные процессы обработки : сборник материалов Всероссийской молодежной конференции, Саратов, 18–19 мая 2022 года. – Саратов: Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А., 2022. – С. 291-294.
2. ГОСТ 14254-2015 Степени защиты, обеспечиваемые оболочками (Код IP). – М.: Стандартинформ, – 2019. – 41 с.
3. Дворянкин, А. О. Применение технологий 3D-печати при изготовлении мастер-моделей в машиностроении / А. О. Дворянкин, Н. И. Баурова // Технология металлов. – 2021. – № 9. – С. 17-21.
4. Зверовщиков, А. Е. Исследование точности размеров, обеспечиваемых технологией 3D-печати / А. Е. Зверовщиков, Д. А. Шелахаев, С. А. Нестеров // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2019. – № 1(49). – С. 66-78.
5. Исследование программных способов корректировки дефектов послойного наплавления при печати на 3D-принтере / М. В. Ефременкова, Я. В. Полинако, С. А. Кизилов, М. С. Никитенко // Наука и инновационные технологии. – 2023. – № 1(26). – С. 104-111.
6. Моделирование и аддитивные технологии изготовления элементов корпусных конструкций мобильных систем / Е. Н. Лазарев, Д. К. Максудов, В. В. Янчук [и др.] // Материалы XXV научно-практической конференции молодых ученых, аспирантов и студентов Национального исследовательского Мордовского государственного университета : Материалы конференции. В 3-х частях, Саранск, 23–27 мая 2022 года / Сост. К.В. Родионова, отв. за выпуск А.М. Давыдкин. Том Часть 1. – Саранск: Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарёва, 2022. – С. 472-475.
7. Мочинский, А. В. Исследование зависимости прочности изделий, напечатанных с использованием аддитивных технологий, от степени заполнения при 3D-печати / А. В. Мочинский // Перспективные материалы и высокоэффективные процессы обработки : сборник материалов Всероссийской молодежной конференции, Саратов, 18–19 мая 2022 года. – Саратов: Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А., 2022. – С. 285-288.
8. Нефелов, И. С. Моделирование оптимальных параметров 3D-печати / И. С. Нефелов, Н. И. Баурова // Все материалы. Энциклопедический справочник. – 2022. – № 6. – С. 26-31.

## ИССЛЕДОВАНИЯ ПОЛУЧЕНИЯ ТОНКОДИСПЕРСНОЙ ЭМУЛЬСИИ НА ОСНОВЕ НЕСМЕШИВАЮЩИХСЯ ЖИДКОСТЕЙ С ПОМОЩЬЮ ВОЛНОВЫХ АППАРАТОВ

С.С. Панин<sup>1</sup>, Е.А. Брызгалов<sup>1</sup>, Н.И. Яковенко<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Институт машиноведения им. А.А.Благонравова РАН, Москва, Россия;

[panin.s.s@yandex.ru](mailto:panin.s.s@yandex.ru); [briz911@mail.ru](mailto:briz911@mail.ru); [nikiforyj@yandex.ru](mailto:nikiforyj@yandex.ru)

Исследована эффективность волновых воздействий, создаваемых с помощью, как проточных волновых установок, так и установок замкнутого типа на процессы тонкодисперсного эмульгирования сред, максимально отличных по плотностям.

### Цель

Целью работы являлось выявление параметров режимов волновых установок, при которых происходит получение наиболее тонкодисперсной эмульсии, состоящей из несмешивающихся жидкостей [1]. Для этого в качестве модельной жидкости была выбрана прямая эмульсия, состоящая из воды и индустриального масла без участия ПАВ.

### Методы

Для полной картины сравнения рассмотрены следующие установки обработки жидкостей различных принципов действия:

1. Замкнутая проточная система с волновой установкой СВ-4

Основным перемешивающим устройством системы является волновая установка СВ-4.

Лабораторная волновая установка СВ-4 является разновидностью новых волновых машин для обработки жидких сред (рис.1). Идея функционирования данного аппарата заключается в прохождении обрабатываемой среды между вращающимися и колеблющимися рабочими органами, имеющими специальную форму профиль, за счет чего достигается необходимый эффект её обработки.

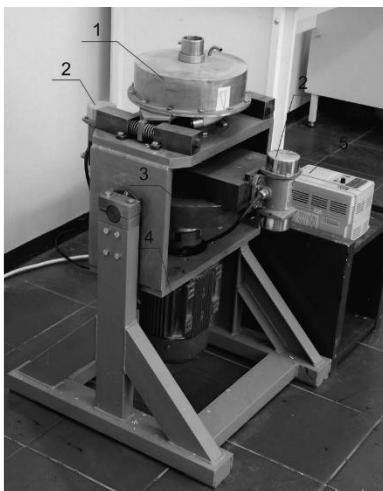


Рисунок 1. Лабораторная волновая установка СВ-4

Где 1- волновой реактор; 2 – двигатели дебалансного типа; 3 – упругий элемент; 4 –привод вращения; 5 – частотный преобразователь.

Дополнительно в СВ-4, наряду с колебательным, предусмотрен классический принцип воздействия на жидкость за счет вращающихся органов. В конструкцию установки заложена возможность как отдельного использования колебательного и

вращательного приводов, так и их одновременного сочетания.

2. Проточный кавитационный стенд (рис.2)



Рисунок 2. Проточный кавитационный стенд

Кавитационный механизм возбуждения колебаний в вихревом генераторе состоит в том, что с увеличением расхода жидкости, протекающей через генератор, растёт радиальный градиент давления, приводящий к снижению давления вблизи оси симметрии генератора и возникновению условий кавитации.

3. Трубка Вентури.

4. Ультразвуковой реактор

Установка предназначена для исследования кавитационных эффектов в жидкостях при воздействии высокочастотных ультразвуковых колебаний.

5. Роторный диспергатор. Типовое решение.

6. Лопастной смеситель. Типовое решение.

7. Колебательный сосуд с шарами

Представляет собой цилиндрический сосуд с металлическими шариками, установленный на вибростол. При работе совершает поступательные колебания в вертикальной плоскости, при этом происходит обработка помещенной внутрь сосуда среды за счет внутреннего трения и соударений об металлические шарики и стенки сосуда.

### Результаты и обсуждение

Получен суммарный график распределения размеров частиц дисперсной фазы в дисперсной среде для всех образцов (рис.3).

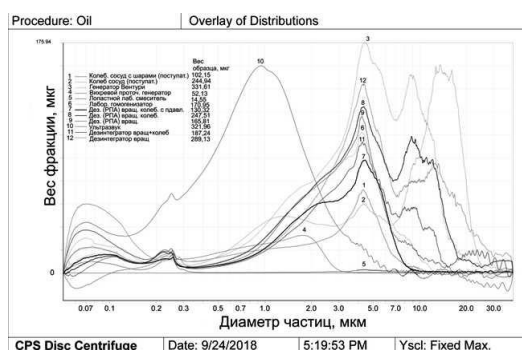


Рисунок 3. Распределение размеров частиц дисперсной фазы в дисперсной среде для всех образцов

Наилучший результат с точки зрения максимальной дисперсности частиц масла ( $\approx 1 \mu\text{м}$ ) показал образец, полученный в ультразвуковом реакторе (кривая 10). Это можно объяснить наибольшим количеством удельной энергии среди всех остальных методов перемешивания. Однако данный метод является наиболее энергозатратным и, что самое важное, наименее производительным из всех.

Хорошие результаты, с точки зрения баланса полученной дисперсности и производительности, показала обработка на вихревом проточном генераторе (кривая 4). Размер частиц эмульсии находится в диапазоне 2 мкм и менее, при практически полном

отсутствии частиц более 3 мкм. Особенностью данного генератора является высокие сдвиговые скорости течений в обрабатываемом потоке. К недостаткам данной обработки можно отнести малое полученное количество диспергированной массы за один проход.

Основной пик размеров частиц фракции масла для всех остальных образцов, характеризующийся значительным их весом, лежит в диапазоне 4,5-5 мкм. При этом максимальное значение этого пика у образца, полученного на кавитационном проточном стенде на генераторе Вентури (кривая 3).

Из полученных данных можно сделать вывод, что наибольшую эффективность показали методы, в которых: 1. обрабатываемая среда подвергается высокоинтенсивным высокочастотным акустическим воздействиям; 2. в обрабатываемой среде реализуются течения с высокими сдвиговыми скоростями потока, что хорошо согласуется с классической теорией эмульгирования [2].

1. Ганиев Р.Ф., Ганиев С.Р., Касилов В.П., Пустовгар А.П. Волновые технологии в инновационном машиностроении – Ижевск: R&C Dynamics – 2012 г. – 92с.
2. Ребиндер П.А. Избранные труды. Поверхностные явления в коллоидных системах. Коллоидная химия. – Москва: Наука, 1978.



## ДУАЛИЗМ УПРАВЛЕНИЯ РИСКАМИ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ. ПРИМЕНЕНИЕ СРЕДСТВ ПОВЫШЕНИЯ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ

А.Н. Панов<sup>1</sup>, Е.Ю. Ромашова<sup>2</sup>

<sup>1</sup> ЮРС-РУСЬ, Санкт-Петербург, Россия; a.panov@tut.by

<sup>2</sup> Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, Москва, Россия; romashova@imash.ru

В докладе рассматриваются проблемы неограниченного роста применения информационных технологий в технических системах, как средства повышения эффективности, и возникшие проблемы, а также рисков взаимного влияния на пригодность технических систем наличие и взаимодействие как вещественной, так и информационной систем.

В настоящее время реализуются процессы практически неограниченного применения встроенных информационных систем в технические системы как средств повышения производительности интеллектуальной деятельности [1-10]. Для всеобщего применения в управляемых условиях информационных систем в технике разрабатываются серии международных и государственных стандартов, определяющих: терминологический аппарат, концепции (например, ISO/IEC 22989-2022); процессы оценивания последствий (ISO/IEC 38507-2022); требования к системе менеджмента организации (ISO/IEC FDIS 42001); методологию идентификации рисков (ISO/IEC 22894-2022). Серия стандартов ГОСТ Р 57700 определяет системы сертификации и валидации программных средств. Например, в ГОСТ Р 57188 представлен используемый терминологический аппарат для моделирования физических процессов, а в ГОСТ Р 57412 определены применимые электронные модели в процессах разработки, производства и эксплуатации изделий. Следует отметить, что методик взаимосвязанного управления рисками вещественных и информационных систем недостаточно для широкого практического использования [4-7], дискуссионный термин «искусственный интеллект» (ИИ), не имеет определения в ISO/IEC 22989. В то же время полагаем, что использование перевода указанного термина – «artificial intelligence» не передает предписываемые ему «творческие функции». Фактически используется программный алгоритм с дополнительными особыми функциями, некорректно называемыми «машинное обучение». Словарь [3] определяет понятие ИИ как техническую систему с адаптивными свойствами, а «творчество», как деятельность, как порождение, чего-либо нового, никогда не бывшего. В СТБ 16949 и СТБ 2582 (с участием авторов доклада) для англоязычного «artificial intelligence» предложено словосочетание - «средство поддержки интеллектуальной деятельности» (СПИД), которое, на наш взгляд, отражает сущность понятия искусственный интеллект. А не вводящее в заблуждение понимание «artificial intelligence» как само чудо по типу - «...по шучьему веленью, по моему хотенью...». Как аналог СПИД – средство поддержки физической деятельности человека – создание машин (например, станок), и инструментов, которые только способствуют повышению производительности человеческого труда.

Для достижения приемлемых рисков технических систем с встроенным программным

обеспечением предложена графическая модель (рис. 1) анализа рисков процесса, использующего гибридную (вещественную и информационную) систему на основе риск-ориентированного проектно-процессного подхода: вызовы, угрозы, уязвимости и ущербы. Каждая система, вещественная (например, механизмы, конструкции), информационная (программное средство) имеет свои риски не достижения соответствия требованиям.

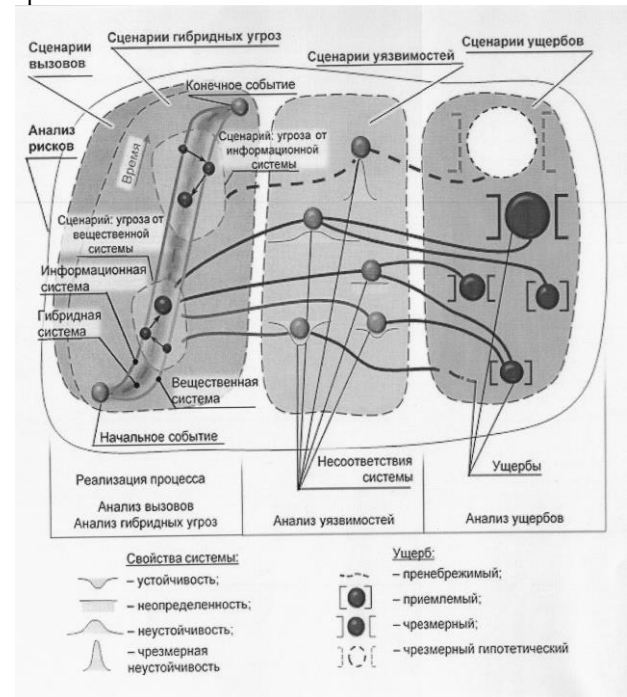


Рис. 1. Представление структуры анализа рисков процесса на основе риск-ориентированного проектно-процессного подхода

Следует рассматривать серию сценариев для идентификации как отдельных уязвимостей систем вещественной и информационной, так и их взаимной уязвимости из-за взаимовлияния при возникновении угроз и проявления уязвимости в каждой из них. Отдельной проблемой является необходимость повторных проведенных анализа рисков в связи с тем, что информационные системы могут обладать функцией адаптируемости информационной системы, также в процессе использования технических систем изменяются как требования заинтересованных сторон, так и нормативные требования. Соответственно, изменяются и уязвимости гибридных систем, что

требует повторного анализа достижения приемлемости рисков.

При использовании риск-ориентированного подхода [8-10] важнейшим этапом является синтез конструкторско-технологических и организационных мероприятий в цепи поставок для снижения уязвимости систем. Принятие решения о выделении ресурсов на совершенствование техники определяется степенью неприемлемости ущерба. Для чего следует рассматривать взаимосвязь управления рисками на стратегическом, операционном, программном и проектном уровнях (рис. 2) поскольку приемлемость интегральных рисков определяется конфигурацией, т.е. системой высшего уровня по отношению к рассматриваемой.

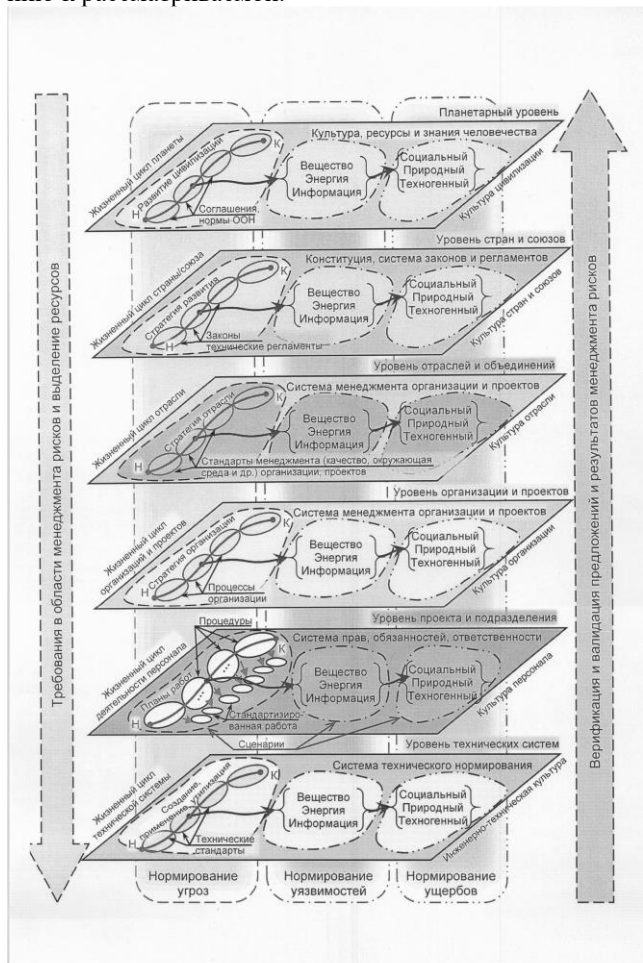


Рис. 2. Модель взаимосвязанного нормирования менеджмента рисков социотехнических систем

Для управления рисками технических систем с встроенным программным обеспечением предлагается использовать разработанную с участием авторов серию стандартов СТБ 1506, СТБ 2582, а также методику анализа рисков FMEA (рис. 3).

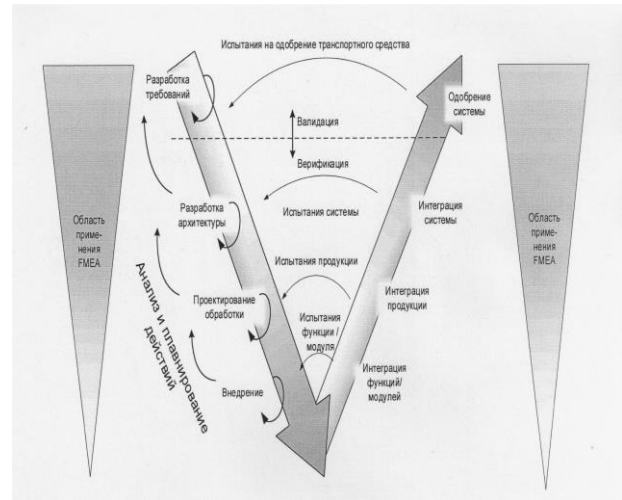


Рис. 3. Схема применения FMEA в процессе разработки программного обеспечения

В настоящее время интенсивно разрабатываются международные и государственные стандарты на информационные системы, в том числе и для управления их рисками. В тоже время недостаточно методического обеспечения для управления рисками в гибридных (вещественно-информационных) системах.

Предложены графические модели управления рисками технических систем, включающих вещественную и информационную системы.

Разработанная методология управления рисками включает: модель нормирования менеджмента рисков для идентификации приемлемости угроз; определение анализа рисков как взаимосвязанную систему вещественных и информационных рисков по отдельности и учет их взаимовлияния; использование стандартизированных методик анализа рисков на основе методики FMEA.

1. Махутов Н.А. и др. Безопасность России. Правовые, социально-экономические и научно-технические аспекты. Научные основы техногенной безопасности. / Под общ. ред. Махутова Н.А.- М.: МГФО «Знание», 2015. - 936 с., ил.
2. Махутов Н.А. и др. Безопасность России. Правовые, социально-экономические и научно-технические аспекты. Техногенная, технологическая и техносферная безопасность / под общ. ред. Н. А. Махутова. – М.: МГОФ «Знание», 2018, – 1016 с.: ил.
3. Философский энциклопедический словарь / Редкол.: С.С.Аверинцев, Э.А. Араб-Оглы, Л.Ф. Ильичев и др. - 2-е изд. - М. Сов. Энциклопедия, 1989 -815 с.
4. Махутов Н.А. и др. Безопасность России. Правовые, социально-экономические и научно-технические аспекты. Безопасность сложных человеко-машинных систем. Под общ. редакцией В.А. Боришпольца. Научный рук. издания чл. корр. РАН Н.А. Махутов, - М.: МГОФ «Знание», 2021. - 432 с.
5. Махутов Н.А. и др. Безопасность России. Правовые, социально-экономические и научно-технические аспекты. Тематический блок «Безопасность железнодорожного транспорта». Техногенная безопасность подвижного состава железнодорожного транспорта. Раздел II Научный рук. издания чл. корр. РАН Н.А. Махутов, - М.: МГОФ «Знание», 2020. - 488 с.
6. Махутов Н.А. и др. Безопасность России. Правовые, социально-экономические и научно-технические аспекты. Тематический блок «Безопасность железнодорожного транспорта». Научные основы функциональной безопасности железнодорожного транспорта. Научный рук. издания чл. корр. РАН Н.А. Махутов, - М.: МГОФ «Знание», 2023. - 560 с.
7. Землин А. И. Актуальные проблемы минимизации рисков, возникающих в связи с использованием беспилотных автомобилей в условиях мегаполиса: системно-правовой анализ:

- монография / А.И. Землин, М.А. Матвеева, Е.В. Гоц. — Москва: КНОРУС, 2023. — 192 с.
8. Горбачевич М.И. Проектирование транспортных средств: нагруженность, повреждение, ресурс: Монография/ М.И. Горбачевич, А.Н. Панов, С.М. Минюкович; Под общей ред. А.Н. Панова. – Мн.: «Технопринт», 2005г.-264 с.:ил.
9. Панов А.Н. Научно-методические основы проектирования: системное обеспечение приемлемых рисков в автотракторосельхозмашиностроении: монография / А.Н. Панов, И.И. Осмола, И.В. Шкадрецов, В.Б. Ловкис, Л.А. Маринич; под общей ред. А.Н. Панова. – Минск: БГАТУ, 2009. – 486 с.: ил.
10. Махутов Н.А. Совершенствование научной базы и нормативного обоснования безопасности колесных мобильных машин / Н.А. Махутов, А.Н. Панов О.Н. //Проблемы безопасности и чрезвычайных ситуаций. – 2021, №1. С. 34-43.

## К ВОПРОСУ О РИСКАХ ПРИМЕНЕНИЯ ЦИФРОВЫХ МОДЕЛЕЙ В МАШИНОВЕДЕНИИ

А.Н. Панов<sup>1</sup>, Е.Ю. Ромашова<sup>2</sup>, М.С. Складнова<sup>3</sup>

<sup>1</sup> ЮПС-РУСЬ, Санкт-Петербург, Россия; a.panov@tut.by

<sup>2</sup> Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, Москва, Россия; romashova@imash.ru

<sup>3</sup> Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, Москва, Россия; skladnova.m@yandex.ru

В докладе рассматривается проблема применения математических/электронных моделей при создании технических систем как средства повышения эффективности процессов жизненного цикла. Проблемы приемлемости расчетных моделей решаются путем идентификации терминов и соответствующих определений, а также критериев адекватности. Развитию моделей и методик анализа рисков пригодности расчетных моделей технических систем следует уделять внимание в зависимости от возникших ущербов. Рассматриваются проблемы повышения пригодности моделей при анализе циклической долговечности, а также адаптации методологии, методик применения электронных моделей техники для достижения приемлемых рисков.

Научный доклад выполнен в рамках выполнения научной темы FFGU-2024-0024.

В настоящее время для сокращения времени создания и постановки продукции на производство [1-10] по ГОСТ Р 15.000 разработана серия стандартов для осуществления численного моделирования технических изделий. Анализ стандартов позволяет отметить нижеследующее.

Серия ГОСТ Р 57700 определяет системы численного моделирования, в том числе процессы сертификации и валидации программных средств. В частности, ГОСТ Р 57700.10 для численного моделирования физических процессов и напряженно-деформированного состояния определяет процессы верификации и валидации численных моделей сложных элементов конструкций в упругой области, а также требования к программному обеспечению компьютерных моделей, используемому для исследования в упругой области напряженно-деформированного состояния сложных элементов конструкций при разработке продукции и проведении приемочных, приемо-сдаточных, квалификационных, серийных и иных испытаний, а также на дальнейших этапах жизненного цикла продукции.

Классификация компьютерных моделей представлена в ГОСТ Р 57700.22, общие положения для применения цифровых двойников изделий представлены в ГОСТ Р 57000.37. Данный стандарт определяет понятие цифрового двойника изделия, а также общие положения и требования по разработке и применению цифровых двойников изделий. В стандарте применены следующие термины с соответствующими определениями: адекватность модели – соответствие модели моделируемому изделию (процессу, явлению) по обоснованному перечню характеристик; цифровая модель изделия – система математических и компьютерных моделей, а также электронных документов изделия, описывающая структуру, функциональность и поведение вновь разрабатываемого или эксплуатируемого изделия на различных стадиях жизненного цикла, для которой на основании результатов цифровых и (или) иных испытаний по ГОСТ 16504 выполнена оценка соответствия предъявляемым к изделию требованиям; цифровой двойник изделия – система, состоящая из цифровой модели изделия и двусторонних информационных связей с изделием (при наличии изделия) и (или) его составными частями; модель – сущность,

воспроизводящая явление, объект или свойство объекта реального мира; математическая модель – модель, в которой сведения об объекте моделирования представлены в виде математических символов и выражений. В ГОСТ Р 57700.37 представлены модели адекватности цифровых двойников и эффективности применения виртуальных испытаний соответственно на рис. 1 и рис. 2.

В ГОСТ Р 57188 представлен используемый терминологический аппарат для моделирования физических процессов, а в ГОСТ Р 57412 определены применимые электронные модели в процессах разработки, производства и эксплуатации изделий. Согласно стандарту: компьютерная модель (электронная модель) – модель, выполненная в компьютерной (вычислительной) среде и представляющая собой совокупность данных и программного кода, необходимого для работы с данными; проверка адекватности компьютерной модели – совокупность действий с моделью, результатом которых является подтверждение ее соответствия моделируемому объекту реального мира. Классификация компьютерных моделей представлена в ГОСТ Р 57000.22.

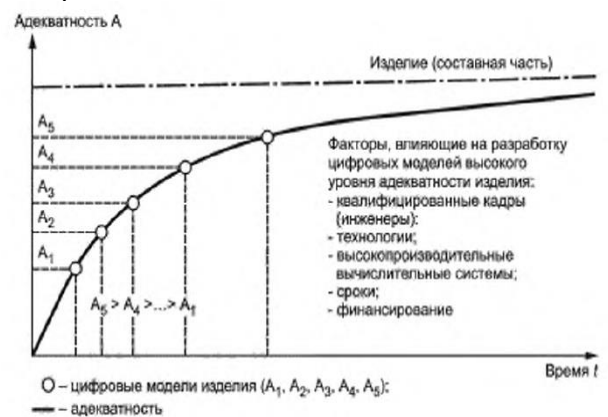


Рис.1. Графическая модель адекватности цифровых двойников в зависимости от различных факторов

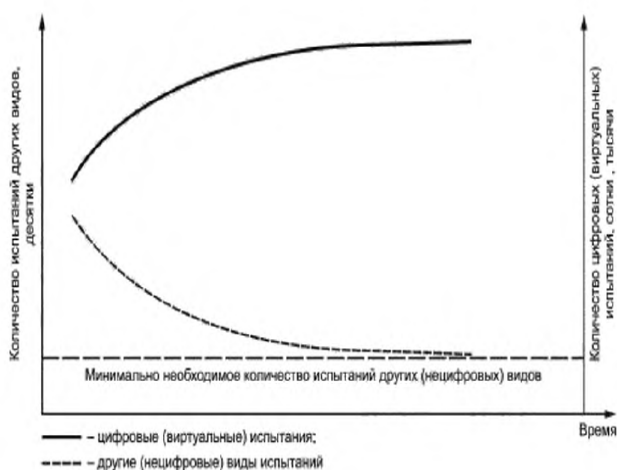


Рис. 2. Снижение объемов испытаний за счет проведения достаточного количества цифровых (виртуальных) испытаний

Поскольку все социотехнические системы деградируют, при анализе рисков адекватности следует рассматривать весь жизненный цикл от маркетинга до процесса утилизации. Следует отметить, что анализ рисков включает этапы оценивания сценариев угроз, ущербов, уязвимостей [4-10]. Для всеобщего применения разрабатываются серии международных и государственных стандартов, определяющих: терминологический аппарат, концепцию (например, ISO/IEC 22989-2022); процессы оценивания последствий (ISO/IEC 38507-2022); требования к системе менеджмента организации (ISO/IEC FDIS 42001); методологию идентификации рисков (ISO/IEC 22989-2022) применения информационных технологий.

Для проведения анализа рисков [1,2,4-6,9,10] – технических систем при использовании электронных моделей требуется дальнейшая разработка соответствующих методологии, методик, учитывающих этапы оценивания сценариев угроз, ущербов, уязвимостей [9,10].

1. Махутов Н.А. и др. Безопасность России. Правовые, социально-экономические и научно-технические аспекты. Научные основы техногенной безопасности/ Под общ. ред. Махутова Н.А.- М.: МГФО «Знание», 2015, - 936 с., ил.
2. Махутов Н.А. и др. Безопасность России. Правовые, социально-экономические и научно-технические аспекты. Техногенная, технологическая и техноферная безопасность / под общ. ред. Н. А. Махутова. – М.: МГОФ «Знание», 2018, – 1016 с.: ил.
3. Философский энциклопедический словарь/ Редкол.: С.С.Аверинцев, Э.А. Араб-Оглф, Л.Ф. Ильичев и др. - 2-е изд. - М. Сов. Энциклопедия, 1989 -815 с.
4. Махутов Н.А. и др. Безопасность России. Правовые, социально-экономические и научно-технические аспекты. Безопасность сложных человеко-машинных систем. Под общ. редакцией В.А. Боришпольца. Научный рук. издания чл. корр. РАН Н.А. Махутов, - М.: МГОФ «Знание», 2021. - 432 с.
5. Махутов Н.А. и др. Безопасность России. Правовые, социально-экономические и научно-технические аспекты. Тематический блок «Безопасность железнодорожного транспорта». Техногенная безопасность подвижного состава железнодорожного транспорта. Раздел II Научный рук. издания чл. корр. РАН Н.А. Махутов, - М.: МГОФ «Знание», 2020. - 488 с.
6. Махутов, Н.А. Совершенствование научной базы и нормативного обоснования безопасности колесных мобильных машин/ Н.А. Махутов, А.Н. Панов О.Н. //Проблемы безопасности и чрезвычайных ситуаций. – 2021, №1. С. 34-43.
7. Лепихин А.М., Морозов Е.М., Махутов Н.А., Лещенко В.В. Возможности оценки вероятностей разрушения и допустимых размеров дефектов элементов конструкций по критериям механики разрушения. Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2022;88(3): С. 41-50
8. Ерпалов А.В., Хорошевский К.А., Румянцева Е.А., Гадолина И.В. Метод оценки долговечности конструкций при стационарном и нестационарном случайных нагружениях с применением вариационной модовой декомпозиции. Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2024;90(9): С. 63-74
9. Горбачевич, М.И. Проектирование транспортных средств: нагруженность, повреждение, ресурс: Монография/ М.И. Горбачевич, А.Н. Панов, С.М. Минюкович; Под общей ред. А.Н. Панова. – Мн.: «Технопринт», 2005г.-264 с.:ил.
10. Панов, А.Н. Научно-методические основы проектирования: системное обеспечение приемлемых рисков в автотракторосельхозмашиностроении: монография / А.Н. Панов, И.И. Осмола, И.В. Шкадрцов, В.Б. Ловкис, Л.А. Маринич; под общей ред. А.Н. Панова. – Минск: БГАТУ, 2009. – 486 с.: ил.

## ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ ПОДХОД К ОЦЕНКЕ СРОКА СЛУЖБЫ УЗЛОВ ТРЕНИЯ

Петрова И.М., Буяновский И.А., Гадолина И.В.

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт машиноведения

им. А.А. Благонравова Российской академии наук; impetrova@mail.ru

Рассмотрены механизмы накопления повреждений узлов трения в эксплуатации, включающие упругое, уругопластическое нагружение и повреждение при трении. В этом случае возможным подходом к оценке повреждений будет оценка повреждения, вносимого каждым фактором воздействия с их последующим суммированием.

### Введение

При эксплуатации на механизм или его компоненты действуют рабочие процессы, имеющие случайный характер разной степени нерегулярности [1], переходные процессы, возникающие при пуске и остановке механизма, аварийные ситуации, вызывающие резкое увеличение действующих напряжений.

### Цели и задачи исследования

Целью данного исследования явилось объединение действующих в процессе эксплуатации факторов. Математические модели, описывающие процессы накопления повреждений, обычно включают один или два повреждающих фактора, в одном уравнении. В настоящей работе рассмотрены три фактора.

### Материалы и методы исследований

В работе были использованы результаты усталостных и трибологических испытаний, проведенных в ИМАШ при исследовании металлов и элементов конструкций, и известных по литературным данным.

Для оценки накопления повреждений при многоциклового усталости, когда действующие напряжения не превышают предел упругости материала, была использована скорректированная линейная гипотеза накопления повреждений [2]:

$$\sum_{\sigma_{ai} > \sigma_{-1d}} \frac{n_i}{N} = a_p \quad (1),$$

где  $n_i$  – число циклов  $\sigma_{ai}$ , действующих в эксплуатации,  $N$  – число циклов, соответствующее напряжению  $\sigma_{ai}$ , и определяемое по кривой усталости. В соответствии с скорректированной гипотезой накопления повреждений величина  $a_p$  зависит от распределения амплитуд напряжений в блоке нагружения и от отношения  $\sigma_{a,max}/\sigma_{-1d}$ , где  $\sigma_{a,max}$  – максимальная амплитуда в распределении амплитуд напряжений и  $\sigma_{-1d}$  – предел выносливости рассматриваемого элемента механизма.

Для учета пластических деформаций было предложено уравнение [2]:

$$\int_1^{N_f} \frac{dN}{N_{f_i}} + \int_0^{e_f} \frac{de}{\varepsilon_f} = D \quad (2),$$

где  $D = 0,6 \dots 1,5$  согласно [2],  $N$  – число циклов нагружения;  $N_{f_i}$  – число циклов, рассчитанное для деформации, заданной для цикла нагружения, с использованием кривой усталости при контроле нагружения;  $N_f$  – число циклов до разрушения;  $e$  – односторонняя деформация, накопленная в процессе монотонного и циклического нагружения;  $\varepsilon_f$  – односторонняя деформация, накопленная к моменту разрушения, появления трещины;  $\varepsilon_f$  – возможная пластическая деформация.

Уравнение (2) может быть также использовано в случае повышенных температур, которые образуются в зоне фрикционного контакта. Тогда уравнение (2) имеет вид

$$\int_1^{N_f} \frac{dN}{N_{f_i}(t)} + \int_0^{e_f} \frac{de}{\varepsilon_f(t)} = D \quad (3).$$

Для оценки параметров уравнения (2) и (3) проводятся стандартные испытания: это контроль малоциклового усталостного напряжения при одноосном нагружении при соответствующей температуре, и одноступенчатое усталостное одноосное нагружение при многоциклового усталости в соответствии с ГОСТ 25.502-79.

Особенности влияния трения на поверхность в (2) и (3) не учитываются, хотя это определенно влияет на срок службы и функцию распределения долговечности, что было отмечено в работе [2]. Следует учесть, что накопление повреждений при износе происходит неравномерно, возрастая со временем.

Разрушение происходит, когда износ достигает определенного предела. Если число циклов при трении пропорционально пути  $S$ , то накопление повреждение при трении, которое отвечает за разрушение поверхности деталей узлов трения, можно определить из выражения [3,4]:

$$D_{и} = \int_0^S \frac{I_h dS}{H} \quad (4),$$

где  $I_h$  интенсивность износа,  $S$  – путь износа, которое пропорционально числу циклов, в течение которых достигается предельный износ  $H$ .

При равномерном износе для его оценки можно использовать [4]

$$I_h = \zeta \frac{b\varepsilon^{\nu+1} h_{max}}{(\nu+1)nl} \eta_c \quad (5),$$

где  $b$ ,  $\nu$  – основные параметры кривой,  $\varepsilon$  – относительное сближение поверхностей;  $h_{max}$  – наибольшее отставание при износе поверхности;  $\zeta$  – коэффициент влияния упругой деформации на реальную площадь контакта  $0,5 \leq \zeta \leq 1$ ;  $\eta_c$  – относительная площадь контакта, которая участвует в процессе износа;  $l$  – средний диаметр пятна контакта.

Подставив все параметры, необходимые для аналитической оценки интенсивности износа мы получим для упругого контакта:

$$I_y = C_y \left( \frac{q_a \nu}{K_\nu} \right)^{1+\beta} \left( \frac{k_f^y}{\sigma_0 \theta} \right) \frac{h_m^{\frac{t(1-\beta)}{2}}}{R} (\eta_c b)^{-t\beta} \quad (6)$$

и для пластического контакта:

$$I_y = C_{\Pi} \sqrt{2} \left( \frac{q_a}{HB} \right)^{\frac{1+t\beta}{1-t\beta}} \left( \frac{k_f^n}{l_0} \right) \left( \frac{h_m}{R} \right)^{\frac{(1+t)}{2}} (\eta_c b)^{\frac{1+t\beta}{1-t\beta}} \quad (7),$$

где  $C_y$ ,  $C_{\Pi}$ ,  $k_f^y$ ,  $k_f^g$  константы, которые оцениваются на основе механических характеристик и характеристик коэффициентов трения контактирующих материалов.

Уравнения (6) и (7) учитывают влияние условий нагружения ( $q$ ), механических свойств ( $\sigma_s$ ,  $HB$ ,  $E$ ,  $\mu$ ), усталостных характеристик ( $l_0$ ,  $\sigma_0$ ,  $t$ ). Также учитываются фрикционные характеристики ( $f$ ), микро и макро геометрия ( $v$ ,  $b$ ,  $h_m$ ,  $R$ ,  $\eta_c$ ) в зависимости от процесса износа.

Тогда для оценки повреждения в эксплуатации с учетом динамического нагружения и износа получим выражение

$$\int_1^{N_f} \frac{dN}{N_f(t)} + \int_0^{e_f} \frac{de}{\varepsilon_f(t)} + \int_0^S \frac{I_h dS}{H} = D \quad (8).$$

В выражении (8) первое слагаемое ответственно за накопление повреждений при упругом нагружении, второе ответственно за пластические деформации и третье за повреждение от трения.

## Выводы

Предложена формула, позволяющая оценить повреждение, вносимое такими факторами, как упругие и пластические деформации, а также эксплуатационный износ поверхности. Формула может быть применена для оценки ресурса деталей машин в эксплуатации.

1. Gadolina, I. Random processes imitation in fatigue studies / I. Gadolina, A. Erpalov, N. Dinyaeva // Reliability: Theory & Applications. – 2022. – Vol. 17, No. 2(68). – P. 31-37. – DOI 10.24412/1932-2321-2022-268-31-37. – EDN NJOTFY.
2. Когаев В.П., Махутов Н.А., Гусенков А.П. Расчеты деталей машин на прочность и долговечность М.: Машиностроение, 1985. 223с.
3. Петрова И.М., Марченко Е.А., Хрущов М.М., Буяновский И.А. Структурные и функциональные закономерности накопления повреждений и разрушения металлов при динамическом нагружении и износе//Заводская лаборатория. Диагностика материалов. Неорганические материалы/Inorganic Material. Год 2024, 60, 15 с.74-82.
4. Когаев, В.П.; Дроздов, Ю.Н. Прочность и износостойкость деталей машин. Издательство: М., Высшая школа. 1991, 319 с. ISBN: 5-06-001905-5

## ИССЛЕДОВАНИЕ СТОЙКОСТИ ОКСИДНОГО ПОКРЫТИЯ СТАЛИ 12X18Н10Т ПРИ КОНТАКТНОМ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ С ПАРОВОДЯНОЙ СМЕСЬЮ В СРЕДЕ СВИНЦОВОГО ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ

М.Д. Погорелов, Р.В. Сумин, Т.А. Бокова, Н.С. Волков, Т.К. Зырянова

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева, Нижний Новгород, Россия;  
md.pogorelov@yandex.ru

В работе представлены результаты экспериментального исследования износа защитного оксидного покрытия стали 12X18Н10Т при моделировании течи парогенератора реакторной установки со свинцовым теплоносителем. Произведена оценка влияния истечения пароводяной смеси при межконтурной неплотности на качество и толщину защитных покрытий.

### Введение

В начале XXI века возродился интерес к использованию свинца и его сплавов в энергетических конструкциях с реакторами деления на быстрых нейтронах, термоядерных реакторов, ускорительно-управляемых систем с жидкометаллическими мишенями. Создание таких реакторных установок требует разработки оборудования, в частности - парогенераторов, надежно работающих условиях тяжёлых жидкометаллических теплоносителей, в среде высокотемпературных свинца и эвтектики свинец-висмут для специфических условий радиационной обстановки и длительного ресурса, предъявляемых к реакторному оборудованию атомных электростанций. Ввиду высокой коррозионной активности расплавов свинца и свинец-висмута по отношению к конструкционным материалам, особое внимание следует уделять сохранности защитных оксидных покрытий, в том числе и при моделировании аварийных процессов, таких, как, например, межконтурная неплотность трубок парогенератора [1].

### Материалы и методы исследований

Для проведения экспериментальных исследований по моделированию течи парогенератора были разработаны 2 вида трубных пучков, выполненных из стали 12X18Н10Т:

1. Трубный пучок для моделирования малой течи парогенератора при истечении легкой фазы из щелевого отверстия представляет собой два ряда труб 22x3,5 мм приваренных к пластине с шагом в 33 мм. Труба 22x3,5, моделирующая поврежденную в трубном пучке, имеет щелевое отверстие 13x1 мм.

2. Трубный пучок для моделирования малой течи парогенератора при истечении легкой фазы из круглого отверстия представляет собой два ряда труб 22x3,5 мм приваренных к пластине с шагом в 33 мм. Труба 22x3,5, моделирующая поврежденную в трубном пучке имеет круглое отверстие диаметром 4 мм.

Исследование, представленное в данной работе, заключается в выявлении изменений оксидного покрытия трубок модели трубного пучка качественно – при визуальном осмотре и изучении макрошлифов под микроскопом, количественно – при измерении толщины защитного оксидного слоя и определении его твердости микротвердомером модели Shimadzu HNV-2T. Сравнение производилось с эталонным образцом, из которого были произведены трубные пучки. В процессе исследования трубные пучки помещаются в свинцовый теплоноситель и выдерживаются в нём в течение времени, необходимого для

перехода на установившийся режим истечения пароводяной смеси в объём свинцового теплоносителя.

### Результаты и их обсуждение

Были получены две серии результатов, для истечения пароводяной смеси из прямоугольного и круглого отверстия. Характер влияния истечения пароводяной смеси в обоих случаях оставался одним и тем же. На трубках экспериментального участка, расположенных в непосредственной близости от места течи, напротив модельных отверстий, наблюдалось сильное истончение (7,9 мкм против 15,25 мкм на слабо поврежденной трубке) оксидных плёнок с образованием каверн, говорящих о вырывах материала оксидной плёнки вследствие эрозионного изнашивания при контакте с потоком пароводяной смеси, истечение которой сопровождается локальными скачками давления. Трубки, наиболее удалённые от места истечения пароводяной смеси, испытывали изнашивание, характерное для конструкционных материалов, работающих в среде тяжёлых жидкометаллических теплоносителей при пониженной термодинамической активности кислорода. Так как формирование и поддержание оксидных плёнок на поверхностях конструкционных материалов гарантироваться при содержании термодинамически активного кислорода в ТЖМТ, контактирующих с поверхностями на уровне не менее  $10^{-4}$  [2], локальный ввод водорода, содержащегося в пароводяной смеси, может приводить к истончению защитных оксидных плёнок за счёт процессов восстановления. Кроме того, наблюдалось уменьшение микротвердости трубок (на 48,68 HV для трубного пучка с круглым отверстием истечения и на 22,97 HV для трубного пучка с прямоугольным отверстием истечения).

На рисунке 1 изображены средние сечения, расположенные над местом истечения пароводяной смеси – круглым отверстием, трубок, наиболее приближенных к месту истечения и наиболее удалённых от него (выбраны наиболее характерные из серии образцов).



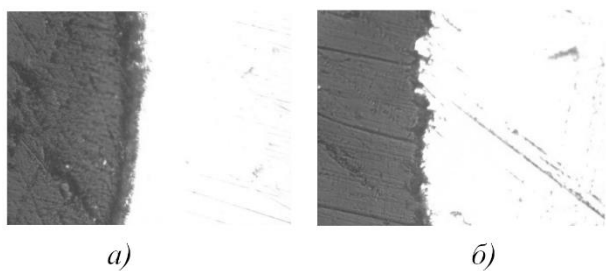


Рис. 1. Сравнение повреждений оксидного слоя конструкционного материала модели парогенератора: (а) – трубка, наиболее удалённая от места истечения пароводяной смеси, (б) – трубка, наименее удалённая от места истечения пароводяной смеси

Полученные результаты могут быть интересны при изучении протекания аварийных процессов типа «межконтурная течь парогенератора» в реакторных установках, охлаждаемых свинцовым теплоносителем, а дальнейшие исследования должны

быть направлены на выявление временных характеристик развития повреждений защитных оксидных плёнок и конструкционного материала при контактом взаимодействии с пароводяной смесью.

Представленные результаты получены в рамках государственного задания в сфере научной деятельности (тема № FSWE-2023-0005 «Особенности и специфика применения тяжелых жидкометаллических теплоносителей в реакторных установках на быстрых нейтронах»).

1. Dinh T.N. Multiphase flow phenomena of steam generator tube rupture in a lead-cooled reactor system: a scoping analysis // Proceedings of ICAPP 2007. Paper No. 7497. May 13-18, 2007. Nice, France.
2. Безносков А.В., Бокова Т.А. Оборудование энергетических контуров с тяжелыми жидкометаллическими теплоносителями в атомной энергетике: учеб. пособие / А.В. Безносков, Т.А. Бокова; Нижегород. гос. техн. ун-т им. Р.Е. Алексеева. – Нижний Новгород, 2011. – 536 с.

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ УЛУЧШЕНИЯ РЕЖИМА РАБОТЫ УЗЛОВ ТРЕНИЯ ШВЕЙНОГО ОБОРУДОВАНИЯ МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНЫМИ НАНОПОКРЫТИЯМИ

Прокопенко А.К., Морозов А.И.

Российский государственный университет им. А. Н. Косыгина, г. Москва, Россия, [prokopenkoak@mail.ru](mailto:prokopenkoak@mail.ru)

**Аннотация.** Описываются особенности конструкции швейных машин и условия работы трущихся материалов. Рассматривается возможность снижения энергопотребления и повышения износостойкости деталей узлов трения швейного оборудования формированием на рабочих поверхностях многофункциональных нанопокрывтий.

Швейное производство представляет собой сложный и многогранный процесс, включающий в себя множество этапов, от разработки дизайна и выкроек до конечного пошива и отделки изделий.

Для обеспечения высокого качества продукции и эффективности производства используются различные виды технологического оборудования и оснастки [1].

Рабочими органами, или рабочими инструментами, машины называют детали машины, непосредственно участвующие в образовании стежка или строчки. Рабочие органы взаимодействуют с обрабатываемым материалом или нитками, из которых формируется строчка.

Несмотря на обилие различных видов и конструкций швейных машин, каждая имеет четыре основных рабочих органа: иглу, челнок (петлитель) нитепритягиватель (нитеподатчик) и передвигатель материала.

Таким образом, основными механизмами швейных машин являются: механизм движения иглы, механизм челнока (петлителя), механизм нитепритягивателя (нитеподатчика), механизм перемещения материала (транспортёр).

Самыми распространенными кинематическими парами исполнительных механизмов швейных машин являются подшипники скольжения и высшие кинематические пары, работающие в реверсивном режиме.

К быстроизнашивающимся деталям швейных машин относится, в первую очередь, шпульный колпачек, корпус челнока, кривошип нитепритягивателя, вкладыши, отводчик ремня, рычаг включения, стержень выключателя и др.

Материалы, используемые для изготовления этих деталей. – стали 20Л, 20Х, 12А, 45, 55Л.

Поверхностный слой деталей подвергается цементации, хромированию или химическому оксидированию. Твердость рабочих поверхностей при этом получают до HRC 56...62.

Большая часть узлов и механизмов современного швейного оборудования работает при высоких скоростях. Частота вращения главного вала машин достигает  $83,3 \text{ с}^{-1}$ .

Скорость нити быстроходных машин трижды за цикл возрастает от 0 до  $16...40 \text{ м / с}$ .

При этом нагрузке в узлах трения в десятки раз превышают усилия непосредственно затрачиваемое на шитье.

Особенность конструкции машин заключается в том, что кинематические пары основных механизмов

не защищены от попадания пыли, влаги и частиц тканей и нитей.

Смазывание сопрягаемых деталей производится различными способами: периодическое-масленкой (в механизме иглы, в парах шатун-палец, поводка и др.); фитильное-непрерывное смазывание (во вкладышах главного челночного и промежуточного валов, игловодителя и др.); автоматическое (в челноках быстроходных машин); смазывание погружением и картерное (в некоторых классах быстроходных машин).

Для смазывания узлов трения используют маловязкие индустриальные масла: И-8А, И-12А, И-20А.

Конструктора швейных машин постоянно ведут работы по совершенствованию системы смазывания основных узлов, но при интенсивной эксплуатации большинство узлов требуют замены уже через несколько месяцев.

Проводились работы по повышению ресурса трущихся деталей оборудования введением в смазочный материал маслорастворимых металлсодержащих соединений [2].

Для легирования жидких и пластичных смазочных материалов использовались присадки на основе продуктов взаимодействия олеиновой кислоты и меди.

Данные присадки являются поверхностно-активными веществами и в результате хемосорбции они располагаются на поверхностях трущихся деталей.

В результате химических реакций они образуют на трущихся поверхностях деталей их железоуглеродистых сплавов нанопокрывтие, улучшающее режим трения материалов и способствующее уменьшению их износа.

В процессе эксплуатации швейных машин были получены результаты повышения износостойкости трущихся деталей в несколько раз и незначительное снижение потерь на трение, но только в тех узлах, где было достаточно смазочного материала во время работы.

Предлагалось наносить перед работой металлсодержащее противоизносное покрытие фрикционным натиранием. Для этого использовались технологические среды, содержащие в своем составе галогениды металлов переходной валентности, например меди [3].

Покрывтие наносилось в результате трения эластичного инструмента, например войлока, пропитанного металлсодержащей средой.

Данная обработка позволяла формировать на рабочих поверхностях деталей из железоуглеродистых материалов пористые покрывтия толщиной  $1...5 \text{ мкм}$ .

Как и в случае с легированием смазочных материалов металлом, в процессе эксплуатации отмечалось положительное влияние данного покрытия на процесс трения.

Однако, имеющие хромовое покрытие детали плохо поддавались обработке. Наличие хрома на поверхности препятствовало протеканию химических процессов, необходимых для формирования покрытия в заданными характеристиками.

В последние годы отечественная промышленность освоила производство фторорганических соединений (эпиламов), обладающих поверхностно-активными свойствами и способных сформировать на поверхностях деталей эффективное защитное покрытие, защищающее металл от коррозии и снижающие потери на трение.

Имеется информация об успешном применении эпиламов в различных отраслях: часовой, полиграфической и авиационной промышленности, машиностроении, деревообработке и др. [4],[5].

Процесс эпиламирания достаточно простой: требуется обезжирить обрабатываемую поверхность и нанести раствор, содержащий фторорганическое соединение, распылением или кистью.

После испарения растворителя на поверхности образуется пористая нанопленка, хорошо удерживающая смазочный материал и обладающая низким коэффициентом трения.

По данным разработчиков обработке может подвергаться широкий спектр деталей из металлических и неметаллических материалов, в том числе и режущего инструмента.

Во всех случаях отмечалось снижение потерь на трения в несколько раз и значительное уменьшение износа трущихся деталей.

На наш взгляд, использование эпиламов в швейном производстве может оказать значительное влияние на работу швейного оборудования.

Эпиламы защитят детали от износа и коррозии, снизят трение и предотвратят адгезию частиц.

Это позволит:

- продлить срок службы оборудования за счет уменьшения износа и защиты от коррозии;
- сократить частоту ремонтов и замен деталей, что приводит к снижению эксплуатационных затрат;
- повысить надежность и производительность оборудования, так как защищенные детали будут работать более стабильно и эффективно;

- снизить энергопотребление швейного оборудования.

Наличие нанопленки также будет способствовать сохранению первоначальных характеристик

оборудования, что особенно важно для обеспечения высокого качества выпускаемой продукции.

Как указывалось выше при эпиламирании образуется покрытие, в порах которого хорошо удерживается смазочный материал.

Проведенные нами исследования показали, что можно использовать это свойство фторсодержащего нанопокртия для заполнения этих пор металлорганическими соединениями.

Для этого могут быть использованы металлорганические маслорастворимые соединения, которые успешно используются в качестве добавок к смазочным материалам.

В этом случае образующееся композиционное покрытие будет своеобразным донором ионов металлов для создания на контртеле из стали или чугуна противозносного покрытия.

Во время работы эти соединения будут попадать в применяемый смазочный материал и легировать его, что обеспечит эффект металлоплакирования незащищенных металлических поверхностей, существенно повысив их износостойкость

Проведенные нами исследования показали возможность формирования на рабочих поверхностях деталей подобного композиционного нанопокртия, содержащего фторорганические и металлорганические соединения.

Предварительные триботехнические исследования показали, что введение металлорганических соединений в структуру нанопокртия положительно влияет на его эксплуатационные характеристики.

Особенно этот эффект проявляется во время начала движения контактирующих деталей.

В настоящее время проводятся работы по определению эффективности композиционных покрытий при нанесении их на поверхности различных материалов для повышения их износостойкости и снижения потерь на трение.

1. Оборудование швейного производства [Электронный ресурс]: электрон. учеб.-метод. комплекс / В. Н. Юрченко, А. В. Леончик. – Новополоцк: Полоц. гос. ун-т, 2021.
2. Прокопенко А.К. Избирательный перенос в узлах трения машин бытового назначения.: Моногр.-М.: Лепромбытздат, 1987.-104с.
3. Корнеев А.А., Прокопенко А.К., Голубев А.П., Терешкин С.А. Финишная антифрикционная обработка деталей узлов трения машин: монография.-М.:ФГБОУ ВПО «МГУДТ», 2015.-98 с.
4. Вохидов А.С., Добровольский Л.А. Эпиламирание: эффективный метод создания нанопленок. // Наноиндустрия, №4, 2012, стр. 32-35
5. Гербер, Д. А. Влияние эпиламирующих покрытий на коррозионную стойкость поверхности стальных деталей / Д. А. Гербер, В. П. Гилета // Актуальные проблемы в машиностроении. – 2017. – Т. 4, № 4. – С. 32-37. – EDN YJTMRX.

## ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ИННОВАЦИОННЫХ ТРИБОТЕХНОЛОГИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ «ЭФФЕКТА БЕЗЫЗНОСНОСТИ» ДЛЯ УЗЛОВ ТРЕНИЯ МАШИН И МЕХАНИЗМОВ

Прокопенко А.К., Корнеев А. А.

Российский государственный университет им. А. Н. Косыгина, г. Москва, Россия, [prokopenkoak@mail.ru](mailto:prokopenkoak@mail.ru)

**Аннотация.** Приводятся необходимые условия для реализации металлоплакирующих триботехнологий с использованием «эффекта безызносности» в узлах трения машин и механизмов. Описывается механизм образования защитных покрытий на трущихся поверхностях деталей. Приводятся результаты апробации технологий в реальных условиях эксплуатации.

В середине 50 годов прошлого столетия советскими учеными Крагельским И.В. и Гаркуновым Д.Н. было сделано научное открытие, известное под названием «эффект безызносности» в узлах трения.

Постановлением Совета Министров СССР от 26.03.1987г. №359 было принято решение о массовом использовании в промышленности данного явления для повышения надежности и ресурса машин и механизмов во время их эксплуатации.

Одной из групп, решающих эти задачи, был научный коллектив Московского технологического института, который занимался повышением срока службы оборудования и транспортных средств, используемых на предприятиях бытового обслуживания и легкой промышленности.

В основу технических решений выполняемых работ были положены физико-химические процессы, обеспечивающие длительный срок работы трущихся деталей компрессоров холодильных машин [1].

На трущихся поверхностях деталей в процессе работы компрессора создается самовосстанавливающаяся металлосодержащая пленка толщиной от нескольких нанометров до одного микрона.

В большинстве случаев она визуально не наблюдается, но иногда ее хорошо видно на поверхностях трения деталей.

Образование подобной металлосодержащей пленки уменьшает трение и защищает основной металл от изнашивания.

Наблюдается «эффект безызносности» трения.

Для исследования данного явления потребовалось создание специальных приборов и методик, позволяющих смоделировать в лабораторных условиях процессы трения материалов холодильных машин.

Был разработан ГОСТ 23.216-84 «Метод испытаний материалов на трение и изнашивание при смазывании маслохладонными смесями».

В результате многолетних исследований были разработаны теоретические основы металлоплакирования и новые технологии, позволяющие во время эксплуатации механических систем существенно увеличить ресурс трущихся деталей [2], [3].

Основа предлагаемых технологий заключается в формировании на трущихся поверхностях деталей машин на всех этапах их изготовления и эксплуатации самовосстанавливающейся металлосодержащей защитной пленки, которая надежно предохранит различные по материалу и форме детали от износа, в том числе от водородного:

- при изготовлении деталей применением композиционных материалов или покрытий, содержащих в своем составе металлосодержащие химические соединения;

- при механической обработке деталей резанием или пластическим деформированием путем введения металлосодержащих соединений в состав СОЖ;

- в период подготовки и технического обслуживания путем фрикционной безабразивной обработки поверхностей трения в металлосодержащих средах;

- в период обкатки (приработки) механических систем в сборе (коробка передач, редукторы, подшипники качения) применением металлоплакирующих обкаточных сред;

- во время эксплуатации узлов трения смазыванием деталей металлоплакирующими смазочными материалами (жидкими, пластичными и твердыми) или обычными смазочными материалами с металлоплакирующими присадками.

Необходимые условия для реализации технологий металлоплакирования во время эксплуатации механической системы:

- детали, участвующие во фрикционном контакте (или одна из них), должны быть изготовлены из металлических сплавов;

- используемый смазочный материал по физико-химическим свойствам должен соответствовать требуемым условиям эксплуатации;

- эффект металлоплакирования (образования на трущихся поверхностях металлосодержащей пленки) обеспечивается введением специальных присадок;

- применяемые присадки должны быть маслорастворимыми и обладать поверхностно-активными свойствами;

- в качестве металлоплакирующей составляющей присадки к смазочному материалу должны быть использованы органические соединения металлов, способных восстанавливаться на трущихся поверхностях деталей;

- в качестве полимеробразующей составляющей присадки к смазочному материалу должны быть органические соединения способные образовывать на рабочих поверхностях полимерную пленку;

- количество вводимой в смазочный материал присадки должно быть таким, чтобы обеспечить режим металлоплакирования в зоне трения и не изменить основных характеристик рабочей среды.

*В этом случае эффект металлоплакирования при трении достигается в результате реакции обмена ионами металлов из присадки и поверхности детали и образования на восстановленном металле полимерной пленки.*

Механизм металлоплакирования представлен на рис.

1.

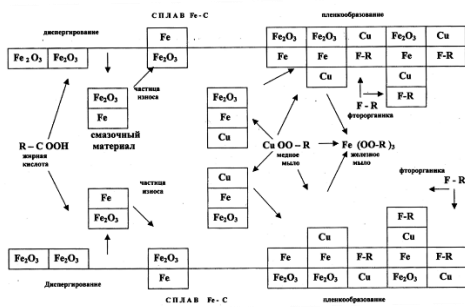


Рис.1. Механизм металлоплакирования в смазочном материале

Необходимые условия для формирования металлополимерного покрытия фрикционной безабразивной обработкой:

- детали, участвующие во фрикционном контакте (или одна из них) должны быть изготовлены из металлических сплавов;
- используемая технологическая среда должна иметь жидкую консистенцию и обладать поверхностно-активными свойствами;
- в качестве металлоплакирующей составляющей технологической среды используются соединения металлов, способных восстанавливаться на трущихся поверхностях деталей;
- в качестве полимеробразующей составляющей технологической среды должны быть органические соединения, способные образовать на рабочих поверхностях полимерную пленку;
- обрабатываемый инструмент (из эластичного материала или металла) должен механическим путем удалить окисную пленку с поверхности детали;
- активацию поверхности могут выполнять детали узлов трения (в том числе и неразборных) во время фрикционного взаимодействия.

Образование металлополимерного покрытия достигается при трении инструмента в результате реакции обмена ионами металлов из технологической среды и поверхности детали без окисной пленки и полимеризацией органических соединений на восстановленном металле.

При этом значительно уменьшается время и улучшается качество приработки трущихся деталей в начальный период работы.

Механизм образования металлополимерного покрытия безабразивной обработкой представлена на рис. 2.

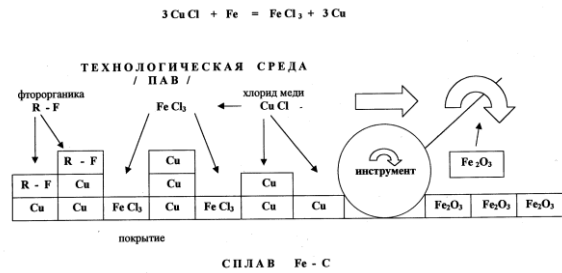


Рис. 2. Механизм образования металлополимерного покрытия фрикционной безабразивной обработкой

Нанесение подобных покрытий также способствует защите трущихся деталей от водородного изнашивания в устройствах уплотнения (см. Рис. 3).



Рис.3. Защита металла от водородного изнашивания

Выводы:

Разработаны теоретические основы повышения ресурса механических систем металлоплакирующими триботехнологиями в период технического обслуживания и при работе деталей в смазочных материалах, гидравлических и охлаждающих жидкостях.

Металлоплакирующие триботехнологии прошли апробацию в реальных условиях эксплуатации для наиболее распространенных узлов трения и показали возможность повысить надежность узлов трения, исполнительных механизмов и режущего инструмента; сохранить заданные технические характеристики узлов трения и исполнительных органов на весь период эксплуатации; снизить потери на трение до 30%; повысить срок службы быстроизнашивающихся деталей не менее чем в 1,5...2,0 раза.

1. Прокопенко А.К. Избирательный перенос в узлах трения машин бытового назначения.: Моногр.-М.: Легпромбытздат, 1987.-104с.
2. Прокопенко А.К., Голубев А.П., Корнеев А.А., Зикеев Г.П. Повышение срока службы деталей машин и инструмента металлоплакированием:/М.; ИИЦ МГУДТ, 2010.87 с.
3. Корнеев А.А., Прокопенко А.К., Голубев А.П., Терешкин С.А. Финишная антифрикционная обработка деталей узлов трения машин: монография. -М.: ФГБОУ ВПО «МГУДТ», 2015.-98 с.

## СИСТЕМА ОБЕСПЕЧЕНИЯ КАЧЕСТВА ПРОДУКЦИИ ЗА ВЕСЬ ЕЁ ЖИЗНЕННЫЙ ЦИКЛ

В.А. Пухальский\*, А.Ю. Албагачиев

\*[puhalya@mail.ru](mailto:puhalya@mail.ru)

Институт машиноведения им. А.А.Благонравова РАН, Москва, Россия;

**Аннотация** Рассмотрена организационно-методологическая часть системы обеспечения качества продукции за весь её жизненный цикл. В связи с этим проанализирована работа с информационными потоками в узлах управления витками качества продукции. Представлены алгоритмы принятия решений на отдельном этапе развития производства и при оценке качества продукции в целом.

Исходя из определения качества [4], система обеспечения качества продукции должна удовлетворять следующим требованиям:

- охватывать все стадии жизненного цикла продукции;
- обеспечивать строгий учет потребности в продукции данного назначения, ее удовлетворения, а также ущерба, причиняемого человеческому обществу, от существования данной продукции в течение всего ее жизненного цикла;
- главным критерием обеспечения качества

является максимум удовлетворения потребностей человеческого общества при минимуме ущерба для него не только в данный момент, но и в перспективе.

Как и во всякой системе управления, в системе качества имеют место как материальные, так и информационные потоки. Т.к. понятие жизненного цикла присуще продукции, т.е. материальному объекту, то материальные потоки в системе качества представим как взаимодействие жизненных циклов – витков качества различных взаимосвязанных видов продукции (рис. 1). Теперь, если учесть выводы о

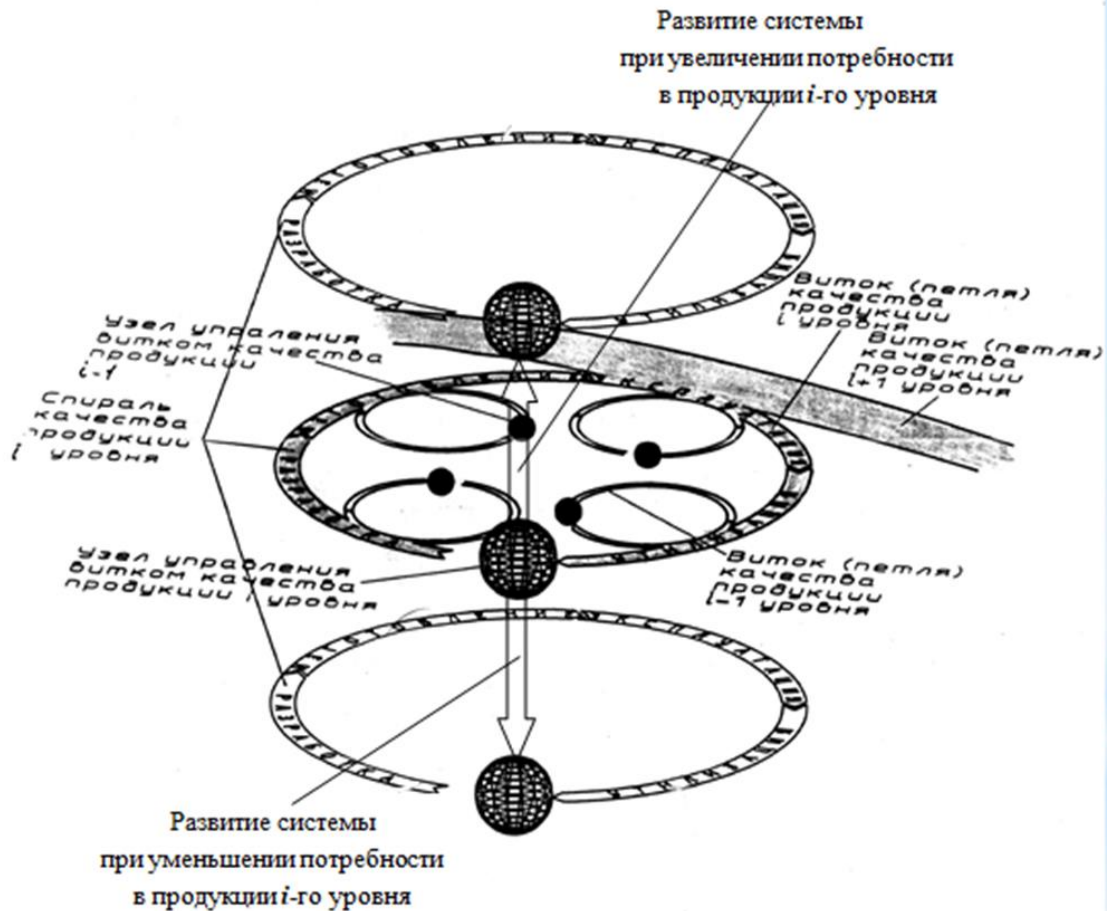


Рис. 1. Структурно-графическая модель системы качества [4]

том, что чем выше уровень оценивания, тем надежнее и точнее будет оценка качества продукции, а также положения, высказанные К. Исикава в [1], о том, что потребитель должен рассматриваться как последующая операция в процессе существования продукции (услуги), то рационально принять следующее условие.

Качество продукции  $i$  уровня должно оцениваться по эффективности функционирования витка качества продукции как минимум  $i+1$  уровня. Т.е. данный подход требует четкой классификации продукции по уровням. Такая классификация может быть получена на основе обобщенных структурных моделей конструкций и процессов [4].

Далее отметим еще одно важное обстоятельство. На практике совершенствование качества продукции происходит поэтапно, в результате определенных действий в рамках конкретных организаций, их подразделений, рабочих мест и т.д., обеспечивающих отдельные стадии жизненного цикла продукции. Поэтому этап в системе качества организации определяет некоторый рубеж в ее развитии, на котором появляется необходимость в принятии определенного управленческого решения и последующего воздействия на ее производство с целью совершенствования качества продукции. Назовем его **этап развития производства**.

Этапы на стадии разработки определяются степенью детализации разработки продукции, на стадии изготовления — степенью освоения ее производства, на стадии эксплуатации — степенью внедрения продукции в эксплуатацию, на стадии утилизации — степенью законченности (полноты) утилизации (переработки) отходов данной продукции.

Здесь следует особо отметить, что на практике организации, специализирующиеся на начальных стадиях жизненного цикла продукции, часто недорабатывают вопросы, возникающих на последующих стадиях жизненного цикла продукции.

И, наоборот, организации, работающие на завершающих стадиях жизненного цикла, имеют недостаточную информацию о предшествующих стадиях жизненного цикла продукции. Каждому этапу развития производства, представляющему часть материальных потоков в системе качества, сопутствует отдельный **цикл информационного обеспечения**, представляющий часть информационных потоков в системе качества. Цикл информационного обеспечения по объему охватывает производство, обеспечивающее некоторую стадию или часть стадии жизненного цикла продукции в рамках отдельного витка качества, а по времени он совпадает с витком качества, т.е. с жизненным циклом единицы или партии продукции. В отличие от цикла Деминга, определяющего порядок действий с объектами обеспечения качества, данный цикл определяет порядок действий с информацией о них.

Цикл информационного обеспечения представляет собой ряд последовательно протекающих процессов, таких как:

- получение исходной информации;
- оценка эффективности продукции;
- принятие управленческого решения по совершенствованию производства на основе оценки;
  
- осуществление управляющего воздействия в рамках системы с целью совершенствования производства.

Управление информационными потоками обеспечивается в узлах управления витками качества (рис. 1). Оно целиком совпадает с так называемой CALS-концепцией [2].

Работа в узле управления витком качества заключается в согласовании уровней развития производств на отдельных стадиях существования продукции. Алгоритм принятия решений на отдельном этапе развития производства приведен на рисунке 2. Данный алгоритм показывает, что схема принятия решений на отдельных этапах и стадиях одинакова, конкретное же наполнение отдельных его блоков, т.е. методы получения исходной информации, методы оценки и т.д., могут быть различными.

Алгоритмом оценка продукции предусмотрена дважды, причем применяемые в этих случаях методы оценки и методы получения исходных данных существенно разнятся по предъявляемым к ним требованиям.

В первом случае методы должны быть как можно более универсальными для использования их на различных стадиях жизненного цикла партии продукции и этапах развития производства. Это связано с необходимостью оценки эффективности продукции на всех стадиях ее жизненного цикла. Кроме того, оценка, получаемая с помощью данных методов, должна позволять принимать решение о том переходить ли на другой этап развития производства или продолжать работу по его совершенствованию на данном этапе. Эти методы используются при завершении этапа развития производства (рис. 37, блоки 9, 10 и 11).

Во втором случае речь идет о методах, используемых для совершенствования продукции на отдельном этапе развития производства, применительно к конкретной стадии жизненного цикла партии продукции, обеспечиваемой данным производством (рис. 2 блоки 4 и 5). Использование этих методов создаёт возможность оперативно оценивать различные варианты, как отдельных элементов, так и продукции в целом на конкретных этапах развития производства.

Для данных целей при работах на различных стадиях жизненного цикла продукции используются принципиально разные методы. Это разнообразие диктуется различием подходов к оценке продукции, различием вида и объема исходной информации на отдельных стадиях ее жизненного цикла. Различие подхода логически следует также из того, что с одной стороны на протяжении жизненного цикла продукция участвует в различных по своей цели процессах (разработки, изготовления, эксплуатации и утилизации). С другой стороны, из того, что продукция выполняет функции различных структурных составляющих этих конкретных процессов преобразования, а именно: объекта, средств, продукта и отходов (представление о структуре и

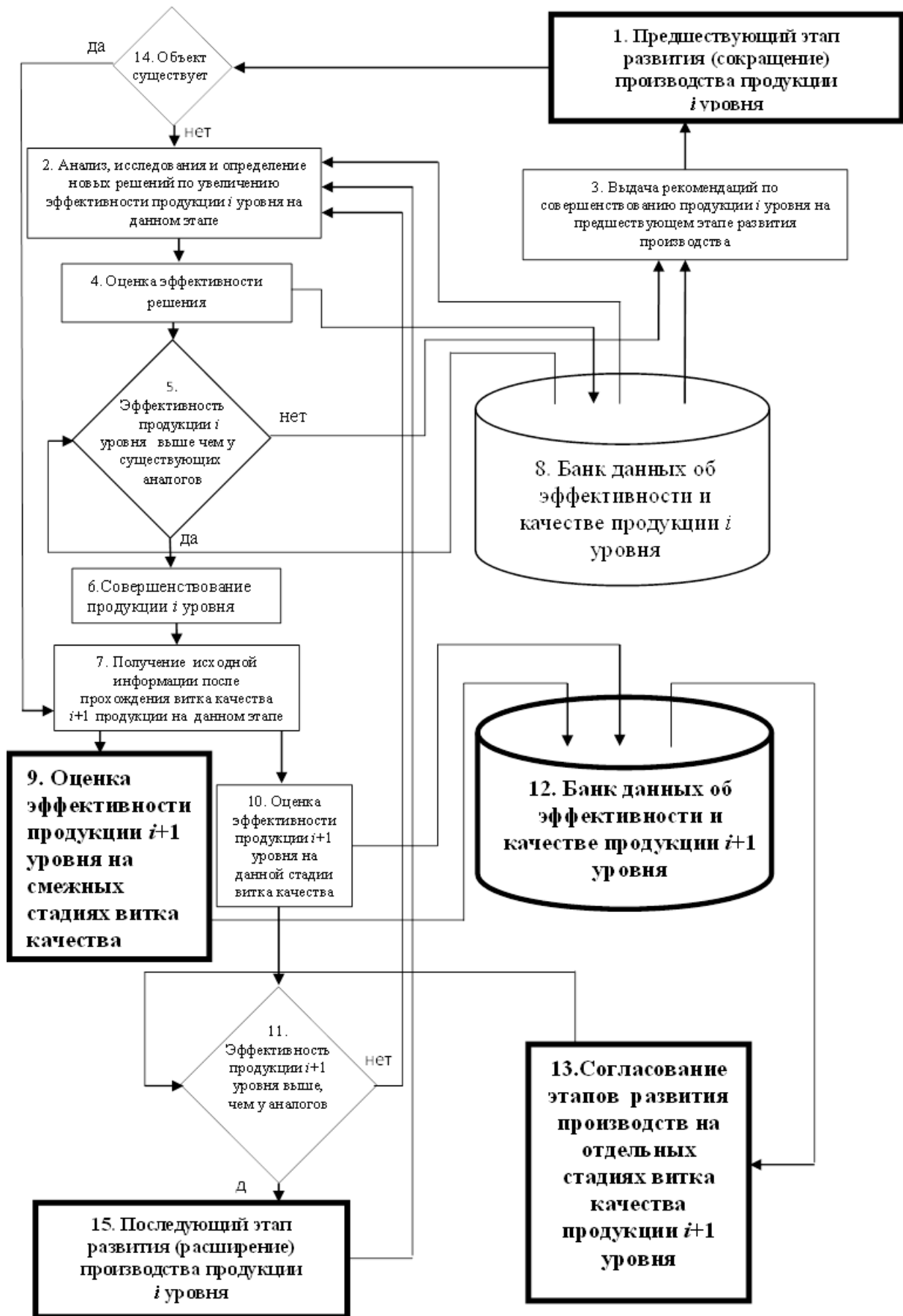


Рис. 2. Алгоритм принятия решений на отдельном этапе развития производства

элементах, необходимых для существования процессов заимствовано из “Капитала” К. Маркса [3].

Вышеизложенное представлено в таблице 1.



Таблица 1. Разнообразие форм и функций продукции на различных стадиях жизненного цикла

Процесс преобразования (стадия жизненного цикла продукции)	Форма существования продукции в процессе преобразования		Функции, выполняемые в процессе преобразования	
	на входе	на выходе	на входе	на выходе
Разработка	идеальная	идеальная	объект	продукт
Изготовление	идеальная	материальная	объект	продукт
Эксплуатация	материальная	материальная	средство	отходы
Утилизация	материальная	материальная	объект	продукт и отходы

Следовательно, данный блок методов оценки в противоположность первому сосредоточен на особенностях существования продукции на конкретных стадиях ее жизненного цикла и этапах развития производства. Соответственно критерии, используемые при оценке этими методами, имеют частный характер. В результате чего определяется не качество, а лишь эффективность продукции или ее части применительно к конкретным: стадии жизненного цикла и этапу развития производства.

Комплект методов оценки качества, охватывающий весь жизненный цикл продукции, разработан на примере режущего инструмента и будет рассмотрен в последующем.

Оба блока методов, используемых в узле управления витком качества продукции  $i$  уровня, предназначены для определения эффективности продукции  $i$  уровня. Оценка же качества продукции  $i$  уровня, согласно принятому выше условию, должна осуществляться вне производств, занятых обеспечением витка качества этой продукции. Для этого оценка качества продукции  $i$  уровня осуществляется на витке качества продукции  $i+1$  уровня. Порядок работы с информацией в узле оценки качества продукции  $i$  уровня представлен на рис. 3.

Наиболее рационально данные работы выполнять силами подразделения обеспечивающего функционирование блока 2 (рис. 2) для продукции  $i+1$  уровня.

Подводя итог, отметим следующие основные моменты.

Установлена взаимосвязь между понятиями жизненного цикла, витком (петлей) качества и спиралью качества.

Установлено, что оценка качества продукции может быть осуществлена только в рамках нескольких организаций, составляющих полный жизненный цикл партии продукции. Для этого качество продукции  $i$  уровня должно оцениваться по эффективности функционирования витка качества как минимум продукции  $i+1$  уровня.

Предложенная система качества основана на ее делении на витки качества, стадии жизненного цикла продукции и этапы развития производств.

Представлены алгоритмы действий, осуществляемых на отдельном этапе развития производства.

Проанализированы общие требования к методам получения исходных данных и методам оценки продукции. Однако особенности этих методов для использования на отдельных этапах и стадиях, а также при оценке качества в целом, требуют специального рассмотрения.

В заключении важно отметить, что чтобы в полной мере представить СК, ее существование следует рассматривать одновременно в трех формах: *методологической, технической и организационной*. Суть такого подхода состоит в следующем.

Основополагающими являются принципы, на которых строится методологическая форма системы. Остальные же формы являются как бы оболочками этого методологического остова. Методологическая форма оговаривает критерии и методы, согласно которым осуществляется оценка и совершенствование качества продукции, а также время, место и состояние продукции, при которых эти методы и критерии должны использоваться. Техническая форма существует в виде технических средств (инструментов, приспособлений, стендов, сотрудников, машин, участков и т.д.), обеспечивающих определенные методы и действия в системе качества. Организационная форма существует в виде связей, обеспечивающих взаимодействие этих технических средств.

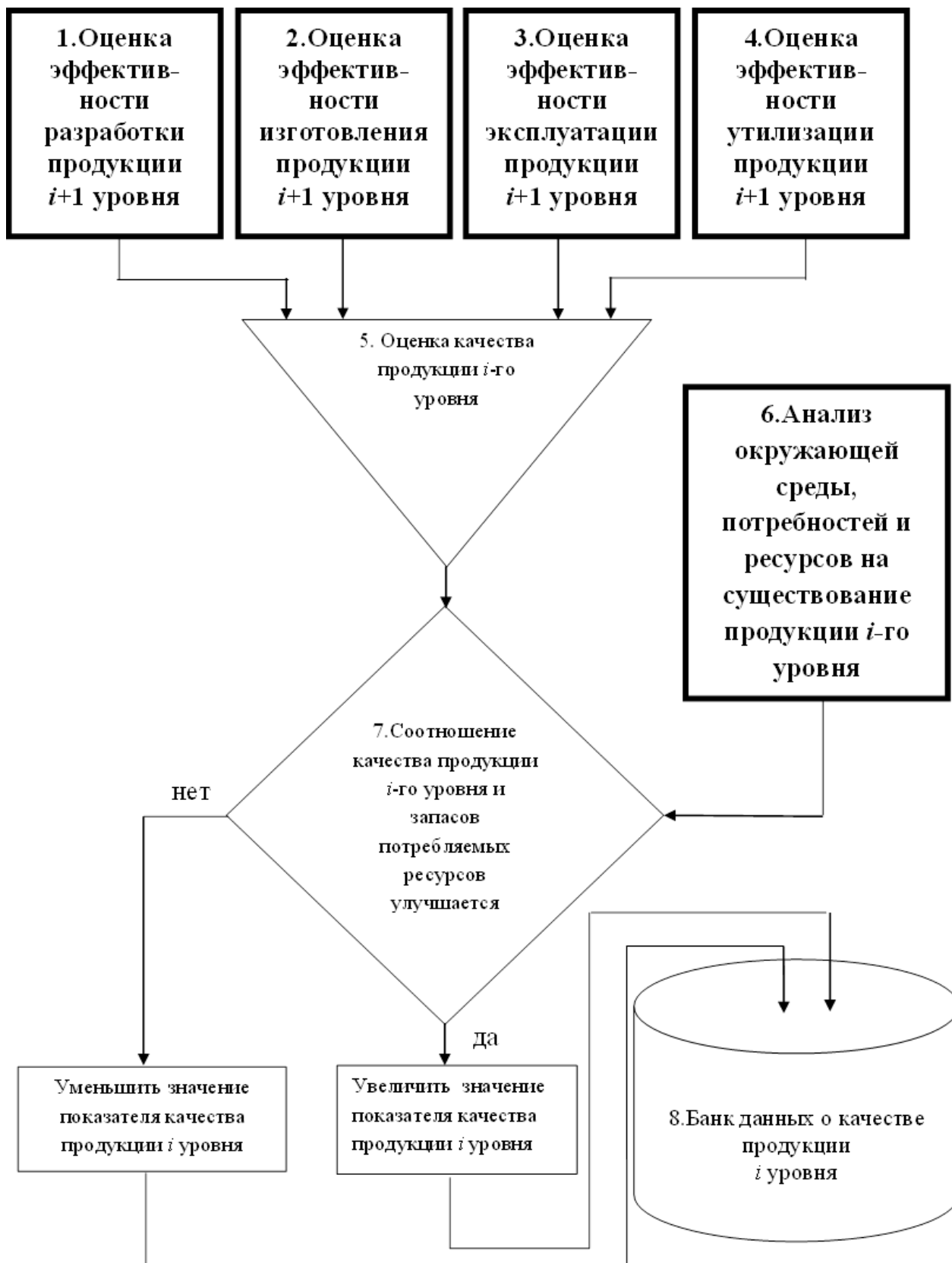


Рис. 3. Алгоритм принятия решений при оценке качества продукции

- Исикава К. Японские методы управления качеством. - М.: Экономика, 1988.
- Кабанов А. Г., Давыдов А. Н., Баранов В. В., Судов Е. В. CALS-технологии для военной продукции, Стандарты и качество №3, 2000.
- Маркс К. и Энгельс Ф. ПСС Том 23, М., 1960, 907 с.
- Пухальский В.А. Ресурсосберегающая система обеспечения качества продукции. - М.: Издательский дом «Спектр», 2016. - 432 с

## СТРУКТУРНЫЙ СИНТЕЗ ОБОБЩЕННЫХ СХЕМ РАБОЧИХ МАШИН

Д.Л. Раков<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Институт машиноведения им. А.А.Благонравова РАН, Москва, Россия; [rdl@mail.ru](mailto:rdl@mail.ru)

В современном мире, где развитие является основным двигателем экономического роста, инновации играют ключевую роль в обеспечении конкурентоспособности. Это относится в первую очередь к машиностроению, где приоритетное значение имеют анализ решений на этапе технического предложения. Структурный синтез обобщённых схем машин относится к методологии проектирования технических систем, где целью является создание оптимальной структуры машины на основе заданных требований. Это важный аспект в автоматизированном проектировании, позволяющий создавать эффективные системы для конкретных задач. В этой работе рассмотрено, что такое структурный синтез, его принципы, этапы, а также его значение для современных технологий. Синтез базируется на усовершенствованном морфологическом подходе. В отличие от традиционных методов, предложенный подход позволяет гибко реагировать на изменения среды и формализовать задачу синтеза и принятия решений на этапе технического предложения.

С развитием технологий, таких как искусственный интеллект и автоматизация, процесс структурного синтеза становится всё более востребованным. Он позволяет создавать сложные технические системы (ТС), которые могут эффективно справляться с разнообразными задачами в условиях ограниченных ресурсов. Это важно в таких отраслях, как машиностроение, робототехника, авиация и автомобилестроение.

Структурный синтез — это процесс формирования архитектуры системы, которая способна выполнять требуемые функции на основе множества элементов и их взаимосвязей. В контексте обобщённых схем машин речь идёт о создании системы, состоящей из множества взаимосвязанных элементов.

Основная цель синтеза — это нахождение структуры, которая будет удовлетворять техническим требованиям при минимальных затратах ресурсов (таких как мощность, время обработки, потребление энергии). Структурный синтез часто основывается на математических моделях и алгоритмах оптимизации, что позволяет находить лучшее решение среди множества возможных вариантов.

В проектировании схемы рабочих машин (РМ) — это абстрактные модели, которые описывают устройство и функционирование машины или системы. Они служат для упрощения сложных ТС и помогают инженерам и разработчикам понимать, как различные компоненты взаимодействуют между собой для выполнения определённых функций. Существуют два подхода к проектированию машинных схем: обобщённые и частные. Обобщённые схемы представляют собой универсальные, гибкие решения, в то время как частные схемы предназначены для выполнения конкретных задач.

Структурный синтез РМ на этапе технического предложения (ТП) фокусируется на одном из ключевых этапов проектирования машин и систем — структурном синтезе, который реализуется в начальной фазе разработки. Этот этап важен для определения общей концепции РМ, её функциональных возможностей и структуры, что закладывает основу для последующих этапов разработки.

ТП - ранний этап, на котором инженеры и разработчики определяют основные требования к системе, оценивают её функциональность и предлагают базовую архитектуру. В рамках этого процесса критически важен структурный синтез, поскольку

именно на этом этапе формируется общая схема и структура машины. Структурный синтез на этапе технического предложения представляет собой выбор и компоновку основных компонентов, их взаимосвязей и функциональных блоков для реализации необходимых задач. Это первый шаг к созданию эффективной и экономичной системы.

Структурный синтез основывается на анализе требований и параметров, предложенных заказчиком или определённых в ходе проектирования. Основная задача синтеза — выбрать оптимальную структуру, которая обеспечит достижение целевых показателей (производительность, надёжность, экономичность) при минимальных затратах ресурсов.

На этапе ТП структурный синтез часто сосредоточен на макроуровне системы, где определяются ключевые компоненты и их функции, но без детальной проработки каждого элемента. Это позволяет быстрее предложить общую концепцию машины и оценить её потенциальные преимущества и недостатки.

В процессе структурного синтеза на ТП проектировщики сосредотачиваются на следующих задачах:

Определение целей и задач системы РМ: понимание того, какие задачи должна решать машина или система, является ключевым моментом. На основании этого формируются основные требования к функциональности.

Анализ требований и ограничений: требования могут касаться производительности, стоимости, времени разработки, а также специфических технических ограничений, например, в условиях эксплуатации. Важно учесть и внешние факторы, такие как условия работы, энергопотребление и доступные ресурсы.

Формирование концепции РМ: на основе анализа формируется общее представление о машине, её структуре и основных компонентах. Здесь принимаются решения о том, как будут организованы основные функциональные блоки (механические, электрические, программные и др.), а также их взаимодействие. Технические решения (ТР) на этом этапе, как правило, касаются компоновки функциональных блоков и выбора основных решений. Например, это может быть выбор между различными типами двигателей, конструктивных схем или материалов.

Производится примерная оценка затрат и эффективности, что позволяет оценить потенциальные

затраты на реализацию выбранной структуры и сопоставить их с предполагаемыми преимуществами. Это позволяет на раннем этапе выявить возможные риски и скорректировать направление проектирования.

В зависимости от типа РМ, это может включать следующие этапы:

Выбор типа привода и двигателя: например, для машин с механическими движущимися частями необходимо выбрать тип привода (электрический, гидравлический, пневматический и т.д.), который будет наиболее эффективным в условиях конкретной задачи.

Определение конструкции рабочих элементов: это могут быть манипуляторы, рабочие головки, режущие инструменты и другие элементы, выполняющие основную функцию машины. На данном этапе принимаются решения об их типе и конфигурации.

Организация системы управления: для эффективного выполнения задач рабочей машине необходима система управления. Важно определить, будет ли управление централизованным или децентрализованным, а также выбрать тип контроллеров и сенсоров.

Моделирование взаимосвязей компонентов: синтез структуры машины требует определения того, как различные элементы будут взаимодействовать друг с другом. Например, для роботизированной системы важно синтезировать схему передачи данных между сенсорами, управляющими модулями и исполнительными элементами.

Структурный синтез на этапе технического предложения позволяет предложить предварительное ТР, на основе которого можно сделать вывод о целесообразности дальнейшей разработки. Синтез позволяет выбрать оптимальные решения на основе анализа требований, что закладывает прочную основу для дальнейших этапов проектирования. Раннее определение структуры системы позволяет выявить потенциальные проблемы и трудности, что снижает вероятность возникновения ошибок на более поздних стадиях разработки. Благодаря ранней оптимизации структуры можно избежать лишних затрат на проектирование и прототипирование, что особенно важно при ограниченных ресурсах.

Частные схемы РМ могут быть настроены для выполнения конкретной задачи с максимальной производительностью и минимальными затратами ресурсов. Это достигается путём исключения избыточных функций и точной настройки всех компонентов для решения единственной задачи. За счёт узкой специализации частные схемы могут обеспечить более высокую эффективность и скорость выполнения задач.

Обобщённые схемы РМ представляют собой универсальные, многофункциональные структуры, которые могут быть адаптированы для различных задач. Эти схемы создаются с учётом возможности модификации и масштабируемости, что позволяет использовать одну и ту же базовую архитектуру для решения различных задач путём изменения её параметров.

Преимущества обобщённых схем РМ:

Гибкость так как, обобщённые схемы могут быть настроены для решения множества задач. И на их основе могут быть выбраны частные схемы РМ.

Такие схемы могут быть легко расширены или модифицированы для повышения производительности или адаптации под новые требования, это соответствует критерию масштабируемости. Это делает их идеальными для использования в средах, где задачи и условия работы могут меняться.

Экономия ресурсов: обобщённые схемы позволяют использовать одни и те же компоненты для выполнения разных функций, что снижает затраты на проектирование и производство новых систем для каждой конкретной задачи.

В современной технике и промышленности исследования, обобщённые схем РМ становятся всё более популярными благодаря своей гибкости и возможности адаптации под изменяющиеся требования. Они используются в таких областях, как машиностроение, автоматизация производства, транспорт и другие.

При выборе ТР большую роль играют субъективные факторы. В некоторых источниках рассматриваются многочисленные подходы к определению этой категории [1-3]. Для построения обобщённых схем РМ возможно применение метода морфологического анализа (МА) [4,5]. Метод морфологического анализа был разработан швейцарским астрофизиком Фрицем Цвикки для решения проблем в астрофизике и инженерии. Основная идея метода заключается в декомпозиции исследуемого множества на ключевые признаки и последующем систематическом анализе всех возможных комбинаций.

МА Цвикки — это универсальный метод решения сложных задач, который помогает систематически исследовать все возможные комбинации характеристик или параметров, относящихся к объекту исследования. Этот метод был разработан для анализа сложных многофакторных систем, где традиционные аналитические методы могут оказаться неэффективными. В инженерии и проектировании рабочих машин МА применяется для синтеза обобщённых структур РМ, где необходимо рассмотреть множество вариантов и выбрать оптимальные решения на основе заданных параметров.

МА представляет собой методическую декомпозицию сложной системы на составляющие компоненты (модули или параметры), после чего для каждого из них формируются возможные варианты решений. Затем все эти варианты комбинируются, что позволяет исследовать огромное количество комбинаций и выявить те, которые будут наиболее эффективными или жизнеспособными для решения конкретной задачи. Процесс включает несколько ключевых шагов:

Определение основных параметров задачи: система разбивается на признаки или модули, каждый из которых описывает важные характеристики объекта.

Разработка набора возможных ТР для каждого признака и для каждого признака составляется список возможных вариантов решений, которые могут быть реализованы.

Создание морфологической матрицы (ММ), где каждая строка соответствует признаку, а каждый столбец — возможному решению (Рис.1).

		Элементы			
		$p^1$	$p^2$	$p^3$	$p^4$
Признаки	$P_1$	$P_1^1$	$P_1^2$	$P_1^3$	$P_1^4$
	$P_2$	$P_2^1$	$P_2^2$	$P_2^3$	
	$P_3$	$P_3^1$	$P_3^2$	$P_3^3$	$P_3^4$
	$P_4$	$P_4^1$	$P_4^2$		
	$P_5$	$P_5^1$	$P_5^2$	$P_5^3$	$P_5^4$

Рис.1. Морфологическая матрица

В предложенном подходе проводится оценка и восходящая агломеративная кластеризация ТР с целью увеличения эффективности разработки (Рис.2) [6-8].

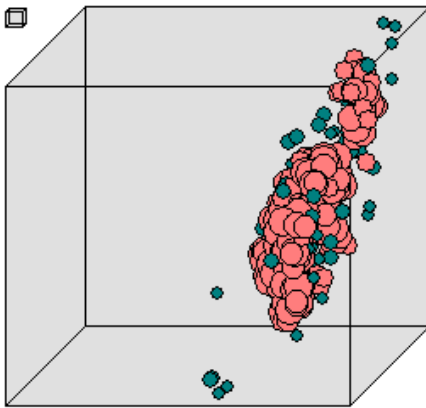


Рис.2. Синтезированные варианты в морфологическом пространстве решений

Комбинирование и оценка возможных ТР, при которых все возможные комбинации анализируются с целью выявления оптимальной структуры для синтеза РМ. Например, можно исследовать комбинации, где машина будет иметь электрический привод и централизованную систему управления, или комбинацию с гидравлическим приводом и децентрализованным управлением.

Структурный синтез РМ на этапе ТП играет

ключевую роль в формировании общей архитектуры системы. На этом этапе проектировщики определяют основные компоненты и их взаимосвязи, предлагая концептуальные решения, которые позволяют оценить жизнеспособность проекта и его экономическую целесообразность. Благодаря структурному синтезу можно на ранних стадиях проектирования оптимизировать систему, повысить её эффективность и снизить затраты на последующих этапах разработки.

Структурный синтез обобщённых схем РМ является ключевым этапом в проектировании сложных систем. Его цель — создание оптимальной структуры системы для выполнения заданных функций с минимальными затратами. Благодаря современным методам математического моделирования и оптимизации, структурный синтез помогает создавать высокоэффективные машины и системы, которые играют важную роль в современном технологическом прогрессе.

#### Ссылки на использованные источники

1. Amabile, Creativity and Innovation in Organizations, 1996; Floyd, "Innovation, Imagination, and Invention," 1989, Pp. 22.
2. Cummings L.L., O'Connell M.J. Organizational Innovation: A Model and Needed Research // Journal of Business Research. 1978. Vol. 6. No. 1. P. 33–50.
3. Раков Д.Л. Анализ и оценка инновационности технических решений в морфологическом подходе в машиностроении. Проблемы машиностроения и автоматизации. 2024. № 2. С. 112-117.
4. Zwicky F. Discovery, Invention, Research – Through the Morphological Approach. Toronto: The Macmillan Company, 1969.
5. Lennart Späker, Benedikt G. Mark, Erwin Rauch, Development of a Morphological Box to Describe Worker Assistance Systems in Manufacturing, Procedia Manufacturing, Volume 55, 2021, Pp. 168-175.
6. Rakov D.L., Sukhorukov R.Y., Pecheykina M.A. Choosing and evaluating fabrication processes by means of a computer-aided innovation support system based on the morphological approach. Journal of Machinery Manufacture and Reliability. 2019. Т. 48. № 2. С. 173-178.
7. Rakov D.L. Strukturelle Synthese und Analyse von innovativen technischen Systemen. Unique and Exzellent Ingenieur Ausbildung im 21. Jahrhundert. 2000. С. 388-395.
8. M. A. Pecheykina, D. L. Rakov, R. Yu. Sukhorukov. Structural Synthesis and the Search for New Technical Solutions in the Conceptual Design Phase. Journal of Machinery Manufacture and Reliability, 2020, Vol. 49, No. 8, pp. 61-68.

## ОСОБЕННОСТИ ТЕХНОЛОГИИ ЛАЗЕРНОЙ УДАРНОЙ СВАРКИ

Г.Ж. Сахвадзе

Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, Москва, Россия; [sakhvadze@mail.ru](mailto:sakhvadze@mail.ru)

В работе исследуется быстропротекающий процесс лазерной ударной сварки (ЛУС). Проводится конечноэлементное моделирование технологии ЛУС с использованием термомеханического метода Эйлера, где в качестве внешнего воздействия принимается давление в ударной волне. С помощью разработанной модели определены распределения быстро меняющихся касательных напряжений, пластические деформации и температуры в течение всего процесса ЛУС. Показано, что во время ЛУС отсутствует эффект плавления пластин.

**Введение.** Ударная сварка — это процесс твердотельного соединения двух металлических пластин, материалы которых существенно отличаются по своим физико-механическим свойствам, особенно по температуре плавления. Она применяется в тех случаях, когда использование традиционных способов сварки плавлением не дает удовлетворительных результатов. Основными параметрами процесса, которые в настоящее время используются для создания прочных соединений при ударной сварке, являются угол между соприкасающимися поверхностями и скорость смыкания. Эта скорость обычно на порядок ниже скорости звука в исходных материалах, которая лежит в интервале 200-1500 м/с [1]. В настоящее время процесс ударной сварки недостаточно изучен и исследования по нахождению оптимальных условий процесса активно продолжаются [2-3].

В данном исследовании используется модель нагружения пластин в соответствии с процессом лазерной ударной сварки (ЛУС), приведенная в [4], где с помощью импульсного лазера создаются твердотельные точечные сварные швы между пластинами толщиной 50 мкм.

Принципиальная схема технологии ЛУС, применяемой в настоящей работе, показана на рис. 1.

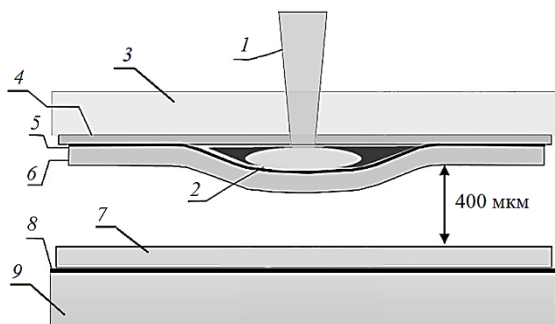


Рис. 1. Принципиальная схема технологии ЛУС: 1 – Лазерный луч; 2 – Плазма; 3 – Прозрачный слой (Боросиликатное стекло); 4 – Двусторонний скотч; 5 – Черная краска; 6 – Математическая алюминиевая пластина; 7 – мишень из нержавеющей стали; 8 – черная лента; 9 – подложка

Лазерный луч (1) с общей энергией в импульсе 3 Дж направляется к математической пластине (6), изготовленной из алюминиевого сплава А0 (зарубежный аналог - aluminum alloy 1100) через прозрачный слой (3). На пластине нанесена матовая черная

краска (толщиной ~25 мкм). Лазерный луч имеет круговую форму диаметром 3.2 мм с продолжительностью импульса в 17 нс. Краска поглощает энергию лазера и мгновенно испаряется, образуя расширяющуюся плазму (2), которая разгоняет математическую пластинку до высоких скоростей. Этому процессу способствует удержание плазмы внутри прозрачного слоя из боросиликатного стекла (3). Пиковые давления достигают величин примерно 2.7 ГПа [5]. В результате происходит столкновение математической алюминиевой пластины с неподвижной мишенью из нержавеющей стали 08X18N10 (зарубежный аналог - AISI 304), что приводит к их точечной сварке [6].

В работе в конечноэлементном пакете ABAQUS проводятся моделирование технологии ЛУС. Получаем численные результаты по изменению локальных скоростей, касательных напряжений, пластических деформаций и температур вдоль границ раздела сварного шва. Расчеты проводятся по методике, приведенной в [7]. Эта методика не только использует более точную сетку Эйлера и приложение нужного профиля давления, но и учитывает термомеханическую связь между приложенными нагрузками и напряжениями, что более реалистично описывает быстропротекающие процессы, происходящие при ЛУС. В результате получена подробная картина эволюции во времени локальных скоростей, касательных напряжений, пластических деформаций и температур вблизи границы раздела сварного шва.

**Определяющее соотношение.** При конечноэлементном моделировании технологии ЛУС требуется определение динамических пределов текучести материалов, для чего используется модель Джонсона-Кука, представляющая собой эмпирическую зависимость динамического предела текучести от пластических деформаций, скоростей пластических деформаций (по Мизесу) и температуры. Области с экстремальными пластическими деформациями при ЛУС образуются очень быстро, поэтому будем использовать определяющее соотношение в виде температурно-зависимой модели Джонсона-Кука, которая определяется выражением [8-9]:

$$\sigma_0 = [A + B(\epsilon_p)^n] \left[ 1 + C \ln \left( \frac{\dot{\epsilon}_p}{\dot{\epsilon}_0} \right) \right] [1 - (T^*)^m], \quad (1)$$

где  $\sigma_0$  – динамическое напряжение;  $\epsilon_p$  – пластическая деформация;  $\dot{\epsilon}_p$  – скорость пластической деформации;  $\dot{\epsilon}_0$  – эталонная скорость деформации ( $\dot{\epsilon}_0$

$=1.0 \text{ с}^{-1}$ );  $A$  – статический предел текучести материала;  $B$  – коэффициент деформационного упрочнения;  $C$  – коэффициент скорости деформации;  $m$  – показатель степени в законе температурного разупрочнения;  $n$  – показатель степени в законе деформационного упрочнения; безразмерная температура  $T^*$  связана с абсолютной температурой  $T$  следующим образом:

$$T^* = \begin{cases} 0, & T < T_0 \\ \frac{T-T_0}{T_m-T_0}, & T_0 \leq T \leq T_m \\ 1, & T > T_m \end{cases} \quad (2)$$

где  $T_0$  – комнатная температура,  $T_m$  – температура плавления материала. Параметры Джонсона-Кука для исследуемых материалов приведены в таблице 1.

Таблица 1. Параметры Джонсона-Кука [6]

Параметр	Алюминиевый сплав А0	Нержавеющая сталь 08X18Н10
$A$ , МПа	148.4	110
$B$ , МПа	345.5	1500
$C$	0.001	0.014
$\dot{\epsilon}_0$ ( $\text{с}^{-1}$ )	1	1
$n$	0.183	0.36
$m$	0.895	1
$T_0$ (К)	293	293
$T_m$ (К)	916	1673

Пространственно-временное распределение давления плазмы, создаваемой и управляемой лазером, моделируется на основе экспериментальных характеристик, где для его построения используется кусочно-непрерывный профиль давления плазмы. Как показано на рис. 2, а за фазой нагрева ( $t < t_p$ ) резко следует фаза адиабатического охлаждения ( $t > t_p$ ).

$$P(t) = 110\alpha Z I_0 2\alpha + 3 \cdot 1 - L(0)L(t), t < t_p$$

$$P(t) = P(t_p) \cdot \left[ \frac{L(t_p)}{L(t)} \right]^y, t \geq t_p \quad (3)$$

Рис.2. Моделирование технологии ЛУС методом конечных элементов: (а) - пространственно-временное распределение давления плазмы: 1 – нагрев; 2 – адиабатическое охлаждение; 3 – зона перехода; (б) – Расчетная схема: 1-1 – ось симметрии; 2 – профиль давления ударной волны; 3 – прозрачный слой (боросиликатное стекло); 4 – метаемая алюминиевая пластина; 5 – неподвижная пластина из нержавеющей стали; 6 – твердая подложка.

В формуле (3)  $\alpha$  является коэффициентом энергетической эффективности (своего рода КПД) процесса взаимодействия лазерного излучения с веществом, который показывает, какая часть энергии лазерного излучения уходит на увеличение давления (естественно, остальная часть уходит на генерирование и ионизацию плазмы).  $L$  – толщина плазмы в разные моменты времени  $t$ .

Начальная толщина плазмы  $L(0)$  составляет примерно 10 мкм, а приведенный ударный импеданс  $Z$  рассчитывается по уравнению (4), где  $Z_{al}$  и  $Z_g$  представляют импедансы алюминиевой метаемой пластины и боросиликатного стекла, соответственно:

$$Z = \frac{Z_{al}Z_g}{Z_{al}+Z_g} \quad (4)$$

### Полученные результаты и обсуждение.

На рис. 3,а показаны распределения эквивалентных пластических деформации при  $t=680$  нс. Как видим, максимальная пластическая деформация при ЛУС равна приблизительно 6.21 и она находится на месте выброса струй материала. Эквивалентные пластические деформации в области сварного шва меньше, чем максимальные значения почти в 2.5 раза, они колеблются от 2.8 до 3, что хорошо согласуется с экспериментальными данными из [10].

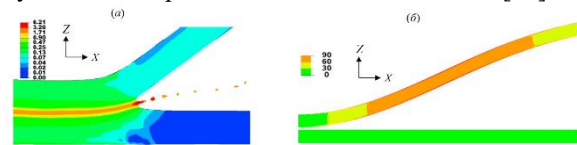


Рис. 3. Полученные численные результаты: (а) – Распределения эквивалентных пластических деформации (при  $t = 680$  нс); (б) - Распределения касательных напряжений в метаемой пластине в плоскости XZ (МПа) до соударения ( $t = 440$  нс)

На рис. 3, б показаны распределения касательных напряжений в метаемой пластине в плоскости XZ. Как видим, до соударения с неподвижной пластиной их величины для большей части пластины находятся в пределах от 60 до 90 МПа. Эти напряжения возникают в результате неравномерности нагружения по длине пластины и играют существенную роль как в процессе соударения, так и в установлении итогового напряженно-деформационного состояния в сварном шве.

На рис. 4а показаны распределения касательных напряжений в метаемой и неподвижной пластинах в процессе ЛУС (в плоскости XZ) в момент времени  $t = 700$  нс. Отчетливо видны очень высокие концентрации положительных касательных напряжений вблизи сварного шва (в радиусе примерно 10 мкм), что приводит к термической расширяющейся пластической деформации и выбросу материала с высокой скоростью. Параллельно образуются большие области с противоположными (по знаку) касательными напряжениями по всей толщине пластины, при этом эти области значительные именно в метаемой пластине. Кроме того, наблюдается наличие положительных касательных напряжений, которые тянутся примерно на расстоянии

120 мкм позади фронта сварного шва (область I на рис. 4а).

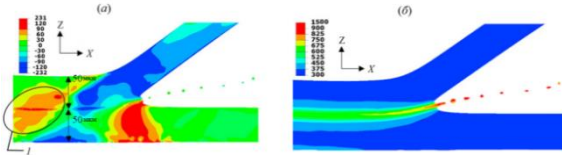


Рис. 4. Полученные численные результаты: а – Распределение касательных напряжений (МПа) в метаемой и неподвижной пластинках в момент времени  $t = 700$  нс; 1 – область с положительными касательными напряжениями; б – распределение температур в пластинах во время ЛУС

На рис. 4, б показано распределение температур в пластинах во время ЛУС (через 200 нс после соударения пластин). Как видим, максимальная кратковременная температура достигается перед началом выброса (равна примерно 1460°К). После начала выброса температура быстро снижается до 900°С. Следует особо отметить, что эти температуры меньше, чем температуры плавления как алюминиевой пластины, так и нержавеющей стали, что еще раз подтверждает тот факт, что сварной шов был образован в твердом состоянии. Таким образом, технология ЛУС является полностью механическим процессом, который достигается с помощью лазерно-плазменного воздействия на исходные материалы при минимальном или полном отсутствии процессов плавления.

**Выводы.** В данной работе разработана термомеханическая конечноэлементная модель технологии лазерной ударной сварки (ЛУС). Эта модель способна определять быстро меняющиеся касательные напряжения, пластические деформации и температуры в течение всего процесса ЛУС.

Показано, что во время ЛУС максимальные эквивалентные пластические деформации достигают значений 6.21 при  $t=680$  нс. Также показано, что максимальные касательных напряжений в метаемой пластине находятся в пределах от 60 до 90 МПа.

Показано, что температура при ЛУС достигает кратковременного максимума в момент  $t=200$  нс и она равна 1460 К, после чего быстро добавляет до 900 К и ниже, что указывает на отсутствие эффекта плавления в процессе ЛУС.

**Финансирование.** Работа выполнена в рамках Государственного задания, шифр научной темы FFGU-2024-0019.

1. Gupta V., Lee T., Vivek, A., Choi K.S. at al. A robust process-structure model for predicting the joint interface structure in impact welding // Journal of Materials Processing Technology. 2019. Vol. 264. P. 107.
2. Groche P., Becker M., Pabst C. Process window acquisition for impact welding processes // Materials & Design. 2017. Vol. 118. P. 286.
3. Lee T., Zhang S., Vivek A. at al. Flyer thickness effect in the impact welding of aluminum to steel // Journal of Manufacturing Science and Engineering. 2018. Vol. 140 (12). P. 121002.
4. Sadeh S., Gleason G.H., Hatamleh M.L. at al. Simulation and Experimental Comparison of Laser Impact Welding with a Plasma Pressure Model // Metals. 2019. Vol. 9(11). P. 1196.
5. Su Y., Hua X., Wu Y. Effect of input current modes on intermetallic layer and mechanical property of aluminum-steel lap joint obtained by gas metal arc welding // Materials Science and Engineering: A. 2013. Vol. 578. P. 340.
6. Wang X., Zheng Y., Liu H. at al. Numerical study of the mechanism of explosive/impact welding using smoothed particle hydrodynamics method // Materials & Design. 2012. Vol. 35. P. 210.
7. Sapanathan T., Raoelison R.N., Padayodi E. at al. Depiction of interfacial characteristic changes during impact welding using computational methods: Comparison between Arbitrary Lagrangian-Eulerian and Eulerian simulations // Materials & Design. 2016. Vol. 102. P. 303.
8. Sakhvadze G.Zh., Sakhvadze G.G. Analysis the mechanisms of plate bending using a laser shock forming technology // Journal of Machinery Manufacture and Reliability. 2023. Vol. 52. Suppl.1. P. S6-S16.
9. Sakhvadze G.Zh. Finite element simulation of hybrid additive technology using laser shock processing // Journal of Machinery Manufacture and Reliability. 2023. Vol. 52. № 2. P. 170-177.
10. Wang X., Gu Y., Qiu T. at al. An experimental and numerical study of laser impact spot welding // Materials & Design. 2015. Vol. 65. P. 1143.



## ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ МЕХАТРОННОГО ОБОРУДОВАНИЯ В ГИБРИДНОМ ПРОИЗВОДСТВЕ

Серебряный В.В.<sup>1</sup>, Хейфец М.Л.<sup>2</sup>, Грецкий Н.Л.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Московский государственный технологический университет «Станкин», г. Москва, РФ;

<sup>2</sup>Институт прикладной физики НАН Беларуси, г. Минск, РБ, mlk-z@mail.ru;

### Введение

Совокупность средств производства или производящих машин, включающих: технологические, транспортные, энергетические и информационные машины, получила название технологических комплексов. Такие комплексы автономно функционируют и с использованием программного управления, в установленных пределах значений, обеспечивают требуемые характеристики качества изделий [1 – 3]. Комплексы технологического оборудования прошли в своем развитии ряд этапов. По сравнению с универсальным станочным оборудованием современное компьютерно-управляемое производство, использующее компоненты искусственного интеллекта, позволяет повысить эффективность оборудования в десятки раз при обеспечении все более возрастающих требований к качеству продукции [4 – 6].

### Мировые тенденции развития комплексов технологического оборудования

Началом первого этапа развития технологических комплексов можно обозначить автоматизацию 1970-х гг. на основе числового программного управления (ЧПУ). В постиндустриальных странах уже с середины 1980-х годов наметился переход от обрабатывающих центров к гибким производственным системам с элементами интеллектуального производства [7].

Развитие средств микроэлектроники явилось базой для создания мехатронных систем, которые включают как электромеханическую, так и электронно-управляющую части. Мехатронные системы обеспечивают синергетическое объединение узлов точной механики с электротехническими, электронными и компьютерными компонентами с целью проектирования и производства качественно новых комплексов машин с интеллектуальным управлением их функциями [8, 9].

Новые этапы развития гибкой автоматизации производственных систем связаны, прежде всего, с предельной концентрацией средств производства и управления, а также с сокращением сроков конструирования, проектирования, технологической подготовки и изготовления изделий. В результате мехатронные технологические комплексы объединяются в гибридное компактное интеллектуальное производство (CIM – Compact Intelligent Manufacture), базирующееся на сочетании различных интенсивных, в том числе и аддитивных технологий, прогрессивного технологического оборудования и интегрированной системы управления [10].

Современный уровень развития информационных технологий в промышленности обеспечил переход к использованию технологий создания, поддержки и применения единого информационного пространства во времени на всех этапах жизненного цикла

продукции: от ее проектирования до эксплуатации и утилизации, то есть к CALS-технологиям (Continuous Acquisition and Life-cycle Support). Единое информационное пространство позволяет интегрироваться разрозненным комплексам компактного производства в виртуальное предприятие, создаваемое из различных пространственно удаленных подразделений, которые обладают единой информационной ERP-системой (Enterprise Resource Planning) для использования в компьютерной поддержке этапов жизненного цикла продукции [11].

После пространственно-временной интеграции производственных процессов и жизненного цикла изделий следуют этапы, обеспечивающие компактность производства на основе технологий аддитивного производства (AM – Additive Manufacturing). Аддитивные технологии синтеза композиционного материала и формообразования изделия обеспечивают высокую эффективность за счет сокращения длительности и количества производственно-технологических этапов жизненного цикла изделий [12].

Анализ производства и адресной поставки кастомизированных изделий, с учетом внешней и внутренней логистики предприятий, можно дополнить прогнозом на ближайшее будущее, которое обусловлено новой парадигмой производства, связанной с промышленным интернетом вещей (IIoT – Industrial Internet of Things) и называемой «Индустрия 4.0».

В основе зарождающихся этапов новой эпохи лежит массовая компьютеризация и глобализация интернета. Дальнейшее развитие производства прогнозируют на базе машинного обучения (ML – Machine Learning) и искусственного интеллекта (AI – Artificial Intelligence). Сочетание робототехники и 3D-печати на основе машинного обучения с интернетом вещей в глобальной сети и искусственным интеллектом уже сегодня позволяют создавать полностью автоматизированные производства [5, 6].

Одновременно с эволюцией производственных технологий идет прогресс биомедицинских технологий, с которыми связывают «Индустрию 5.0». По прогнозам уже после 2025 г. носимая человеком электроника начнет замещаться имплантатами, а в 2030-х гг. 3D-принтеры приступят к печати новых органов, и к 2040-м гг. нанороботы начнут ремонтировать организм на клеточном уровне. Предполагают, что к 2035 г. люди могут стать «киборгами», напичканными множеством электронных имплантов, а к 2045 г. вся планета превратится в один «огромный компьютер», использующий весь людской интеллект [5, 6].

### Анализ традиционных стадий и этапов проектирования станочного оборудования

Мехатронные станочные системы включают

механическую (кинематическую), электромеханическую (энергетическую), электронную и управляющую (использующую компьютеры и микропроцессоры) части. В нее входят: датчики состояния как внешней среды, так и самой системы управления; источники энергии; исполнительные механизмы; усилители; вычислительные элементы (компьютеры и микропроцессоры). Мехатронная система представляет собой единый комплекс электромеханических и электронных элементов и средств вычислительной техники, между которыми осуществляется непрерывный обмен энергией и информацией [8, 9].

Функционально простую мехатронную систему комплекса технологического оборудования можно подразделить на следующие составные части [1, 5]: исполнительные устройства (объект управления и приводы), информационные устройства (датчики внутреннего состояния системы и датчики состояния внешней среды) и систему управления (компьютер и микропроцессоры). Взаимодействие между этими частями, реализующее прямые и обратные связи в системе, осуществляется через устройство сопряжения (интерфейс). Система управления включает аппаратные средства и программное обеспечение, которое управляет согласованной работой аппаратных средств и обеспечивает синхронизацию процессов сбора и обработки данных, поступающих от информационных устройств, с процессами, управляющими исполнительными устройствами.

При проектировании механической части технологического оборудования, используемого в традиционном и в перспективном производстве, применяются как известные, так и новые схемы формообразования и послойного синтеза изделий, а также интенсивные процессы модифицирования материалов концентрированными и распределенными потоками энергии [5, 13].

Традиционно исходные данные для проектирования технологического оборудования содержит техническое задание конкретного заказчика, включающее только: 1) данные о материалах и готовых изделиях; 2) производительность оборудования; 3) характер и тип производства; 4) уровень автоматизации и встраиваемость в современное высокотехнологичное производство.

Последовательность проектирования технологического оборудования для производства традиционного типа включает укрупненные стадии, опирающиеся на расчетные схемы: 1) компоновка и выбор кинематической схемы; 2) модульное построение по ограниченному набору агрегатов и узлов; 3) выбор схемы и проведение прочностных расчетов; 4) выбор схемы и проведение динамических расчетов; 5) выбор термодинамической схемы и расчет температур; 6) точностные расчеты геометрических и кинематических связей; 7) расчеты надежности и долговечности с экономическим обоснованием ресурса оборудования; 8) анализ человеко-машинной системы, включающий охрану труда.

Расчет основных систем технологического оборудования производится по детализированным стадиям для: 1) несущих систем; 2) направляющих движений; 3) приводов движений и других.

Проектирование основных систем технологического оборудования проводится по техническим требованиям, предъявляемым: механическим агрегатам, технологической оснастке и средствам автоматизации;

системам смазки и охлаждения; электрооборудованию и программируемым системам; системам диагностики, с учетом техники безопасности и эргономики станка.

### **Применение потоков энергии для интенсификации процессов обработки**

При формировании комплексов технологического оборудования для автоматизированного производства, использующего управление многочисленными приводами, концентрированными и распределенными потоками энергии, традиционных стадий проектирования недостаточно. Связано это с тем, что требуется дополнительно рассматривать схемы технологических модулей и определять параметры оборудования, описывающие как подвод инструмента, так и распределение потоков энергии и материала.

Создание формы изделия в аддитивных технологиях происходит путем добавления материала, с использованием источников энергии, в отличие от традиционных технологий механической обработки, основанных на удалении инструментом «лишнего» материала.

Широко применяемые в мировом производстве технологии позволяют заключить, что наиболее перспективно применение оборудования по наращиванию слоев и формообразованию поверхностей изделий, использующего различные сочетания материалов и источников энергии. Это в свою очередь ставит задачи распределения компонентов материалов и потоков энергии не только по заданному контуру или поверхности, но и по глубине от поверхности изделия, а также по характеру подачи материала и энергии [5, 13].

Использование последовательностей критериев переноса для анализа процессов образования структуры материала многократно сокращает объем экспериментальных исследований технологии по формированию поверхностного слоя при термомеханической и электрофизической обработке. Критерии тепломассопереноса устанавливают последовательность структурообразования в обрабатываемом материале при увеличении мощности воздействий. Критерии, характеризующие потоки энергии, при электрофизической обработке оказывают влияние на последовательность поверхностных явлений и определяют процесс формирования свойств материала [13].

Организация обратных связей при управлении технологическим оборудованием через степени свободы инструментов, частиц наносимого материала и удаляемого слоя, посредством дополнительных воздействий потоками энергии, позволяет управлять устойчивостью процессов формирования поверхностного слоя. Поэтому, с учетом контуров прямых и обратных связей в технологической системе, следует выбирать системы числового программного управления и проектировать комплекс технологического оборудования как мехатронную систему [1, 5].

Рассматривая комплекс технологического оборудования с позиций компьютеризации производственной деятельности, его модули, узлы и детали следует проектировать как устройства компьютерной периферии, построенные по той же архитектуре, что и ЭВМ.

### **Структурные связи информационных технологий в аддитивном производстве**

Анализ процессов производства деталей без использования формообразующей оснастки (3D-печати), в

зависимости от агрегатного состояния исходного материала, размерности потоков формообразующей среды и последовательности технологических операций [1, 5], позволяет в виде диаграммы структурных связей описывать совокупность методов прямого «выращивания» изделий.

Диаграмма структурных связей представляет собой направленный замкнутый граф и описывает автомат с конечным числом состояний. Вершины графа изображают процессы создания изделий без формообразующей оснастки и представляют логические операции: трансляцию информации; движение потоков вещества и энергии; запуск и остановку автоматического цикла [14, 15].

Описание алгоритмами в соответствии с терминами логических операций процессов 3D-печати по диаграмме структурных связей дает возможность анализировать существующие и разрабатывать новые методы прямого «выращивания» изделий [1, 5].

Проведенный анализ методов прямого «выращивания» деталей машин показал особую перспективность разработки процессов послонного синтеза с управляемым формированием свойств материала потоками энергии.

### Заключение

Комплексный анализ проектирования обрабатывающего оборудования с помощью построения традиционных для механики машин расчетных схем показал, что перспективы применения новых технологий, использующих искусственный интеллект, потоки энергии для интенсификации процессов обработки и модифицирования материалов, должны анализироваться на ранних стадиях проектирования. Предложено приступить к проектированию мехатронных систем станочных комплексов с анализа структурных связей информационных технологий в гибридном производстве, включающем как традиционные, так и аддитивные технологии, и использовать теплофизические и электрофизические критерии для изучения формирующихся связей в

технологической системе.

1. Теоретические основы проектирования технологических комплексов / А.М. Русецкий [и др.] ; под общ. ред. А.М. Русецкого. – Минск: Беларус. навука, 2012. – 239 с.
2. Конструирование и оснащение технологических комплексов / А.М. Русецкий [и др.] ; под общ. ред. А.М. Русецкого. – Минск: Беларус. навука, 2014. – 316 с.
3. Автоматизация и управление в технологических комплексах / А.М. Русецкий [и др.] ; под общ. ред. А.М. Русецкий (гл. ред.), П.А. Витязь (зам. гл. ред.), М.Л. Хейфец (зам. гл. ред.). – Минск: Беларус. навука, 2014. – 375 с.
4. Обеспечение качества изделий в технологических комплексах / С.А. Чижик [и др.] ; под общ. ред. М.Л.Хейфеца. – Минск: Беларус. навука, 2019. – 248с.
5. Хейфец, М. Л. Проектирование мехатронных технологических комплексов для традиционного и аддитивного производства / М. Л. Хейфец // Доклады Нац. акад. наук Беларуси, 2020, Т. 64, № 6. – С. 744-751.
6. Перспективные технологии машиностроительного производства / О. П. Голубев [и др.]; под общ. ред. Ж. А. Мрочка и М. Л. Хейфеца. – Новополоцк : Полоцк. гос. ун-т, 2007. – 204 с.
7. Сироткин, О. Технологический облик России на рубеже XXI века / О. Сироткин // Экономист. – 1998. – № 4. – С. 3–9.
8. Мехатроника / Т. Исии [и др.] ; пер. с яп. С.А. Масленникова ; под. ред. В.В.Василькова. – М.: Мир, 1988. – 314 с.
9. Bradley, D.A. Mechatronics – Electronics in Products and Processes / D.A. Bradley. – London: Chapman & Hall, 1993. – 376 p.
10. Delchambke, A. Computer-aided Assembly Planning / A. Delchambke. – London: Chapman & Hall, 1992. – 276 p.
11. Компьютеризированные интегрированные производства и CALS-технологии в машиностроении / Б.И. Черпаков [и др.] ; под ред. Б.И. Черпакова. – М.: ГУП «ВИМИ», 1999. – 512 с.
12. Gibson, I. Additive Manufacturing Technologies: 3D Printing, Rapid Prototyping, and Direct Digital Manufacturing / I. Gibson, D. Rosen, B. Stucker. – N.Y.: Springer, 2015. – 498 p.
13. Хейфец, М.Л. Проектирование технологических процессов и оборудования, использующих поля и потоки энергии на основе анализа критериев подобия / М.Л. Хейфец, В.С. Крутько, Н.Л. Грецкий // Доклады Национальной академии наук Беларуси. – 2021. – Т. 65, № 5. – С. 628–635.
14. Нейман фон, Дж. Теория самовоспроизводящих автоматов / Дж. фон Нейман. – М.: Мир, 1971. – 342 с.
15. Винер, Н. Кибернетика или управление и связь в живом и машине / Н. Винер. – М.: Совет. радио, 1958. – 296 с.

# ИНТЕГРАЦИЯ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА И ЦИФРОВЫХ ДВОЙНИКОВ В МОДЕЛИРОВАНИЕ НАКОПЛЕНИЯ ПОВРЕЖДЕНИЙ ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ ИЗДЕЛИЙ

Д.С. Ситдинов<sup>1</sup>, Б.С. Лещинский<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Военная Академия Связи им. Маршала Советского Союза С.М. Буденного, Санкт-Петербург, Россия

Одной из ключевых инноваций, повлиявших на развитие машиностроения и других производственных отраслей, является концепция цифровых двойников. Модели накопления повреждений являются важным направлением цифровых двойников и позволяют прогнозировать остаточный ресурс изделия и улучшать качество производственных процессов. Настоящая статья исследует взаимодействие искусственного интеллекта, цифровых двойников и моделей накопления повреждений, сравнивая их с существующими решениями в научной литературе и анализируя перспективы их дальнейшего развития.

## Введение

Современные производства требуют высокой степени автоматизации и точности. В условиях растущей конкуренции и увеличивающейся сложности изделий, применение новых цифровых технологий становится ключевым фактором успешности предприятий. Искусственный интеллект (ИИ) и цифровые двойники (ЦД) представляют собой важнейшие технологии, способные улучшить процесс проектирования, производства и эксплуатации изделий.

Цифровые двойники, как виртуальные копии физических объектов, позволяют моделировать реальные процессы, что дает возможность предсказать потенциальные проблемы до их возникновения. В контексте обработки материалов, цифровые двойники изделий (ЦДИ) играют особую роль, так как позволяют отслеживать накопление повреждений, вызванных механической, термической или химической обработкой, и прогнозировать отказ изделия.

Модели накопления повреждений, разработанные в рамках применения ЦД, используют методы машинного обучения и глубоких нейронных сетей для анализа большого объема данных, собранных с датчиков, установленных на оборудовании. Это позволяет более точно прогнозировать поведение изделия в эксплуатации и минимизировать риски отказов. В данном исследовании мы проанализируем существующие подходы к использованию ИИ и ЦДИ, а также модели накопления повреждений при обработке материалов, сравнив их с актуальными научными работами.

## Искусственный интеллект и его роль в цифровых двойниках

Искусственный интеллект является одной из ключевых технологий для разработки и функционирования цифровых двойников. ИИ позволяет не только обрабатывать и анализировать большие объемы данных в реальном времени, но и предсказывать поведение систем на основе этих данных. Системы искусственного интеллекта широко используются в цифровых двойниках для решения задач, связанных с оптимизацией процессов производства, прогнозированием дефектов и управлением ресурсами.

ИИ позволяет создавать более точные и адаптивные модели поведения сложных систем, включая процессы обработки материалов. Модели на основе машинного обучения могут

анализировать данные о нагрузках, воздействующих на изделие во время обработки, и с высокой степенью точности предсказывать накопление повреждений в материале. Это становится особенно актуально для сложных производственных систем, где традиционные методы диагностики и прогнозирования не могут справиться с большим количеством переменных.

## Цифровые двойники изделий

Цифровой двойник — это виртуальная модель физического объекта, которая в реальном времени обновляется данными с физических сенсоров и может использоваться для мониторинга состояния системы, прогнозирования отказов и оптимизации процессов. В машиностроении цифровые двойники находят широкое применение на всех этапах жизненного цикла изделия: от проектирования и производства до эксплуатации и обслуживания.

Цифровые двойники изделий обеспечивают предприятиям возможность точного анализа поведения оборудования и производственных систем. За счет использования реальных данных, поступающих от датчиков, ЦДИ позволяют прогнозировать процессы износа, выявлять потенциальные точки отказа и оптимизировать производственные процессы. Это значительно улучшает контроль качества продукции, повышает надежность оборудования и снижает затраты на ремонт и обслуживание.

## Модели накопления повреждений при обработке.

При обработке материалов (резка, сверление, термическая обработка и др.) неизбежно возникают повреждения в материале. Эти повреждения могут накапливаться, со временем приводя к возникновению дефектов или разрушению изделия. Для того чтобы минимизировать вероятность отказа изделия на стадии эксплуатации, необходимо моделировать накопление повреждений уже на этапе его производства.

Модели накопления повреждений строятся на основе данных о физических процессах, происходящих в материале в ходе обработки. Они могут учитывать различные факторы: интенсивность механической обработки, температуру, влажность, химический состав материала и прочие параметры. Однако традиционные подходы не всегда обеспечивают достаточную точность прогноза, особенно для сложных многокомпонентных систем.

Использование ИИ и цифровых двойников позволяет существенно повысить точность моделей накопления повреждений. Системы машинного обучения могут анализировать большие объемы данных, поступающих от датчиков, и с высокой точностью прогнозировать, как материал будет реагировать на различные воздействия. Примером успешного применения подобных технологий является использование нейронных сетей для анализа данных о вибрации и нагрузках при обработке металлических изделий. Эти данные позволяют предсказать микроразрушения и трещины, которые невозможно выявить традиционными методами контроля.

### Сравнение с релевантными работами.

Исследование ЦДИ и моделей накопления повреждений активно развивается в научных кругах. Важно сравнить подходы различных авторов для более глубокого понимания текущего состояния науки.

1. Модель накопления повреждений нитями оплетки и контроль качества нитей в плетеных преформах [1] позволяет осуществлять своевременное выявление технологического брака и подбирать оптимальные параметры процесса плетения, что повышает производительность изготовления композиционных материалов для ракетно-космической отрасли.

2. Применение методов машинного обучения в рамках прогнозирования состояния электромеханических систем прокатного производства [2]. В рамках данной работы разработана модель, позволяющая с хорошей точностью прогнозирования отказов оборудования в процессе эксплуатации.

3. В данном исследовании [3] предложен метод, который использует данные плавающей ветровой турбины (FWT) для создания модели накопления повреждений. Для изучения характеристик повреждений обучалась модель глубокой нейронной сети (DCLSTMNN) с использованием частотных данных, полученных при различных сценариях нагрузки. В условиях неопределенности, таких как изменение ветровой нагрузки, метод показал более высокую точность в определении местоположения и серьезности повреждений по сравнению с другими подходами.

Общим выводом всех этих исследований является то, что сочетание ИИ и цифровых двойников позволяет не только повысить точность моделей накопления повреждений, но и улучшить прогнозирование остаточного ресурса изделия. Это особенно важно для таких объектов, как авиационные двигатели, трубопроводы и энергетическое оборудование.

**Применение цифровых двойников в реальном производстве.** Цифровые двойники широко применяются на промышленных предприятиях. Например, в автомобильной промышленности цифровые двойники позволяют моделировать все

стадии сборки автомобиля, выявлять дефекты еще на стадии проектирования и оптимизировать производственные процессы.

Одним из примеров успешного применения ЦД является завод Siemens, где цифровые двойники используются для управления процессами производства и предсказания отказов оборудования. С помощью ИИ и цифровых двойников специалисты завода могут анализировать данные в реальном времени, выявлять потенциальные проблемы и оперативно принимать меры для их устранения. В ПАО «КАМАЗ» создали цифровые двойники станков, что позволило довести мощность оборудования до более высоких показателей. За счет оптимизации удалось сократить время изготовления детали с 29 минут до 10 минут 12 секунд [4].

Технологии ИИ и цифровых двойников находятся на стадии активного развития. В ближайшие годы можно ожидать, что они будут все больше интегрироваться в производственные процессы. Одним из перспективных направлений является использование квантовых вычислений для более быстрого анализа данных и прогнозирования отказов.

Кроме того, развитие технологий интернета вещей (IoT) позволит расширить возможности ЦД за счет использования большего количества датчиков и получения более точных данных о состоянии изделия в реальном времени.

### Заключение.

Искусственный интеллект и цифровые двойники изделий открывают новые возможности для управления производственными процессами и прогнозирования отказов оборудования. Совместное применение этих технологий позволяет более точно моделировать накопление повреждений при обработке материалов, что способствует повышению надежности и долговечности изделий. На основании проведенного анализа можно сделать вывод, что использование ИИ и цифровых двойников будет и дальше развиваться, охватывая все больше отраслей промышленности. В дальнейшем, эти технологии станут основой для создания полностью автоматизированных и саморегулируемых производственных систем.

1. Грачев Ф. А. Модель накопления повреждений нитями оплетки и контроль качества нитей в плетеных преформах //Иновационные аспекты социально-экономического развития региона. – 2019. – С. 156-169
2. Кожевников А. В., Илатовский И. С., Соловьева О. И. Применение методов машинного обучения в рамках прогнозирования состояния электромеханических систем прокатного производства //Вестник Череповецкого государственного университета. – 2017. – №. 1 (76). – С. 33-39.
3. Mousavi Z. et al. A digital twin-based framework for damage detection of a floating wind turbine structure under various loading conditions based on deep learning approach //Ocean Engineering. – 2024. – Т. 292. – С. 116563.
4. Фролова А. Д., Анищенко Ю. А. Понятие, типы и особенности технологии цифровых двойников при производстве изделий //молодые ученые в решении актуальных проблем науки. – 2023. – С. 1210-1213.

## ВИБРОАКУСТИЧЕСКИЙ ОТКЛИК В МЕТАЛЛАХ И СПЛАВАХ НА ЭЛЕКТРОИМПУЛЬСНОЕ ВОЗДЕЙСТВИЕ

О.Б. Скворцов, В.И. Сташенко

Институт машиноведения им. А.А.Благонравова РАН, Москва, Россия; [stepanov@imash.ru](mailto:stepanov@imash.ru)

Действие электрических импульсов на металлы и сплавы при их обработке давлением сопровождается формированием механических ударных процессов и волновых процессов деформации. Такие процессы влияют на металл аналогично внешним вибрационным вибрациям и ультразвуковому облучению поверхности металла, что сопровождается эффектом акустического смягчения материала. В отличие от воздействия внешних механических колебаний, электроимпульсное воздействие формирует виброакустический отклик в поверхностном слое самого металла за счет взаимодействия электрического тока в скин-слое с собственным магнитным полем этого тока.

Действие коротких электрических импульсов тока высокой плотности на металл сопровождается проявлением электропластического эффекта (ЭПЭ). При таком воздействии в металле формируется сопутствующий виброакустический отклик, который обычно рассматривают как диагностический побочный эффект, а в качестве физических механизмов проявления ЭПЭ рассматривают пинч-, скин-эффекты, неомогенное выделение тепла, действие «электронного ветра», пондеромоторное действие электромагнитных колебаний на области дефектов и дислокаций и т.д. [1]. При этом было отмечено, что сопровождающие ЭПЭ вибрационные процессы могут вносить заметный вклад в наблюдаемые процессы [2].

Несмотря на большой объем экспериментальных исследований ЭПЭ [3] перечисленные теории не вполне согласуются с ними, что сдерживает широкое применение ЭПЭ в различных процессах обработки металлов и сплавов давлением. В работе [4] представлен критический анализ распространенных механизмов ЭПЭ и сделан теоретический вывод об их физической несостоятельности. В этой работе также предложена теория ЭПЭ, основанная на процессах электрической индукции, формирующих при воздействии электрических импульсов механические колебания в металле. В работе ниже анализируем экспериментальные данные по динамике магнитных и вибрационных процессов в металле, вызванных действием на него электрического импульса.

Особенности действия виброакустического отклика и электрического импульса показывают, что они большей частью действуют независимо, а достигаемые при ЭПЭ результаты аналогичны проявлениям акустического смягчения в металлах и сплавах. Такие изменения затрагивают поверхностный слой металла на глубину 200-400 мкм [5, 6].

На рис. 1 представлена структура стенда для определения влияния электрических импульсов на динамические процессы в одиночном проводнике из металла. Датчики обеспечивают контроль постоянства температуры, и изменений магнитной индукции около поверхности проводника. Для контроля вибрации на проводнике установлен акселерометр с высокой собственной резонансной частотой.

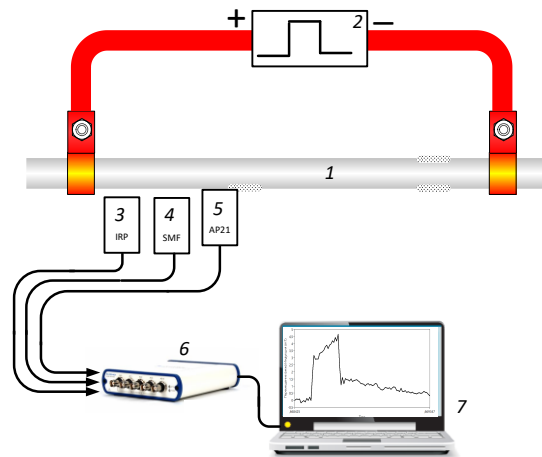


Рис. 1. Стенд для исследования отклика проводника 1 на действие электрического импульса от генератора 2. Датчик температуры IRP 3 и магнитной индукции SMF 4, вибрации 5

На рисунке 2 представлен пример изменения магнитной индукции. Эксперименты показывают, что в начальный момент прихода фронта электрического импульса наблюдается скачек магнитной индукции у поверхности проводника вблизи его края. Длительность такого скачка не превышает 10 мкс. После этого наблюдается увеличение магнитной индукции в соответствии влиянием самоиндукции и скин-эффекта. Формирование скачка можно объяснить взаимодействием собственного магнитного поля (СМП) вокруг проводника с радиальными токами поляризации, возникающими из-за действия пинч-эффекта тока свободных электронов в скин слое и СМП. Изменения магнитного поля пропорциональны изменениям тока через проводник.

Быстрое изменение радиального тока возможно, поскольку индуктивное сопротивление проводника для такого тока намного меньше, чем индуктивное сопротивление этого проводника в продольном направлении. Радиальные токи поляризации при взаимодействии с СМП формируют короткий механический ударный импульс аддитивный для всех поперечных сечений проводника. Ударные импульсы на фронтах затем переходят в затухающие вибрационные колебания, как показано на рис. 3.

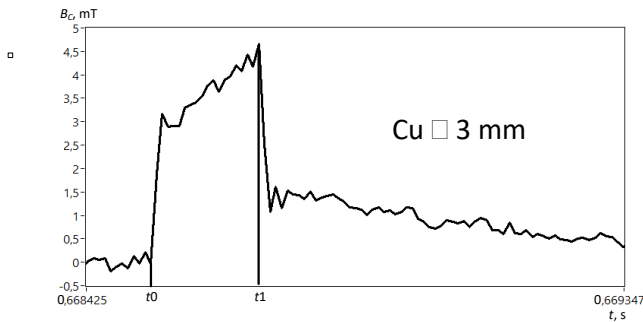


Рис. 2. Импульс магнитной индукции у поверхности проводника вблизи контактного соединения с ним

Распространение по металлу виброакустических колебаний сопровождается эффектом акустического смягчения материала при его деформировании [7, 8]. Механические колебания металла в локальной области деформирования вызывают снижение сопротивления деформациям, увеличивают пластичность металла. Их действие вызывает активацию трансформации микроструктурных изменений и заживление микротрещин. Такие виброакустические воздействия обеспечивают в зависимости от их интенсивности и продолжительности процессы упрочнения или разупрочнения поверхностного слоя металла.

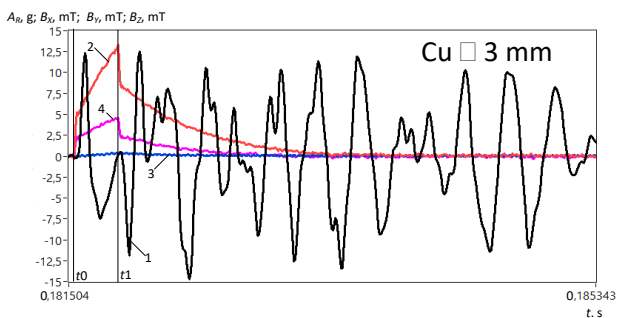


Рис. 3. Формирование механических ударов в осевом направлении в проводнике в моменты прихода фронтов электрического импульса и последующие затухающие виброакустические колебания.

Длительность виброакустического воздействия и область распространения таких колебаний могут существенно превышать длительность внешнего электрического импульса и размеры локальной области его воздействия, что создает преимущества применения ЭПЭ при обработке металлов давлением. Продолжительность виброакустического импульса определяется диссипацией энергии колебаний и, в частности, процессами внутреннего трения в металле. Ударно-волновое воздействие на металл характеризуется широкоспектрным частотным спектром нагружения, которое включает как низкочастотные деформации, так и динамические высокочастотные воздействия. Такое нагружение сопровождается более сильным влиянием на процессы деформирования за счет сложного нагружения [9-12], чем действие одночастотного гармонического нагружения

или случайное статическое механическое нагружение при тепловых нагружениях, которые также могут быть применены для управления пластическими деформациями металла.

Таким образом, виброакустическое воздействие на металл при ЭПЭ проходит параллельно с тепловым действием тока и другими электрическими процессами в металле и результаты такого воздействия на металл аналогичны внешнему воздействию высокочастотной вибрации и ультразвукового облучения. Преимуществом ЭПЭ при этом является простота реализации и управления режимом.

1. Мельникова Н.В., Хон Ю.А. К теории электропластической деформации металлов. Физическая мезомеханика. 2000. № 5. С. 59–64
2. Ерилова Т.В. Влияние импульсов электрического тока на свойства и структуру малоуглеродистых и низколегированных сталей // Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук Новокузнецк. 1998. – 22 с.
3. Stolyarov V.V., Misochenko A.A. A Pulsed Current Application to the Deformation Processing of Materials // Materials. – 2023. – Vol. 16, No. 18. – P. 6270. – DOI 10.3390/ma16186270.
4. Sutton A.P., Todorov T.N, Theory of electroplasticity based on electromagnetic induction // *Physical review materials*, 2021, Vol: 5, № 11, 113605-1-19, <https://doi.org/10.1103/PhysRevMaterials.5.113605>
5. Багмутов В.П., Паршев С.Н., Положенко Н.Ю. Формирование структуры и свойств поверхностного слоя стальных изделий электропластической обработкой // *Фундаментальные проблемы современного материаловедения*. – 2007. – Т. 4, № 1. – С. 36-40.
6. Эдигаров В.Р., Литая Е.В., Малый В.В. Комбинированная электропластическая обработка с динамическим силовым воздействием // *Омский научный вестник*. – 2015. № 1(137). – С. 69–72.
7. Jerez mesa R. Study and characterisation of surface integrity modification after ultrasonic vibration-assisted ball burnishing // Tesis doctor por la universitat politècnica de catalunya. Cotutela internacional con la Université de Toulouse III. 2018. – 296 с.
8. Xu Si-nuo, Feng Ying-hao, Wang Chun-hui, Qian Ling-yun, Sun Chao-yang, Feng Shao-chuan. Theory and application research progress of acoustic effect in ultrasonic vibration assisted plastic forming // *Journal of Plasticity Engineering*, 2023, 30(6), 67–87 <https://doi.org/10.3969/j.issn.1007-2012.2023.06.006>
9. Махутов Н.А., Гаденин М.М. Оценка ресурса при сочетании экстремальных малоцикловых и вибрационных воздействий // ...Динамика и прочность конструкций аэрогидроупругих систем. Численные методы. Труды четвертой Всероссийской научно-технической конференции – М.: ИМАШ РАН, 2017. – С. 40–41.
10. Махутов Н.А., Гаденин М.М., Чернявский О.Ф., Чернявский А.О. Исследования свойств материалов при сложных условиях малоциклового деформирования. Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2021, 87(7), С.49–58. <https://doi.org/10.26896/1028-6861-2021-87-7-49-58>
11. Махутов Н.А., Гаденин М.М. Исследование обобщенных кривых статического и циклического деформирования, повреждения и разрушения. Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2023, 89(5), С.46–55. <https://doi.org/10.26896/1028-6861-2023-89-5-46-55>
12. Махутов Н.А., Гаденин М.М., Юдина О.Н. Анализ циклической прочности технических систем при сложных режимах эксплуатационного нагружения. Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2023, 89(10), С.55–62. <https://doi.org/10.26896/1028-6861-2023-89-10-55-62>

## ПРИМЕНЕНИЕ УДАРНЫХ И ВИБРАЦИОННЫХ ПРОЦЕССОВ, ВЫЗВАННЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИМИ ИМПУЛЬСАМИ ТОКА, ПРИ ОБРАБОТКЕ И СБОРКЕ ИЗДЕЛИЙ ИЗ МЕТАЛЛОВ

Скворцов О.Б., Сташенко В.И.

Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, Москва, Россия; [vis20-11@rambler.ru](mailto:vis20-11@rambler.ru)

В технологических операциях сборки конструктивных элементов из металлов и сплавов обычно используются динамические нагрузки для получения упругих или упруго - пластических деформаций. Снижение динамических нагрузок возможно за счет использования ударных и вибрационных процессов в металле, вызванных в нем короткими электрическими импульсами тока. Рассмотрены примеры использования таких вибраций и/или ударов, создаваемых внешними энергетическими воздействиями для формирования поступательных, изгибных и крутильных деформаций.

Известны такие способы повышения пластичности металла при его обработке как нагрев, обработка потоками заряженных частиц, ультразвуковое облучение, воздействие электрических, магнитных полей и СВЧ облучение. Одним из наиболее технологичных методов управления пластичностью поверхностного слоя металла является применение электропластического эффекта (ЭПЭ), при котором через обрабатываемую область металла пропускают электрические импульсы тока малой длительности (50-200 мкс) и высокой плотности (100-5000 А/мм<sup>2</sup>). Использование ЭПЭ позволяет не только снизить сопротивление металла деформации, но и улучшить его микроструктуру, а также повысить скорость обработки металла.

Особенности проявления магнитного и вибрационного отклика в металле при пропускании электрического импульса показывают, максимальное механическое воздействие в виде ударных импульсов формируется в начальные моменты фронтов импульсов, имеет полярный характер, а изменения магнитного поля в эти моменты времени сопровождается скачкообразными изменениями [1, 2]. Скорость изменения магнитного поля при этом превышает скорости, определяемые явлением диффузии магнитного поля в металл из-за самоиндукции и влияния скин-эффекта.

Целью данной работы является установление общих принципов применения электроимпульсного воздействия при различных видах деформирования в процессах обработки металлов как при удалении части металла, так в технологических операциях сборки неразъемных и разъемных соединений конструктивных металлических элементов.

Рассмотрим некоторые примеры применения ЭПЭ при обработке металлов давлением (ОМД) [3]. Многократное воздействие электрических импульсов на деформируемую область металла сопровождается интенсивными высокочастотными и низкочастотными вибрациями. Многочастотное вибрационное воздействие характеризуется снижением прочности металла по сравнению со случаем простого циклического нагружения как при лабораторных исследованиях, так и при анализе повреждений отдельных металлоизделий и их соединений [4-8].

На рис. 1 представлены примеры обработки металлической заготовки 1 прокаткой (рис. 1а) и волочением (рис. 1б). Заготовка 1 деформируется

инструментом 2. Для получения ЭПЭ к месту деформирования поданы через контактные элементы 3 электрические импульсы от генератора прямоугольных импульсов 4. Аналогичным образом ЭПЭ используют при штамповке, прессовании, плющении и других видах деформирования металлов давлением.

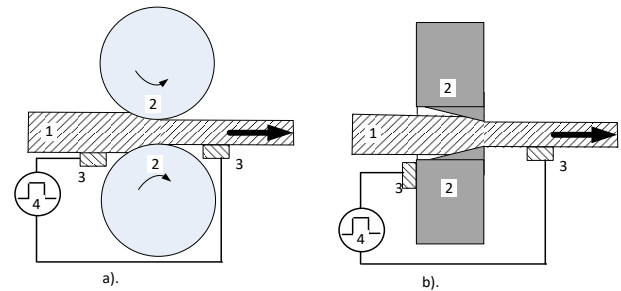


Рис. 1. Применение ЭПЭ при прокатке (а) и волочении (б)

Электроимпульсное воздействие на зону обработки металла успешно применяется для повышения скорости обработки и снижения сопротивляемости металла и в технологиях металлообработки, связанных с удалением части металла в виде стружки. Примеры таких операций иллюстрируются рисунком 2, где представлена проточка поверхности (рис. 2а) и сверление (рис. 2б). Такое дополнительное воздействие аналогично использованию ЭПЭ и может также применяться при резке, фрезеровании и т.п.

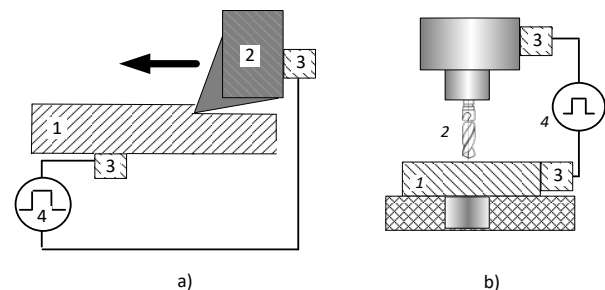


Рис. 2. Применение ЭПЭ при обработке металлов с резанием для проточки (а) и при сверлении (б)

Сопутствующие электроимпульсному воздействию затухающие вибрации материала обеспечивают при их использовании в процессе электроимпульсной сварки релаксацию остаточных механических напряжений и увеличивают скорость взаимной



диффузии свариваемых металлических элементов, что улучшает качество получаемого сварного шва.

Известно еще одно применение ЭПЭ при формировании соединений различных элементов. В этом случае ЭПЭ можно использовать в процессе деформирования как самих соединяемых металлических элементов, например, листов металла, так и специальных соединительных элементов, таких как заклепки, как показано на рис. 3б. Сопутствующие электроимпульсному воздействию вибрационные процессы могут обеспечивать более плотное затягивание резьбового соединения (рис. 3а), увеличивая надежность и таких разборных механических соединений.

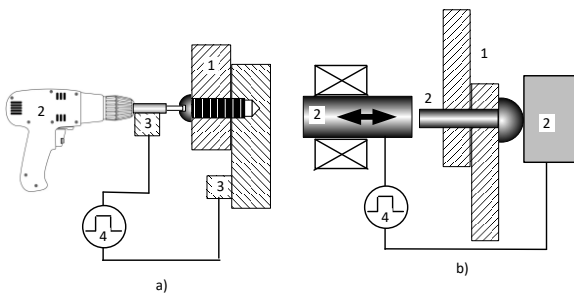


Рис. 3. Применение ЭПЭ при формировании резьбовых (а) и неразъемных (б) соединений

Несмотря на многочисленные гипотезы о физических процессах, лежащих в основе ЭПЭ, общепринятой теории этого явления пока нет. В большинстве случаев в основу экспериментальных исследований ЭПЭ положен анализ результатов его действия на металл уже после ОМД, по изменениям в микроструктуре, либо анализе диаграмм нагружения изучая только сравнительно медленные изменения во времени. Динамические изменения в металле во время воздействия электрического импульса можно подробнее рассмотреть по сигналам от датчиков магнитных полей и вибрации. Это позволяет увеличить временное разрешение до величин порядка микросекунд. Такой анализ показывает, что при воздействии электрического импульса малой длительности еще при небольших значениях тока формируется ударный механический отклик, переходящий в виброакустические колебания. Этот процесс протекает независимо от последующих изменений электрических токов в поверхностном слое металла.

На рис. 4 приведен пример динамических изменений поперечной вибрации, осевой динамической силы и магнитного поля, показывающий синхронность развития этих процессов с момента начала электрического импульса.

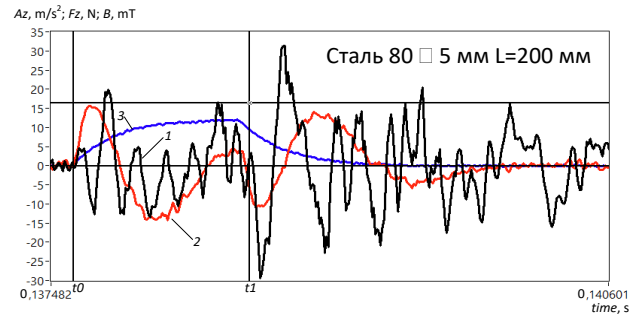


Рис. 4. Вибрационный отклик по поперечному ускорению – 1, продольной динамической силе – 2 и магнитной индукции – 3 на действие электрического импульса длительностью от  $t_0$  до  $t_1$

Эти процессы протекают при воздействии короткого электрического импульса в течение действия скин эффекта. Результаты такого воздействия оказываются значимыми, прежде всего для поверхностного слоя металла на глубину до 400-500 мкм [9, 10]. Как видно из рисунка 4, за это время, ток еще не успевает достичь максимального значения.

Особо отметим, что экспериментально установленное силовое электродинамическое действие электрических импульсов на металлы в первую очередь приходится на его поверхностные слои. Обусловлено это тем, что сами электрические и магнитные процессы протекают в поверхностном слое металла (поверхностный эффект). Поверхностный слой, испытывая наибольшие динамические механические нагрузки, является областью, где большей степени распространения виброакустических колебания. В поверхностном слое металла и на ее контактах с другими материалами наблюдаются процессы отражения, преломления и трансформации виброакустических колебаний между волнами растяжения сжатия и сдвигового типов. Поверхностный слой металла, по-видимому, и оказывает важнейшее влияние на пластичность, прочность и износостойкость металла [11]. Заметим, что поверхностные слои металла существенно влияют на его мало- и много цикловую усталость [12].

1. Скворцов О.Б., Сташенко В.И. Механический отклик проводника на электрический импульс // Вопросы электротехнологии № 2(39), 2023. – С.5–10.
2. Скворцов О.Б., Сташенко В.И. Взаимодействие электрического импульса с проводниками - задачи и эксперименты // Машиностроение и инженерное образование, № 3-4 (70), 2022. – С. 12–20.
3. Троицкий О.А. Электропластический эффект в металлах // Изд-во «Ким Л.А.». М.: 2021. – 467 с.
4. Заверюха Г.Г. Определение усталостной долговечности конструктивных элементов при бигармоническом процессе нагружения // Ученые записки ЦАГИ, том IV. 1973 С.85–96.
5. Гаденин М.М. Исследование повреждаемости и долговечности конструкций при одно- и двухчастотных режимах нагружения на основе деформационных и энергетических подходов // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2017, 83(6): С.44–51.
6. Романов А.Н. Проблемы материаловедения в механике деформирования и разрушения на стадии образования трещин: часть 15. методы и аппаратура для проведения исследований при высокотемпературном циклическом нагружении // Вестник научно-технического развития, № 7 (131), 2018, – С.27–40. www.vnti.ru.
7. Махутов Н.А., Зацаринный В.В. Эффекты упругопластического деформирования и ползучести в резьбовых

соединениях // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2015, 81(9), 54–59.

8. Иванов А.М., Коваленко Н.Д., Рааб Г.И. Влияние комбинированного воздействия экструзии и винтового прессования на механические свойства низкоуглеродистой стали при низкой температуре. Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2018, 84(1(I)). С.66–70. <https://doi.org/10.26896/1028-6861-2018-84-1-I-66-70>.

9. Багмутов В.П., Паршев С.Н., Полозенко Н.Ю. Формирование структуры и свойств поверхностного слоя стальных изделий электрохимической обработкой // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. – 2007. Т. 4, № 1. – С. 36-40.

10. Эдигаров В.Р., Литау Е.В., Малый В.В. Комбинированная электромеханическая обработка с динамическим силовым воздействием // Омский научный вестник. 2015. № 1(137). – С. 69–72.

11. Албагачиев А. Ю., Скворцов О. Б. Виброакустический мониторинг процессов фреттинг-коррозии // **Молодежный вестник Новороссийского филиала Белгородского государственного технологического университета им. В. Г. Шухова**, Том 3 № 2, 2023. с. 29–36.

12. Шиняевский А.А., Солдатенков А.П. Новые парадигмы в описании усталости металлов // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. – 2019. № 1. С. 198–209. DOI 10.15593/perm.mech/2019.1.17.

## АНСАМБЛИЕВЫЕ МЕТОДЫ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ ДЛЯ АНАЛИЗА ПРОЦЕССОВ ТРЕНИЯ И ИЗНОСА

М.С. Складнова<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, Москва, Россия; [skladnova.m@yandex.ru](mailto:skladnova.m@yandex.ru)

В докладе рассматриваются основные методы объединённого машинного обучения, включая вероятностные модели, корреляционный анализ, регрессионный анализ и машинное обучение для изучения характеристик трения и износов материалов. В работе представлены результаты исследований и их применимость для повышения эффективности и надежности триботехнических систем.

### Введение

Для решения проблем оптимизации механических систем за счет снижения трения, минимизации износа и повышения общей производительности за счет передовых стратегий смазки применяется интеграция цифровых технологий с трибологическими принципами. Цифровая трибология применяет современные вычислительные подходы и аналитику на основе данных для улучшения производительности и надежности промышленных операций. Интеграция цифровых инструментов в производственные процессы позволяет отраслям формировать «умные фабрики» с взаимосвязанными системами и автоматизированным управлением на базе искусственного интеллекта. Эта технологическая интеграция открывает значительные возможности для трансформации традиционных промышленных процессов, предоставляя уникальные шансы для значительного роста производительности и эффективности. [1]

Особое внимание заслуживают цифровые двойники, представляющие собой как технологию, так и результат её использования. В трибологии они выступают в роли виртуальной копии реальных систем, отражающей их структуру, параметры и поведение. Применение цифровых двойников способствует снижению затрат на тестирование новых материалов, смазочных веществ и конструктивных решений, а также улучшению технического обслуживания и прогнозированию потенциальных сбоев.

Машинное обучение предлагает мощные средства для создания прогностических моделей, способных предсказать поведение трибосистем в разных условиях эксплуатации. [1] Современные методы машинного обучения и искусственного интеллекта открывают новые горизонты для изучения сложных явлений в трибосистеме и количественного анализа их поведения, причем иногда даже в реальном времени. Их преимущества заключаются в способности эффективно решать задачи высокой сложности и работать с большими объемами данных, адаптируясь к меняющимся условиям с минимальными усилиями и затратами. Эти методы позволяют выявлять важные взаимосвязи и накопленные знания на основании имеющихся данных. Также стоит учитывать, что показатели трения и износа представляют собой переменные потери, зависящие от времени и условий тестирования. [2]

Ансамблевое глубокое обучение включает в себя объединение нескольких моделей машинного обучения для повышения точности и снижения переобучения за счет снижения дисперсии или ошибок, которые могут присутствовать в любой одной модели. В ансамблевом обучении отдельные

модели, как правило, представляют собой нейронные сети, которые обучаются на разных подмножествах данных или с разными конфигурациями. После обучения моделей сделанные прогнозы объединяются различными способами для получения конечного результата. Это можно выполнить с помощью простого среднего или взвешенного среднего отдельных прогнозов модели или с помощью более сложных методов, таких как стекирование или бустинг. Используя способность сверточных нейронных сетей извлекать признаки из изображений и точно их классифицировать, несколько исследований продемонстрировали важность использования этого инструмента для обнаружения соответствующих признаков [3].

### Методы и материалы

Большинство приемов в ансамблевом обучении направлены на то, чтобы сделать ансамбль достаточно разнообразным, поскольку ошибки отдельных алгоритмов на определенных объектах будут компенсироваться корректной работой других алгоритмов. В сущности, при построении ансамбля повышается качество базовых алгоритмов и увеличивается их разнообразие. Разнообразие достигается путем изменения обучающих наборов данных (например, методом бэггинга), изменения признаков (метод Random Subspaces), модификации целевых значений (например, методами ЕСОС или деформацией целевого признака), вариации моделей (использованием различных моделей или методом стэкинга) и изменений внутри самой модели (например, использованием различных алгоритмов в рамках одной модели или рандомизацией в алгоритме, как в случайном лесе). Примеры естественного и ручного варьирования включают зависимость результатов обучения нейронных сетей от начальных настроек параметров, что приводит к получению различных алгоритмов даже при использовании одной и той же архитектуры. Ручная модификация может включать, например, выполнение бустинга над решающими деревьями различной глубины и последующее объединение полученных алгоритмов. Еще одним аргументом в пользу разнообразия алгоритмов является эксперимент, показывающий, что если построить несколько одинаковых алгоритмов, то голосование по ним приведет к тому же самому результату.

В общем случае ансамбль записывается как

$$a(x) = b(b_1(x), \dots, b_n(x)), \quad (1)$$

где **b** – некоторый алгоритм, **мета-алгоритмом (meta-estimator)**.

Простейший пример ансамбля в регрессии – усреднение нескольких алгоритмов:

$$a(x) = \frac{1}{n} (b_1(x) + \dots + b_n(x)), \quad (2)$$

Бэггинг стал широко используемым подходом, этот метод предполагает, что базовые алгоритмы принадлежат одному семейству, обучаются параллельно и практически автономно, а итоговые результаты просто объединяются. Бэггинг дает возможность получать ответы модели. Суть метода проста: каждый алгоритм обучается на отдельной подвыборке, которая содержит не все объекты обучения, поэтому на оставшихся объектах можно оценить ответы алгоритма. Все созданные алгоритмы усредняются, и аналогичным образом можно усреднять ответы алгоритмов для каждого объекта обучения, который не входил в их обучающую выборку:

$$a_{OOB}(x_j) = \frac{1}{|i:x_j \in OOB_i|} \sum_{i:x_j \in OOB} b_j(x_j), \quad (3)$$

При наличии достаточного количества базовых алгоритмов можно получить оценку ответа практически для всех объектов обучения.

Бэггинг ориентирован на сокращение дисперсии в данных и часто реализуется в форме алгоритма случайного леса, где слабыми моделями служат глубокие случайные деревья. Но при создании случайного леса применяется ещё один подход — метод случайных подпространств. Помимо того, что благодаря бутстрэпу выбираются определенные элементы из исходного набора данных, также производится отбор случайного подмножества признаков. В результате, условная матрица признаков сокращается как по строкам, так и по столбцам. Это помогает существенно уменьшить корреляцию между слабыми классификаторами. [4]

В ансамблевом подходе бустинг модели уже не обучаются отдельно друг от друга, а каждая следующая исправляет ошибки предыдущей. Если один слабый алгоритм не смог выявить какую-либо закономерность в данных, потому что это оказалось для него сложным, то следующая модель должна это сделать. Однако здесь возникает недостаток: работу алгоритма трудно распараллелить из-за зависимости предыдущих и последующих шагов. Бустинг направлен на уменьшение смещения в данных, чем на снижение их разброса. Поэтому в качестве базовых алгоритмов могут использоваться модели с высоким смещением, например, неглубокие случайные деревья. Типичными представителями бустинга являются две модели: градиентный бустинг и AdaBoost. Они обе решают одну и ту же оптимизационную задачу по поиску итоговой модели, представляющей собой взвешенную сумму слабых алгоритмов.

$$res_m = \sum_{i=1}^m c_i * a_i, \quad (4)$$

Где  $c_i$ - весовые коэффициенты,  $a_i$ - результаты базовых моделей.

Градиентный бустинг использует стандартный алгоритм градиента для решения этой задачи. Когда добавляется новый слабый алгоритм в ансамбль, выполняется несколько шагов: находится оптимальный вектор сдвига, который улучшает предыдущий ансамбль алгоритмов, этот вектор сдвига определяется как антиградиент функции ошибок работы предыдущего ансамбля моделей, с помощью вектора сдвига устанавливаются значения, которые должны принять объекты обучающей выборки, и наконец, находится следующий алгоритм в композиции, который минимизирует отклонение ответов от истинных. [5]

### Заключение

Ансамблевые методы машинного обучения эффективны для решения чрезвычайно сложных, нелинейных задач как теоретического, так и практического характера, что делает их особенно привлекательными для различных областей трибологии. Однако одно из главных препятствий заключается в обработке неопределённости в экспериментальных и практических наборах данных, вызванных различиями в конфигурациях и системах датчиков, а также в многослойной природе трибологической информации со значительной долей различных параметров. Данные в трибологии не являются жёсткими величинами, а зависят от времени и условий, представляя собой переменные потери, что нередко осложняет их переносимость на другие условия или даже на иные трибосистемы. Поэтому для успешного внедрения новых методов требуются дополнительные фундаментальные исследования, гарантирующие адекватность и надёжность их применения в решении трибологических задач. Особенно важны специализированные экспертные знания, тесно связанные с предметом исследования. [6] Междисциплинарный характер трибологии открывает широкие возможности, но также предъявляет серьёзные требования для тесного взаимодействия специалистов из различных областей, таких как физика, химия, материаловедение, инженерное дело и компьютерные науки.

1. Rosenkranz A, Marian M, Profito FJ, Aragon N, Shah R. The Use of Artificial Intelligence in Tribology—A Perspective. *Lubricants*. 2021; 9(1):2.
2. Kügler, P.; Marian, M.; Schleich, B.; Tremmel, S.; Wartzack, S. tribAln—Towards an explicit specification of shared tribological understanding. *Appl. Sci.* 2020, 10, 4421.
3. M.A. Ganaie, Minghui Hu, A.K. Malik, M. Tanveer, P.N. Sughanathan, Ensemble deep learning: A review, *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, Volume 15, 2022, 105151, ISSN 0952-1976
4. Методы сбора ансамблей алгоритмов машинного обучения: стекинг, бэггинг, бустинг [Электронный ресурс]. URL: <https://habr.com/ru/articles/561732/>
5. Дьяконов А.Г. Машинное обучение и анализ данных, М: 2024.
6. Shah R, Sridharan NV, Mahanta TK, Muniyappa A, Vaithyanathan S, Ramteke SM, Marian M. Ensemble Deep Learning for Wear Particle Image Analysis. *Lubricants*. 2023; 11(11):461.

## ВЛИЯНИЕ МОЩНОСТИ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ПРИ СЛС НА СТРУКТУРУ И ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ СВОЙСТВА АНТИФРИКЦИОННОГО АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА

А.Л. Скоренцев, Н.М. Русин, К.О. Акимов, А.Ю. Никонов

Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, Томск, Россия; [skoralexan@mail.ru](mailto:skoralexan@mail.ru)

Проведено исследование влияния мощности лазера на структуру и трибомеханические свойства синтезированного методом селективного лазерного сплавления (СЛС) сплава Al-40Sn. Установлено, что в процессе СЛС в сплаве формируется слоистая структура. При этом каждый слой содержит области вытянутой эллиптической формы, состоящие из фрагментов с определенной ориентацией алюминиевых зерен. С увеличением мощности лазера структура сплава огрубляется. Прочность исследуемых сплавов значительно превышает ее значение для спеченного сплава Al-40Sn. Доуплотнение полученных образцов приводит к значительному уменьшению пористости и повышению  $\sigma_B$  до 150 МПа.

**Введение.** Алюминиевые сплавы применяются в подшипниках скольжения в качестве замены более дорогостоящих и тяжелых вкладышей на основе меди (бронзы) и олова (баббиты). Однако область их применения ограничивается склонностью алюминия к схватыванию с контртелом в условиях дефицита жидкой смазки, которые всегда имеют место в процессе работы узла трения. Для решения данной проблемы в такие сплавы добавляют мягкое олово, способное размазываться по поверхности трения и препятствовать схватыванию [1]. С ростом содержания олова ( $C_{Sn}$ ) давление схватывания сплавов Al-Sn возрастает, а максимальная их износостойкость достигается при  $C_{Sn} = 40\%$  масс. ( $\approx 20\%$  об.) [2].

Однако прочность двухфазных материалов Al-Sn, полученных традиционными методами невысокая и заметно снижается с увеличением содержания олова. Повысить их прочностные свойства можно путем легирования алюминиевой матрицы элементами, приводящими к ее твердорастворному или дисперсионному упрочнению [3]. Однако в первом случае часть легирующих элементов неизбежно попадает в олово и, следовательно, ухудшает его смазочные свойства. Наличие же твердых частиц на поверхности трения приводит к дополнительному износу дорогостоящего контртела.

Добиться повышения прочности указанных сплавов можно путем формирования в них мелкодисперсной структуры, обеспечивающей малую длину свободного пробега дислокаций. Перспективным методом получения такой структуры является селективное лазерное сплавление (СЛС) порошковой смеси нужного состава, при котором формирующийся сплав испытывает большие скорости нагрева и охлаждения за счет высокоэнергетического воздействия лазерного луча в локальных областях. Данный метод за счет послойного выращивания позволяет получать изделия практически любой формы. В последние годы он активно развивается и нашел широкое применение для получения алюминиевых сплавов. Например, прочностные свойства полученных методом СЛС силуминов значительно превосходят промышленные аналоги [4].

**Целью настоящей работы** является изучение особенностей влияния мощности лазерного излучения на формирующуюся структуру и зависящих от нее трибомеханических свойств сплава Al-40Sn.

**Материал и методика эксперимента.** Для получения сплава исследуемого состава Al-40Sn (масс. %) использовалась смесь коммерческих порошков алюминия АСД-1 (ТУ 48-8-226-87) и олова марки ПО 2 (ГОСТ 9723-73). Порошки смешивались в течение четырех часов в смесителе Турбула, а затем полученная смесь сушилась в вакуумном шкафу в течение 3 часов при 120 °С.

СЛС осуществляли с использованием 3D-принтера марки ONSINT AM150 в атмосфере проточного аргона высокой чистоты. Температура силуминовой подложки составляла  $120 \pm 3$  °С. Толщина носимого слоя порошковой смеси составляла 30 мкм, а коэффициент запаса подачи порошка – 1,3. Стратегия сканирования луча была линейная, с поворотом на 67°, а скорость сканирования составляла 1200 мм/с. Диаметр пятна лазера был  $75 \pm 5$  мкм, а межтрековое расстояние – 90 мкм. Синтезированные образцы имели размеры 10x10x10 мм. Часть полученных образцов подвергалась последующему доуплотнению в пресс форме с каналом 10x10 мм при температуре 250 °С.

Плотность ( $\rho$ ) синтезированных образцов определяли методом гидростатического взвешивания (ГОСТ 20018-74). Их пористость ( $\Pi$ ) рассчитывали по формуле:  $\Pi = (\rho_T - \rho) / \rho_T$ , где  $\rho_T$  – теоретическая плотность. Механические испытания материала осуществляли методом сжатия на универсальной машине Instron-1185 со скоростью осадки образцов – 0,5 мм/мин. Торцы сжимаемых образцов смазывали графитом. Продольная ось вырезанных образцов совпадала с направлением наращивания материала. Испытания на износостойкость проводили при сухом трении по стальному (сталь 40Х) диску на триботестере «Tribotechnic» (France по схеме «палец-диск»). Площадь контактной поверхности составляла 4 мм<sup>2</sup>, а скорость скольжения была 0,6 м/с. Для каждого режима СЛС испытывалось не менее трех образцов.

Для приготовления шлифов полученные образцы разрезали напополам вдоль направления наращивания материала. Затем плоскость среза подвергалась шлифованию на наждачной бумаге с убыванием размера абразивных частиц, а затем полировалась на сукне с алмазной суспензией. Поверхность шлифов травили в 4% растворе азотной кислоты в спирте, а затем тщательно промывали в ультразвуковой ванне со спиртом.

Для исследований структуры сплавов использовали растровый LEO EVO 50 (Carl Zeiss, Germany) микроскоп со встроенным микроанализатором. Данные для рентгенофазового анализа были получены с помощью дифрактометра ДРОН-8Н с использованием  $\text{Cu K}\alpha$  излучения ( $\lambda=1,5406 \text{ \AA}$ ) в интервале углов от  $10$  до  $110^\circ$ . Для обработки результатов использовали программный комплекс PDWin (Буревестник, Россия). Используемое в работе оборудование было предоставлено ЦКП «НАНОТЕХ» ИФПМ СО РАН.

**Результаты и их обсуждение.** На приведенных изображениях структуры синтезированных сплавов видно, что она имеет слоистый характер (рис. 1). Слои состоят из вытянутых областей (полу)эллиптической формы, отделённых друг от друга светлыми границами с повышенным содержанием олова и представляющих собой следы ванн расплава. Вытянутая их форма указывает, что данные области сформировались в результате кристаллизации расплава, фронт которой двигался к середине ванны. Ширина областей достигает  $150 \text{ мкм}$  и значительно превышает диаметр пятна лазера. Следовательно, при прохождении луча плавится не только материал в месте его падения, но и в прилегающих областях.

При больших увеличениях (рис. 1) видно, что указанные выше области состоят из фрагментов, отличающихся от соседних ориентацией заключённых в них алюминиевых зерен и расположенных между ними оловянных включений. С увеличением мощности лазера структура сплава огрубляется. Так, средняя толщина алюминиевых зерен в полученном при  $P = 10 \text{ Вт}$  сплаве составляет менее  $1 \text{ мкм}$ , тогда как в случае  $P = 190 \text{ Вт}$  ее значение было около  $5 \text{ мкм}$ . Укрупнение структуры сплава означает, что при увеличении мощности излучения объём ванны с

расплавленным материалом возрастает, а скорость его охлаждения снижается.

Полученные при различной мощности материалы содержат также значительное количество пор и расслоев, характерных для СЛС сплавов. Обнаружено, что зависимость пористости от мощности лазера нелинейная (табл. 1). С увеличением  $P$  до  $130 \text{ Вт}$  пористость сплава Al-40Sn снижается и составляет  $5 \%$ . При этом практически исчезают границы между слоями (рис. 1б), что свидетельствует о более однородном перемешивании материала при воздействии лазерного излучения. При последующем увеличении  $P$  до  $190 \text{ Вт}$  пористость и число расслоев возрастает.

Под воздействием высокоэнергетического лазерного луча порошковая смесь подвергается значительным скоростям нагрева и охлаждения. В результате материал испытывает большие напряжения, которые приводят к возникновению большого количества дислокаций в алюминиевых зернах. Рентгеноструктурный анализ показал, что плотность дислокаций ( $\rho$ ) в полученных сплавах составляет  $(3,5-6) \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}$ , в зависимости от  $P$ , тогда как в случае спеченного сплава аналогичного состава  $\rho \sim 1,6 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}$ , то есть, в 2-4 раза ниже.

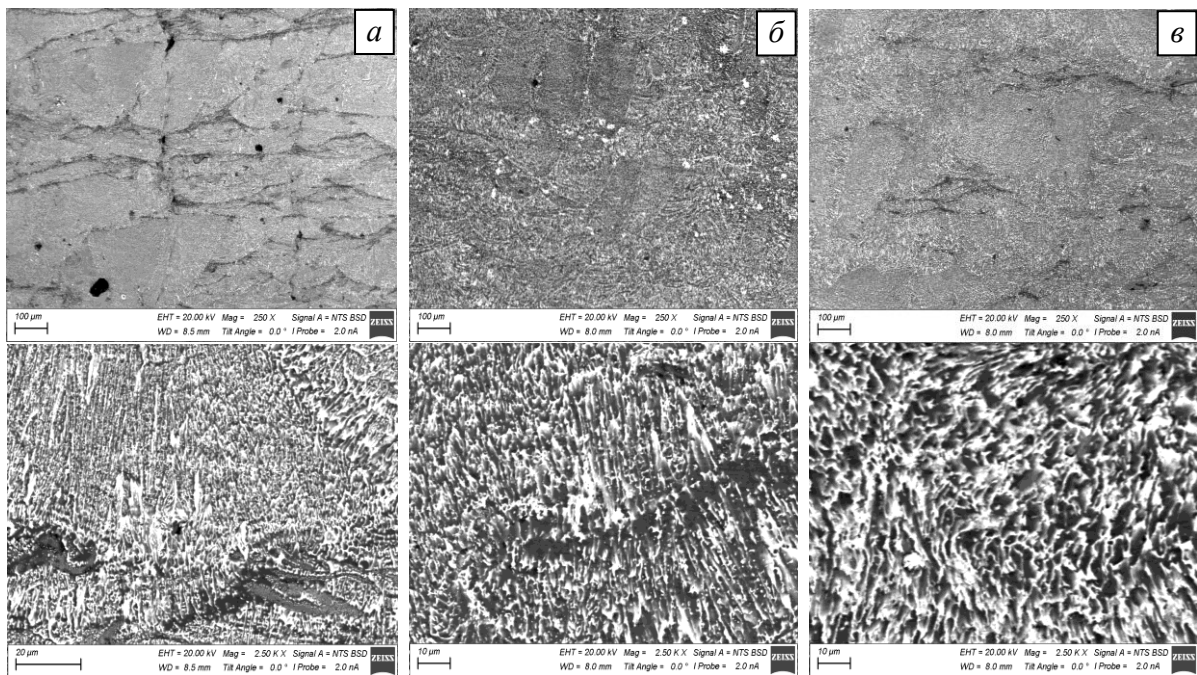


Рис. 1. Микроструктура синтезированного методом СЛС сплава Al-40Sn. Мощность лазера  $P$ , Вт: 30 – а, 130 – б, 190 – в

Таблица 1. Пористость и механические свойства полученных методом СЛС сплавов Al-40Sn

Мощность лазера, Вт	Пористость, %	Предел текучести $\sigma_{0,2}$ , МПа	Предел прочности $\sigma_B$ , МПа	Деформация в точке $\sigma_B$ $\epsilon(\sigma_B)$ , %
30	6,5	87	102	1,4
70	6,2	84	99	1,2
90	6,3	82	95	1,5
110	5,9	76	93	1,8
130	5	75	99	3,4
+ ГД (300 МПа)	2,5	112	134	1,8
+ ГД (500 МПа)	1,1	133	152	1
150	6,7	78	93	2,5
190	8,3	75	96	3,1
Спекание	-	48	80	> 20

Более высокий уровень микронапряжений в синтезированном сплаве приводит к тому, что прочностные свойства СЛС сплавов Al-40Sn значительно превышают аналогичные значения для спеченного сплава, имеющего крупнозернистую алюминиевую матрицу. Так, предел текучести  $\sigma_{0,2}$  полученного при  $P = 10$  Вт сплава составлял 87 МПа и немного снижался (до 75 МПа) с ростом мощности лазера. При этом максимальная их прочность  $\sigma_B$  слабо зависит от  $P$ . Вероятно, данная закономерность связана с тем, что при больших значениях  $P$  пластичность образцов выше и они испытывают большее деформационное упрочнение, в результате чего их  $\sigma_B$  достигает тех же значений, что и у полученных при малой мощности образцов. Однако пластичность СЛС сплавов была значительно ниже по сравнению со спеченным сплавом Al-40Sn.

С целью устранения пор и других структурных дефектов полученный при  $P = 130$  Вт сплав, обладающий наилучшей пластичностью, был подвергнут последующему горячему доуплотнению при 250 °С. Обнаружено, что такая обработка под давлением 300 МПа, что в три раза больше предела текучести сплава, приводит к двухкратному снижению его пористости и увеличению  $\sigma_B$  на 35 МПа (рис. 2). В свою очередь, обработка при давлении 500 МПа еще больше уплотняет сплав Al-40Sn, пористость которого снижается до 1,1 %, а  $\sigma_B$  возрастает до 152 МПа (табл. 1). Такое значение  $\sigma_B$  соответствует требованиям, предъявляемым к прочности монометаллических подшипников скольжения [5].

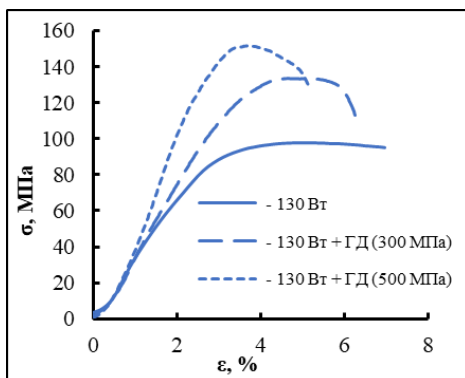


Рис.2. Кривые сжатия сплавов Al-40Sn, полученных методом СЛС и подвергнутых последующему доуплотнению

Испытания на износостойкость при сухом трении показали, что интенсивность изнашивания полученного при 130 Вт и подвергнутого последующему доуплотнению сплава Al-40Sn при 1 МПа составляет 0,12 мкм/м и не уступает ее значениям для спеченного и упрочненного твердыми частицами алюминиевых сплавов с аналогичным содержанием Sn. С ростом давления до 5 МПа интенсивность изнашивания исследуемого сплава резко возрастает и становится заметно хуже по сравнению с указанными материалами. Данный факт, вероятно, связан с низкой пластичностью сплава Al-40Sn, эффект от величины которой начинает сказываться при высоких давлениях. Повысить ее можно путем различной термической обработки синтезированных образцов.

**Закключение.** Установлено, что метод СЛС позволяет получать прочный сплав Al-40Sn с мелкозернистой структурой, размер структурных элементов которого возрастает с увеличением мощности лазера. Прочность его значительно превышает ее значение для спеченного композита эквивалентного состава и мало зависит от мощности лазерного излучения. Доуплотнение полученных сплавов при 250 °С приводит к значительному уменьшению их пористости и повышению предела прочности до 152 МПа. При этом пластичность сплавов Al-40Sn остается низкой, что является причиной их повышенного износа при высоких нагрузках в процессе сухого трения по стали.

Работа выполнена в рамках реализации проекта РНФ № 24-79-10099.

1. Буше Н.А., Двоскина В.А., Раков К.М., Гуляев А.С. Подшипники из алюминиевых сплавов. М.: Транспорт. 1974. 256 с.
2. Rusin N.M., Skorentsev A.L., Kolubaev E.A. Effect of equal channel angular pressing on mechanical and tribological properties of sintered Al-Sn composites // Journal of Materials Engineering and Performance. 2020. V. 29. P.1955–1963.
3. Yuan G.-C., Zhang X.-M., Lou Y.-X., Li Z.-J. Tribological characteristics of new series of Al-Sn-Si alloys // Transactions of Non-ferrous Metals Society of China. 2003. V.13. № 4. P.774–780.
4. Рябов Д.К., Антипов В.В., Королев В.А., Медведев П.Н. Влияние технологических факторов на структуру и свойства силумина, полученного с использованием технологии селективного лазерного синтеза. Авиационные материалы и технологии. 2016. № S1. С. 44–51.
5. Миронов А.Е., Белов Н.А., Столярова О.О. (ред.) Алюминиевые сплавы антифрикционного назначения. М.: Изд. дом МИСиС. 2016. 222 с.

## ИССЛЕДОВАНИЕ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ, ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ И ФРИКЦИОННЫХ СВОЙСТВ КМ С УГЛЕРОДНОЙ МАТРИЦЕЙ, ПРИМЕНЯЕМЫХ В ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ УСЛОВИЯХ В СОСТАВЕ АВИАЦИОННЫХ ТОРМОЗНЫХ СИСТЕМ

А.А. Слюсарев<sup>1</sup>, М.И. Панин<sup>1</sup>, П.А. Цепаев<sup>1</sup>, А.Р. Гареев<sup>1</sup>, О.И. Кулаков<sup>2</sup>,  
Т.А. Соболева<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Акционерное общество «Научно-исследовательский институт конструкционных материалов на основе графита «НИИГрафит» (АО «НИИГрафит»), Москва, Россия; [AASlyusarev@rosatom.ru](mailto:AASlyusarev@rosatom.ru)

<sup>2</sup>Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, Москва, Россия

Исследовано и оценено влияние различных текстильных структур и природы углеродной матрицы на физико-механические, теплофизические и фрикционные свойства УУКМ для авиационных тормозных систем. В рамках изучения влияния внешних факторов на фрикционные УУКМ определена скорость окисления. Фрикционные испытания показали различия, а также положительные и отрицательные стороны применения войлочных и тканых наполнителей в составе УУКМ с пироуглеродной и пековой матрицей.

Углерод-углеродные композиционные материалы (УУКМ) благодаря высокому механическому характеристикам, обладающие свойством их сохранения до температуры 2000 °С, применяют как жаропрочные и термостойкие материалы в химическом машиностроении, авиационной и ракетно-космической технике.

По своей структуре УУКМ можно описать как композиционный материал на основе углеродных волокнистых наполнителей с использованием углеродных волокон, нетканых полотен, тканей, намоток и углеродной матрицы на базе коксовых остатков нефтяных или каменноугольных пеков, синтетических смол или пиролитического углерода. Применение текстильных заготовок из углеродных волокнистых наполнителей является основой для производства фрикционных материалов, используемых в тяжело нагруженных узлах трения.

УУКМ обладают меньшим весом по сравнению с металлическими или керамическими материалами, более низкой плотностью (в диапазоне 1,3-1,9 г/см<sup>3</sup>), высокой прочностью при повышенных температурах, низким коэффициентом теплового линейного расширения, высоким коэффициентом теплопроводности, высокой стойкостью к тепловому удару. Такие свойства, вкуче с сохранением и увеличением механических характеристик при эксплуатации до 2000 °С, делают УУКМ незаменимыми при использовании в качестве высокотемпературных материалов [1].

Один из вариантов применения таких материалов – использование в конструкциях авиационных тормозных систем в качестве материалов тормозных дисков. Такой выбор обусловлен сочетанием комплекса прочностных характеристик с малым удельным весом и возможностью существенного снижения массы конструкции.

УУКМ обладают высокой термостойкостью, стабильным коэффициентом трения, обеспечивающим эффективное торможение, а также способностью к быстрому и эффективному переводу кинетической энергии самолета в тепловую. В настоящий момент развитие авиационной техники сопровождается увеличением массы и посадочных скоростей самолетов, что приводит к возрастанию эксплуатационных нагрузок на тормозные системы [2]. Одним из путей повышения ресурса и работоспособности тормозных

систем является разработка новых и совершенствование уже известных материалов тормозных дисков. Сейчас на мировом рынке ведущие фирмы представили материалы, обладающие ресурсом до 4500 циклов «взлет-посадка» [2]. Наблюдается серьезное отставание отечественных материалов по характеристикам ресурса работы от мирового уровня [2]. Целью данной работы является разработка отечественных аналогов фрикционных УУКМ и оценка их свойств, в сравнении с зарубежными аналогами.

### Оценка физико-механических свойств волокна, используемого для создания армирующего каркаса УУКМ

Для формирования иглопробивных каркасов использовали ткани с поверхностной плотностью 400 и 600 г/м<sup>2</sup> на основе нитей марок UMT 49, T 700 и SYT 45S. Для измерения модуля упругости и филаментарной прочности в качестве образцов использовали волокна различных марок тканей зарубежного и отечественного производства (таблица 1).

Таблица 1. Физико-механические характеристики волокна.

Волокно	Филаментарная прочность, ГПа	Модуль упругости, ГПа	Плотность волокна, г/см <sup>3</sup>
UMT 49	4,9	255	1,79
SYT 45S	4,5	230	1,79
T 700	4,9	230	1,79

Из полученных данных видно, что все марки волокон схожи по характеристикам, обладая небольшими отличиями лишь в филаментарной прочности и модуле упругости.

### Исследование и оценка влияния различных упорядоченных текстильных структур на физико-механические и теплофизические свойства УУКМ для авиационных тормозных систем

Технологический процесс изготовления УУКМ можно разделить на следующие стадии: изготовление армирующего каркаса иглопробивным способом; циклы предварительной пропитки каркасов средне-температурным каменноугольным пеком;



вакуумную заливку (ВЗ) заготовок высокотемпературным каменноугольным пеком, их пропитку и карбонизацию под давлением (ПКД) с последующей высокотемпературной обработкой (ВТО) заготовок в электровакуумных печах.

Фрикционные УУКМ армируют различными способами – дисперсными волокнами, либо каркасами на основе углеродной ткани или войлока, полученными иглопробивным методом с послойным наращиванием толщины каркаса. В данной работе проведено исследование фрикционных УУКМ производства АО «НИИГрафит» (УУКМ 1-3), Safran SA и Goodrich Corporation. УУКМ 1-3 изготовлены из углеродного каркаса на основе тканей различных марок и уплотнены при помощи жидкофазной технологии, а зарубежные аналоги произведены на основе углеродного войлочного каркаса с последующим пиролитическим уплотнением.

В таблице 2 приведены данные исследования физико-механических и теплофизических свойств различных УУКМ. Из полученных данных видно, что при небольшом различии в плотности и пористости, исследуемых УУКМ, имеется существенная разница предела прочности при сжатии. УУКМ 1-2 имеют показатель предела прочности гораздо выше, нежели зарубежные аналоги. Такой результат обоснован использованием тканых структур для армирующего каркаса. Аналогичный результат наблюдается при сравнении результатов предела прочности при растяжении и изгибе. Тканая структура позволяет лучше реализовать потенциал волокна, нежели объемное наполнение войлоком. Разница в прочности между УУКМ 1-2 и 3 заключается в доле объемного армирования каркасов на основе ткани с поверхностной плотностью 400 и 600 г/см<sup>2</sup> (40-45% и 35% соответственно). Чтобы реализовать все свойства волокна SYT 45S необходимо повысить содержание матрицы в УУКМ-3. Для этого провели дополнительный цикл ПКД и определили прочность при сжатии. Повысив плотность УУКМ-3 до 1,85 г/см<sup>3</sup>, прочность при сжатии возросла до 170 МПа.

Таблица 2. Физико-механические и теплофизические свойства фрикционных УУКМ.

Характеристики материала	УУКМ-1 (УМТ 49)	Safran	УУКМ-2 (Т 700)	УУКМ-3 (SYT 45S)	Goodrich
Поверхностная плотность углеродной ткани, г/см <sup>2</sup>	400	-	400	600	-
Плотность, г/см <sup>3</sup>	1,70	1,76	1,77	1,75	1,75
Пористость, %	13,6	14,0	12,2	15,0	15,6
Предел прочности при сжатии, по оси Z, МПа	181,7	119,8	200,0	108,0	118,0
Предел прочности при изгибе, по оси Z, МПа	92,9	98,5	100,6	122,4	93,5
Предел прочности при сдвиге, МПа	8,6	8,0	11,2	19,1	8,5

Предел прочности при растяжении, МПа	-	30,3	52,6	83,8	-
Ударная вязкость по оси Z, кДж/м <sup>2</sup>	-	33,27	102,11	33,14	30,21
Коэффициент теплопроводности, по оси Z, Вт/(м*К) При T (20 °C)	10,8	12,2	19,1	26,2	10,3
Коэффициент теплопроводности, по оси XY, Вт/(м*К) При T (20 °C)	32,8	24,7	39,1	38,6	23,4
ТКЛР Z, α·10 <sup>-6</sup> К <sup>-1</sup>	-	2,1	4,5	3,9	-
ТКЛР XY, α·10 <sup>-6</sup> К <sup>-1</sup>	-	0,59	0,75	0,85	-
Примечание – Направление Z, XY указывает ориентацию вырезки образцов. Z – перпендикулярно слоям, XY – параллельно слоям.					

Более высокой прочностью на сжатие обладают материалы с применением исходных текстильных структур с меньшей поверхностной плотностью при одинаковой объемной плотности УУКМ. При сравнении предела прочности при изгибе и растяжении УУКМ 1-3 возникает обратная зависимость. Такой результат связан с увеличением количества слоев ткани в каркасе, что влечет за собой увеличение количества проколов при иглопробивке и большее травмирование структуры ткани и волокна.

Сравнивая результаты испытаний на ударную вязкость, можно сделать вывод о том, что УУКМ-2, более устойчив к распространению магистральных трещин.

Теплопроводность материала УУКМ зависит от структуры волокна, плотности УУКМ, степени армирования материала и температуры термообработки волокна и матрицы. Образцы из зарубежного материала на основе войлочного каркаса и пироуглеродной матрицы в плоскости слоя имеют меньшее значение коэффициента теплопроводности, в отличие от УУКМ 1-3. В свою очередь в направлении оси Z коэффициент теплопроводности почти одинаков для образцов УУКМ-1, Safran и Goodrich.

В рамках изучения влияния внешних факторов на фрикционные УУКМ определена скорость окисления. Сущность метода заключается в экспериментальном определении величин скорости окисления в интервале температур 500-700 °C. При этом, скорость окисления образцов углеродных материалов в токе кислорода воздуха определяется весовым методом по потере массы образца в единицу времени на единицу первичной массы.

Из экспериментальных результатов, представленных на рисунке 1, видно, что скорость потери массы образцов УУКМ-1 и Safran в области температур 500-600 °C практически не отличается. В интервале температур 700 °C скорость потери массы УУКМ-1 увеличивается на 25% при сопоставимой открытой пористости (УУКМ-1 и Safran 13,6% и 14% соответственно) до начала окисления. Скорость потери

массы образцов УУКМ-2 в 2 раза выше, чем у УУКМ-1 и Safran, хотя открытая пористость – 12,2% до начала окисления. УУКМ-3 показал наилучшую стойкость к окислению при открытой пористости 15%.

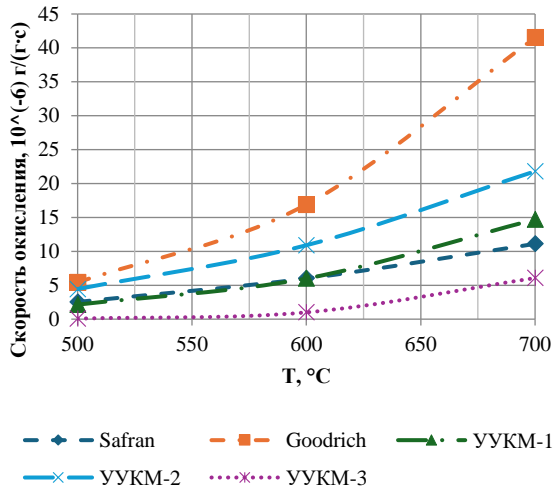


Рисунок 1. Зависимость скорости окисления образцов фрикционных УУКМ от температуры окружающей среды. Плотность и пористость образцов соответствует данным таблицы 2. Образец УУКМ-3 испытан до проведения дополнительного цикла ПКД (плотность 1,75 г/см³).

Заметны логически противоречивые результаты — увеличение открытой пористости и одновременное снижение абсолютной потери массы. В рамках методики определения скорости окисления среднее значение трех параллельных измерений границы погрешности не превышают 3,3% отн., а для методики измерения пористости – границы погрешности не превышают 4% отн. Возможно, в случае УУКМ-1 и УУКМ-2 диффузионный фактор скорости окисления пористой структуры материала доминирует над фактором величины потенциальной поверхности гетерогенной реакции [3] за счет большего содержания волокна в упорядоченной текстильной структуре каркаса УУКМ.

В то же время, при рассмотрении параметров скорости окисления и сравнивая открытую пористость образцов УУКМ-1 и Goodrich, имеет место ожидаемая пропорциональная зависимость. Увеличение открытой пористости коррелирует с увеличением потери массы в результате окисления пористого материала.

В рамках изучения структуры фрикционных материалов проведена компьютерная рентгеновская микротомография 3-х кубических образцов фрикционных УУКМ размером 10×10×10 мм и построены их трехмерные модели.

На томографических снимках видно различие в структуре материала УУКМ-1 и Safran. В обеих плоскостях УУКМ-1 заметна меньшая дефектность (пористость и трещины). Также четко прослеживается упорядоченная структура ткани – нити основы и утка, а также слоистость материала.

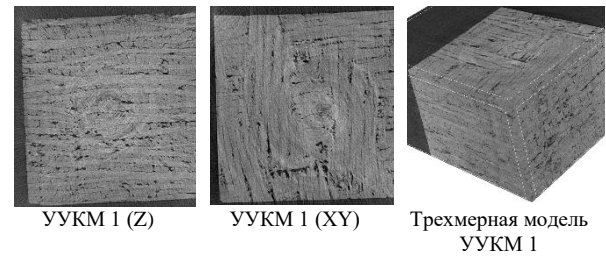


Рисунок 2. Томографический снимок фрикционного материала УУКМ-1.

Материала Safran обладает меньшим количеством слоев и хаотичной структурой войлочного материала в плоскости слоя. Большая дефектность материала Safran подтверждает низкую прочность при сжатии и возможно вызвана тем, что изучаемый авиационный тормозной диск был в эксплуатации.

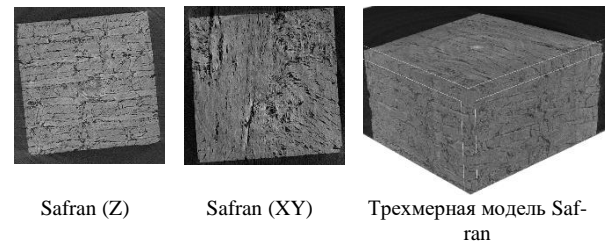


Рисунок 3. Томографический снимок фрикционного материала Safran.

### Оценка фрикционных свойств УУКМ для авиационных тормозных систем

Для проведения испытаний на фрикционную теплостойкость использовали машину трения УМТ-1М. Схема испытаний, а также принципиальные основы метода подробно изложены в работах [4-11].

Основные результаты по измерению трибологических характеристик фрикционных УУКМ представлены ниже в виде зависимостей различных параметров.

На графике зависимости коэффициента трения от объемной температуры (рисунок 4) видно, что УУКМ-1 имеет коэффициент трения, отличающийся в разы от зарубежных материалов, вплоть до 275 °С. Это явление имеет как свои плюсы так минусы. При высоком значении коэффициента трения должен повышаться линейный износ, однако, как видно из рисунка 5, линейный износ уже при 200 °С сопоставим или ниже, чем у зарубежных аналогов. При этом стабильность коэффициента трения всегда на довольно высоком уровне – от 0,625 до 0,8 (рисунок 6).

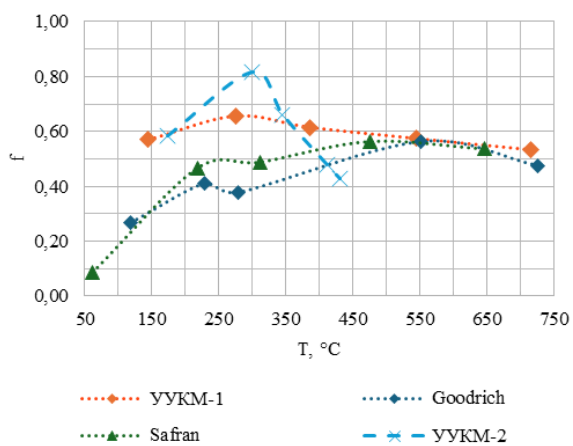


Рисунок 4. Зависимость коэффициента трения от температуры.

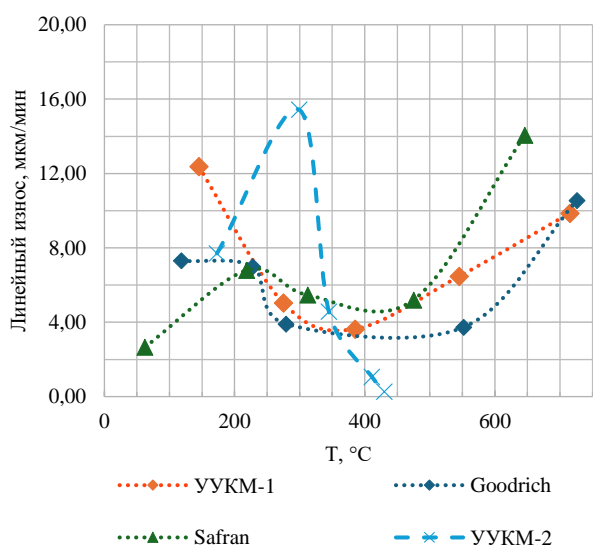


Рисунок 5. Зависимость скорости линейного износа от температуры.

УУКМ-3 ведет себя совершенно иначе. При повышении объемной температуры до 300 °С сильно увеличивается коэффициент трения, его стабильность и линейный износ. При этом на конечных режимах испытаний материал самый холодный из-за снижения коэффициента трения, что привело к снижению линейного износа и уменьшению стабильности коэффициента трения на высоких скоростях испытаний. При температурах свыше 450 °С в механизм линейного износа включается окислительный фактор, что приводит к резкому возрастанию скорости потери массы образцов УУКМ.

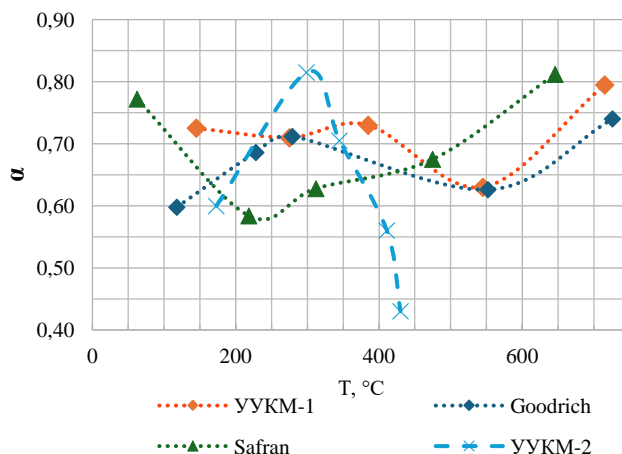


Рисунок 6. Зависимость стабильности коэффициента трения от температуры.

Определение коэффициента трения, величины линейного износа и стабильности коэффициента трения выполняется по методике РД 50-329-82 «Теплоимпульсный метод испытаний фрикционных материалов» на малом инерционном стане ИМ-58М. Схема испытаний, а также принципиальные основы метода подробно изложены в работах [4-10, 12].

Таблица 2. Фрикционные характеристики УУКМ после 15 торможений.

	Safran	УУКМ-3.1	УУКМ-3.2	УУКМ-3.3	УУКМ-2
Коэффициент трения	0,42	0,32	0,36	0,35	0,42
Стабильность коэффициента трения	0,85	0,59	0,76	0,71	0,76
Линейный износ, мкм/торм	2,61	1,55	1,22	1,76	1,79
Средняя объемная температура, °С	498	-	476	409	435,5

Из полученных данных видно, что линейный износ УУКМ 2-3 варьируется от 1,2 до 1,8 мкм/торм., что является довольно хорошим результатом, при несколько сниженных значениях коэффициента трения и его стабильности по сравнению с зарубежным аналогом. Также, при более высоком коэффициенте теплопроводности перпендикулярно поверхности трения, объемные температуры сопоставимы или ниже значений Safran и Goodrich.

### Заключение

Проведена оценка физико-механических, теплофизических и фрикционных свойств композиционных материалов с углеродной матрицей зарубежного и отечественного производства, применяемых в составе авиационных тормозных систем.

УУКМ 1-2 имеют показатель предела прочности гораздо выше, нежели зарубежные аналоги. Такой результат обоснован использованием тканых структур для армирующего каркаса. Более высокой прочностью на сжатие обладают материалы с применением исходных текстильных структур с меньшей поверхностной плотностью при одинаковой объемной плотности УУКМ. Такой результат связан с увеличением количества слоев ткани в каркасе, что влечет за собой увеличение количества проколов при иглопробивке и большее травмирование структуры ткани и волокна.

Образцы из зарубежного материала на основе войлочного каркаса и пироуглеродной матрицы в плоскости слоя имеют меньшее значение коэффициента теплопроводности, в отличие от УУКМ 1-3. В свою очередь в направлении оси Z коэффициент теплопроводности почти одинаков для образцов УУКМ-1, Safran и Goodrich.

Скорость потери массы образцов УУКМ-1 и Safran в области температур 500-600 °С практически не отличается. В интервале температур 700 °С скорость потери массы УУКМ-1 увеличивается при сопоставимой открытой пористости до начала окисления. Скорость потери массы образцов УУКМ-2 в 2 раза выше, чем у УУКМ-1 и Safran. УУКМ-3 показал наилучшую стойкость к окислению.

На томографических снимках видно различие в структуре материала УУКМ-1 и Safran. В обеих плоскостях УУКМ-1 заметна меньшая дефектность (пористость и трещины). Также четко прослеживается упорядоченная структура ткани – нити основы и утка, а также слоистость материала. Материала Safran обладает меньшим количеством слоев и хаотичной структурой войлочного материала в плоскости слоя. Большая дефектность материала Safran подтверждает низкую прочность при сжатии и, возможно, вызвана тем, что изучаемый авиационный тормозной диск был в эксплуатации.

Испытания на фрикционную теплостойкость показали различия, а также положительные и отрицательные стороны применения войлочных и тканых наполнителей в составе УУКМ с пироуглеродной и пековой матрицей.

Модельные испытания торможений показали, что линейный износ УУКМ 2-3 варьируется от 1,2 до 1,8

мкм/торм., что является довольно хорошим результатом, при несколько сниженных значениях коэффициента трения и его стабильности по сравнению с зарубежным аналогом. Также, при более высоком коэффициенте теплопроводности перпендикулярно поверхности трения, объемные температуры сопоставимы или ниже значений материалов компаний Safran и Goodrich.

1. Fitzer, E. The future of carbon-carbon composites / Fitzer E. // Carbon. – 1987. – V. 25. – N. 2. – P.163-190.
2. Savage, G. Carbon-carbon composites / Savage G. - London: Chapman and Hall, 1993. – 389 p.
3. Е.Г. Чеблакова, М. Ю. Бамборин, Д. С. Максимова, А.Р. Гареев, С. А. Колесников / Повышение огнеупорности углеродных композиционных материалов за счет ограничения гетерогенной поверхности окисления / Научные исследования и разработки. 2016, №4, с 13 – 23
4. Чичинадзе А. В. Теории тепловой динамики и моделирования трения и износа фрикционных пар при оценке фрикционной теплостойкости и теплоимпульсного трения // В кн. “Трение, износ и смазка” / Под ред. А. В. Чичинадзе. — М.: Машиностроение. — 2003, 299—306.
5. Чичинадзе А. В. Полимеры в узлах трения машин и приборов: Справочник. — М.: Машиностроение. — 1988.
6. Чичинадзе А. В. Методы повышения прочности и износостойкости / В кн. “Прочность, ресурс, живучесть и безопасность машин”. — М.: Либроком. — 2008, 212—230.
7. Справочник по триботехнике. Т. 3 / Под. ред. М. Хебды, А. В. Чичинадзе. — М.: Машиностроение. — 1992.
8. Гурский Б. Э., Чичинадзе А. В. Тепловая задача трения / В кн. “Современная трибология”. — М.: Изд-во ЛКИ. — 2007, 297—320.
9. Чичинадзе А. В. Тепловая динамика трения и изнашивания фрикционных пар // Проблемы машиностроения и надежности машин. — 1996, № 5, 71—79.
10. Чичинадзе А. В. Моделирование трения и изнашивания фрикционных пар // Проблемы машиностроения и надежности машин. — 1996, № 6, 79—88
11. Кулаков, О. И. Модернизация машины трения УМТ / О. И. Кулаков // Научные труды 6-ой Международной научно-технической конференции "Живучесть и конструкционное материаловедение" (ЖивКоМ-2022), Москва, 09–11 ноября 2022 года. – Москва: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт машиноведения им. А.А. Благонравова Российской академии наук, 2022. – С. 190-192. – EDN KAOZVN.
12. Кулаков, О. И. Модернизация машины трения ИМ-58 / О. И. Кулаков // Научные труды 6-ой Международной научно-технической конференции "Живучесть и конструкционное материаловедение" (ЖивКоМ-2022), Москва, 09–11 ноября 2022 года. – Москва: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт машиноведения им. А.А. Благонравова Российской академии наук, 2022. – С. 187-189. – EDN SJXCXZ.

## АНАЛИЗ РАБОТЫ БЕТОННО-РАСТВОРНОГО УЗЛА И ПРИЧИНЫ ВЫХОДА ИЗ СТРОЯ АГРЕГАТОВ И УЗЛОВ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ

А.А. Смирнов, д.т.н., проф. М.Н. Ерофеев

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт машиноведения им. А.А. Благонравова Российской академии наук (ИМАШ РАН), Москва, Россия,  
humarist@bk.ru, erofeevnm@imash.ru

В статье рассмотрена проблема обеспечения высокого уровня качества и надежности рабочих элементов оборудования БРУ, сформированы основные факторы, вызывающие отказы рабочих элементов, и выделены наиболее подверженные этому элементы оборудования, определена необходимость совершенствования систем управления качеством и надежностью с использованием современных технологий контроля и информационных средств.

### Введение

За последние годы в России объемы строительства характеризуются существенным ростом ввода в эксплуатацию. Наибольший прирост увеличения темпов в России приходится на индустриальное строительство. За последние годы ключевым драйвером роста данного сегмента служит стремление к опережающей реализации проектов, связанных с импортозамещением. На фоне беспрецедентного санкционного давления из зарубежных стран и при использовании

инструментов и мер государственной поддержки инвесторам удается успешно реализовывать проекты.

Таблица 1. Ввод в действие зданий жилого и нежилого назначения в Российской Федерации [1]

	2021	2022 <sup>1)</sup>	2023 <sup>1)</sup>
<b>Количество введенных зданий - всего, тыс.</b>	<b>403,1</b>	<b>434,1</b>	<b>465,5</b>
в том числе:			
жилого назначения	383,4	413,0	445,8
нежилого назначения	19,7	21,1	19,7
<b>Общая площадь зданий - всего, млн. м<sup>2</sup></b>	<b>148,4</b>	<b>160,2</b>	<b>175,0</b>
в том числе:			
жилого назначения	114,4	126,7	139,3
нежилого назначения	34,0	33,5	35,7

1) Без учета статистической информации по Донецкой Народной Республике (ДНР), Луганской Народной Республике (ЛНР), Запорожской и Херсонской областям.

Такие высокие темпы и объемы строительства требуют соразмерного увеличения объемов рынка строительных материалов. Одним из ключевых материалов которого является - бетон.

В России отрасль машиностроения выпускающая оборудование для производства бетона всех назначений с введение антироссийских санкций получила новый виток развития. Отечественные производители, используя накопленный опыт эксплуатации и

современные возможности отечественной отрасли совершенствуют существующее и создают новые образцы технологического оборудования.

### Современные бетонно-растворные узлы

Бетонно-растворный узел (БРУ) – это сложный комплекс технологического оборудования, который обеспечивает полный цикл производства.

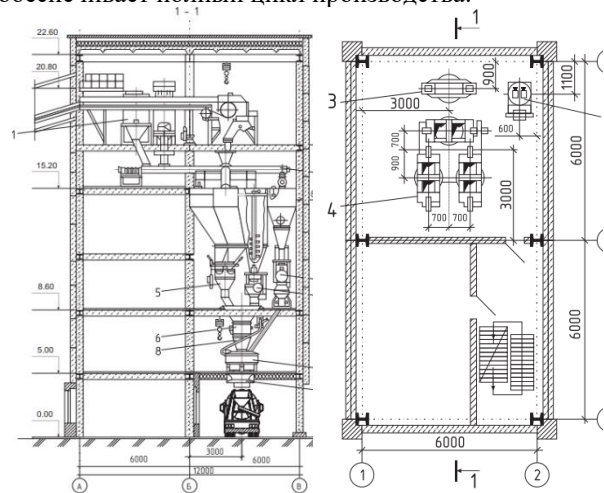


Рис. 1. Типовая автоматизированная секция БРУ с бетоно- и растворомесителями вместимостью 500–750 л [2],

где: 1 - циклон; 2 - конвейер винтовой; 3 - дозатор весовой для цемента; 4 - дозатор весовой для инертных материалов; 5 - дозатор весовой для жидкости; 6 - воронка сборная; 7 - бетоносмеситель (500 л); 8 - течка в бетоносмесителе; 9 - воронка выдачи бетона

В современных условиях в нашей стране и в мире существует огромное количество мелких, средних и крупных компаний по производству оборудования для строительной индустрии, поэтому диапазон изготавливаемых аппаратов достаточно велик, и можно легко подобрать нужный агрегат исходя из технических характеристик и, что немаловажно, его стоимости. [3]

По степени мобильности БРУ разделяют на стационарные и мобильные. По компоновке технологического оборудования выделяют линейную и гнездовую схемы.

Особый толчок развития за последние годы наблюдается на рынке мобильных БРУ. Этому послужил как рост темпов производства, так и развитие отечественной отрасли машиностроения в целом.

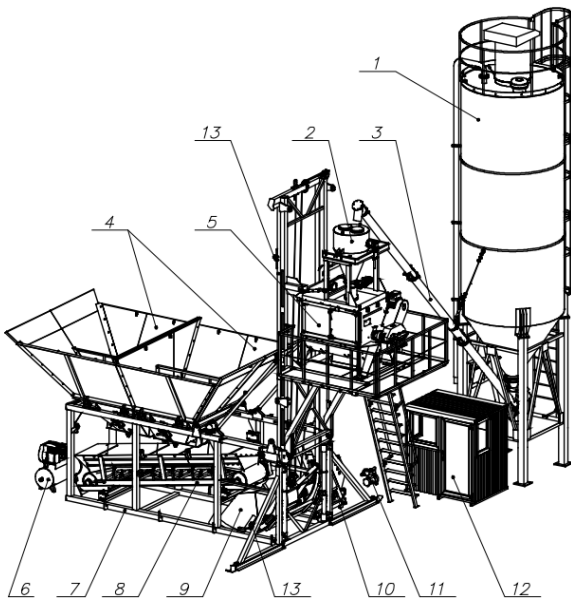


Рис. 2. Общий вид БРУ (на примере «РИФЕЙ-БЕТОН-МОБИЛЬНЫЙ-30») [4],

где: 1 – силос; 2 – блок дозатора цемента; 3 – конвейер винтовой (шнек); 4 – бункер заполнителя; 5 – смеситель; 6 – компрессор; 7 – шарнирная рама; 8 – конвейер взвешивающий; 9 – бункер скипа; 10 – привод скипа; 11 – дозатор воды проточный; 12 – кабина оператора с пультом управления; 13 – датчики крайнего положения скипа.

В ходе эксплуатации БРУ правильное и своевременное техническое обслуживание определяет качество и бесперебойность его работы, а также минимизирует внеплановый ремонт оборудования. Вместе с тем часть узлов и агрегатов испытывает высокие эксплуатационные нагрузки восприятие которых заложено в конструктивных особенностях оборудования.

### Виды отказов агрегатов и узлов технологического оборудования

Проблема обеспечения высокого уровня качества и надежности рабочих элементов оборудования является важной практической задачей, носящей многоплановый характер и тесно связанной со всеми этапами и стадиями их разработки, производства и эксплуатации.

Основные факторы, обуславливающие возникновение отказов агрегатов и узлов технологического оборудования БРУ возможно разделить на следующие группы:

1. Структурные несовершенства исходных материалов элементов, обусловленных наличием структурных дефектов.
2. Конструктивно-технологические дефекты процесса производства элементов.
3. Внешние воздействия, определяемые параметрами, учитывающими влияние режима работы и среды.

Отказы рабочих элементов вызываются

изменением параметра под влиянием внешних факторов и вследствие физико-механических изменений (явлений износа и старения). Опыт эксплуатации БРУ показывает, что наиболее подвержены отказам и требуют первоочередного диагностирования следующие элементы оборудования БРУ: система аспирации, фильтры, влагомалоотделители пневмосистем; рабочие элементы бетоносмесителей, шнековых транспортёров, лопастных питателей; челюстные, секторные и дроссельные затворы; транспортёрные и элеваторные ленты и ролики; концевые выключатели; подшипниковые узлы и торцевые уплотнения вращающихся и перемещающихся элементов и валов (цепные и ремённые передачи смесительные и шнековые валы, штоки пневмоцилиндров, опорные втулки затворов, редукторы, насосы).

Высокие требования, предъявляемые к качеству и надежности работы современных БРУ, большое разнообразие причин отказов технологического оборудования требуют совершенствования в построение систем автоматизированного управления качеством и надежностью с использованием высокоинформационных (например, нейросетевых) технологий и средств контроля всех этапов при эксплуатации БРУ.

### Выводы

В дальнейшем основной задачей по оптимизации работы агрегатов и узлов технологического оборудования мобильного БРУ будет необходимо:

7. Провести априорное ранжирование факторов влияющих на работоспособность БРУ.
8. Проанализировать задачи, условия, специфические особенности применения мобильных БРУ, причины возникновения наиболее частых отказов;
9. Определить перспективы создания и совершенствования основных нагружаемых узлов и агрегатов технологического оборудования;
10. Разработать математическую модель оптимизации технологических процессов на примере действующего БРУ;
11. На основании полученных материалов подготовить перечень практических рекомендаций в целях повышения эффективности работы БРУ.

### Ссылки на использованные источники

1. Данные Федеральной службы государственной статистики <https://rosstat.gov.ru/folder/14458>
2. С.В. Беднягин, Е.С. Герасимова, Проектирование бетоносмесительных предприятий по производству бетонных и железобетонных изделий и конструкций. 2019. С. 24-25.
3. С.В. Беднягин, Е.С. Герасимова, Проектирование бетоносмесительных предприятий по производству бетонных и железобетонных изделий и конструкций. 2019. С. 31.
4. Паспорт. Руководство по эксплуатации «РИФЕЙ-БЕТОН-МОБИЛЬНЫЙ-30» Бетонный завод. 2016. С.8-9.

## ТРИБОЛОГИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДНЫХ ЛОПАСТНЫХ НАСОСОВ

Н.И. Смирнов

Институт машиноведения им. А.А.Благонравова РАН, Москва, Россия; [smir1947@yandex.ru](mailto:smir1947@yandex.ru)

### Аннотация

Разработана методология исследования трибологических и динамических процессов электроприводных лопастных насосов с учетом их взаимовлияния. Приведены критерии подобия модели и природы при моделировании трибологических процессов. Получены расчетные зависимости износа сопряжений насосной секции и ступени от различных факторов.

**Ключевые слова:** УЭЛН, насосная ступень, износ, динамика

На работоспособность электроприводных лопастных насосов (ЭЛН) в значительной степени влияют трибологические процессы и динамика. Износ трибосопряжений приводит к увеличению динамики; динамика в свою очередь формирует характер и форму поверхности трения. Поэтому эти процессы необходимо рассматривать как взаимосвязанные. На практике превалируют исследования трибологических процессов при стационарных условиях, с применением моделей и испытательных стендов, не воспроизводящих реальных условий. Не разработаны методы решения динамических задач с учетом износа трибосопряжений. Это приводит к возникновению трудно объяснимых отказов насосов или непрогнозируемым износам и разрушениям [1].

**Задачей исследования** является разработка расчетно-экспериментального метода исследования трибодинамических процессов ЭЛН. Стратегия исследования, рис.1, состоит из следующих составляющих:

- численное моделирование динамики системы с целью определения частотного спектра поперечных и крутильных колебаний, резонансных частот,
- расчет предельного состояния корпуса и вала ЭЛН по критерию прочности при заданной величине износа радиальных сопряжений,
- трибодинамические испытания насосных секций с варьированием типоразмера, конструктивных особенностей, среды испытаний с целью получения кинетики и изменения износа по длине секции, формы износа трибосопряжений и виброскорости корпуса секции,
- разработка физической модели процесса изнашивания сопряжений насосной секции: радиальных сопряжений (ступеней и подшипников), осевых сопряжений (ступени, упорного подшипника), торцовых уплотнений,
- разработка комплекса испытательных стендов и методик испытаний деталей и узлов насосов и двигателей для исследования трибологических процессов.

**Исследование динамики** системы с учетом износа радиальных сопряжений [2] позволили получить основные характеристики процесса:

- конструкционные особенности насоса, в первую очередь отношение длины к диаметру, влияют на динамику – в области 10-13 Гц имеется 10-11 собственных частот колебаний, что характеризует «закритические» условия работы;
- в процессе износа радиальных сопряжений, вызванного первоначально исходным дисбалансом рабочих колес, могут реализовываться синхронная и асинхронная прецессия вала. Частота асинхронной прецессии для расчетного случая  $\sim 9,1$  Гц,
- изменение величины износа по длине насоса - неравномерное и зависит от конструктивных особенностей, в частности от расстановки промежуточных износоустойчивых подшипников,
- форма вращения вала должна учитываться при разработке трибологической модели ступени и секции.

**Трибологический аспект** заключается в определении износоустойчивости насосной секции, которая определяется преимущественно износоустойчивостью ступеней и подшипников. Основная сложность в исследовании процесса изнашивания субтильных механических систем заключается в их длине (3...5м), что исключает широкое использование натуральных испытаний. При модельных испытаниях необходимо обеспечить реальную динамику, т.е. синхронную и асинхронную прецессию рабочего колеса. Поэтому применили метод физического моделирования на основе аффинного подобия модели и природы. Откуда получили подобие динамических прогибов природы и модели при условии равенства критериев подобия

$\pi_1 = \frac{a^0}{m^0 L^2} = idem, \quad \pi_2 = EI^0 / L^4 m^0 \omega^0 = idem,$  где:  $I^0, m^0, a^0, L, \omega$  соответственно момент инерции

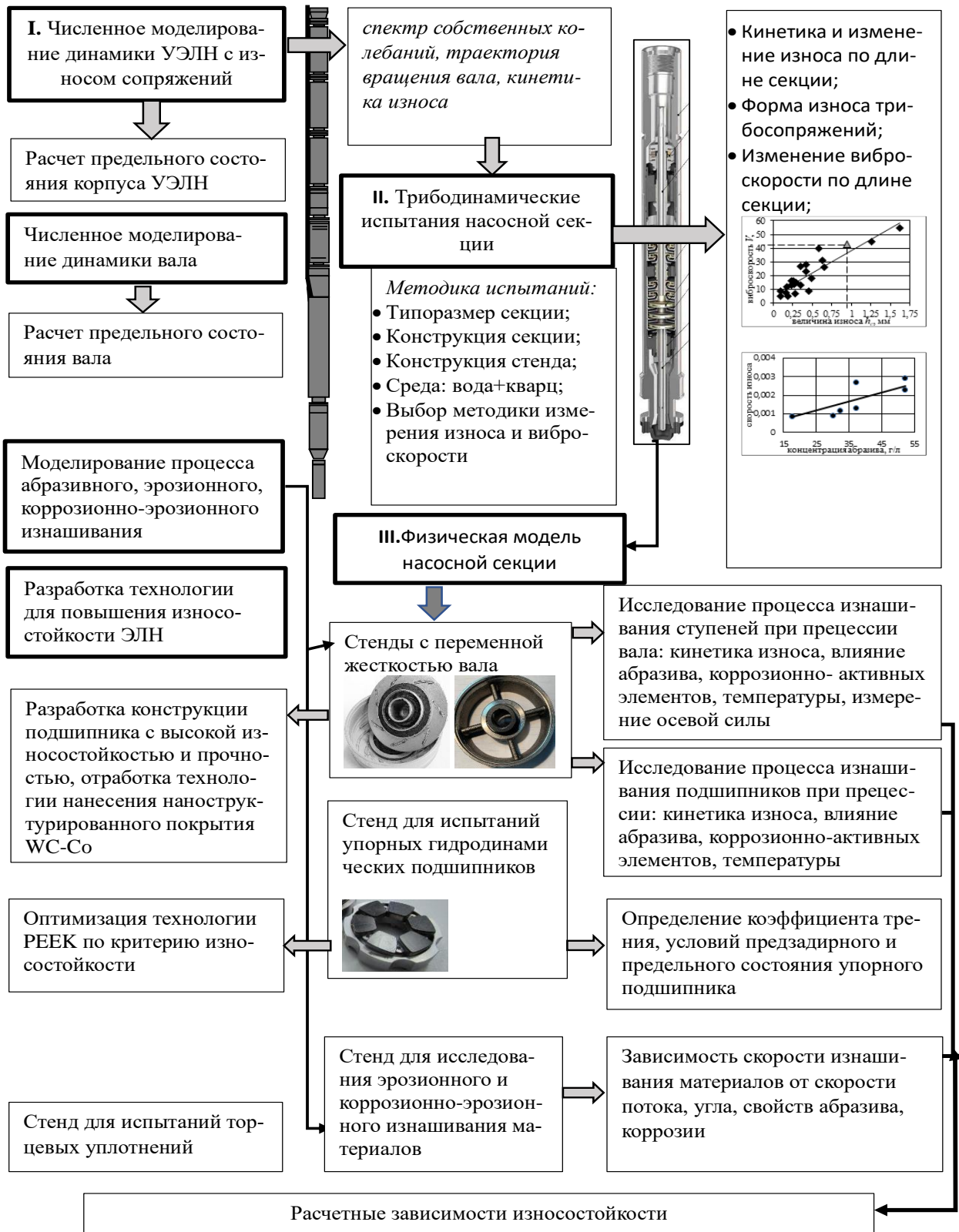


Рис.1 стратегия исследования

сечения, погонная масса, момент инерции массы, длина ротора, частота вращения в произвольно выбранном сечении ротора. С использованием полученных критериев разработаны модельные стенды.

**Скорость изнашивания** можно представить в виде мультипликативной зависимости от скорости

изнашивания ступеней  $v_{стi}$ , конструкционно-технологических, эксплуатационных и динамических факторов:

$$\bar{v}_{нс} = A \frac{1}{N} \sum_{i=1}^n v_{стi} \cdot k_{дин} \cdot k_a(l)_i \cdot k_k, \text{ где:}$$

$A$  – коэффициент согласия;  $v_{стi}$  – скорость изнашивания ступени;  $k_{дин}$  – динамический фактор, определяется изменением динамики вследствие износа, турбулентности жидкости, переходными процессами и



т.д.;  $k_{a_i}$  – коэффициент влияния абразива по длине секции  $l$ ;  $k_k$  – конструкционный фактор;  $N$  – количество ступеней в секции. Физический смысл коэффициента  $k_a(l)_i$  заключается в степени изменения режущих свойств абразива по длине секции вследствие его дробления. Коэффициент  $k_{дин}$  характеризует изменение условий контактирования в сопряжениях вследствие деформации вала при вращении.

Динамический фактор  $k_{дин} = f(h)$  характеризует форму изгиба вала при вращении и изменение его величины  $h$  по длине секции. Теоретически эта зависимость имеет вид

$$h(x) = a + \sum_m^n \left( a_m \cos \frac{\pi n l}{L} + a_m \sin \frac{\pi n l}{L} \right), \text{ где:}$$

$n$  – порядковый номер ступени;  $l$  – высота ступени;  $L$  – длина полуволны основной гармоника колебаний или расстояние между подшипниками,  $x = \pi n l$ . Длина полуволны основной гармоника колебаний  $L$  и распределение износа по длине секции могут быть найдены для типовых конструкций при испытаниях на изнашивание насосной секции, опертой на фланцевые соединения по концам.

Концентрацию абразива в жидкости  $\varepsilon_{p_n}$  на  $n$ -ой ступени вследствие дробления в результате последовательного прохождения через ступени секции оцениваем зависимостью

$$\varepsilon_{p_n} = \varepsilon_{p_0} \left( 1 - \frac{q_y}{Q} \right)^N, \text{ где: } \varepsilon_{p_0} \text{ – исходная концентрация на входе, } q_y \text{ – расход жидкости через уплотнение ступени, } Q \text{ – подача насоса.}$$

Коэффициентом  $k_k$  учитываются особенности конструкции секции, влияющие на износ радиальных сопряжений ступеней за счет, например, применения промежуточных подшипников.

Наиболее сложным вопросом является определение скорости изнашивания радиальных сопряжений ступеней  $v_{ст_i}$ . В общем виде процесс изнашивания зависит от большого числа факторов и зависимость износа  $h$  от них можно записать в неявном виде  $h = f(\varepsilon_p, d_p, \lambda_F, H_p, T, \nu, k_{HCl}, Q, H, n, H_M E_M, t)$ , где:  $\varepsilon_p, d_p, \lambda_F, H_p$  – соответственно концентрация, размер, коэффициент формы и твердость абразивных частиц;  $T, \nu, k_{HCl}$  – температура, вязкость и коррозионная активность жидкости;  $Q, H$  – подача, напор;  $n$  – частота вращения;  $H_M, E_M$  – твердость и модуль упругости материала сопряжения,  $t$  – время.

Для получения расчетных зависимостей скорости изнашивания  $v$  от большого числа влияющих факторов различной природы целесообразно использовать метод интегральных аналогов проф. Ю.Н. Дроздова

[3] и представить скорость изнашивания в виде мультипликативной зависимости от безразмерных обобщенных критериев системы:

$$v_r(t) = \frac{h}{t} = A \cdot F_p^\alpha \cdot F_Q^\beta \cdot F_K^\gamma \cdot F_M^\delta, \text{ где: } F_p^\alpha \text{ – комплекс, характеризующий концентрацию, размер, форму, твердость абразива в жидкости; } F_Q^\beta \text{ – симплекс, характеризующий отклонение характеристик насоса от номинальных значений; } F_K, F_M \text{ – соответственно конструкционный фактор и фактор механических свойств.}$$

Кинетика изнашивания радиальных сопряжений ступеней описывается выражением

$$h(t) = A \left[ 1 - \exp \left( -\frac{\varepsilon_p t}{a} \right) \right], \text{ где: } t \text{ – время; } A \text{ и } a \text{ – коэффициенты, и характеризуется двумя стадиями: абразивный износ и эрозионный износ. Эрозионный износ наступает после того, как в сопряжении сформируется зазор, равный максимальному размеру абразивных частиц, которые в дальнейшем будут свободно проходить через него, соударяясь с поверхностью сопряжения. Поэтому общий износ } h_{\Sigma t} \text{ представляем в виде суперпозиции абразивного износа } h_{a_{t1}} \text{ и эрозионного износа } h_{э_{t2}}. \text{ В дальнейшем исследуются процессы абразивного и эрозионного изнашивания ступеней.}$$

Выводы

- 1 Разработан расчетно-экспериментальный метод исследования трибодинамических процессов ЭЛН на основе численного и физического моделирования.
- 2 Получены критерии аффинного подобия природы и модели насосной секции ЭЛН как динамической системы.
- 3 Разработана трибологическая модель секции и ступени с прецессионным вращением вала.

## Выводы

- 1 Разработан расчетно-экспериментальный метод исследования трибодинамических процессов ЭЛН на основе численного и физического моделирования.
- 2 Получены критерии аффинного подобия природы и модели насосной секции ЭЛН как динамической системы.
- 3 Разработана трибологическая модель секции и ступени с прецессионным вращением вала.

1. Bai C., **Ошибка! Недопустимый объект гиперссылки.** D., **Ошибка! Недопустимый объект гиперссылки.** R., **Ошибка! Недопустимый объект гиперссылки.** R., **Ошибка! Недопустимый объект гиперссылки.** N., **Ошибка! Недопустимый объект гиперссылки.** G. The Impact of Journal Bearing Wear on an Electric Submersible Pump in Two-Phase and Three-Phase Flow *J. Tribol.* May 2019, 141(5): 051702 (8 pages) Paper No: TRIB-18-1398.
2. Смирнов Н.И., Дроздов А.Н., Смирнов Н.Н. Трибодинамические аспекты ресурса электропогружных лопастных насосов для добычи нефти // Записки Горного института. 2023. Т. 264. С. 962-970. EDN QNNAGA
3. Дроздов, Ю.Н. Прикладная трибология (трение, износ, смазка) / Ю.Н. Дроздов, Е.Г. Юдин, А.И. Белов. Под ред. Ю.Н. Дроздова // - М.: "Эко-Пресс", 2010. – 604

## ПРЕИМУЩЕСТВА ПРИМЕНЕНИЯ ВРАЩАТЕЛЬНО-ЛИНЕЙНЫХ МОДУЛЕЙ В МАНИПУЛЯТОРАХ ДЛЯ ФИНИШНОЙ РАЗМЕРНОЙ ОБРАБОТКИ ЛОПАТОК ГАЗОТУРБИННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

А.Н. Смоленцев<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Институт машиноведения им. А.А.Благонравова РАН, Москва, Россия; alexeism1@rambler.ru

Проведен анализ механизмов относительного манипулирования на основе вращательно-линейных мехатронных модулей в сравнении с другими манипуляционными системами по возможности обеспечения производительности и точности финишной размерной обработки лопаток газотурбинных двигателей. Также проведена качественная оценка технологичности вращательно-линейных модулей.

### Актуальность

Наиболее перспективным способом получения заготовок лопаток газотурбинных двигателей (ГТД) в настоящее время является 3D-печать. Её точность ограничена толщиной слоя, наносимого в процессе формообразования в случае применения методов лазерной наплавки и спекания [1], а при использовании связующего полимера необходимо последующее спекание, при котором происходит существенная усадка, которая также препятствует достижению требуемой размерной точности. Поэтому необходима финишная механическая размерная обработка с применением робототехнических комплексов (РТК).

### Сравнительный анализ

Применение последовательного манипулятора, перемещающего обрабатываемую заготовку относительно режущего инструмента, позволяет обеспечить требуемые углы сервиса, использовать различные виды инструментов, и осуществлять захват заготовки и её перемещение в зону контроля одним и тем же манипулятором. Однако, настройка точности обработки в этом случае обеспечивается системой контроля и интеллектуальной системой управления [2], которая требует значительного времени на обучение при переходе на другой вид лопаток. Производительность обработки в этом случае невелика из-за того, что каждый привод должен перемещать всю последующую кинематическую цепь, что ухудшает возможности получения угловых и линейных ускорений.

Для обеспечения большей производительности и обеспечения точности обработки применяются также механизмы относительного манипулирования (МОМ), например описанный в патенте US5193314 заявителя GEN ELECTRIC, опубликованный в 1993 г., в котором привод абразивной ленты перемещается по двум угловым степеням подвижности, а обрабатываемая заготовка перемещается тремя линейными и одним угловым приводом. Абразивная лента не позволяет обработать сопряжения заготовки, поэтому была предложена схема обработки с применением универсального шлифовального круга, описанная в патенте RU2629419.

Применение механизма плоского пятизвенника в МОМ, предложенное в патенте RU2063329 ИМАШ РАН, позволяет дополнительно повысить производительность обработки, однако требует более сложной процедуры калибровки, а также разгрузки каждого привода от сил инерции, которые могут

зависеть сложным образом от конфигурации манипуляторов и от скоростей и ускорений в других приводах. Эта разгрузка для таких манипуляторов параллельной структуры требует соответствующих алгоритмов и структуры системы управления [3].

Манипуляторы параллельной структуры на основе винтовых механизмов с двумя степенями подвижности существенно проще плоского пятизвенника или манипулятора Конга-Гослена (предложенного в составе МОМ в патенте RU2478464) как в отношении калибровки, так и в отношении разгрузки от сил инерции [4].

### МОМ на основе вращательно-линейных модулей

Вращательно-линейный мехатронный модуль на основе винтового механизма перемещает выходной вал по угловой координате вокруг его оси и линейной координате вдоль оси. Число кинематических пар и звеньев определяется решением структурной формулы для винтовых механизмов

$$W = 2n - p_5 \quad (1)$$

при условии  $W = 2$ . Простейшее решение — это винтовой четырёхзвенный механизм [4] с  $n = 3$  подвижными звеньями и  $p_5 = 4$  кинематическими параметрами. Также практически значим винтовой пятизвенный механизм ( $n = 4$  и  $p_5 = 6$ ), обеспечивающий динамическую развязку своих приводов.

Винтовой четырёхзвенник содержит ведущие звенья: гайку и шлицевую втулку, сопрягаемые с корпусом вращательными кинематическими параметрами, и выходной вал, сопрягаемый с гайкой винтовой кинематической парой, а со шлицевой втулкой — поступательной кинематической парой. Для поворота гайки или шлицевой втулки применяется соответствующий прямой привод — встраиваемый вращательный синхронный электродвигатель с полым ротором на основе постоянного магнита (встраиваемый СДПМ). Для измерения угла поворота гайки или шлицевой втулки может применяться соответствующий встраиваемый датчик, также с полым ротором. Для формообразования сложной поверхности лопатки ГТД достаточно 5 степеней подвижности для перемещения электрошпинделя (ЭШ) с вращающимся инструментом относительно её заготовки. Кинематическая схема такого МОМ [4, 5] упрощённо показана на рис. 1.

На рисунке вращательно-линейные модули показаны как двухподвижные цилиндрические кинематические пары, а дополнительный вращательный привод - как вращательная пара. Вариант этой компоновки с поворотами ЭШ в вертикальной плоскости рассматривается в патенте RU2353502, опубликованном в 2009 г.

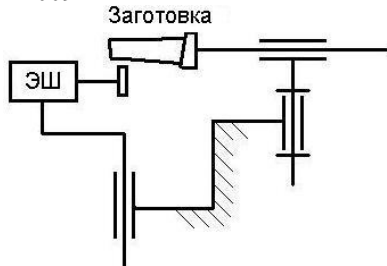


Рис.1. Кинематическая схема MOM

Предпочтителен вариант с поворотами ЭШ в горизонтальной плоскости [5], рис.1, в этом случае статическая нагрузка от его веса на привод постоянна.

### Обеспечение точности

Определение точных значений геометрических параметров этого MOM возможно с применением решения уравнений замыкания кинематической цепи методом наименьших квадратов для соответствующего калибра [4], но это вероятностный подход. Возможна также разработка более сложной измерительной процедуры последовательного измерения с использованием системы из нескольких калибров, обеспечивающей гарантированную точность определения всех геометрических параметров.

Помимо разгрузки от сил инерции, при финишной абразивной обработке существует также задача управления силой прижатия инструмента к обрабатываемой заготовке. Поэтому приводные СДПМ должны быть обеспечены возможностью управления крутящим моментом с достаточной точностью и малой постоянной времени. Эта задача решается в [6] путём измерения соотношений между крутящим моментом и током для каждой фазы в зависимости от угла поворота ротора. Затем такие зависимости учитываются при формировании алгоритма управления.

### Технологичность

Встраиваемые СДПМ с полым ротором, а также датчики с полым ротором применяются в станкостроении и робототехнике, поэтому их производство существует в настоящее время. Для винтовой кинематической пары предпочтительно применение шариковинтовой передачи (ШВП). Для поступательной кинематической пары предпочтительно сочетание шлицевого вала с шариковой втулкой — это рельсовая направляющая качения в исполнении вал-втулка, производится японской фирмой ТНК с 1990-х годов. Особое внимание уделено конструкции сепараторов между шариками из эластичного материала (патент US5993064). Недавно опубликован патент KR200491611Y1 на шлицевой вал с роликовой втулкой, однако эта конструкция имеет большие радиальные габариты.

Применение ШВП не всегда возможно по

причине неподходящего передаточного отношения, а изготовление шлицевого шарикового или роликового соединения с требуемой точностью может быть проблематично. Кроме того, могут быть требования по жёсткости, поэтому вариант с парами скольжения тоже следует учитывать.

В этом случае возможна неопределённость силы трения скольжения, которую необходимо уменьшить выбором подходящей смазки и присадки, а также рекомендуется использовать микроуглубления на одной из взаимодействующих поверхностей [7]. При создании алгоритмов системы управления нужно также обеспечить компенсацию приводами сил трения на основе снятых данных их предварительной идентификации [8].

### Выводы

Применение MOM на основе вращательно-линейных модулей для финишной размерной обработки лопаток ГТД по сравнению с другими робототехническими системами имеет следующие преимущества: меньшая инерционность подвижных звеньев, лучшие возможности для калибровки, уравнивания динамики проще, максимально возможные углы сервиса. Технологичность конструкции такая же, как и у станков с ЧПУ.

1. Смоленцев А.Н., Раков Д.Л., Сухоруков Р.Ю. Современные технологические процессы формообразования при обработке проточной части лопаток ГТД // Проблемы машиностроения и автоматизации. 2023. № 3. С. 139-148.
2. Мубаракшин Р.М., Дическул М.Д., Николаев Н.Н., Травкин А.А., Мубаракшин М.Р. Роботизированная адаптивная размерная полировка компрессорных и турбинных лопаток // Авиационные двигатели. 2021. № 4. С. 51-62.
3. Honegger, M. & Codourey, A. & Burdet, Etienne. (1997). Adaptive Control of the Hexaglide, a 6-dof Parallel Manipulator. Proceedings - IEEE International Conference on Robotics and Automation. pp. 543-548, vol.1.
4. Смоленцев А.Н. Робототехническая технологическая установка на основе винтового четырёхзвенного механизма // Русский инженер. 2023. №2. С. 38-40.
5. Смоленцев А.Н., Афонин В.Л. Анализ кинематических и динамических возможностей станочного оборудования, построенного на основе вращательно-линейных модулей. FRITME-2019. М.: С. 385-387.
6. Алейников А. В. Разработка методов снижения пульсаций электромагнитных виброусилий в многофазном магнитоэлектрическом электроприводе. Автореферат диссертации на соискание ученой степени к. т. н. Иваново: 2022. 20 с.
7. Venci A., Ivanovic L., Stojanovic B., Zadorozhnaya E., Miladinovic S., Svoboda P. Surface texturing for tribological applications: a review. Proceedings of SERBIATRIB '19, 16th International Conference on Tribology, Kragujevac, Serbia, 15 – 17 May 2019. pp. 227-239.
8. Алёшин А.К. Теоретическое обоснование и разработка методологии определения параметров, обуславливающих функциональные характеристики механизмов. Диссертация на соискание ученой степени д. т. н. М.: 2021. 210 с

## ЭЛЕКТРОПЛАСТИЧЕСКИЙ ЭФФЕКТ В АМОРФНЫХ И КРИСТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛАХ

В.В. Столяров

Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, Москва, Россия; [vlstol@mail.ru](mailto:vlstol@mail.ru)

Работа посвящена исследованию проявления электропластического эффекта в аморфных сплавах на основе железа и соединения TiNi. Показано отсутствие типичных скачков напряжения в исходном состоянии и их появление после нанокристаллизационного отжига.

### Цель

Одним из механизмов электропластического эффекта (ЭПЭ) является электронный ветер, который предполагает наличие дислокаций в твердом теле. Аморфное состояние характеризуется отсутствием дальнего порядка и соответственно, дислокаций. Поэтому, появление или отсутствие скачков напряжения может качественно подтвердить или опровергнуть теоретическое представление о природе ЭПЭ.

### Материалы и методы

Материалами исследования были кристаллические сплавы в крупнозернистом и наноструктурном состоянии, а также сплавы с памятью формы в быстрозакаленном состоянии (БЗС) ( $Ti_{50}Ni_{25}Cu_{25}$ ,  $Fe_{78}Si_{13}V_9$ ) с аморфной структурой. Образцы сплавов подвергались растяжению без тока и с током в форме одиночных импульсов различной плотности  $j$  (100 – 1500 А/мм<sup>2</sup>) и длительности  $\tau$  (100 - 1000 мкс) импульса.

### Результаты и их обсуждение

В крупнозернистых (КЗ) сплавах при введении импульса тока типичным являются скачки напряжения вниз на диаграмме растяжения, связанные с ЭПЭ. Амплитуда скачков зависит от плотности и длительности импульса тока, а также от размера зерен в структуре сплавов. Например, в однофазном крупнозернистом титане она увеличивается в 4-5 раз с увеличением длительности импульса от 100 до 1000 мкс [1]. В УМЗ титане при той же плотности тока и длительности импульса 100 мкс скачки напряжения не регистрируются и наблюдаются только при  $\tau \geq 1000$  мкс. То есть амплитуда скачка уменьшается с уменьшением размера зерен от 100-150 МПа в КЗ состоянии до 25-50 МПа в УМЗ состоянии [1]. Аналогичная тенденция в уменьшении величины ЭПЭ с уменьшением размера зерен наблюдается и в сплаве ВТ6 с двухфазной ( $\alpha + \beta$ ) структурой.

Рассмотрим ЭПЭ в сплавах с памятью формы (рис.1). В КЗ состоянии при введении импульсов тока присутствуют скачки напряжения вверх амплитудой до 50 МПа, связанные с эффектом памяти формы (ЭПФ) и скачки вниз меньшей амплитудой (25 МПа), обусловленные ЭПЭ.

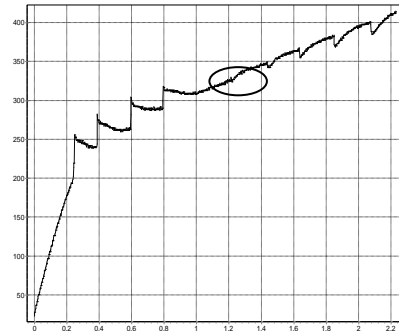


Рис.1. Кривая растяжения в КЗ сплаве  $Ti_{49.3}Ni_{50.7}$

В БЗС  $Ti_{50}Ni_{25}Cu_{25}$  с исходно аморфной структурой от введения одиночных импульсов с  $j = 600$  А/мм<sup>2</sup>,  $\tau \leq 800$  мкс ЭПЭ на кривой растяжения практически не наблюдается (рис.2), однако в состоянии после кристаллизационного отжига появляются значительные по амплитуде прыжки вниз (рис.3).

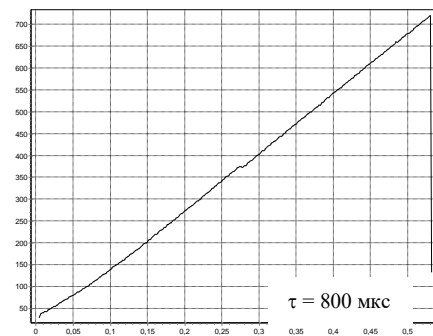


Рис.2. Кривая растяжения с током в БЗС  $Ti_{50}Ni_{25}Cu_{25}$  до отжига

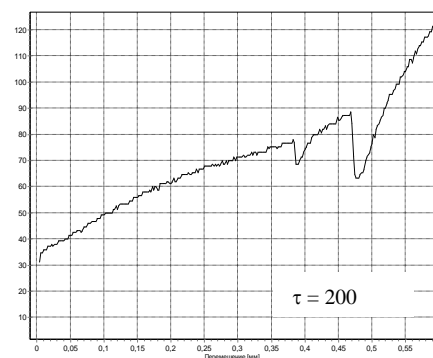


Рис.3. Кривая растяжения с током в БЗС  $Ti_{50}Ni_{25}Cu_{25}$  после отжига

В БЗС  $Fe_{78}Si_{13}V_9$  наблюдается аналогичное поведение, при котором ЭПЭ при  $j = 350$  А/мм<sup>2</sup> отсутствует при коротких ( $\tau \leq 100$  мкс) импульсах тока (рис.6а), но появляется при увеличении длительности импульса от 150 до 1000 мкс. При этом амплитуда прыжков вниз увеличивается с 10 МПа до 50

МПа с увеличением длительности импульса.

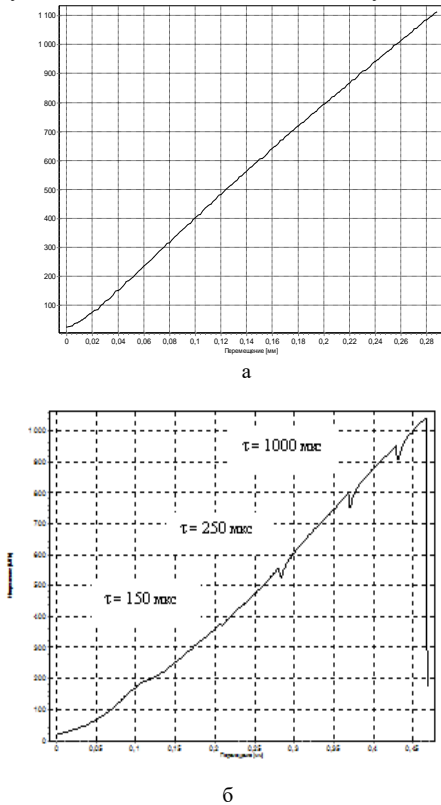


Рис. 4. Кривые растяжения с током 350 А/мм<sup>2</sup> БЗС Fe<sub>78</sub>Si<sub>13</sub>B<sub>9</sub>:  
а -  $\tau \leq 100$  мкс; б -  $\tau \geq 150$  мкс

### Обсуждение

Приведенные результаты ясно показывают чувствительность ЭПЭ к структуре и фазовому составу исследуемых материалов. Прежде всего, это относится к влиянию размера зерен на ЭПЭ. В кристаллических титановых сплавах (ВТ1-0 и ВТ6) уменьшение размера зерен от нескольких десятков микрон до нескольких долей микрона ведет к многократному уменьшению амплитуды скачка и следовательно величины ЭПЭ. Увеличение числа фаз также уменьшает величину ЭПЭ. Так, наличие 20% объемной доли зернограничной  $\beta$  фазы в  $(\alpha+\beta)$  сплаве ВТ6 способствует уменьшению ЭПЭ по сравнению с однофазным сплавом ВТ1-0, как в КЗ, так и в УМЗ состояниях.

Поскольку один из механизмов ЭПЭ реализуется за счет взаимодействия свободных электронов с дислокациями, то наблюдаемая зависимость ЭПЭ от степени дисперсности структурных элементов и многофазности сплава хорошо объясняется мобильностью и способностью зарождения внутривитризеренных дислокаций, которые резко падают с уменьшением зерен до наноразмеров и наличием межфазных границ.

Исследование ЭПЭ в сплаве TiNi с фазовым превращением показало, что направление скачка напряжения при введении импульса тока может быть не только вниз, но и вверх. Более того, измельчение структуры в сплаве приводит к исчезновению скачков вниз и появлению скачков только вверх. Тщательный анализ природы скачков в сплаве TiNi позволил установить, что направление и амплитуда скачка определяется суммой двух разных по знаку

эффектов – ЭПЭ (скачок вниз) и эффект памяти формы ЭПФ (вверх). Последний обусловлен повышением напряжения течения фазы В2 в момент обратного мартенситного превращения В19'→В2, вызванного тепловым эффектом тока. Поскольку в наноструктурном состоянии ЭПЭ заметно меньше ЭПФ или даже близок нулю, то результатом является скачок напряжения вверх. Уменьшение амплитуды повышенный напряжения в никелиде титана в НС состоянии от импульсов тока с увеличением степени деформации связано с изменением соотношения аустенитной и мартенситной фаз, а также со стабилизацией одной из этих фаз.

В БЗС сплавах Ti<sub>50</sub>Ni<sub>25</sub>Cu<sub>25</sub>, Fe<sub>78</sub>Si<sub>13</sub>B<sub>9</sub> ЭПЭ отсутствует в аморфном состоянии и проявляется в кристаллическом состоянии, полученном либо отжигом в печи, либо пропуском импульсов тока большой длительности. Этот факт хорошо согласуется с уменьшением и исчезновением ЭПЭ в нанокристаллических структурах. Действительно, из-за отсутствия в аморфных материалах свободных дислокаций в областях с ближним порядком ЭПЭ не наблюдается. Напротив, кристаллизация сплавов при отжиге или за счет теплового эффекта тока способствует появлению дислокаций, а значит и проявлению ЭПЭ.

Режимы и вид тока также влияют на ЭПЭ.

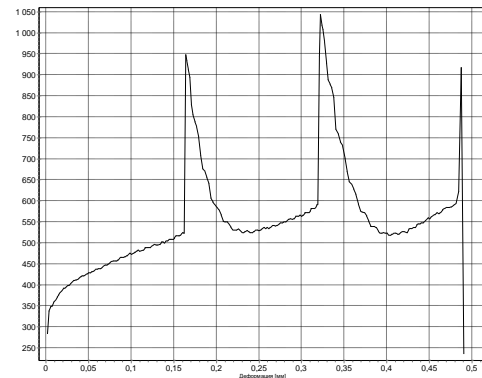


Рис.5. Кривая растяжения с многоимпульсным током в НС сплаве Ti<sub>49.3</sub>Ni<sub>50.7</sub>

Поскольку повышение плотности тока и длительности импульса увеличивают энергию импульса, то эти параметры повышают амплитуду прыжков напряжения. По этой же причине переход от одиночных импульсов к многоимпульсному току приводит к такому же эффекту. Например, ранее для сплава Ti<sub>49.3</sub>Ni<sub>50.7</sub> было показано [2], что тепловой эффект тока в случае применения многоимпульсного режима (до нескольких сотен импульсов в пачке) может приводить к более значительным прыжкам напряжения рис.5 (до 500 МПа), чем при применении одиночных импульсов.

### Заключение

Исследовано влияние исходного структурно-фазового состояния в различных сплавах и параметров импульсного тока на деформационное поведение при растяжении. Импульсный ток

приводит к появлению на диаграмме растяжения скачков напряжения, связанных с проявлением электропластического эффекта или фазовым превращением. Показано, что амплитуда и направление скачков напряжения зависят от количества фаз, дисперсности микроструктуры, наличия мартенситных превращений в сплавах, а также режимов импульсного тока.

1. Столяров В.В., Особенности диаграмм растяжения с током нанокристаллических и аморфных сплавов, *Наноинженерия*, 4, 2015, 19-24.
2. V.V. Stolyarov, Deformability and nanostructuring of shape memory TiNi alloys during the electroplastic rolling, *Mater. Sci. Eng. A*, 503 (2009), 18-20

## ПАРАМЕТРИЧЕСКИЙ СИНТЕЗ БАЗОВЫХ NR МЕХАНИЗМОВ РОБОТОТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Ф.Ф. Хабибуллин

Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева–КАИ, Казань, Россия; [fanil\\_arsk@mail.ru](mailto:fanil_arsk@mail.ru)

Статья посвящена разработке метода параметрического синтеза робототехнических систем на базе пространственных рычажных механизмов с одноподвижными вращательными кинематическими парами. Представлен алгоритм, который учитывает условия собираемости, работоспособности пространственного 4R, 5R механизма, условия использования ненулевых звеньев и их смещение. Представлена опытно-производственная установка и лабораторные модели, разработанные на основе данного метода.

Робототехника — это наука, которая сочетает в себе инженерные, компьютерные и специализированные знания для создания устройств, способных выполнять задачи автоматически. С каждым годом эта отрасль технологий становится всё более актуальной, играя важную роль в различных сферах жизни: от промышленности до медицины. Но для того чтобы добиться значительного прогресса в области робототехники, необходимо не только внедрение новых технических решений, но и развитие теоретических методов и подходов. Понимая необходимость развития методов структурного и параметрического синтеза робототехнических систем была определена цель исследования.

**Цель исследования:** Разработать метод параметрического синтеза робототехнических систем на базе nR механизмов на основе зависимостей структурных и геометрических параметров.

Исследования трудов отечественных [1-3] и зарубежных ученых показывают, что на основе многих робототехнических и мехатронных систем лежат модификации самых простых плоских и пространственных механизмов. Однако исследования также показывают, что есть механизмы, которые в связи со сложностями проектирования, существованием достаточно многих условий собираемости и работоспособности не смогли быть реализованы на практике реализации.

**Основная часть.** Исследования показывают, что достаточно сложным но перспективным является четырёхзвенный пространственный механизм с одноподвижными вращательными кинематическими парами (механизм Верховского-Беннетта) или как называют зарубежные ученые- пространственный 4R механизм, то есть пространственный механизм, содержащий 4 одноподвижные и вращательные кинематические пары.

На рисунке 1 представлена структурная схема пространственного 5R механизма, который был получен методом добавления станины в конструкцию пространственного 4R механизма, что дало возможность повысить функционал механизма без изменения структуры базового механизма. В результате механизм, представленный на рисунке 1 является двухподвижным и параметры перемещения, скорости и ускорения подвижных точек зависят от углов поворота ведущих кривошипов 1 (AB) и 4 (AD).

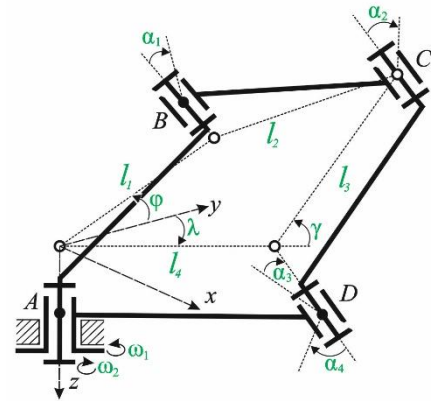


Рис. 1. Структурная схема пространственного 5R механизма

Исследования показали, что угол поворота ( $\gamma$ ), образованный между шатуном (AD) ведомым звеном (CD) зависит от угла поворота ( $\varphi$ ) ведущего звена (AB), а угол ( $\lambda$ ) поворота шатуна (AD) можно будет определить по следующим уравнениям [4]:

$$\left\{ \begin{array}{l} \cos \varphi \cdot \cos \lambda \cdot K_1 + \sin \varphi \cdot \sin \lambda \cdot K_2 - \\ \cos \gamma = \frac{-(\cos^2 \lambda - \sin^2 \lambda) \cdot K_3 - K_4}{-\cos \varphi \cdot \cos \lambda \cdot K_5 + \sin \varphi \cdot \sin \lambda \cdot K_6 +} \\ \quad + (\cos^2 \lambda - \sin^2 \lambda) \cdot K_7 - K_8 \\ \quad (\sin \varphi \cdot \cos \lambda + \sin \lambda \cdot \cos \varphi) \cdot \\ \sin \gamma = \frac{(l_2^2 - l_1^2)}{-\cos \varphi \cdot \cos \lambda \cdot K_5 + \sin \varphi \cdot \sin \lambda \cdot K_6 +} \\ \quad + (\cos^2 \lambda - \sin^2 \lambda) \cdot K_7 - K_8 \end{array} \right. \quad (1)$$

В результате дифференцируя уравнение (1) по времени получим угловую скорость звена (CD) относительно шатуна (AD), который примет следующий вид:

$$\omega_2 = \frac{A_1 + A_2}{(-\cos \varphi \cdot \cos \lambda \cdot L_1 + \sin \varphi \cdot \sin \lambda \cdot L_2 + (\cos^2 \lambda + \sin^2 \lambda) \cdot L_3 + L_4)^2 \cdot \cos \lambda} \quad (2)$$

Необходимо сказать, что в уравнении (2) для удобства некоторые значения были сгруппированы и представлены ниже:

$$\begin{cases}
 A_1 = (l_2^2 - l_1^2) \cdot (\omega_1 + \omega_4) \cdot (\sin \varphi \cdot \sin \lambda \cdot \cos \varphi \cdot \\
 \cdot \cos \lambda \cdot (l_2^2 \cdot \cos \alpha_1 + l_1^2 \cdot \cos \alpha_2 + l_1 \cdot l_2 \cdot \\
 \cdot (\cos \alpha_1 - \cos \alpha_2)) + (\sin^2 \lambda - \cos^2 \lambda) \cdot l_2^2 \cdot \cos \alpha_1) - \\
 - (\sin \varphi \cdot \sin \lambda)^2 \cdot l_1 \cdot l_2 \cdot (\cos \alpha_1 - \\
 - \cos \alpha_2) - (\cos \varphi \cdot \cos \lambda)^2 \cdot l_1 \cdot l_2 \cdot (\cos \alpha_1 + \cos \alpha_2), \\
 A_2 = (l_2^2 - l_1^2) \cdot (\omega_1 + \omega_4) \cdot (\sin \varphi \cdot \sin \lambda \cdot \cos \varphi \cdot \cos \lambda \cdot \\
 \cdot (l_2^2 \cdot \cos \alpha_1 + l_1^2 \cdot \cos \alpha_2 + l_1 \cdot l_2 \cdot \\
 \cdot (\cos \alpha_1 - \cos \alpha_2)) + (\sin^2 \lambda - \cos^2 \lambda) \cdot l_2^2 \cdot \cos \alpha_1) - \\
 - (\sin \varphi \cdot \sin \lambda)^2 \cdot (\cos \alpha_1 - \\
 - \cos \alpha_2) - (\cos \varphi \cdot \cos \lambda)^2 \cdot (\cos \alpha_1 + \cos \alpha_2), \\
 L_1 = l_1 \cdot l_2 \cdot (\cos \alpha_1 + \cos \alpha_2), \\
 L_2 = l_1 \cdot l_2 \cdot (\cos \alpha_1 - \cos \alpha_2), \\
 L_3 = l_2^2 \cdot \cos \alpha_2, \\
 L_4 = l_2^2 \cdot \cos \alpha_1.
 \end{cases} \quad (3)$$

Принимая во внимание проекции координат шарнира  $C$  на системы координат, которая зависит от углов  $\varphi, \lambda$  получаем:

$$\begin{cases}
 X_C = -l_1 \cdot \sin \varphi + l_2 \cdot \sin \gamma \cdot \cos \varphi - l_2 \cdot \cos \gamma \cdot \sin \varphi, \\
 Y_C = l_1 \cdot \cos \varphi + l_2 \cdot \sin \gamma \cdot \cos \alpha_1 \cdot \sin \varphi + l_2 \cdot \cos \gamma \cdot \cos \varphi, \\
 Z_C = -l_2 \cdot \sin \gamma \cdot \sin \alpha_1.
 \end{cases} \quad (4)$$

где

$$\begin{cases}
 \cos \gamma = \frac{\cos \varphi \cdot \cos \lambda \cdot l_2^2 \cdot \cos \alpha_1 + l_1^2 \cdot \cos \alpha_2 + \\
 + \sin \varphi \cdot \sin \lambda \cdot l_2^2 \cdot \cos \alpha_2 + l_2^2 \cdot \cos \alpha_1 - \\
 - (\cos^2 \lambda - \sin^2 \lambda) \cdot l_1 \cdot l_2 \cdot \\
 \cdot \cos \alpha_2 - l_1 \cdot l_2 \cdot \cos \alpha_1}{- \cos \varphi \cdot \cos \lambda \cdot l_1 \cdot l_2 \cdot (\cos \alpha_1 + \cos \alpha_2) + \\
 + \sin \varphi \cdot \sin \lambda \cdot l_1 \cdot l_2 \cdot (\cos \alpha_1 - \cos \alpha_2) + \\
 + (\cos^2 \lambda - \sin^2 \lambda) \cdot l_1^2 \cdot \cos \alpha_2 - l_2^2 \cdot \cos \alpha_1}, \\
 \sin \gamma = \frac{(\sin \varphi \cdot \cos \lambda + \sin \lambda \cdot \cos \varphi) \cdot \\
 \cdot (l_2^2 - l_1^2)}{- \cos \varphi \cdot \cos \lambda \cdot l_1 \cdot l_2 \cdot (\cos \alpha_1 + \cos \alpha_2) + \\
 + \sin \varphi \cdot \sin \lambda \cdot l_1 \cdot l_2 \cdot (\cos \alpha_1 - \\
 - \cos \alpha_2) + (\cos^2 \lambda - \sin^2 \lambda) \cdot l_1^2 \cdot \cos \alpha_2 - \\
 - l_2^2 \cdot \cos \alpha_1}
 \end{cases} \quad (5)$$

Продифференцировав уравнение (4) по времени, принимая во внимание (5) получаем проекции углового ускорения:

$$\begin{cases}
 \varepsilon_2^x = \varepsilon_{2/1} \cdot \sin \alpha_1 \cdot \cos(\varphi + \lambda) + (\omega_1 + \omega_4) \cdot \\
 \cdot \omega_{2/1} \cdot \sin \alpha_1 \cdot \sin(\varphi + \lambda), \\
 \varepsilon_2^y = \varepsilon_{2/1} \cdot \sin \alpha_1 \cdot \sin(\varphi + \lambda) + (\omega_1 + \omega_4) \cdot \\
 \cdot \omega_{2/1} \cdot \sin \alpha_1 \cdot \cos(\varphi + \lambda), \\
 \varepsilon_2^z = \varepsilon_{2/1} \cdot \cos \alpha_1.
 \end{cases} \quad (6)$$

На основании уравнения (4) были получены графики угловой скорости исполнительного устройства сварочного робота сферических поверхностей, которые представлены на рисунке 2.

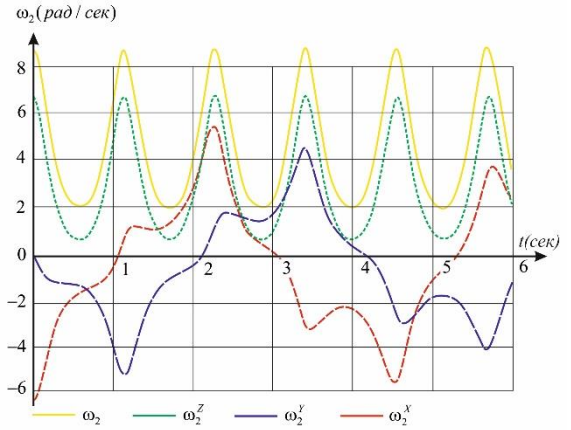


Рис. 2. Графики угловой скорости исполнительного устройства сварочного робота сферических поверхностей, полученные аналитически

Необходимо сказать, что проектированием работоспособных модификаций пространственного 4R механизма занимались достаточно много исследователей и были предложены патенты на изобретения и полезные модели для перемешивания материала, передвижения емкостей или платформ [5, 6].

В ходе данного исследования и на основании проектирования более 100 модификацией был разработан алгоритм параметрического синтеза робототехнических систем на базе nR механизмов на основе зависимостей структурных и геометрических параметров, блок-схема данного алгоритма представлена на рисунке 3.

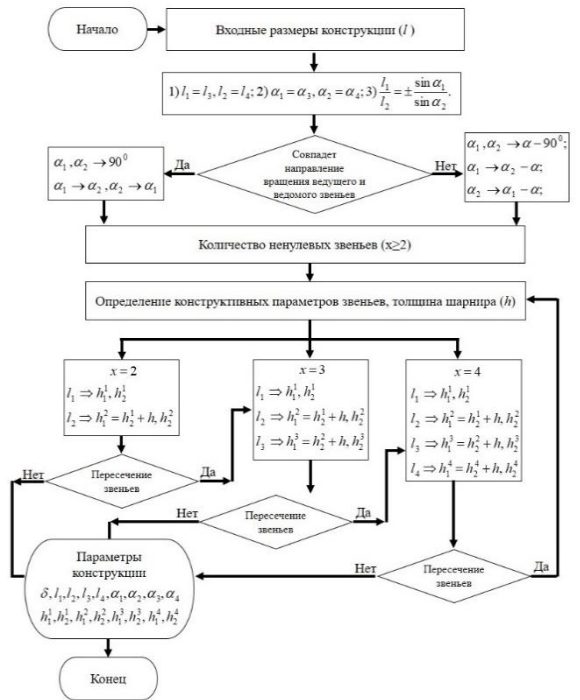


Рис. 3. Блок-схема алгоритма параметрического синтеза робототехнических систем на базе nR механизмов

Разработанный алгоритм параметрического синтеза робототехнических систем на основе зависимостей структурных и геометрических параметров дает возможность проектировать модификации с учетом смещения ненулевых звеньев от кратчайшего расстояния между



шарнирами звена, как представлено на рисунке 4а. На рисунке 4б наглядно видно, как строится ненулевое звено относительно кратчайшего расстояния между шарнирами звена.

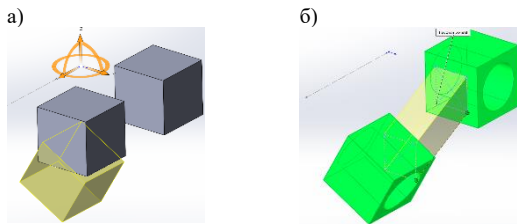


Рис. 4. Проектирование ненулевого звена: а) определение координат шарниров; б) определение геометрии соединения шарниров

На основании использования ненулевых звеньев в модификациях робототехнических систем был исследован метод сборки в зависимости от количества ненулевых звеньев из параметров их смещения от кратчайших расстояний между шарнирами звена. На рисунке 5а представлен процесс сборки механизма только из ненулевых звеньев, а на рисунке 5б представлена установка нулевого звена, в результате которого получился механизм с 3 ненулевыми и с 1 нулевыми звеньями.

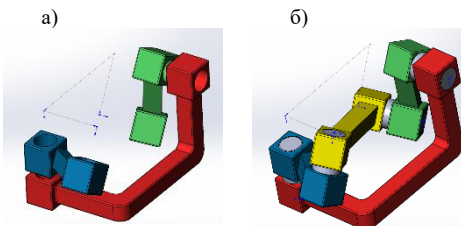


Рис. 5. Сборка пространственного механизма: а) только с ненулевыми звеньями; б) с нулевым звеном

На основе разработанного алгоритма и метода был спроектирован сварочный робот сферических поверхностей, который представлена на рисунке 6.

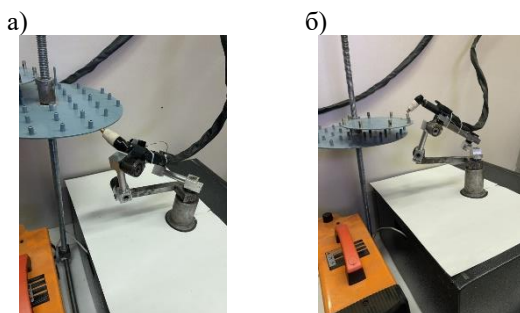


Рис. 6. Фотографии сварочного робота сферических поверхностей при вращении ведущего кривошипа по часовой стрелке: а) траектория окружности; б) траектория сферы

**Результаты исследований.** Анализ результатов экспериментальных исследований робота сферических поверхностей показал, что математическая модель была составлена правильно и дает возможность использовать разработанный алгоритм и метод при параметрическом синтезе базовых nR механизмов и проектировании робототехнических систем.

Необходимо сказать, что анализ уравнений (2), (4) и (6) показывает, что шатун пространственного двухподвижного 5R механизма позволяет получить сложное пространственное движение. Также уравнения (3), (4) и (6) дают возможность методом обратного синтеза спроектировать робототехнические системы, в которых необходимо получить сложное пространственное движение необходимыми частотами неравномерности или необходимостью охвата определенного диапазона сложной поверхности.

Необходимо сказать, что с точки зрения технологического процесса изготовления ненулевых звеньев намного сложнее, в связи с этим при реализации данного типа механизма ненулевые звенья использованы из условий собираемости и работоспособности. Данный подход основан на проектировании шарниров в зависимости от конструктивных параметров, где данная модификация в качестве исполнительного устройства будет установлена в конструкцию робототехнической системы

- 1 Воробьева Н.С., Несмиянов И.А., Дяшкин А.В., Дяшкин-Титов В.В., Захаров Е.Н. Робототехнический комплекс для возделывания овощных культур // Известия Волгоградского государственного технического университета. 2024. № 4 (287). С. 41-44.
- 2 Глазунов В.А., Ерофеев М.Н., Пелин И.В., Илюхин А.А., Гончаров Н.С., Ковалева Н.Л., Скворцов С.А. Пространственный механизм // Патент на полезную модель RU 211503 U1, 09.06.2022. Заявка № 2021137116 от 15.12.2021.
- 3 Yarullin M.G., Mingazov M.R., Galiullin I.A. Historical review of studies of spatial nR linkages // International Review of Mechanical Engineering. 2016. Т. 10. № 5. С. 348-356.
- 4 Мингазов М.Р. Синтез и кинематический анализ двухподвижного пространственного 5R-механизма // диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого». 2015.
- 5 Евграфов А.Н., Петров Г.Н. К вопросу о динамике машин с программным управлением // Современное машиностроение. Наука и образование. 2023. № 12. С. 65-80.
- 6 Пикмуллин Г.В., Мудров А.П., Валиев А.А. Пространственные механизмы для создания силовых импульсов // В сборнике: Современное состояние и перспективы развития технической базы агропромышленного комплекса. научные труды Всероссийской (национальной) научно-практической конференции, посвященной памяти д.т.н., профессора Мартыанова А.П.. Казанский государственный аграрный университет. Казань, 2022. С. 134-139.

## СРЕДСТВА ИЗМЕРЕНИЯ И КОНТРОЛЯ ДЛЯ МЕТРОЛОГИЧЕСКОГО И ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ КАЧЕСТВА ПРОДУКЦИИ

Хейфец М.Л.

Институт прикладной физики НАН Беларуси

*Метрология поистине является матерью наук*

*Дж. Холл (Нобелевский лауреат)*

*J. Hall / Philos. Trans. R. Soc., Ser. A, London, 2011*

**Метрология** – наука об измерениях, методах и средствах обеспечения их единства и способах достижения требуемой **точности**. Точность является приоритетным параметром при оценке **качества** в процессе производства продукции.

Предметом метрологии является выполнение точных и достоверных измерений физических величин специальными техническими средствами, то есть средствами измерений. Результат измерений – измеряемая величина как свойство (характеристика) объекта, представленное в числовой форме. При этом показатели точности измерений не должны выходить за установленные границы с заданной вероятностью. Результат измерений иногда называют «числовой моделью».

Правовые и организационные основы деятельности в области метрологии определяются Законом «Об обеспечении единства измерений» и нормативными правовыми актами, которые гармонизированы с Положениями Метрической конвенции, документами Генеральной конференции по мерам и весам и т.д.

**Измерение** — это процесс экспериментального получения количественного значения величины, которые могут быть обоснованно приписаны величине. Обычно результат измерения является аппроксимацией или оценкой значения измеряемой величины и зависит от одного или более параметров. Повторные измерения той же величины дадут слегка различающиеся результаты в целом, которые возникают из-за оказывающих влияющих факторов на результат измерения величин, и которые невозможно поддерживать полностью постоянными. Таким образом, результат любого измерения должен завершиться заявлением о неопределённости.

*Математическая модель измерения, которая преобразует ряд повторных наблюдений в результат измерения, является крайне важной, т.к., кроме наблюдений, она обычно включает различные влияющие величины, которые точно неизвестны. Отсутствие знаний вносит вклад в неопределённость результата измерения наряду с изменениями повторных наблюдений и любой неопределённостью, связанной с самой математической моделью.*

*Важность учета неопределённости измерений широко признана как в области метрологии, так и в области аккредитации лабораторий, как основополагающего элемента метрологической прослеживаемости результатов измерений.*

Очевидно, что главной тенденцией в области метрологии является снижение неопределённости, то есть повышение точности.

В процессе измерений **значение величины** выражается как произведение численного значения на единицу. **Единица** представляет собой конкретную величину рассматриваемого рода и используется как основа для сравнения. Практическая реализация единицы величины – эталон.

*Во всем мире как основной язык в области науки, техники, промышленности и торговли используется Международная система единиц (SI), которая включает семь основных единиц и механизм создания производных. На сегодняшний день их реализация ограничена только квантовой структурой природы и существующими техническими возможностями.*

*Международной системой единиц (SI) управляет руководящий орган Метрической конвенции - Генеральная конференция по мерам и весам (ГКМВ). ГКМВ на двадцать шестом собрании в ноябре 2018 года (первое заседание проводилось в 1889 году), для снижения неопределённости измерений приняла решение, что все SI-единицы будут основываться на семи «определяющих константах».*

*Среди «определяющих» приняты фундаментальные константы природы, такие как скорость света в вакууме, элементарный заряд, постоянная Планка, константа Больцмана и число Авогадро. Квантовая метрология, таким образом, явилась научным основанием поистине революционного изменения системы единиц измерения.*

**Средство измерений** – техническое средство, предназначенное для измерений, имеющее нормированные метрологические свойства, воспроизводящее и хранящее единицу физической величины, размер которой принимают неизменным в течение известного интервала времени. К средствам измерения относят: меры, измерительные приборы и преобразователи, установки и измерительные системы. **Мера** – это средство измерений, предназначенное для воспроизведения физической величины заданного размера.

**Эталон** – средство измерений, обеспечивающее воспроизведение и хранение единицы физической величины для передачи её размера нижестоящим по поверочной схеме средствам измерения, выполненное по особой спецификации и официально утверждённое в качестве эталона.

Помимо измерений, неразрушающий контроль включает в себя такой вид деятельности, как **контроль** – проверка соответствия объекта установленным техническим требованиям, к которому относится дефектоскопия.

**Средство контроля** – техническое устройство, материал или вещество, применяемые для проведения проверки соответствия параметров объекта установленным требованиям. Существенной особенностью неразрушающего контроля является влияние свойств контролируемого объекта на требования к оборудованию и применяемым методикам.

Сущность всякого контроля сводится к осуществлению двух основных этапов: 1) получение информации о фактическом состоянии некоторого объекта, о признаках и показателях его свойств; 2) сопоставление первичной информации с заранее установленными требованиями, нормами, критериями, то есть обнаружение соответствия или несоответствия фактических данных требуемым (ожидаемым).

Объектом, данные о состоянии и (или) свойствах которого подлежат при контроле сопоставлению с установленными требованиями, может быть продукция или процесс. При этом выработка соответствующих управляющих воздействий уже не является частью контроля. Это следующий этап управления, основанный на результатах контроля – неотъемлемой и существенной части всякого управления. На основе данных контроля осуществляют адаптацию системы управления, то есть принятие оптимизирующих управленческих решений. Контроль – одна из основных функций системы управления.

**Качество** – философская категория, но несмотря на то, что на практике встречаются разнообразные определения «качества», для всех отраслей промышленности Международной организацией по стандартизации (согласно стандарту ISO 9000) принято единое определение. **Качество** – степень, с которой совокупность собственных характеристик выполняет требования. Характеристика – отличительное свойство. Характеристика качества – собственная характеристика продукции или системы вытекающая из требований. **Требование** – потребность или ожидание, которое установлено, обычно предполагается или является обязательным. Установленным требованием является такое требование, которое определено в документе, например в стандарте.

**Стандарт** – нормативный документ по стандартизации, разработанный на основе согласия большинства заинтересованных сторон и утвержденный или принятый признанным органом. В стандарте устанавливаются для всеобщего и многократного использования правила, характеристики, касаются определенных видов деятельности. Стандарт направлен на достижение **оптимальной степени упорядочения** в определенной области.

*Метрология, как наука физико-технической отрасли, подразделяется на теоретическую, прикладную и законодательную. Теоретическая включает в себя общие теоретические проблемы: разработка теории и проблем измерений*

*физических величин, их единиц, создание эталонов, а также разработка методов измерений и способов обработки результатов и погрешностей (неопределенности) измерений. Она базируется на общей теории измерений, теоретической и прикладной физике, математических дисциплинах. Прикладная метрология использует результаты теоретических исследований для метрологического обеспечения. Предметом законодательной метрологии является установление обязательных технических и юридических требований по применению единиц величин, эталонов, методов и средств измерений, направленных на обеспечение единства и требуемой точности измерений.*

Таким образом, основные цели охватывают направления теоретической, прикладной и законодательной метрологии, в том числе направленные на обеспечение качества продукции, путем управления процессами производства, а также мониторинг и диагностику состояния для обеспечения техногенной безопасности инфраструктурных объектов.

Цели формируют комплекс метрологических задач: разработка физических основ, методов и средств измерений, приборов и устройств, автоматизированных контрольно-измерительных систем для неразрушающего контроля и технической диагностики, как широкого применения (для определения характеристик материалов и конструкций, их физико-механических и электромагнитных свойств на различных масштабных уровнях); так и специального назначения (в медицине и биологии, экологии и природопользовании, обороне и безопасности).

Основные методы решения задач и средства их научно-технического и организационно-методического обеспечения: методы и средства измерения и неразрушающего контроля; техническая диагностика, мониторинг и томография объектов и процессов.

Анализ проведенных исследований и внедренных средств и автоматизированных комплексов измерения и контроля для обеспечения качества продукции и техногенной безопасности инфраструктурных объектов показал, что следует обеспечивать практическую направленность разработок по метрологическому обеспечению и повышению достоверности результатов контроля, по стандартизации и подтверждению соответствия требуемых параметров качества.

На настоящем этапе актуальными являются задачи:

- внедрение новых принципов моделирования производственных процессов и сложных инфраструктурных объектов;
- получение измерительной информации в реальном масштабе времени и выделение первичных информативных параметров;
- мониторинг состояния сложных технологических объектов и процессов и их техническая диагностика;
- построение и обучение интеллектуальных приборов и систем неразрушающего контроля, методов обработки сигналов и представления результатов;

- создание национальных эталонов с установленными метрологическими характеристиками.

В результате на ближайшую перспективу наиболее актуальны:

1. Научные исследования по неразрушающему контролю новых материалов и высоких технологий, с учётом междисциплинарных направлений развития диагностики, как в сфере медицины, жизнеобеспечения и среды обитания человека, так и в других.

2. Разработка и внедрение на основе моделирования, получения и обработки информации, использования передового программно-технического обеспечения, «умных» приборов и систем неразрушающего контроля и технической диагностики для

производственных процессов и сложных инфраструктурных объектов.

3. Проведение работ по стандартизации и метрологическому обеспечению, включая создание эталонов единиц величин, разработку средств и систем измерений, методик неразрушающего контроля и технической диагностики для технологического обеспечения качества продукции.

4. Новые формы и площадки эффективного международного сотрудничества учёных и специалистов, их подготовки, оценки навыков и знаний специалистов по неразрушающему контролю и технической диагностике.

## УПРАВЛЕНИЕ БИЗНЕС-ПРОЦЕССАМИ (НА ПРИМЕРЕ ПРОЕКТНО-ПРОИЗВОДСТВЕННОГО КОМПЛЕКСА МАШИНОСТРОЕНИЯ)

Цырков А.В.

МИРЭА - Российский технологический университет, Москва, Россия

Методология проектно-операционного управления (ПОУ) строилась как средство комплексного управления процессами создания новых изделий и изготовления продукции, уже освоенной в производстве.

Общепризнанным является факт организации работы по управлению жизненным циклом продукции, организации взаимосвязей всех процессов создания, связанных с изделием, с помощью PLM (Product Lifecycle Management) систем. Планирование и управление процессами разработки проектно-конструкторской и проектно-технологической документации в PLM-системах строится на основе модели потока работ (Work Flow – WF). В основу WF закладываются этапы прохождения трехмерной математической модели изделия и сопровождающих ее документов по всему циклу создания (разработки и подготовки производства) нового изделия: “Проектирование и конструирование изделия – Функциональные расчеты – Проектирование оснастки – Разработка технологии и управляющих программ – Эксплуатация”.

В основе PLM систем лежат методы управления проектной деятельностью – PM (Project Management).

Для управления производством используются системы по глобальному управлению ресурсами предприятий – ERP (Enterprise Resource Planning), базирующиеся на положениях об операционной деятельности. Данные системы работают в соответствии со стандартом MRP-II (Manufacturing Resource Planning), который позволил развить технологию планирования, ориентированную на применение корпоративных информационных систем, очертив полный контур задач управления промышленным предприятием на оперативном уровне.

В последнее время в практике российских предприятий появляется дополнительная компонента – APS (Advanced Planning and Scheduling), которая при интеграции с ERP-системой добавляет производственному предприятию возможность более оперативного реагирования на изменения внешней среды и внутреннего состояния производства. В российской интерпретации функционал APS часто определяют как СПО (синхронное планирование и оптимизация). Системы СПО возникли в результате эволюции методов и систем производственного управления.

Развитием методов управления проектной и производственной (операционной) деятельностью является создание средств, объединяющих эти процессы. ПОУ является примером такого функционала (рис. 1). Реализуя идеи СПО, система осуществляет сквозное планирование процессов проектно-конструкторской деятельности, технологической и логистической подготовки производства, изготовления сложных технических систем (СТС).

Планирование, управление и мониторинг процессов создания СТС проводится на принципах организации бережливого производства. Система формирует общий поток работ для объектов опытного и серийного производства.

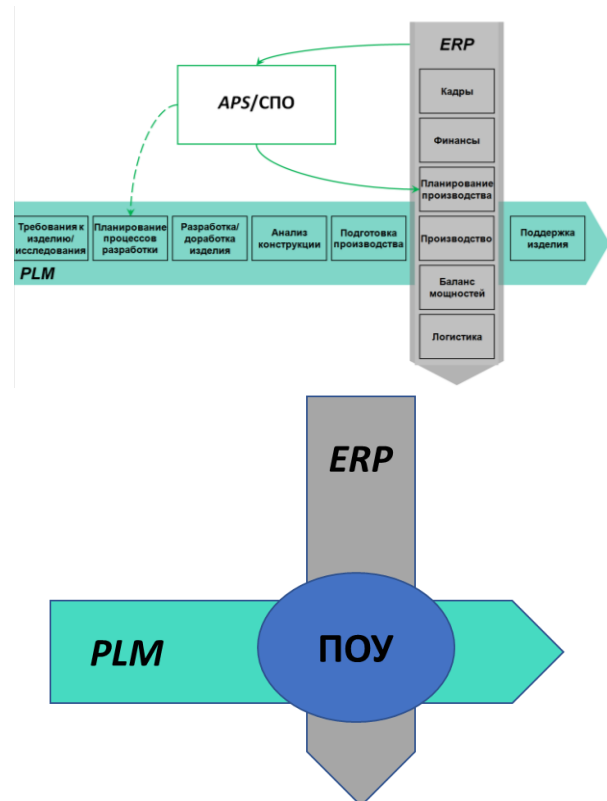


Рис. 1. Структурная схема ПОУ

Для реализации методологии проектно-операционного управления создано несколько программных решений [1-4].

В реализациях ПОУ особое внимание уделялось одной из наиболее проблемных задач, присущих построению функционалов планирования и управления проектными и производственными процессами, которая состоит в подготовке данных, адекватно описывающих моделируемые процессы. Суть проблемы в том, что с одной стороны – большой объем данных и необходимый тщательный их анализ и расчет на подготовительной стадии процесса планирования приводит к значительным трудовым затратам и временным потерям. С другой – проектная деятельность, НИРы и ОКРы, как одно из базовых направлений деятельности предприятий, приводят к частым изменениям в объектах

производства, что усугубляет проблему подготовки данных для планирования и управления процессами.

Решением проблемы является создание комплекса специализированных процедур и конструкторско-технологических баз знаний (КТБЗ), автоматизирующих процессы подготовки данных на основе структурно-параметрического синтеза [5] при формировании цепочек работ (как элементов общего потока) и определении их атрибутики (трудоемкость, длительность, размеры партий, применяемость, ...) для расчета планово-ресурсных характеристик потоков работ. К числу таких процедур относятся:

- конструкторско-технологическое разузлование и расчет применяемости элементов в комплексах данных, описывающих сдаточный объект по изделию; формирование цепочки этапов проектно-производственных работ для элемента изделия;
- формирование содержания этапа цепочки работ (процесс создания КД, технологический процесс, процедура закупки, ...);
- моделирование атрибутивных характеристик потоков работ для материальных и информационных подразделений.

Структурно-параметрический моделлер [5] также имеет программно-методические реализации и отработывался в учебном процессе и выполнении х/д и НИР в течение более 30 лет.

На основе функционалов R BPM [1] и ППИАС [2] возможно построение инновационных программно-аналитических комплексов (рис. 2.):

- Управления проектно-производственным комплексом (ППК). Типовое решение для отрасли.
- Управления ППК с системой контроля состояния производственных активов (ТОиР) на основе методов предиктивной аналитики [6].
- Управления ППК на основе техники центров параллельного проектирования (параллельной подготовки производства (конструкторской, технологической и логистической) и изготовления).
- Управления интегрированной проектно-производственно-эксплуатационной структуры.

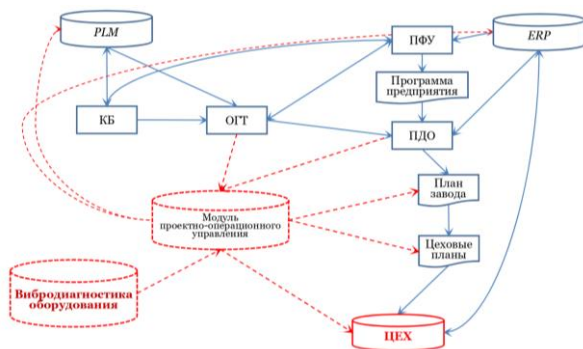


Рис. 2. Типовая схема программно-аналитического комплекса

Систематизация методов планирования и управления потоками работ, которыми традиционно управляют и PLM и ERP комплексы, а также объединение и унификация управляющих компонент этих

систем позволит создать новый метод проектно-операционного управления процессами сопровождения жизненного цикла изделия. Одним из основных достижений метода является сокращение цикла создания новых изделий за счет “сквозного” моделирования процессов по всему ЖЦ, исключения лишних “буферов”, формируемых каждой из традиционно используемых систем (PLM и ERP) при планировании, и исключения необходимости согласования планов между службами, технологическими и логистическими службами и цехами-изготовителями. Модель ОПР (объединенного потока работ) и метод ПОУ (проектно-операционного управления) обеспечат контроль и управление сроками создания по стадиям ЖЦ, позволят преодолевать межфункциональные барьеры структурных подразделений, что будет способствовать снижению сроков создания техники. Опытная эксплуатация системы, реализующей метод ПОУ, показывает возможность сокращения цикла создания опытной продукции на 10...20%.

Предлагается решение по построению автоматизированной системы проектно-производственного сопровождения процессов, координирующей работу подразделений проектно-производственного предприятия, занимающегося проектированием, подготовкой производства и изготовлением изделий СТС.

Систематизированы элементы программно-методического обеспечения, определена структура и способы построения информационного обеспечения системы. Выделены принципы, на которых должна быть проведена реализация комплекса программно-технических средств сопровождения организационно-технических решений в процессах создания изделий СТС.

Опытная эксплуатация показывает, что снижение трудозатрат в процессах описания состава работ достигается за счет автоматизации проектирования (синтеза) схмотехнических решений при подготовке данных как для системы управления, так и содержания процессов сопровождения ЖЦ создания продукции. Возможна разработка проектно-производственных баз знаний (ППБЗ) и КТБЗ позволяющих покрыть до 95% схменных решений, применяемых при разработке новых изделий в рамках НИОКР, выполняемых предприятием, применяемым методологию ПОУ и ПОУ АП, что позволит снизить трудозатраты в процессах описания состава работ на 80%.

1. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2021613736 Российская Федерация. Система ресурсного управления бизнес-процессами машиностроительного предприятия (Resourced Business Process Management System, R BPM): №2021611652: заявл. 09.02.2021 опубли. 12.03.21 / Цырков Г.А., Цырков А.В.

2. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2020615161 Российская Федерация. Программная платформа интеграции автоматизированных систем. Серверная часть.: №2020613433: заявл. 19.03.2020: опубли. 18.05.20 / Цырков Г.А., Цырков А.В.

3. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2016618895 Российская Федерация. Мониторинг процессов проведения опытно-конструкторских работ (МП ОКР): №2018660480: заявл. 21.06.2016: опубли. 20.09.2016/ Ермохин Е.А., Кубышев С.В., Лопота А.В., Цырков А.В., Цырков Г.А. //

Федеральное государственное автономное научное учреждение «Центральный научно-исследовательский и опытно-конструкторский институт робототехники и технической кибернетики» (ЦНИИ РТК).

4. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ 2018613127 Российская Федерация. Программа расчета параметров закупок при выполнении опытно-конструкторских работ (ПРП Закупки ОКР) / С.В. Кубышев, А.В. Лопота, С.Л. Поздняков, А.В. Цырков, Г.А. Цырков; заявитель и правообладатель Федеральное государственное автономное научное учреждение «Центральный научно-исследовательский и опытно-конструкторский институт робототехники и технической кибернетики». – № 2018610185; заявл. 09.01.2018; опубл 02.03.2018. – 1 с.

5. А.В. Цырков. Структурно-параметрический моделлер – основа построения комплексных информационных моделей производственных систем / Информационные технологии в проектировании и производстве: Науч.-техн. журн./ФГУП «ВИМИ», 2005, №1 с.51-58

6. Цырков А.В., Цырков Г.А., Юрцев Е.С., Савинов Ю.И. Цифровые двойники в анализе качества продукции В сборнике: Избранные научные труды восемнадцатой Международной научно-практической конференции "Управление качеством", 2019. С. 349-355.

## ПРОГРАММНАЯ ПЛАТФОРМА ИНТЕГРАЦИИ АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ СИСТЕМ

Цырков Г.А.

МИРЭА - Российский технологический университет, Москва, Россия

Статья посвящена вопросам создания программной платформы интеграции автоматизированных систем (ПШИАС). В ней рассматриваются основные этапы и подходы к созданию подобного рода решений, анализируются ключевые технологии и инструменты, необходимые для успешной реализации проекта. Особое внимание уделяется вопросам обеспечения совместимости интегрируемых систем, а также методам оптимизации процессов интеграции.

Актуальность темы обусловлена растущими потребностями предприятий в повышении эффективности управления и оптимизации бизнес-процессов за счёт интеграции различных информационных систем. В статье представлены примеры успешных программных решений в данной области, а также рекомендации по выбору стратегии разработки и внедрения программной платформы интеграции автоматизированных систем.

### 1.1. Введение

В современном мире, где информационные технологии играют ключевую роль в развитии всех сфер деятельности человека, решение вопросов интеграции автоматизированных систем становится необходимым условием для эффективного управления процессами и ресурсами предприятия, например в системе ресурсного управления бизнес-процессами машиностроительного предприятия, R BPM [1]. Программная платформа интеграции автоматизированных систем (ПШИАС) позволяет объединить различные информационные системы, обеспечивая тем самым более высокий уровень автоматизации и контроля над бизнес-процессами [2].

Разработка такой платформы требует комплексного подхода, включающего в себя анализ потребностей предприятия, выбор технологий и инструментов, а также проектирование и реализацию системы.

Выбор инструментов должен быть основан на анализе требований к платформе, её функциональности, безопасности, масштабируемости и других важных параметрах. Необходимо также учитывать опыт и квалификацию команды разработчиков, доступность ресурсов и бюджет проекта.

Проектирование информационной системы (ИС) включает в себя разработку архитектуры платформы, определение её компонентов и их взаимодействия, а также создание технической документации. На этом этапе важно уделить внимание вопросам безопасности, надёжности и производительности системы [3].

### 1.2. Технологии разработки ИС

Выбор технологий разработки программного обеспечения (ПО) является критически важным этапом в процессе создания продукта. От правильности выбора зависит не только успешность проекта, но и его стоимость, сроки реализации, а также возможность дальнейшего развития и поддержки.

В нашем случае, элементы серверной части программного решения, имеет смысл реализовывать на

базе технологии .NET. Такое решения можно использовать на различных операционных системах, таких как Windows, Linux и macOS, что позволяет создавать приложения, которые могут работать на любой платформе. Технология использует современные методы оптимизации, такие как AOT (Ahead-Of-Time) компиляция, чтобы повысить производительность приложений. В процессе разработки программистам предоставлен ряд механизмов безопасности, которые помогают защитить приложения от атак и утечек данных [4].

Технологический стек имеет модульную структуру, что позволяет использовать только те компоненты, которые необходимы для конкретного приложения. В целом, .NET - это мощный инструмент для разработки кроссплатформенных приложений с высокой производительностью, безопасностью и удобством разработки.

Выбор ReactJS в качестве базовой технологии для разработки клиентской части программной платформы имеет ряд существенных преимуществ. Ключевым следует выделить возможность повторного использования компонентов, что упрощает процесс разработки и сопровождения кода. Разработчики могут создавать многократно используемые блоки кода, которые можно легко интегрировать в разные части приложения, что экономит время и ресурсы. Еще одним преимуществом является нисходящий поток данных, который упрощает архитектуру приложения и делает его более предсказуемым и понятным. Это также способствует улучшению качества кода и уменьшению количества ошибок [5].

Все это делает программное решение более гибкими и легкими в поддержке и развитии. Все инструменты для разработки и сборки приложений являются проектами с открытым исходным кодом, что позволяет разработчикам более свободно работать с технологией и получать дополнительные данные по шаблонам использования.

### 1.3. Архитектура программного решения на базе ПШИАС

Серверная часть программной платформы интеграции автоматизированных систем в базовом представлении является обособленной реализацией функционала веб-сервера на базе протокола HTTP.



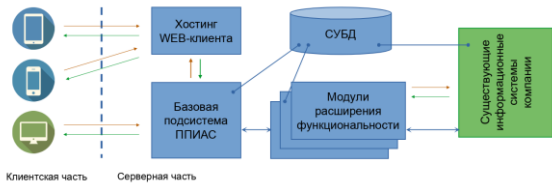


Рисунок 1. - Пример организации компонентов при использовании ППИАС

В серверной части ППИАС можно выделить следующие подсистемы и компоненты (рисунок 1):

1. Подсистема формирования ответа на запрос.
2. Подсистема регистрации модулей расширения функциональности.
3. Подсистема управления пользовательскими разрешениями.
4. Подсистема управления информационными объектами.
5. Подсистема поддержки модели данных для используемой СУБД.

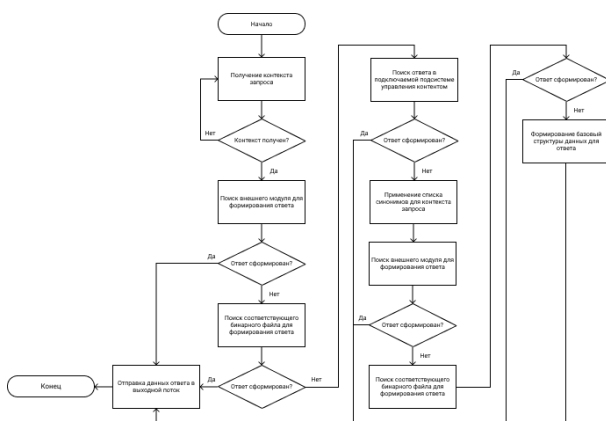


Рисунок 2. - Алгоритм обработки входящего запроса

Идея реализации сводится к постоянному асинхронному чтению контекста HTTP запроса и последующей обработке при успешном получении данных. В отличие от концепции «обычного» WEB/HTTP сервера, по предоставлению доступа к файлам статической информации, базовый алгоритм формирование ответа, в первую очередь, определяет «исполнителя» по задаче, поступившей в запросе (рисунок 2). Методы обработки запросов могут быть реализованы во внешних, отдельно подключаемых, модулях платформы.

#### 1.4. Организация управления пользователями системы

Организация подсистемы управления пользователями в информационной системе на основе ролевой модели, где вместо ролей выступают группы пользователей, обеспечивает эффективное и безопасное управление доступом к ресурсам системы. Такой подход позволяет упростить администрирование и контроль за действиями пользователей, а также обеспечить гибкость в настройке прав доступа.

Применение ролевой модели управления пользователями способствует упрощению процесса добавления новых пользователей и изменения их прав доступа. Вместо того чтобы индивидуально настраивать права каждого пользователя, администраторы

могут просто добавлять пользователей в соответствующие группы, что значительно сокращает время и усилия, затрачиваемые на управление системой.

Интеграция программной платформы с внутренним LDAP-сервером предоставляет ряд существенных преимуществ для организации. Интеграция ИС с внутренним LDAP-сервером является важным шагом на пути к созданию эффективной и безопасной ИТ-инфраструктуры организации.

#### 1.5. Организация функциональных расширений

Организация модульности в программной платформе играет ключевую роль в обеспечении гибкости, масштабируемости и удобства сопровождения кода. Одним из основных инструментов для достижения этой цели является использование технологии Managed Extensibility Framework (MEF). MEF позволяет разработчикам легко создавать и интегрировать модульные расширения в свои приложения, обеспечивая при этом высокую степень гибкости и возможности для будущего развития.

В процессе регистрации библиотеки, реализующей дополнительный функционал, была предусмотрена возможность описания структуры дополнительных таблиц в СУБД, которые могут быть задействованы в процессе отработки реализованных алгоритмов. Таким образом, программная платформа позволяет упростить процессы миграции структур данных для СУБД.

Для того чтобы добавить новую процедуру в решение, которое строится на базе ППИАС, разработчику необходимо сначала описать классы для входных и выходных данных.

После того как в кодовой базе есть типы, определяющие структуру объектов DTO (Data Transfer Objects), можно приступить к разработке основного класса, реализующего алгоритм системы, отработку которого можно будет вызывать через различные клиентские части общего решения. Класс должен быть наследником интерфейса IDeepApiExtension и иметь реализацию метода object DoWork (object request, DeepRequestEnvironment env).

#### 1.6. Информационные объекты в ППИАС

Основная функция современных ИС является способность собирать, хранить, обрабатывать и анализировать большие объемы информации, позволяя принимать обоснованные управленческие решения и оптимизировать бизнес-процессы [6].

Таким образом в базовой части программной платформы появилась подсистема организации доступа к данным и соответствующие инструменты настройки, позволяющие максимально точно описать структуру используемых полей без необходимости модифицировать программный код системы. Для этого были введены специальные информационные сущности: информационный объект; категория объекта; отношения между объектами.

Бывают случаи, когда некоторая информация имеет право на существования, только в моменте привязки к другой сущности, например данные конструкторского состава, в частности количественные значения, применяются только в контексте описания

конкретной сборочной единицы. Для организации хранения подобного рода информации, в программной платформе были добавлены описания типов взаимоотношений, которые аналогично описаниям категорий, помогают организовать запросы с учетом описанной иерархии между объектами.

На схеме ниже (рисунок 3) представлена структура, описывающая взаимодействие информационного объекта, категории и связи, для получения полного набора параметров.

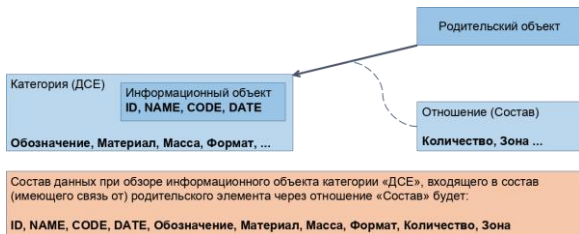


Рисунок 3. - Схема привязки параметров категорий и отношений

### 1.7. Выводы

Эффективность использования интегрированных автоматизированных систем на отечественных производственных предприятиях проявляется через множество аспектов, начиная от повышения функциональных характеристик и качества выпускаемой продукции до снижения операционных расходов и улучшения обслуживания клиентов. Информационные системы позволяют предприятиям оптимизировать производственные процессы, сократить время на разработку и внедрение новых продуктов, а также улучшить взаимодействие с поставщиками и клиентами [7].

Интегрированные системы способствуют повышению эффективности основных видов деятельности предприятия, таких как планирование производства, управление запасами, логистика и сбыт. Они

помогают идентифицировать избыточные расходы ресурсов и задержки материальных потоков, что ведет к снижению уровня запасов и улучшению обслуживания клиентов [8].

1. Государственная регистрация программы для ЭВМ 2021613736, 12.03.2021, Цыркoв Г.А., Цыркoв А.В., Программа для ресурсного управления бизнес-процессами машиностроительного предприятия (Resource Business Process Management System, R BPM) ([https://new.fips.ru/registers-doc-view/fips\\_servlet?DB=EVM&DocNumber=2021613736&TypeFile=html](https://new.fips.ru/registers-doc-view/fips_servlet?DB=EVM&DocNumber=2021613736&TypeFile=html))

2. Государственная регистрация программы для ЭВМ № 2020615161, 18.05.2020, Цыркoв Г.А., Цыркoв А.В., Программная платформа интеграции автоматизированных систем. Серверная часть. ([https://new.fips.ru/registers-doc-view/fips\\_servlet?DB=EVM&DocNumber=2020615161&TypeFile=html](https://new.fips.ru/registers-doc-view/fips_servlet?DB=EVM&DocNumber=2020615161&TypeFile=html))

3. Принципы построения системы управления проектно-производственной деятельностью для создания сложной технической продукции / Лопота А.В., Цыркoв А.В. // Информационные технологии в проектировании и производстве. - 2015 - 3 (159). - С. 19-28.

4. Методы построения высокопроизводительной вычислительной среды системы управления производственными процессами / Островерх А.А., Цыркoв А.В., Криштоп А.А., Цыркoв Г.А. // Бизнес-информатика. - 2012 - 1 (19). - С. 62-69.

5. Lopota A.V., Tsyrcov A.V., Tsyrcov G.A. Methods and Tools of Project-Operational Management of an Machine-Building Enterprise. 2017 IEEE Conference on Quality Management, Transport and Information Security, Information Technologies, IT and MQ and IS 2017 7751937, pp. 536 - 539. (DOI: 10.1109/ITMQIS.2017.8085882)

6. Система управления технологическими данными / Цыркoв А.В., Цыркoв Г.А. // Информационные технологии в проектировании и производстве. - 2010 - 2. - С. 3-10.

7. Проектно-операционное управление в машиностроительном производстве / Цыркoв А.В., Кузнецов П.М., Цыркoв Г.А., Ермохин Е.А., Москвин В.К. // Вестник Мордовского университета. - 2018. - 4 (28). - С. 511-522.

8. Цыркoв А.В., Цыркoв Г.А. Применение программной платформы на основе единого информационно-алгоритмического пространства в целях повышения качества сопровождения производственных процессов // Избранные научные труды семнадцатой Международной научно-практической конференции «Управление качеством». - М.: Пробел-2000, 2018. - С. 389-393.

## ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИКИ СИСТЕМЫ ВИБРОЗАЩИТЫ НА ОСНОВЕ МЕХАНИЗМА НАЛОЖЕНИЯ СВЯЗЕЙ

В.И. Чернышев<sup>1</sup>, Р.Н. Поляков<sup>1</sup>, О.В. Фоминова<sup>1</sup>, А.В. Горин<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева, Орел, Россия; [gorin57@mail.ru](mailto:gorin57@mail.ru)

В статье изложены элементы прикладной теории новых базовых моделей виброзащитных систем с дополнительным управляемым устройством прерывистого действия – механизмом наложения связей и импульсной ловушкой. Показано, что данные системы устраняют резонансные явления и обеспечивают затухание переходных процессов в пределах одного периода вынужденных колебаний.

### Цель

Модернизация существующих и создание новых машин и механизмов высокой производительности, долговечности и надёжности во многом зависит от решения научных проблем, связанных с обеспечением вибрационной безопасности технических объектов, эксплуатация которых происходит в условиях интенсивных динамических воздействий [1,2].

Обеспечение нормативных показателей вибрационного состояния в различных зонах машин достигается посредством использования для этих целей как пассивных, так и управляемых виброзащитных систем [3]. При этом необходимо учитывать, что динамические свойства данных систем проявляются только во взаимодействии с защищаемым объектом, как части машины, отражающего специфику её функционирования [4].

Известно, что пассивные виброзащитные системы обеспечивают снижение интенсивности колебаний защищаемого объекта только при узкополосном спектре кинематического возмущения и отсутствии силового возмущения. Чтобы избежать резонансных явлений производят отстройку частот. Однако при этом неизбежно ухудшаются инвариантные свойства системы по восприятию силового воздействия. Кроме того, «срезание» резонансных пиков посредством увеличения демпфирования негативно сказывается на динамических свойствах системы в области высоких частот. Очевидно, что в классе пассивных виброзащитных систем преодолеть указанные противоречия невозможно [5]. В связи с этим, активные виброзащитные системы, управление в которых непосредственно отождествляется с компенсационным воздействием и характеризуется как прямое управление, а также виброзащитные системы с непрямым управлением, формирующие компенсационные воздействия опосредствовано за счёт существенно-нелинейных эффектов в упругодемпфирующих и инерционных звеньях, являются более перспективными [6].

### Материалы и методы

Особый интерес представляют предельные варианты управления, приводящие к скачкообразному изменению структуры системы, когда управление периодически резко возрастает  $u \rightarrow \infty$  и, когда управление периодически обнуляется  $u \rightarrow 0$ . Последовательное чередование данных управлений определяет так называемое не прямое импульсное управление параметрами демпфирования и жёсткости дополнительного (управляемого)

упругодемпфирующего звена прерывистого действия [7,8]. При этом, естественно, что вне зависимости от типа используемых управляемых звеньев, таких как, демпфер вязкого сопротивления, фрикционный демпфер или упругий элемент, достигаемый эффект виброзащиты, при всех прочих равных условиях, будет одинаков. В данном случае управляемые звенья имитируют работу механизма наложения связей, то есть периодически блокируют виброзащитную систему, что позволяет существенно улучшить её динамические свойства за счёт нового параметра, определяющего длительность данных блокировок. В частности, можно рассматривать также имитацию работы импульсной ловушки, реализующей локальные мгновенные (импульсные) блокировки системы, в результате которых скорость защищаемого объекта периодически становится равной нулю.  $u \rightarrow \infty$

В предлагаемой статье приводятся результаты исследований уникальных антирезонансных и противударных свойств базовых моделей виброзащитных систем с управляемым механизмом наложения связей. Показано, что данный класс управляемых систем виброзащиты устраняет резонансные явления и обеспечивает затухание переходных процессов в пределах одного периода внешних возмущений – в режиме один толчок одно колебание.

### Математические модели

Рассмотрим модель виброзащитной системы с дополнительным управляемым демпфером вязкого сопротивления, которая предназначена для защиты объектов от кинематических воздействий:

$$m\ddot{x} + b_1(t)(\dot{x} - \dot{y}) + b(\dot{x} - \dot{y}) + c(x - y) = 0. \quad (1)$$

В этой модели вязкое сопротивление дополнительного демпфирующего звена отождествляется с управлением  $b_1(t) = U(t)$ , что позволяет перейти к базовой модели с управляемым механизмом наложения связей, представленной ниже в безразмерном виде:

$$\dot{x}_0 = x_1, \quad \dot{x}_1 = -\frac{u}{\eta}(x_1 - \dot{\theta}) - \frac{\varepsilon}{\eta}(x_1 - \dot{\theta}) - \frac{1}{\eta^2}(x_0 - \theta),$$
$$u = \begin{cases} \infty, & |\dot{\theta}(\tau)| \leq \Delta, \\ 0, & \text{иначе.} \end{cases} \quad (2)$$

В частном случае, когда виброзащитная система (2) имитирует работу импульсной ловушки, имеем:

$$\begin{aligned} \dot{x}_0 = x_1, \quad \dot{x}_1 = -\frac{u}{\eta}(x_1 - \dot{\vartheta}) - \frac{\varepsilon}{\eta}(x_1 - \dot{\vartheta}) - \frac{1}{\eta^2}(x_0 - \vartheta), \\ u = \begin{cases} \infty, & |\dot{\vartheta}(\tau)| \leq \Delta \approx 0, \\ 0, & \text{иначе.} \end{cases} \end{aligned} \quad (3)$$

Рассмотрим также модель виброзащитной системы (виброизоляции), которая предназначена для защиты несущих элементов от воздействия виброактивных объектов:

$$m\ddot{x} + b_1(t)\dot{x} + b\dot{x} + cx = P(t). \quad (4)$$

Наличие в этой модели управляемого демпфера вязкого сопротивления позволяет реализовать предельные варианты прерывистого демпфирования и перейти к базовой модели с управляемым механизмом наложения связей, представленной ниже в безразмерном виде:

$$\begin{aligned} \dot{x}_0 = x_1, \quad \dot{x}_1 = -\frac{u}{\eta}x_1 - \frac{\varepsilon}{\eta}x_1 - \frac{1}{\eta^2}x_0 + h(\tau), \\ u = \begin{cases} \infty, & h(\tau) \leq \Delta, \\ 0, & \text{иначе.} \end{cases} \end{aligned} \quad (5)$$

В частном случае, когда базовая модель (5) имитирует работу импульсной ловушки, имеем:

$$\begin{aligned} \dot{x}_0 = x_1, \quad \dot{x}_1 = -\frac{u}{\eta}x_1 - \frac{\varepsilon}{\eta}x_1 - \frac{1}{\eta^2}x_0 + h(\tau), \\ u = \begin{cases} \infty, & h(\tau) \leq \Delta \approx 0, \\ 0, & \text{иначе.} \end{cases} \end{aligned} \quad (6)$$

В работе [6] авторами данной статьи было высказано предположение относительно того, что «... базовые модели (1) – (6), в которых механизм наложения связей периодически резко увеличивает вязкое сопротивление и тем самым воспроизводит процесс ударного или ударно-блокирующего демпфирования колебаний, позволяют реализовать оптимальные последовательности программируемых «мгновенных» переводов системы из одного состояния в другое, при которых достигается минимизация принятого показателя качества на траекториях движения системы, состоящих из кусков границ допустимой области и кусков сопряжённых экстремалей. Упорядоченные и расширенные последовательно срабатываний механизма наложения связей и их длительности являются новыми переменными, существенно повышающими управляемость системы по сравнению, например, с вариантом пассивных ограничителей. Причём для непрямого импульсного управления характерен определённый минимум энергозатрат, не зависящий от достигаемого эффекта виброзащиты».

В отличие от неуправляемых виброзащитных систем базовая модель с импульсной ловушкой позволяет существенно снизить уровни колебаний объекта, как в области низких (дорезонансных), так и в области высоких (зарезонансных) частот.

Реализация ударного демпфирования позволяет сместить пиковые значения коэффициентов

динамичности в дорезонансную область частот и положительный эффект виброзащиты достигается, если относительная частота  $\eta > 1,1$ . При этом наблюдается монотонное уменьшение амплитуд колебаний объекта. Показательно, что на характерной частоте кинематического воздействия, когда  $\eta \approx 1,41$ , амплитуды колебаний объекта уменьшаются более чем в два раза. В момент срабатывания импульсной ловушки происходит скачкообразное «обнуление» скорости защищаемого объекта. После этого объект совершает «свободное» движение, которое происходит до тех пор, пока скорость подвижного основания опять не станет равной нулю.

В процессе наложения удерживающих связей параметр  $\Delta$ , как элемент непрямого управления, позволяет исключить проявление резонансных явлений и достичь предельных показателей виброзащиты в рабочем диапазоне частот кинематического воздействия. При этом регламентированное увеличение продолжительности наложения удерживающей связи в области низких частот и, соответственно, уменьшение этой продолжительности в области высоких частот обеспечивает монотонно-убывающую зависимость для коэффициентов динамичности на всём диапазоне частот.

В результате моделирования установлено, что переходные процессы, вызываемые начальными условиями или случайными флуктуациями внешних возмущений, затухают в пределах одного периода кинематического воздействия.

#### Случай силового воздействия

В базовых моделях управляемых систем виброизоляции (5) и (6), которые предназначены для защиты несущих элементов от силового воздействия, использован новый ограничительный параметр  $\Delta$ , который косвенно определяет длительность интервала блокировки системы. Определение данного параметра связывается с достижением минимума пиковых нагрузок и выполнения неравенства:

$$\max |R| < 1 \text{ and } \sqrt{1 + (\varepsilon\eta)^2 / (1 - \eta^2)^2 + (\varepsilon\eta)^2}, \quad (7)$$

В более общем случае требуется обеспечить минимум среднеквадратических значений и выполнения неравенства:

$$\sigma_R < \frac{\sqrt{2}}{2} \approx 0.705 \text{ and } \sigma_{R_0}, \quad (8)$$

Будем искать периодические решения при детерминированном силовом возмущении:

$$P(t) = P_0 \sin \omega t \rightarrow h(\tau) = \eta^{-2} \sin \tau.$$

Рассмотрим три временных интервала движения системы:  $0 \dots \tau_1$ ,  $\tau_1 \dots \tau_2$ ,  $\tau_2 \dots \pi$ . На первом и третьем интервалах движения система виброизоляции заблокирована.

Движение виброактивного объекта на интервале  $\tau_1 \dots \tau_2$  описываются следующими уравнениями:

$$x_0(\tau) = \exp(-\gamma\tau) \cdot (C_1 \cos \beta\tau + C_2 \sin \beta\tau) + Kd \cdot \sin(\tau - \varphi), \quad (9)$$

$$x_1(\tau) = -\gamma \exp(-\gamma\tau) \cdot (C_1 \cos \beta\tau + C_2 \sin \beta\tau) + \exp(-\gamma\tau) \cdot (-C_1\beta \sin \beta\tau + C_2\beta \cos \beta\tau) + Kd \cdot \cos(\tau - \varphi). \quad (10)$$

В этих уравнениях  $C_1$  и  $C_2$  – постоянные интегрирования.

Отмечается, что графики динамических нагрузок имеют разрывы первого рода в точках, которые соответствуют моментам срабатывания механизма наложения удерживающих связей (моментам блокировки и разблокировки системы). Однако, если обеспечивается минимум значений пиковых нагрузок, то разрывы первого рода наблюдаются только в момент разблокировки системы.

Установлено, что максимальные значения оптимальной динамической нагрузки приходятся на моменты, когда происходит срабатывание механизма наложения удерживающих связей, и эти значения равны по абсолютной величине, то есть  $|R(\tau_1)| = |R(\tau_2)| = \max |R(\tau)|$ .

В отличие от неуправляемых систем виброизоляции базовая модель с механизмом наложения связей позволяет существенно снизить уровни динамических нагрузок, воспринимаемых несущим основанием, как в области низких (дорезонансных), так и в области рабочих частот  $1,0 < \eta < 1,6$ . Условия неравенств выполнены. Причём динамические нагрузки монотонно уменьшаются с увеличением частоты силового возмущения и, как следствие, проявление резонансных явлений исключается. Данные выводы сделаны на основе результатов расчёта пиковых нагрузок и среднеквадратических значений динамических нагрузок

Следует отметить, что механизм наложения связей оказывает также определённое нивелирующее (ослабляющее) влияние и на процессы, генерируемые виброактивным объектом. Это обстоятельство необходимо учитывать при разработке соответствующих технологических машин, для поддержания рабочих режимов которых требуется высокий уровень интенсивности колебаний.

### Результаты и их обсуждение

Разработаны новые базовые модели виброзащитных систем с дополнительными управляемыми устройствами прерывистого действия: механизм наложения связей и импульсной ловушкой.

По результатам исследования динамических свойств данных систем можно сделать следующие основные выводы:

- резонансные явления устраняются (в

установившихся режимах колебаний амплитуды колебаний объекта монотонно уменьшаются с увеличением частоты кинематического гармонического возмущения);

- переходные процессы, вызываемые начальными условиями или случайными флуктуациями внешних возмущений, затухают в пределах одного периода внешнего воздействия, то есть реализуется процесс, который характеризуется как «один толчок – одно колебание»;

- инвариантность системы по отношению к силовым возмущениям в результате периодических блокировок существенно повышается и, как следствие, можно уменьшать жёсткость несущего упругого элемента, не опасаясь потери устойчивости;

- энергетические затраты на реализацию прямого импульсного управления связаны только с процессом «включить – выключить», который может быть запрограммирован через компоненты состояния системы в относительном движении посредством актуализации конструктивных свойств системы.

Работа выполнена в ОГУ им. И.С. Тургенева в рамках государственного задания № 075-00196-24-08 на 2024 год и на плановый период 2025 и 2026 годов от 23.08.2024 г., проект 1024041900021-8-2.3.1;2.2.3 Разработка конструкторских и программно-аппаратных решений управления вибрационными процессами в вертолётном транспорте, обеспечивающих формирование оптимальных компенсационных воздействий (FSGN-2024-0013).

1. Елисеев, А.В. Динамика вибрационных взаимодействий элементов технологических систем с учётом неуправляемых связей / А.В. Елисеев, В.В. Сельвинский, С.В. Елисеев. – Новосибирск: Наука, 2015. – 332 с.
2. Чернышев, В.И. Роторная динамика: гироскопические эффекты и управление / В.И. Чернышев, Л.А. Савин, О.В. Фомина // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии, 2016. – №5. – С.3-8.
3. Аврамов, К.В. Нелинейная динамика упругих систем / К.В. Аврамов, Ю.В. Михлин. – М.-Ижевск: Институт компьютерных исследований. Т.2. Приложения, 2015. – 700 с.
4. Chernyshev, V.I. Dynamics of the rotor on elastic-damping supports under action of kinematic effects / V.I. Chernyshev, L.A. Savin, O.V. Fominova. – IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. HERVICON+PUMPS-2017, vol. 233. – no.1. – p. 012055.
5. Фомина, О.В. Прерывистое демпфирование в системах виброзащиты: основы теории, приложения / О.В. Фомина. – М.: Машиностроение-1, 2005. – 256 с.
6. Чернышев, В.И. Непрямое управление колебаниями: элементы теории / В.И. Чернышев, Л.А. Савин, О.В. Фомина // Труды СПИИРАН, 2019. – Том 18. – №1. – С. 148-175.
7. Черноушко Ф.Л., Ананьевский И.М., Решмин С.А. Методы управления нелинейными механическими системами / Ф.Л. Черноушко, И.М. Ананьевский, С.А. Решмин. – М.: Физматлит, 2006. – 328 с.

## ЗАДАЧА СИНТЕЗА НЕЙРОСЕТИ УПРАВЛЯЕМОЙ КОНСТРУКЦИИ НА ПРИМЕРЕ ДВУХ СОПРЯЖЁННЫХ РОБОТОВ

В.И.Чижиков<sup>1</sup>, Е.В.Курнасов<sup>2</sup>

<sup>1</sup>МИРЭА – Российский технологический университет «РТУ МИРЭА», Москва, Россия; [vichizhikov@gmail.com](mailto:vichizhikov@gmail.com)

<sup>2</sup>МИРЭА – Российский технологический университет «РТУ МИРЭА», Москва, Россия

На основе дифференциального метода определения ошибок в захватных устройствах двух сопряжённых роботов, выполняющих совместную работу, предлагается синтез нейросети, которая обеспечивает подстройку узлов конструкции за минимальное время, в течение которого удовлетворяются силовые ограничения в точках сопряжения. Для одного из роботов решается обратная задача кинематики, которая может решаться с использованием нечёткой нейронной сети.

В основу разработки модели взаимодействия двух роботов, совместно выполняющих работу [1, 2], положена программа управления перемещением объекта манипулирования с размещёнными на нём захватных устройств смежных роботов. Причём объект, в рамках решаемой задачи, не должен испытывать деформационных нагрузок, превышающих допустимые, вызванных кинематическим возмущением вследствие рассогласования в управлении группой. Следует отметить, что захватное устройство каждого манипулятора руки жёстко связано с объектом в определённых точках и манипулирование предполагает изменение положения устройства как твёрдого тела с выполняемыми требованиями, упомянутыми выше. Особое значение для решения поставленной задачи является выбор кинематической схемы манипуляторов [3-5], обладающих соответствующей маневренностью.

Модель взаимодействия двух твердых тел, принадлежащих двум разным манипуляторам, есть решение обратной задачи кинематики для каждого манипулятора с учётом неразрывности кинематической связи между ними. Представим геометрию взаимодействия двух манипуляционных роботов (рис. 1) в виде векторного замкнутого контура  $O_1A_1B_2AB_2$ , сформированного из замыкающих кинематическую цепь векторов  $O_1A$  и  $O_2B$  для каждого из манипуляторов и представленных в одной общей системе координат. Отрезок  $AB$  контура совпадает с осью предмета манипулирования.

Рассмотрим построение компенсационного алгоритма, основанного на преобразовании контура  $O_1ABO_2$ , построенного на результирующих векторах двух взаимодействующих роботов и предмета манипулирования. Идея метода заключается в устранении кинематических погрешностей [1], выявленных в упомянутом контуре, за счёт введения виртуальных плоских механизмов, в которых допускаются возможные смещения узлов контура. Нелинейность ошибок устраняется путём построения планов малых перемещений для каждого узла. Делая допущение о том, что кинематические ошибки есть произведение упругих податливостей и сил, действующих в соответствующих контуру направлениях, рассматриваемую задачу можно привести к силовой.

исполнительных механизмов манипуляторов роботов-манипуляторов осуществляется с помощью контуров на основе обратной связи по развиваемым усилиям (моментам). Проектирование этих контуров выполним по следующей схеме:

- по кинематическим соотношениям определяются заданные значения усилий, которые необходимо создать инструментом (схватом) в рабочей точке;
- по уравнениям динамики формируются контуры управления исполнительных двигателей, создающих требуемые моменты в степенях подвижности.

Особенностью такого подхода является то, что управляющие сигналы формируются на основе кинематических уравнений связи между движущими моментами и составляющими усилий (внешний контур системы), а также по модели приводов (внутренний контур системы). Два контура синтезируются независимо друг от друга. В рассматриваемой задаче имеем силу  $F_A^0$   $FA_0$ и  $F_R^0$ , заданные своими проекциями на неподвижные оси  $F_{Ax}^0, F_{Ay}^0, F_{Az}^0, F_{Bx}^0, F_{By}^0, F_{Bz}^0$ , образующие вектор-столбцы  $F_A^0$  и  $F_R^0$ .

Рассмотрим  $s$ -ю кинематическую пару. Приведём силу  $F_A^0$  к  $s$ -ой локальной системе отсчёта. Она приведёт к силе  $F_A^s$  и моменту  $M_{O_s}^s(F_A^0)$ . Имеем

$$F_A^s = A_{O,s}^{-1}F_A^0, \quad (1)$$

где  $A_{O,s}$  – матрица перехода от  $s$ -ой системы координат к базовой.

$$M_{O_s}^s(F_A^0) = r_A^s \times F_A^s = r_A^s \times A_{O,s}^{-1}F_A^0, \quad (2)$$

где  $r_A^s$  – радиус-вектор от центра  $s$ -ой кинематической пары до точки приложения вектора силы в точке  $A$  в той же системе координат.

В дальнейшем удобно использовать кососимметричную матрицу  $R_A^s$ , соответствующую вектору  $r_A^s$ :

$$R_A^s = \begin{pmatrix} 0 & -z_A & y_A \\ z_A & 0 & -x_A \\ -y_A & x_A & 0 \end{pmatrix}^s.$$

Тогда выражение (2) может быть записано в форме

$$M_{O_s}^s(F_A^0) = R_A^s A_{O,s}^{-1}F_A^0. \quad (3)$$

Управление                      силовыми                      операциями

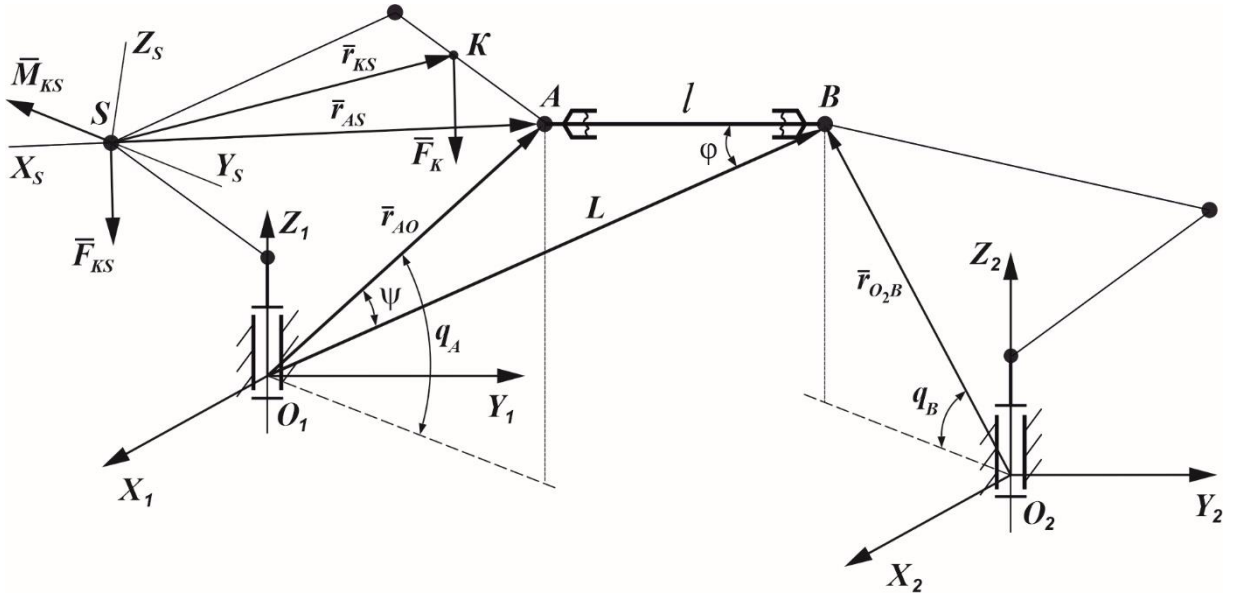


Рис. 1. Взаимодействие двух манипуляционных роботов, представленное в виде векторного замкнутого контура  $O_1ABO_2$  ( $AB$  – предмет манипулирования)

Сила (1) и момент (3) вызовут в упругой кинематической паре малое поступательное перемещение  $\xi_s$  и малый поворот  $\theta_s$ , компоненты которых в  $s$ -ой системе могут быть определены по формулам  $\xi_{sx}^s = \gamma_{sx} F_{Ax}^s$ ,

$$\begin{aligned}\xi_{sy}^s &= \gamma_{sy} F_{Ay}^s, \\ \xi_{sz}^s &= \gamma_{sz} F_{Az}^s, \\ \theta_{sx}^s &= \gamma_{s\theta x} M_{O_{sx}}^s(F_A^0), \\ \theta_{sy}^s &= \gamma_{s\theta y} M_{O_{sy}}^s(F_A^0), \\ \theta_{sz}^s &= \gamma_{s\theta z} M_{O_{sz}}^s(F_A^0).\end{aligned}$$

Введём матрицы линейных ( $\Gamma_s$ ) и угловых податливостей ( $\Gamma_{s\theta}$ ):

$$\Gamma_s = \begin{pmatrix} \gamma_{sx} & 0 & 0 \\ 0 & \gamma_{sy} & 0 \\ 0 & 0 & \gamma_{sz} \end{pmatrix},$$

$$\Gamma_{s\theta} = \begin{pmatrix} \gamma_{s\theta x} & 0 & 0 \\ 0 & \gamma_{s\theta y} & 0 \\ 0 & 0 & \gamma_{s\theta z} \end{pmatrix}. \quad (4)$$

С учётом введённых матриц упругие перемещения можно записать в следующем виде

$$\begin{aligned}\xi_s^s &= \Gamma_s F_A^s = \Gamma_s A_{O,s}^{-1} F_k^0, \\ \theta_s^s &= \Gamma_{s\theta} M_{O_s}^s(F_k^0) = \Gamma_{s\theta} R_A^s A_{O,s}^{-1} F_k^0.\end{aligned} \quad (5)$$

Найдём перемещение  $(\Delta r_A^0)_s$  точки  $A$ , вызванное деформацией  $s$ -ой кинематической пары от силы, приложенной в точке  $k$  (рис. 1).

$$\begin{aligned}(\Delta r_A^0)_s &= A_{O,s} (\Delta r_A^s)_s = A_{O,s} (\xi_s^s + \theta_s^s \times r_A^s) = \\ &= A_{O,s} (\xi_s^s - R_A^s \theta_s^s),\end{aligned} \quad (6)$$

где  $R_A^s$  – кососимметричная матрица, соответствующая вектору  $r_A^s$ . Подставляя (5) в (6), получим:

$$(\Delta r_A^0)_s = (A_{O,s} \Gamma_s A_{O,s}^{-1} - A_{O,s} R_A^s \Gamma_{s\theta} R_k^s A_{O,s}^{-1}) F_k^0 = E_{kA}^s F_k^0, \quad (7)$$

где  $E_{kA}^s = A_{O,s} (\Gamma_s - R_A^s \Gamma_{s\theta} R_k^s) A_{O,s}^{-1}$  – матрица  $3 \times 3$ , элементы которой имеют размерность податливостей. Складывая перемещения точки  $A$ , вызванные деформацией всех кинематических пар от первой до  $k$ -й, получаем

$$\Delta r_A^0 = \sum_{s=1}^k A_{O,s} (\Gamma_s - R_A^s \Gamma_{s\theta} R_k^s) A_{O,s}^{-1} F_k^0 = E_{kA} F_k^0.$$

Нами получено перемещение точки  $A$  для левого манипулятора (см. рис. 1). Аналогично, для правой схемы упругое перемещение  $\Delta r_B^0$  точки  $B$  содержит матрицу податливости  $E_{kB}$  и силу, приложенную в соответствующей точке правого манипулятора. Точки  $A$  и  $B$  жёстко связаны звеном, которым является объект манипулирования, а в точках  $A$  и  $B$   $\Delta r_A^0 \neq \Delta r_B^0$  вследствие различной податливости. Таким образом, статический анализ схемы позволил выявить кинематическую погрешность контура  $O_1ABO_2$ . Задача регулирования напряжённо-деформированного состояния (НДС) полученной конструкции (как вариант оптимизационной задачи) успешно решается на основе синтеза прямой и обратной нейросетевых задач. При этом определены предельно допустимые значения параметров её НДС.

Шаг 1. Выбираем контрольные узлы конструкции. В нашем случае это узлы  $A$  и  $B$ , в которых схваты роботов удерживают предмет манипулирования с заданными допустимыми пределами в точках контакта.

Шаг 2. Составляем «задачник» на основе теоретических или экспериментальных процедур из входов (внешних воздействий) и выходов (желаемых значений параметров (точки  $A$  и  $B$ )). В нашем случае

на основе решения обратной задачи кинематики получаем определение максимально допустимых внешних перемещений звеньев в узлах конструкции и, как следствие, допустимых нагрузок в точках  $A$  и  $B$ . Также возможен выбор оптимальных управлений, удовлетворяя условию минимума в расписании включения приводов, что приводит к минимуму затрат на энергию.

Шаг 3. Рассматривается задача оптимального управления с критерием минимума затрат энергии на управление. Особенностью является вариативность наборов включений и выбор минимума. Указанные шаги могут быть использованы с элементами самонастройки, а также с использованием нечёткой нейронной сети (ННС). Использование последней существенно ускоряет решение обратной задачи кинематики рассматриваемой задачи.

#### **Заключение.**

Совместное использование двух роботов, которые связаны объектом манипулирования, приводит к созданию несущей механической системы, требующей разработки алгоритмов управления силовыми параметрами в определённых узлах конструкции, то есть управлению её напряжённо-деформированным состоянием. В нашем случае управляемый модуль конструкции есть предмет манипулирования с узлами  $A$  и  $B$ , через которые осуществляется силовое взаимодействие с манипуляторами. В решаемой задаче компенсировались отклонения от заданного в осевом направлении, причём во всех вариантах компенсирующее воздействие не предполагало

относительного перемещения в узлах  $A$  и  $B$  элементов захватного устройства и объекта манипулирования, т.е. отсутствие деформации. В дифференциальном методе определения кинематических ошибок, который используется при синтезе компенсационного алгоритма, используются управляющие сигналы на основе кинематических уравнений связи между движущимися моментами и составляющими усилий в рабочей точке.

Таким образом, изложены приёмы синтеза алгоритмов и математического обеспечения систем автоматизации управления исполнительными механизмами для выполнения монтажных, сборочных и других операций.

1. Chizhikov V. I., Kurnasov E. V. Primary Error Compensation in Grippers with Any Manipulator Structure when Robots Collaborate in Moving an Object // Russian Engineering Research. 2023. V.43. N.11. P.1343–1349. DOI: 10.3103/S1068798X23110060.
2. Chizhikov V. I., Kurnasov E. V. Interaction of Two Robots in Synchronized Operation // Russian Engineering Research. 2020. V.40. N.10. P.804–808. DOI: 10.3103/S1068798X20100081.
3. Бруевич Н. Г., Правоторова Е. А., Сергеев В. И. Основы теории точности механизмов. М.: Наука, 1988. 236 с.
4. Крутько П. Д. Управление исполнительными системами роботов. М.: Наука, 1991. 336 с.
5. Коловский М. З., Слоущ А. В. Основы динамики промышленных роботов. М.: Наука, 1988. 240 с.
6. Golubov V.V., Manko S.V. Automation of autonomous mobile robot docking based on the counter growth rapidly exploring random tree method // Russian Technological Journal. 2024. V.12. N.1. P.7-14. DOI: 10.32362/2500-316X-2024-12-1-7-14



## ТРИБОЛОГИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА НИТРАТНЫХ ГРАФИТОВЫХ ФОЛЫГ

В.А. Шуляк<sup>1</sup>, Д.В. Демченко<sup>1</sup>, П.О. Буковский<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия; [ChVA-98@ya.ru](mailto:ChVA-98@ya.ru)

<sup>2</sup>Институт проблем механики имени А. Ю. Ишлинского РАН, Москва, Россия.

Изучены трибологические свойства графитовых фольг (ГФ) с плотностью 1,0, 1,3, 1,6 г/см<sup>3</sup> из очищенного природного графита различной фракции: с частицами размером 40-80 мкм, 160-200 мкм и >500 мкм. Получены результаты шероховатости поверхности образцов ГФ после холодной прокатки и испытаний на трение.

### Введение

Графитовая фольга (ГФ) является функциональным материалом с заданными свойствами, формирование которых происходит на всех этап её получения. Одним из ключевых факторов устанавливающих конечные свойства является плотность материала [1], [2]. ГФ имеет широкое применение в промышленности всех родов в качестве уплотнительного материала для статичных и подвижных соединений. Последние предполагают вращательные и поступательные движения по линиям соприкосновения с фольгой. Для изучения влияния условий получения ГФ на её трибологические свойства нами были подготовлены образцы из графитов трёх фракционного состава 40-80; 160-200; >500 мкм и трёх плотностей 1,0; 1,3; 1,6 всего 9, все образцы получены по нитратной технологии.

### Материалы и методы

Природный графит со средним размером частиц ~ 200 мкм и содержанием углерода > 99,9 % масс С) был просеян на виброгрохоте с установленными ситами 40; 80; 160; 200; 500 мкм, что позволило выделить три целевые фракции 40-80; 160-200; >500 мкм. Из каждой фракции были получены серии графитовых фольг для исследования трибологических свойств.

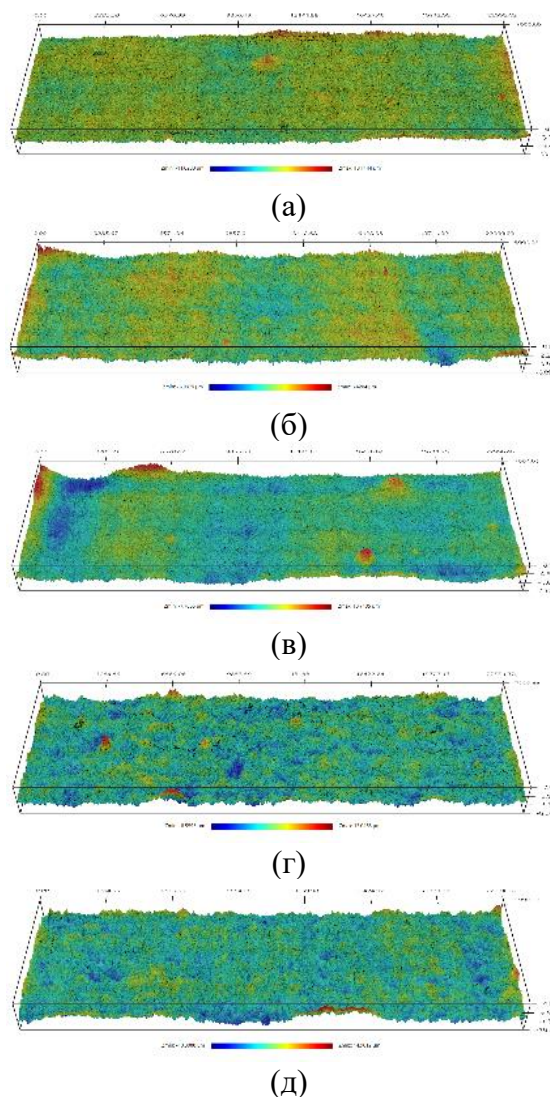
Получения интеркалированного графита происходило для каждой фракции графита одинаковым образом. Порошок природного графита смешивался с азотной кислотой 98% в массовом соотношении графит: кислота, как 1: 0,8. Перемешивание смеси происходило в течении получаса до полного прекращения самопроизвольного нагревания графита. Для получения ОГ в смесь графит-кислота при перемешивании вносилось 1000 мл дистиллированной воды, полученный раствор переносился на нутч-фильтр и промывался дополнительно 750 мл дистиллированной воды. Полученный ОГ просушивался в сушильном шкафу в течении 6 часов при 50 °С до полного испарения воды.

Вспенивание ОГ проводилось путём резкого нагрева ОГ до температуры 1000 °С в воздушной среде в течение ~ 3 секунд. Полученный порошок ТРГ каждой серии массой 33,75; 43,88 и 54,00 г прессовался в пресс-форме 15x15 см с нагрузкой в 2 тонны, для получения низкоплотных заготовок графитовых фольг (ГФ), которые далее прокатывались до плотностей 1,0; 1,3; 1,6 г/см<sup>3</sup> соответственно. Таким образом было получено 3 серии образцов из графита

различного фракционного состава с тремя плотностями. Всего было получено и испытано 9 образцов ГФ.

Исследования топографии поверхности образцов ГФ проводились при помощи 3D бесконтактного профилометра S Neox (Sensofar, Испания), оснащённого моторизированным X-Y столиком и 10X конфокальным объективом. Область единичного сканирования составляла 1,7x1,4 мм с разрешением 1224x1024 пикселей. Сшивание 136 рядом стоящих сканирований позволило получить изображение шероховатости поверхности образца размерами 25x8 мм.

### Результаты и обсуждение



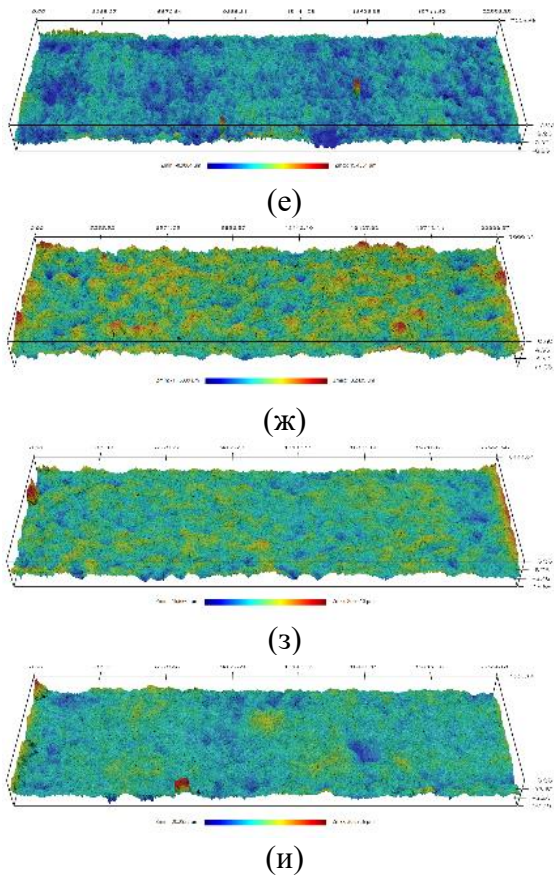


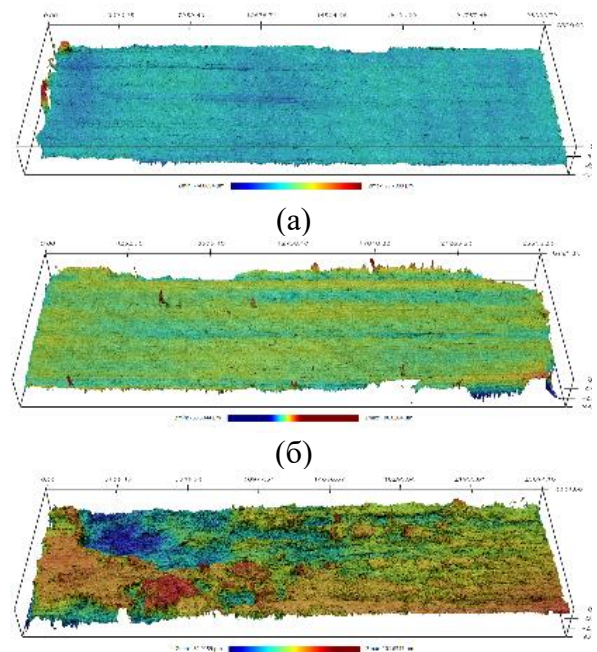
Рис. 1. Топография исходных поверхностей ГФ для плотности 1 г/см<sup>3</sup> (а, г, ж), 1,3 г/см<sup>3</sup> (б, д, з), 1,6 г/см<sup>3</sup> (в, е, и) полученных из фракции 40-80 мкм (а-в), 160-200 мкм (г-е), >500 мкм (ж-и)

Первоначально для характеристики образцов было получено сканирование поверхности образцов, изображенное на Рисунке 1. После чего проведены испытания на динамический коэффициент трения. Обнаружено, что после испытаний поверхность ГФ фракции 40-80 мкм стала более развитой, что особенно заметно при частоте возвратно-поступательного движения 1 Гц. Дополнительно наблюдаются следы частичного или полного расслоения ГФ для плотностей 1,3-1,6 г/см<sup>3</sup>. Образцы с более низкой плотностью деформируются не так значительно. Поверхность образцов ГФ, полученных из фракции >500 мкм, после экспериментального исследования на динамический коэффициент трения имеют однонаправленные следы от трения, а также небольшие следы разрушения. На поверхностях присутствуют преимущественно следы абразивного изнашивания, т.е. практически отсутствуют зоны расслоения или вырывания слоев материала.

Профилограммы полученные после экспериментов на страгивание демонстрируют, что поверхности ГФ очень близки по форме к исходной поверхности, только в некоторых местах появились следы смятия и разрушения. С ростом размера фракции в составе ГФ увеличивается и шероховатость исходной поверхности. Плотность ГФ незначительно влияет на исходную шероховатость. Минимальную исходную шероховатость независимо от плотности имеют поверхности образцов ГФ полученных из фракции 40-

80 мкм, эта шероховатость лежит в интервале  $Sa = 0,41 \div 0,48$  мкм.

Анализ результатов измерений параметров шероховатости показал, что при испытании при малых скоростях скольжения (статический коэффициент трения) высотные параметры шероховатости незначительно отличаются от исходных значений. При повышении частоты колебаний возвратно-поступательного привода увеличились и значения шероховатости, так, например, для образца ГФ плотности 1,3 г/см<sup>3</sup> полученной из фракции >500 мкм шероховатость возросла примерно в 4 раза ( $Sa = 6,7$  мкм), по сравнению с исходной поверхностью ( $Sa = 1,5$  мкм), что свидетельствует о сильном абразивном разрушении. Самую грубую поверхность демонстрируют образцы ГФ, полученные из фракции 160-200 мкм не зависимо от плотности параметр  $Sa$  лежит в интервале 0,58–4,09 мкм. Это связано в первую очередь с сильным расслоением образца, что свидетельствует о слабой межслойной адгезии. Анализ данных показывает, что статический коэффициент трения уменьшается при повышении плотности образцов ГФ полученных из фракций всех исследуемых размеров, это связано с его более хрупким поведением в касательном направлении. Самый низкий динамический коэффициент трения показывает ГФ полученная из фракции 40-80 мкм и составляет  $\mu = 0,13 \div 0,15$ , а самые высокие значение коэффициента трения демонстрирует образец ГФ с размером фракции 160-200 мкм ( $\mu \approx 0,21$ ), что в первую очередь связано с сильными разрушениями его поверхности (рис. 4). От плотности ГФ динамический коэффициент трения слабо зависит, преобладающим фактором в данных экспериментах является частота возвратно-поступательного привода. Описываемые деформации изображены на Рисунке 2.



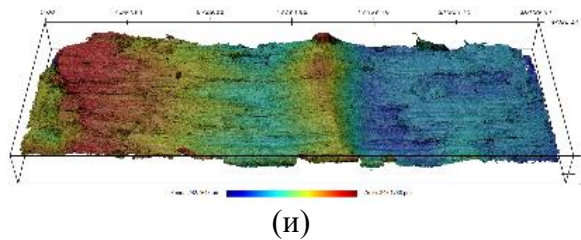
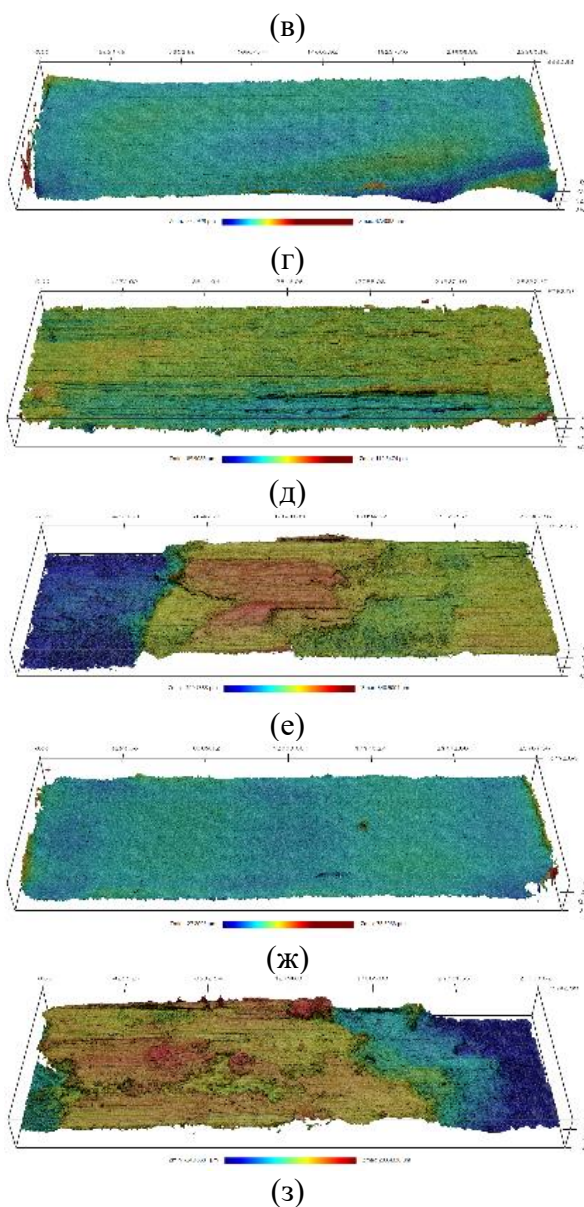


Рис. 2. Топография поверхностей ГФ для плотности 1 г/см<sup>3</sup> (а-в), 1,3 г/см<sup>3</sup> (г-е), 1,6 г/см<sup>3</sup> (ж-и) полученных из фракции 40-80 мкм после экспериментальных исследований при скорости скольжения 1 мкм/с (а, г, ж), частоте 0,1 Гц (б, д, з), 1 Гц (в, е, и)

## Выводы

Из анализа трибологических свойств, исследованных ГФ из разных фракций, следует, что при увеличении плотности с 1.0 до 1.6 г/см<sup>3</sup> для всех фракций исходного и после страгивания материала не изменяются значения шероховатости поверхности:  $S_a \approx 0.5-0.7$  мкм,  $S_q \approx 0.5-1.0$  мкм. Из этого следует, что возникающее при холодной прокатке трение одинаково воздействовало на структурные изменения образцов ГФ, при этом слабые нагрузки для определения момента страгивания не вызывают сильных дефектов поверхности.

Для ГФ, подвергшихся динамическому испытанию на трение, наблюдается рост шероховатости ( $S_a$  возрастает с 0.7 мкм до 3.5 мкм и  $S_q$  – от 1.0 мкм до 7.0 мкм) при увеличении плотности с 1.0 до 1.6 г/см<sup>3</sup> для каждой фракции.

Коэффициент трения ГФ растет с увеличением размера фракции от 0.15 до 0.167, что сильнее всего выражено при плотности 1.6 г/см<sup>3</sup>, и снижается с 0.165 до 0.15 при увеличении плотности с 1.0 до 1.6 г/см<sup>3</sup> внутри каждой отдельной фракции.

1. Shulyak V.A., Morozov N.S., Ivanov A.V., Gracheva A.V., Chebotarev S.N., Avdeev, V.V. The Influence of Machining Conditions on the Orientation of Nanocrystallites and Anisotropy of Physical and Mechanical Properties of Flexible Graphite Foils // *Nanomaterials* 2024. V. 14. P. 540.
2. Shulyak V.A., Morozov N.S., Gracheva A.V., Gritskovich M.D., Chebotarev S.N., Avdeev, V.V. Anisotropy of Electrical and Thermal Conductivity in High-Density Graphite Foils // *Nanomaterials* 2024. V. 14. P. 1162.

## МЕТОДОЛОГИЯ ОПТИМАЛЬНОГО СИНТЕЗА РЕГУЛИРУЕМЫХ ПОДШИПНИКОВ ЖИДКОСТНОГО ТРЕНИЯ И ИХ КОНТРОЛЛЕРОВ

Д.В. Шутин, А.С. Фетисов, М.Г. Литовченко, Л.А. Савин

<sup>1</sup>Орловский государственный университет им. И.С. Тургенева, Орел, Россия; rover.ru@gmail.com

В статье представлен подход к реализации процедур оптимального синтеза регулируемых подшипников жидкостного трения и их управляющих контроллеров. Параметрический синтез геометрических параметров подшипников реализован на основе многокритериальных эвристических оптимизационных алгоритмов. Для синтеза оптимальных контроллеров таких подшипников использованы методы обучения с подкреплением. Ускорение процесса синтеза контроллеров достигнуто применением суррогатных многокомпонентных моделей управляемых подшипников на основе искусственных нейронных сетей.

### Введение

Подшипники жидкостного трения являются одними из наиболее ответственных элементов турбомашин, от которых зависит работоспособность и характеристики системы. Опоры скольжения обладают множеством нелинейных характеристик, от чего их проектирование становится нетривиальной задачей и в большинстве случаев проводится по упрощённым методикам с получением усреднённых характеристик опор [1]. Спроектированные таким путём опоры скольжения способны работать в узком диапазоне частот и нагрузок. Внедрение активного управления в опоры скольжения позволяет расширить рабочие диапазоны машин, однако дополнительно усложняет процедуры проектирования ввиду снижения детерминированности системы. Процедуры оптимального синтеза опор скольжения в последнее время основываются на применении эвристических алгоритмов [2], однако вопросы их применения к регулируемым опорам практически не рассмотрены в литературе.

Мультифизичность и нелинейность управляемых роторно-опорных систем требует также комплексного подхода к вопросу синтеза контроллеров. В последние годы интеллектуальные контроллеры на основе обучения с подкреплением успешно используются в различных сложных нелинейных задачах, таких как автономное вождение [3], управление движением робота [4]. Это создает предпосылки для реализации интеллектуальных контроллеров активных опор роторов, однако данный вопрос также еще почти не рассматривался в исследованиях.

Данная статья предлагает комплексный подход к проектированию активных опор скольжения, включающий в себя две основных части: синтез механической части подшипника, соответствующей основным критериям производительности подшипника, и последующий синтез оптимального контроллера. При таком подходе вычислительная стоимость всей задачи уменьшается за счёт разделения её на более простые задачи.

### Модель и методы

В качестве объекта исследования рассматривается активно смазываемый цилиндрический гибридный

подшипник жидкостного трения. Схема подшипника представлена на рис. 1.

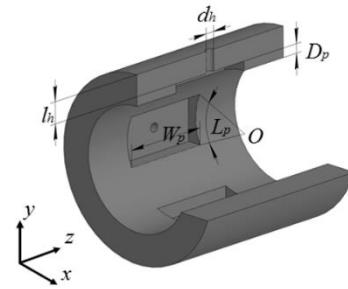


Рис. 1. Расчетная схема активно смазываемого цилиндрического гибридного подшипника

Втулка гибридного подшипника содержит четыре прямоугольных гидростатических кармана малой площади с дросселями. Управляющее воздействие на ротор производится независимым регулированием давления подачи смазочного материала в карманы посредством сервоклапанов.

Математическая модель подшипника основана на гидродинамической теории смазки [5,6] и, в частности, на численном решении модифицированного уравнения Рейнольдса:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[ \frac{h^3}{\mu} \frac{\partial p}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[ \frac{h^3}{\mu} \frac{\partial p}{\partial z} \right] = 6 \frac{\partial}{\partial x} (Uh) + 12V, \quad (1)$$

где  $x, z$  – декартовы координаты,  $h$  – функция радиального зазора,  $p$  – распределение давления смазочного материала,  $\mu$  – динамическая вязкость смазочного материала,  $U$  – окружная скорость вала,  $V$  – радиальная скорость вала.

Задача параметрического синтеза механической части подшипников была сформулирована как многокритериальная оптимизационная задача с ограничениями.

В качестве критерия, описывающего способность подшипника конвертировать управляющие сигналы в силовые воздействия на ротор предложено использовать безразмерную величину максимального управляющего воздействия:

$$\bar{F} = \frac{F_{\max}}{W}, \quad (2)$$



Рис. 2. Схема процедуры синтеза оптимального DQN контроллера активного гибридного подшипника

где  $F_{max}$  – наибольшая управляющая сила, создаваемая суммарно в двух контурах управления (по осям  $x$  и  $y$ ),  $W$  – вес ротора.

В качестве меры энергетической эффективности использована величина момента трения в смазочном слое подшипника  $T$ , а в качестве динамической меры устойчивости системы – наименьший из прямых коэффициентов демпфирования  $C$ .

В задаче синтеза механической части максимальное управляющее воздействие и коэффициент демпфирования подлежат максимизации, момент трения – минимизации. В качестве переменных проектирования использовались: длина подшипника  $L$ , начальный радиальный зазор  $h_0$ , диаметр канала подвода смазки  $d_h$ , длина канала подвода смазки  $l_h$ , ширина гидростатического кармана в % от ширины подшипника  $W_p$ , глубина кармана в % от зазора подшипника  $L_p$ .

Апробация методологии решения оптимизационной проводилась посредством расчета опор для экспериментальной установки, задача была сформулирована следующим образом:

$$\min f(G) = \{T, -C, -\bar{F}\} \quad (3)$$

$$\text{subject to } \begin{cases} 0,5 < L/D < 1,5 \\ 40 < L < 80, \text{ mm} \\ 40 < h_0 < 80, \mu\text{m} \\ 0,5 < d_h < 4, \text{ mm} \\ 5 < l_h < 12, \text{ mm} \\ 5 < W_p < 60, \% \\ 5 < L_p < 40, \% \end{cases}$$

$$\text{where } G = [L, h_0, d_h, W_p, L_p].$$

В качестве метода синтеза оптимального контроллера подшипника использован метод глубокого Q-сетевого обучения (DQN), который является одним из методов обучения с подкреплением. При реализации метода модель роторной системы с управляемым подшипником используется в качестве среды, во взаимодействии с которой посредством итерационной процедуры происходит оптимизация политики управления:

$$\pi = \arg \min_{\pi} N_{\Pi} \quad \text{subject to } e < e_{lim}, \quad (4)$$

где  $N_{\Pi}$  – суммарные потери мощности на трение в подшипнике и на прокачку смазочного материала,  $\mathbf{U}=[u_x \ u_y]$  – вектор управляющих сигналов,  $e$  и  $e_{lim}$  – текущий и максимально допустимые эксцентриситеты вала в подшипнике.

Функция награды DQN агента сформулирована следующим образом:

$$r = \begin{cases} r_{max} - K(\Delta u_x + \Delta u_y) & \text{если } N_{\Pi} < N_{lim} \ \& \ e \leq e_{lim}; \\ -f_{max} & \text{если } e > e_{lim}. \end{cases} \quad (5)$$

где  $r$  – награда,  $r_{max}$  и  $f_{max}$  – максимальные награда и штраф,  $K$  – балансирующий коэффициент, ограничивающий скорость изменения управляющего сигнала. Общий алгоритм обучения DQN контроллера представлен на рис. 2.

### Результаты и обсуждение

Многокритериальная оптимизация проводилась с помощью эвристических алгоритмов MOGA и MOPSO с 200 особями (частицами) в популяции, относительная точность при генерации нового поколения  $10^{-5}$ . Решения были представлены в виде множеств оптимальных по Парето решений, которые взаимно дополняют друг друга, формируя единое множество решений в системе координат целевых функций. Множество представлено в графическом виде на рис. 2 с дополнительными обозначениями качественных критериев по осям координат для упрощения выбора решений с заданными свойствами.

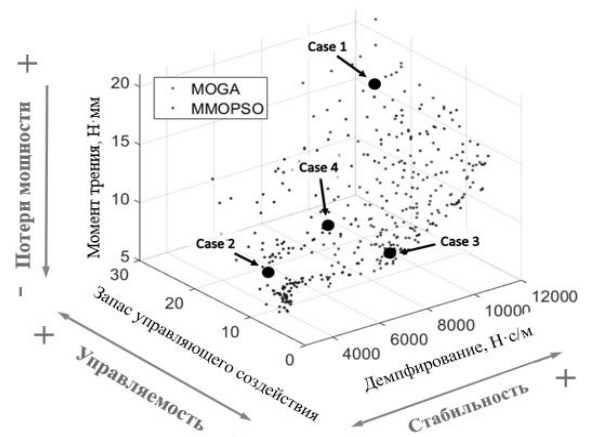


Рис. 3. Наборы оптимальных по Парето решений, полученных с помощью алгоритмов MOGA и MOPSO

Из множества решений было отобрано три, имеющих существенно различающиеся свойства, и одно дополнительное, отличающееся их сбалансированным сочетанием. Экспериментальные образцы опор

с синтезированными параметрами были изготовлены и исследованы на экспериментальном стенде. Коэффициенты корреляции экспериментальных оценок целевых функций с расчетными значениями составили: для максимального управляющего воздействия в пределах 0,99-0,95; для момента трения более 0,99; для коэффициента демпфирования 0,981. Результаты позволили сделать вывод о хорошем соответствии фактических свойств образцов заданным при проектировании. На рис. 4 также представлено численное моделирование процесса активного подавления вызванных дисбалансом вибраций вала выбранными конфигурациями.

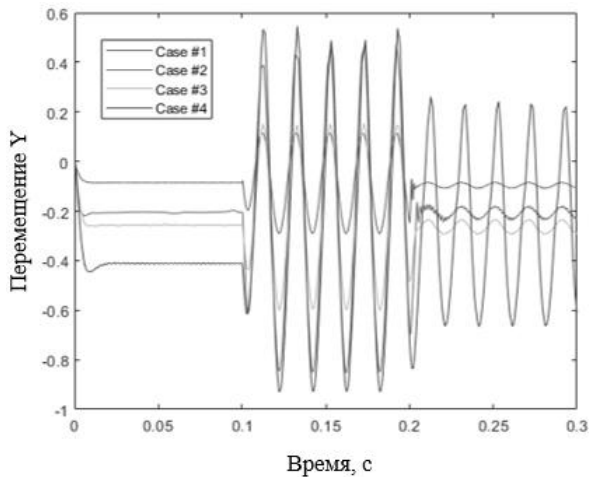


Рис. 4. Сравнительная оценка способности конфигураций подшипника к активному снижению вибраций ротора

Синтезированный с учетом выражений (4) и (5) DQN-контроллер был численно протестирован для различных величин дисбаланса ротора. Рассчитанные траектории управляемого движения ротора в подшипнике представлены на рис. 5.

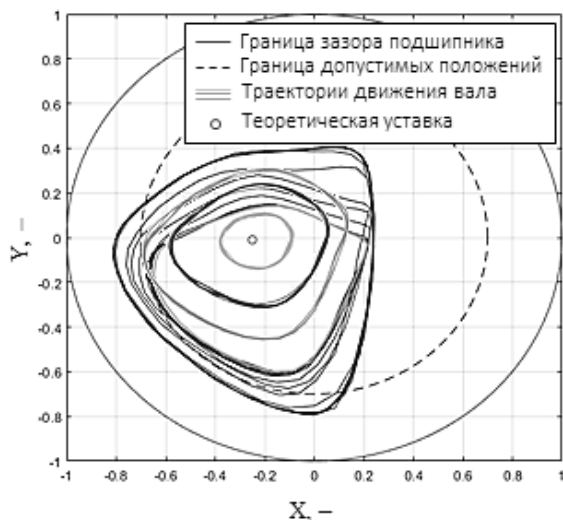


Рис. 5. Траектории управляемого движения ротора

При обучении контроллера применялась также

процедура замены исходных численных моделей на их суррогатные аналоги на основе сопряженных искусственных нейронных сетей, согласно методике [7], для многократного ускорения расчетов движения ротора.

Результаты показывают, что контроллер эффективно удерживает положение вала в подшипнике в области расчетного положения, соответствующего теоретическому минимуму затрат энергии [8]. Если амплитуда колебаний превышает допустимую границу перемещений вала, контроллер эффективно приводит систему в допустимые пределы согласно наложенным ограничениям.

## Заключение

Результатом исследования стала комплексная методология проектирования управляемых гибридных опор скольжения. Она позволяет производить параметрический синтез механической части подшипника с заданными свойствами управляемости, энергоэффективности и устойчивости, что подтверждено экспериментальным исследованием. Синтез на ее основе интеллектуального контроллера на основе обучения с подкреплением также позволяет обеспечить поведение управляемой роторной системы, которое соответствует заданным требованиям энергоэффективности и обеспечения безопасных режимов работы.

**Финансовая поддержка.** Работа поддержана грантом РФФ № 22-19-00789, <https://rscf.ru/en/project/22-19-00789/>.

1. Michalec M. и др. A novel geometry optimization approach for multi-recess hydrostatic bearing pad operating in static and low-speed conditions using CFD simulation // Tribology Letters, 2023. Т. 71.
2. Hu X., Wang J., Zhu S., Dong W. Optimal design of hydrodynamic journal bearing based on BP neural network optimized by improved particle swarm algorithm // Proceedings of international conference on artificial intelligence and communication technologies (ICAICT 2023). Smart Innovation, systems and technologies, 2024. Т. 368. С. 121-136.
3. Zhu M. и др. Safe, efficient, and comfortable velocity control based on reinforcement learning for autonomous driving // Transp. Res. Part C Emerg. Technol., 2020. Т. 117. С. 102662.
4. Zhang F. и др. Towards Vision-Based Deep Reinforcement Learning for Robotic Motion Control // Australas. Conf. Robot. Autom. ACRA. 2024.
5. Hori Y. Foundations of Hydrodynamic Lubrication // Hydrodynamic Lubrication, Springer. 2006.
6. Mattox D. Encyclopedia of Tribology // PVD, Springer. 2013.
7. Shutin D., Kazakov Y., Stebakov I., Savin L. Data-driven and physics-informed approaches for improving the performance of dynamic models of fluid film bearings // Tribology Int., 2024. Т. 191. №109136.
8. Shutin D., Kazakov Y. Multi-Objective Deep Q-Network Control for Actively Lubricated Bearings // Lubricants, 2024. Т. 12(7). №242.

## ПРЕДИКТИВНЫЙ АНАЛИЗ ИЗНОСНОЙ И УСТАЛОСТНОЙ ДЕГРАДАЦИИ АКТИВНЫХ И ПАССИВНЫХ ПОДШИПНИКОВ ЖИДКОСТНОГО ТРЕНИЯ

Д.В. Шутин, М.Э. Бондаренко, Р.Н. Поляков, Ю.Н. Казаков

<sup>1</sup>Орловский государственный университет им. И.С. Тургенева, Орел, Россия; rover.ru@gmail.com

В статье представлен подход к реализации систем предиктивного анализа состояния подшипников жидкостного трения, в том числе управляемых, с учетом процессов их механического изнашивания и накопления усталостных напряжений. Подход включает в себя использование численной модели роторно-опорной системы для синтеза данных с последующим обучением предиктивной модели на основе искусственной нейронной сети. Входами модели являются, в общем случае, параметры нагрузок в системе, а выходами - оценочные значения остаточного ресурса узла.

### Введение

Цифровизация производств включает в себя целый комплекс мероприятий, связанных со сбором и использованием данных о производственных процессах на всех уровнях. Внедрение систем мониторинга и предиктивного анализа состояния оборудования занимают существенное место в процессах цифровизации, повышая информированность о состоянии критического оборудования.

В роторных машинах одними из критических для обеспечения работоспособности узлов являются опоры роторов. Ввиду особенностей конструкции, прямой доступ к ним во многих случаях затруднен. В данном случае разработка систем предиктивного анализа состояния подшипников позволяет снизить риски непредвиденных выходов оборудования из строя и прогнозировать развитие ключевых дефектов в процессе их эксплуатации [1, 2].

Наиболее распространенными причинами выхода из строя опор скольжения является их механический износ, а также усталостное разрушение элементов опорных поверхностей [3]. При этом, в отличие от износа, накопление усталостных напряжений в материале вкладышей подшипников не проявляется до самого начала разрушения, а значит требует особого внимания.

Переход к регулируемым конструкциям опор роторов [4] еще больше затрудняет реализацию предиктивного анализа, поскольку работа систем управления может существенно влиять процессы во всей роторно-опорной системе [5].

Одним из возможных подходов в таком случае является совмещение модельного подхода и подхода, основанного на фактических данных от оборудования, который все чаще применяется в технике [6]. Однако в области подшипников скольжения, данный вопрос изучен не в полной мере.

В данной работе представлена методика создания предиктивных моделей износной и усталостной деградации подшипников скольжения, использующих данные численных моделей на этапе подготовки, и данные от технологического оборудования на этапе эксплуатации. Методы машинного обучения позволяют аппроксимировать

характеризующие эти процессы зависимости и прогнозировать остаточный ресурс подшипников скольжения, как традиционной пассивной конструкции, так и со встроенными системами регулирования.

### Моделирование

Объектом исследования является радиальный гидродинамический подшипник, общая схема которого представлена на рис 1. Несущая способность подшипника рассчитывается численным решением обобщенного уравнения Рейнольдса:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[ h^3 \frac{\partial p}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[ h^3 \frac{\partial p}{\partial z} \right] = 6\mu \frac{\partial}{\partial x} (V_1 h) - 12\mu V_2, \quad (1)$$

где  $V_1$  и  $V_2$  составляющие скорости движения жидкости в окружном и радиальном направлениях соответственно,  $\mu$  – динамическая вязкость смазочной жидкости,  $h$  функция зазора смазочного слоя,  $p$  – искомое поле давления жидкости в смазочном слое,  $x$  и  $z$  координаты развертки подшипника.

Моделирование износа опорной поверхности подшипника скольжения осуществляется с использованием уравнения Арчарда:

$$V = \frac{KS_n P}{HB} \quad (2)$$

где  $K$  — безразмерный коэффициент износа;  $S_n$  — путь трения за 1 час, м/ч;  $P$  — полная нагрузка, Н;  $HB$  — твердость материала износа, МПа,  $V$  – объемная скорость изнашивания.

Накопление усталостных повреждений моделируется на основе SN-зависимостей [3], описывающих запас усталостной прочности материала, с применением правила суммирования повреждений Пальмгрена-Майнера:

$$D = \sum_i \frac{n_i}{N_i}, \quad (3)$$

где  $n_i$  — количество циклов при определенном уровне нагрузки,  $N_i$  — количество циклов до отказа при определенном режиме нагружения.

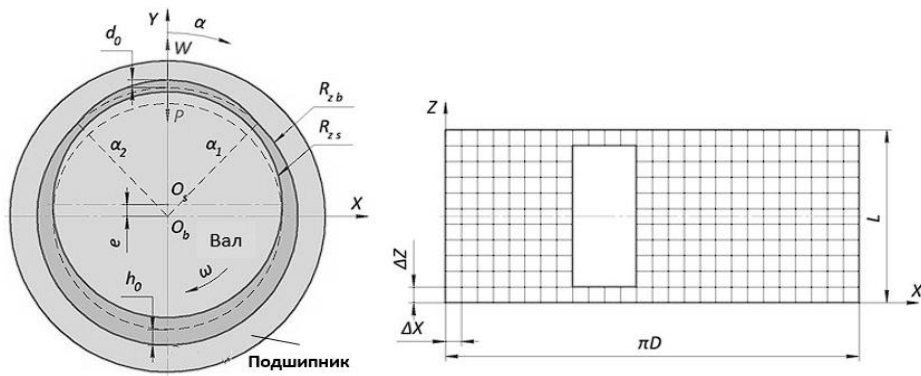


Рис. 1. Расчетная схема гидродинамического подшипника жидкостного трения

## Результаты и обсуждение

Обобщенно процесс разработки моделей прогнозирования износа и усталости материала подшипников скольжения представлен на рис. 2. Он состоит из двух основных этапов. Первый этап включает описание процесса деградации на основе физической модели, совмещаемой с численной моделью роторно-опорной системы. Для заданного диапазона условий эксплуатации, который должен заведомо превышать реально возможные их лимиты, генерируется набор данных. Эти данные позволяют методами машинного обучения создать быстродействующую модель, которая ставит в зависимость скорость накопления дефектов и величину остаточного ресурса от измеряемых параметров нагрузок в системе. В случае с регулируемыми подшипниками скольжения, величины управляющих воздействий также становятся дополнительными входами модели.

Оптимизация прогностической модели на этапе ее формирования при этом производится также посредством анализа получаемого набора данных. В

частности, плотность данных может быть повышена в областях наибольшей нелинейности описываемых зависимостей по результатам соответствующего анализа. Напротив, в более линейных областях плотность данных может быть меньшей. В совокупности это повышает как качество аппроксимации данных, так и скорость работы предиктивной модели.

Сравнительно малый порядок получаемых таким образом моделей позволяет реализовывать их на вычислительных средствах с достаточно малой производительностью. Необходимые параметры при этом измеряются напрямую или косвенно с помощью датчиков во время работы оборудования. Полученные данные передаются на вход модели. Наконец, параметры деградации подшипников рассчитываются и суммируются на основе выходов модели, а значение остаточного ресурса непрерывно оценивается, при необходимости подвергается фильтрации, и отображается при необходимости.

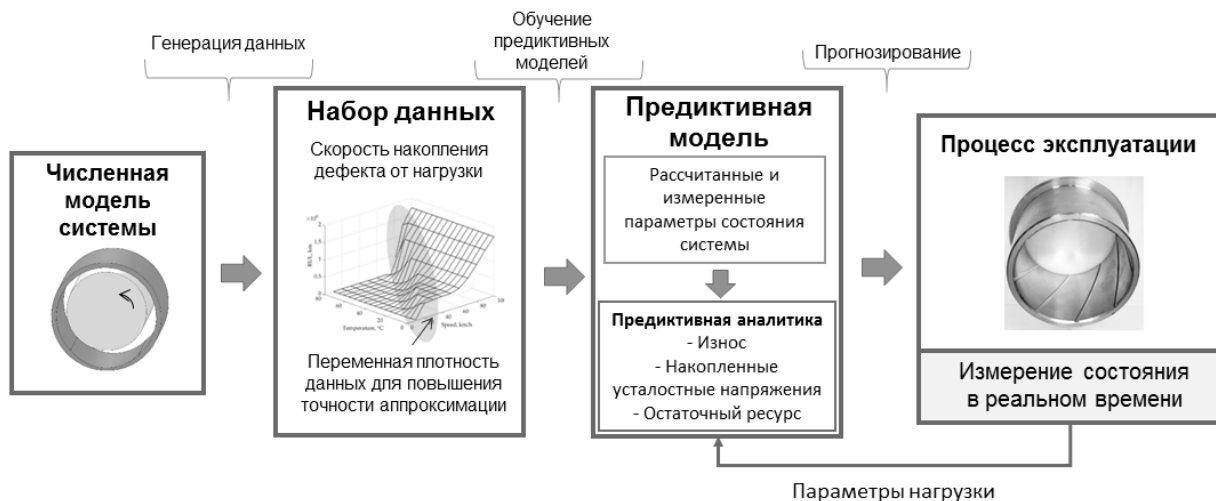


Рис. 2. Процесс разработки моделей предиктивной аналитики и диагностики износа и усталости



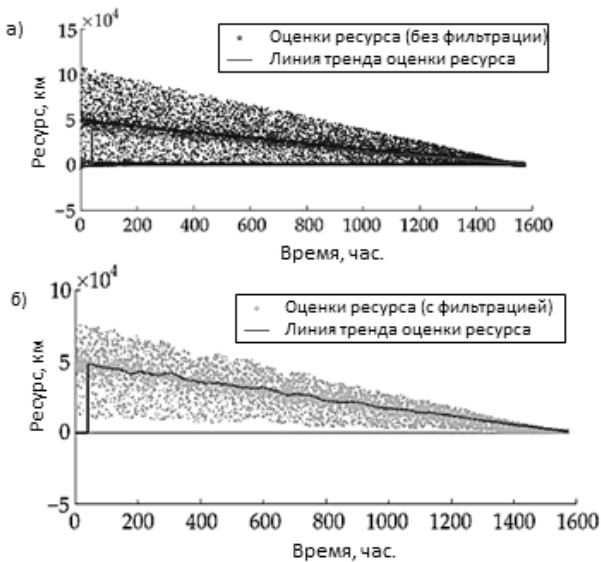


Рис. 3. Оценка остаточного ресурса по износу подшипника тягового мотора локомотива

Апробация подхода была проведена на соответствующих примерах. Так, анализ износа был реализован для подшипника тягового мотора электровоза [7], а анализ усталостной деградации был проведен на примере опор тяжелого турбоагрегата [8].

Результаты моделирования жизненного цикла подшипника тягового мотора локомотива, подверженного износу, показаны на рис. 3. Модель выдает точечные оценки ресурса, среди которых прослеживается тренд, наиболее приближенный к истинному значению. Для обработки результатов применялись процедуры удаления выбросов и усреднения данных методом скользящего окна.

Результаты моделирования жизненного цикла подшипника турбогенератора, подверженного усталостному разрушению, показаны на рис. 4. Подшипник имел при этом регулирующую конструкцию со смещаемой верхней половиной, имеющей целью снижение амплитуды колебаний ротора на отдельных режимах работы. Влияние степени управляемого смещения  $\delta$  на ресурс подшипника также проанализировано на рис. 4.

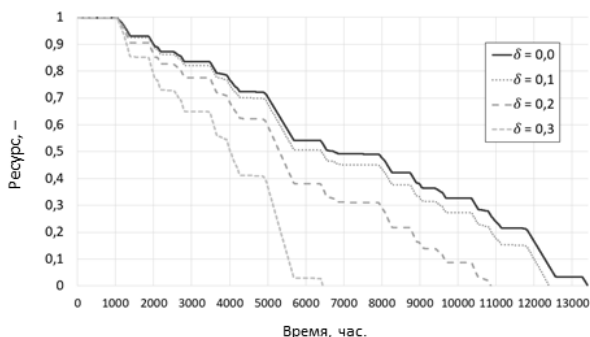


Рис. 4. Моделирование усталостной деградации подшипника турбогенератора

Анализ проводился путем сопоставления полученных результатов с данными ГОСТ 27165-97, устанавливающего предельные значения вибраций. Так, при предельно допустимой для заданных условий работы амплитуде вибраций максимальное давление в смазочном слое составляло 5,5 МПа, что дает около 12 тысяч часов ресурса по усталостной прочности. При сдвиге верхнего вкладыша подшипника амплитуда колебаний снижается, но также снижается и ресурс подшипника на десятки процентов. Данная информация может применяться для проведения ремонта оборудования по фактическому состоянию.

### Заключение

Результаты исследования представляют подход к реализации предиктивного анализа подшипников скольжения на основании гибридных моделей. В них процессы износа и снижения усталостной прочности первоначально моделируются численно, а затем на генерируемых данных обучаются быстродействующие предиктивные модели. Они позволяют прогнозировать скорость накопления дефектов и величину остаточного ресурса подшипника на основании измеряемых данных о нагрузках в роторной системе, а в случае применения регулируемых подшипников – также и с учетом информации о величине управляющих сигналов.

**Финансовая поддержка.** Работа поддержана грантом РФФ № 22-19-00789, <https://rscf.ru/en/project/22-19-00789/>.

1. Ding H., Yang L., Cheng Z. и Yang Z. A Remaining Useful Life Prediction Method for Bearing Based on Deep Neural Networks // Measurement, 2021. Т.172.
2. Wen P., Li Y., Chen S. и Zhao S. Remaining Useful Life Prediction of IIoT-Enabled Complex Industrial Systems with Hybrid Fusion of Multiple Information Sources // IEEE Internet Things J., 2020. Т.8. С.9045–9058.
3. Sun B., Li Y. и др. Remaining Useful Life Prediction of Aviation Circular Electrical Connectors Using Vibration-Induced Physical Model and Particle Filtering Method // Microelectronics Reliability, 2019. Т.92. С.114–122.
4. Santos I.F. Controllable Sliding Bearings and Controllable Lubrication Principles – An Overview // Lubricants, 2018. Т. 6(1). №16.
5. Machado T.H., Alves D.S. и Cavalca K.L. Investigation about Journal Bearing Wear Effect on Rotating System Dynamic Response in Time Domain // Tribol Int., 2019. Т.129. С.124–136.
6. Alves D.S., Fieux G., Machado T.H., Keogh P.S. и Cavalca K.L. A Parametric Model to Identify Hydrodynamic Bearing Wear at a Single Rotating Speed // Tribol Int., 2021. Т.153. №106640.
7. Shutin D., Bondarenko M., Polyakov R., Stebakov I. и Savin L. Method for On-Line Remaining Useful Life and Wear Prediction for Adjustable Journal Bearings Utilizing a Combination of Physics-Based and Data-Driven Models: A Numerical Investigation // Lubricants, 2023. Т. 11(1). №33.
8. Shutin D., Bondarenko M., Polyakov R., Stebakov I. и Savin L. Prediction of Remaining Useful Life of Passive and Adjustable Fluid Film Bearings Using Physics-Based Models of Their Degradation // Mechanisms and Mach. Science, 2023. Т. 139. С. 211-223.

## НАУКОЕМКИЕ ТЕХНОЛОГИИ ПОВЫШЕНИЯ РЕСУРСА РАБОТЫ ДЕТАЛЕЙ МАШИН И МЕХАНИЗМОВ

Яковлева А.П.<sup>1</sup>, Албагачиев А.Ю.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

<sup>2</sup> ИМАШ РАН, Москва, Россия

Авторами разработаны и исследованы методы комбинированной обработки, которые заключаются в последовательном применении метода упрочнения концентрированными потоками энергии и поверхностной пластической деформации. После применения ППД на поверхности упрочненных образцов не выявлены зоны концентрации напряжений. Разработанные методы увеличивают износостойкость и ресурс работы деталей.

Надежность и долговечность машин и механизмов во многом зависит от процессов трения и износа. [1-4]. По данным МАДИ, ВИМ и других профильных организаций аварийные простои различных видов техники составляют до 42%. При этом, износ деталей играет ключевую роль [3,5]. Анализ литературы показывает, что до 80% всех деталей выходят из строя по причине износа. Поэтому повышение износостойкости является актуальной задачей.

Одним из способов повышения износостойкости — это разработка новых технологических методов. Научой и практикой предложено большое количество методов обеспечения износостойкости. Однако производители машин и механизмов по-прежнему используют традиционные методы: цементация, закалка ТВЧ, азотирование, карбонитрирование и др. И этому есть разумное объяснение — при выпуске большой номенклатуры деталей подбирать режимы, оборудование и инструмент проблематично. В закалочных печах можно упрочнять различные по размерам, назначению и конструкции детали. Это очень выгодно. Поэтому необходимо предложить универсальные способы повышения износостойкости и такими способами могут быть методы упрочнения концентрированными потоками энергии (КПЭ) — лазерная закалка, электрохимическая обработка и плазменная закалка. Эти способы имеют ряд преимуществ: они технологичные, экономичные, и прекрасно встраиваются в автоматические линии и гибкие производственные системы. Упрочнение возможно на строго определенном участке поверхности, при этом отсутствует коробление, что дает возможность исключить операцию шлифования и избежать прижогов и термических трещин [6]. Оборудование для этих методов упрочнения изготавливают на территории России — хорошее по качеству и цене.

Однако у методов упрочнения КПЭ имеется существенный недостаток — при наложении полос закалки образуются зоны отпуса [6]. В этих зонах наблюдается некоторое понижение твердости и эти зоны могут быть зонами концентрации напряжений (ЗКН). Известно, что наличие ЗКН в поверхностном слое снижает усталостную прочность. Применять такие методы упрочнения для деталей машин, работающих в условиях знакопеременных нагрузок и смазки не целесообразно. Поэтому необходимо исключить ЗКН, полученные после упрочнения КПЭ.

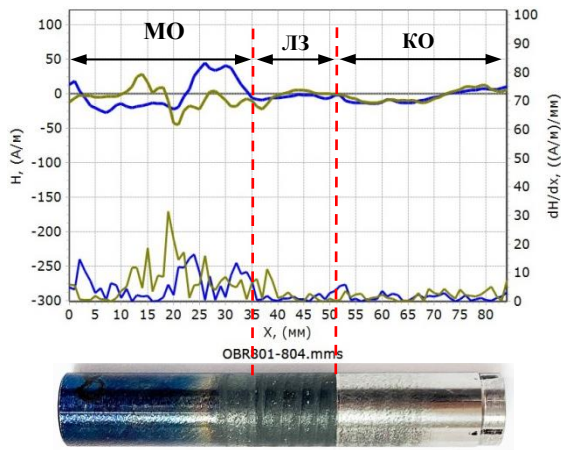
Решением этой задачи может быть применение комбинированной обработки (КО). Известно, что комбинированное воздействие на поверхностный слой расширяет возможности каждого метода, исключает недостатки, дает возможность получить поверхности с новыми свойствами — модифицированные поверхности [6-9]. Это создает резерв для повышения износостойкости и ресурса деталей машин. Научный подход заключается в выборе дополнительного способа обработки для исключения ЗКН после упрочнения КПЭ и получение поверхностей с новыми свойствами и повышения износостойкости деталей машин и механизмов.

Методы ППД благоприятно влияют на поверхностный слой, особенно после термического воздействия. Поэтому в работе выдвинуто предположение, что совмещение методов даст положительный эффект.

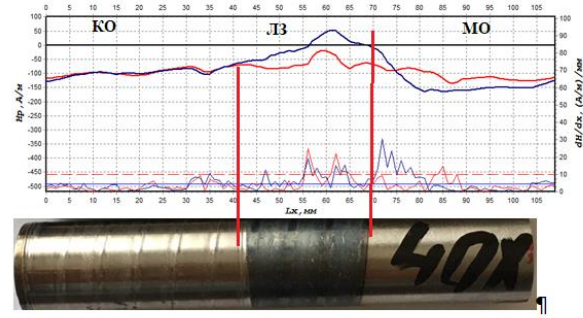
Таким образом, были разработаны процессы КО, которые заключаются в последовательном применении одного из методов упрочнения КПЭ (лазерная закалка, электрохимическая обработка или плазменная закалка) и метода ППД (например, алмазного выглаживания).

В работе была представлена методика проектирования процессов КО с учетом типа производства и влияния технологической наследственности на образование ЗКН.

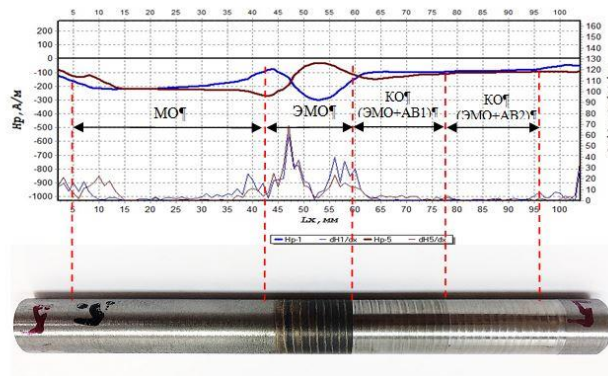
Авторами проведены экспериментальные исследования наличия ЗКН после КО методом магнитной памяти металла [8]. Исследование показало, что в полученном модифицированном слое отсутствуют ЗКН в результате влияния фактора наследственности: полезные свойства поверхности сохраняются в течение всего технологического процесса (твердость, глубина упрочнения, шероховатость, остаточные напряжения), а негативные свойства (ЗКН) исключаются. Алмазное выглаживание является технологическим барьером для большинства поверхностных дефектов (рисунок). На образцах, изготовленных из стали 40Х, (рисунок 1а) после механической обработки (МО) заметны возмущения, что свидетельствует о наличии поверхностных дефектов. После лазерной закалки дефектов значительно меньше, а после алмазного выглаживания дефекты не обнаружены. Подобные результаты получены на остальных образцах (рисунок 1б, в).



а)



б)



в)

Исследование поверхностного слоя на наличие зон концентрации напряжений: а, б –МО – механическая обработка, ЛЗ – лазерная закалка, КО – комбинированная обработка; в - МО – механическая обработка, ЭМО – электромеханическая обработка, КО – комбинированная обработка

В работе проведены экспериментальные исследования остаточных напряжений после КО, которые проводили рентгеновским методом оценки

[9]. Исследования показали наличия сжимающих остаточных напряжений в поверхностном слое образцов, изготовленных из стали 40X (таблица).

Результаты измерений остаточных напряжений после различных методов обработки

Обработка	Напряжения, МПа		Деформация кристаллической решетки. $a, \text{\AA}$ .
	Осевые	Окружные	
Механическая обработка	-125±53	-147±44	2,8682
Электромеханическая обработка	-554±15	-479±406	2,8684
КО	-1235±119	-1237±293	2,8802
КО	-1142±72	-1568±354	2,8771
Лазерная закалка	-180±89	-191±131	2,8689

Результаты испытаний на износ подтвердили правильность сделанных предположений, что КО создает резерв для повышения износостойкости деталей машин [10].

Таким образом, установлено, что в процессе комбинированной обработки можно управлять процессом технологического и эксплуатационного наследования так, чтобы свойства, положительно влияющие на качество поверхности сохранялись в течение всего технологического процесса (сжимающие остаточные напряжения), а свойства, влияющие отрицательно (поверхностные дефекты), ликвидировались в начале изготовления. После комбинированной обработки в поверхностном слое не образуются концентраторы напряжений, и алмазное выглаживание является технологическим барьером для скрытых дефектов. Это создаст резерв для увеличения износостойкости деталей машин и механизмов.

1. Сулима, А.М. Поверхностный слой и эксплуатационные свойства деталей машин / А.М. Сулима, В.А. Шудов, Ю.Д. Ягодкин. – М.: Машиностроение, 1988. – 237 с.
2. Фадеев, Л.Л. Повышение надежности деталей машин / Л.Л. Фадеев, А.Ю. Албагачиев. – М.: Машиностроение, 1993. – 95 с.
3. Трение, износ и смазка (трибология и триботехника) / Под ред. А.В. Чичинадзе. – М.: Машиностроение, 2003. – 576 с.
4. Горячева, И.Г. Механика фрикционного взаимодействия / И.Г. Горячева. – М.: Наука, 2001. – 480 с.
5. Сулов, А.Г. Технологическое обеспечение параметров состояния поверхностного слоя деталей / А.Г. Сулов. – М.: Машиностроение, 1987. – 208 с.
6. Федоров, С.К. Исследование температурных полей в зоне контакта инструмента с обрабатываемой поверхностью в процессе избирательной электрохимической закалки / С.К. Федоров, А.В. Морозов, В.А. Фрилинг // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2012. – № 9. – С. 117–125.
7. Албагачиев, А.Ю., Яковлева, А.П. Применение методов комбинированного воздействия на поверхностный слой деталей машин в наукоёмких технологиях // Наукоёмкие технологии в машиностроении. – 2023. – № 3 (141). – С 12–18.
8. Яковлева, А.П., Албагачиев, А.Ю. Теоретическое исследование влияния режимов комбинированной обработки на величину и характер остаточных напряжений в поверхностном слое цилиндрических пар трения // Проблемы машиностроения и надежности машин. -2020.- № 3.- С. 72–78.
9. Yakovleva, A., Isaenkova, M., Minushkin, R. The Effect of Combined Processing on Residual Stresses in the Surface Layer of Power Plant Parts. *Materials*, 2022, 15(2), 420.
10. Яковлева, А.П., Албагачиев, А.Ю., Кулаков, О.И. Повышение износостойкости цилиндрических пар трения методом комбинированной обработки // Наукоёмкие технологии в машиностроении. 2023. №1 (139). — С.31–38.

## СОВРЕМЕННЫЕ ПРИБОРЫ И ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ ТРИБОЛОГИЧЕСКИХ ИСПЫТАНИЙ МАТЕРИАЛОВ

Ярмухаметов И.И.

ilnury@mail.ru

ИМАШ РАН, Москва, Россия

Цель работы заключается в исследовании различных приборов для проведения трибологических испытаний материалов. Выявление недостатков и преимуществ приборов, сравнение технических характеристик, их анализ и оценка.

**Ключевые слова:** Трение, скретч-тестирование, трибология

### Введение

В современном мире существует множество приборов и оборудования для исследования взаимодействия твердых деформируемых тел при их относительном перемещении. Предназначения и задачи у каждого оборудования разные. Цели и задачи исследования, выявление преимуществ и недостатков современных приборов для проведения испытаний материалов на трение, изнашивание и смазку, провести сравнение технических характеристик различных видов оборудования. В ходе работы были исследованы приборы для скретч-тестирования и машины трения.

### Материалы и методы

Скретч-тестирование — это метод оценки адгезии покрытий путем анализа царапин, сделанных алмазным индентором в условиях приложения к нему постоянной или возрастающей нагрузки, перпендикулярной к испытываемой поверхности. Метод способствует разрушению покрытия и нарушению его целостности за счет упруго – пластических деформаций от вдавливания индентора, трения при контактировании алмаза с материалом покрытия и подложки, остаточных внутренних напряжений, присутствующих в покрытии.

В ходе анализа рынка скретч-тестеров были выявлены их следующие виды:

1. Микро скретч-тестер - используется для оценки адгезии, хрупкости, деформации, отслаивания и износостойкости поверхности тонких пленок и покрытий с типичной толщиной менее 5 мкм. Микро скретч-тестер также используется в анализе органических и неорганических мягких и твердых покрытий.
2. Нано скретч-тестер - используется для оценки адгезии, хрупкости, деформации, отслаивания и износостойкости в тонких пленках и покрытиях с типичной толщиной менее 1000 нм. Нано скретч тестер может использоваться для анализа органических и неорганических веществ; мягких и твердых покрытий.
3. Макро скретч-тестер – используется для характеристики материалов с упрочняющими покрытиями, толщиной от 1 мкм и выше.

Результаты сравнения технических характеристик скретч-тестеров представлены в таблице 1.

Табл. 1. Сравнение технических характеристик скретч-тестеров

Технические характеристики	Микро скретч-тестер		Нано скретч-тестер	Макро скретч-тестер	
	Низкий	Высокий		Низкий	Высокий
Макс. глубина [μm]	100	1000	600	100	1000
Разрешение глубины [nm]	0,05	0,5	0,3	1,5	15
Макс. нагрузка [N]	10	30	1000	100	200
Разрешение нагрузки [mN]	0,01	0,03	0,01	3	6
Макс. нагрузка на трение [N]	10	30	1000	100	200
Разрешение нагрузки на трение [mN]	0,01	0,03	0,3	3	6

Использование скретч тестирования целесообразно проводить для сравнительной оценки адгезионных свойств одинаковых по химическому составу покрытий равной толщины, наносимых одним и тем же технологическим процессом при использовании одного и того же материала и вида образца с одинаковыми физико-механическими свойствами и параметрами шероховатости, а также при идентичности условий эксперимента. При этом скретч тестирование не характеризует тип разрушения – адгезионный или адгезионно – когезионный.

Современные скретч тесты содержат механическую часть тестера (нанесения рисок на поверхность покрытия при фиксации зависимости сил от вертикального и горизонтального перемещения) и оптическую часть, позволяющую измерять параметры трека. Это достаточно дорогие приборы, и такая громоздкая комплектация не всегда разумна. Часто более целесообразно приобрести по отдельности эти блоки. Механический блок можно использовать для различных трибологических исследований, а оптический блок в виде интерференционного микроскопа с программным обеспечением — для определения микрофотографических характеристик шероховатости и волнистости и для определения параметров формы поверхности. Внедрение новых

приборов для скретч теста сопровождалось принятием новых стандартов для полимерных и керамических покрытий. Поэтому в настоящее время нет не преодолимых трудностей для внедрения данных стандартов и аппаратуры для оценки адгезионных свойств различных покрытий.

Машины трения - установки для определения износостойкости материалов. Испытания на машине трения позволяют получить информацию о совместимости материалов проектируемой пары трения и составить прогноз на срок службы механизма. Трение является главной причиной преждевременного выхода подвижных деталей из строя, в процессе работы элементы нагреваются и изнашиваются. Для изучения особенностей контактного взаимодействия образцов из конкретных конструкционных материалов проводят испытания на машине трения.

Основными элементами машины трения являются:

- Испытательный блок – главный узел установки, в котором осуществляется взаимодействие материалов. Образцы вставляются в держатели, обеспечивающие их точную и надежную фиксацию.
- Приводной механизм – устройство, придающее движение одному или нескольким испытуемым элементам. Он состоит из электродвигателя и передаточного механизма.
- Блок нагружения – узел, создающий постоянную или переменную нагрузку на образцы.
- Камера – закрытое пространство, в котором возможно создание специальных условий для проведения испытаний, таких как температура, воздействие абразива, вакуум, влажность, трение в жидкостной среде и так далее. Упрощенные модели машин трения не имеют камеры.
- Пульт управления с измерительными инструментами – блок, с помощью которого запускается процесс исследования, осуществляется регулирование нагрузки, скорости вращения образцов и других параметров. Измерительные инструменты непрерывно фиксируют изменения показателей функционирования образцов для составления графиков зависимостей.

Этапы испытаний на машине трения:

- Установка деталей в образцедержатели.
- Сближение элементов, приведение подвижных образцов в движение.
- Регистрация силы трения холостого хода.
- Нагружение образцов, начало отсчета продолжительности испытаний. Метод нагружения подбирается таким образом, чтобы обеспечить плавность и стабильность приложения нагрузки. Она может придаваться через прикрепление груза, при помощи упругого элемента, пружинным, гидравлическим, пневматическим и другими способами.
- Фиксация температуры в зоне контакта, скорости изнашивания, силы трения и других параметров.
- Разгрузка образцов.
- Запись силы трения холостого хода после испытания.
- При необходимости повтор процесса.

- Анализ полученных данных.

В современном мире для испытания материалов на трение и износ в основном используют зарубежные стандартизованные методики, среди которых наиболее распространенной является классификация методов испытаний DIN 50322-1986 (Методы испытаний материалов на износ). К простейшим и самым применяемым лабораторным установкам для испытаний смазочных материалов относятся четырехшариковая машина трения.

Четырехшариковая машина трения — одно из самых первых и хорошо известных испытательных устройств для жидких и пластичных смазочных материалов. Основные достоинства такой машины — низкая цена и простота проводимых измерений. Устройство, отличающееся простотой конструкции, позволяет определять показатель износа, коэффициент трения материала и критические нагрузки смазок и масел путем широко распространенных испытаний на свариваемость.

Четырехшариковая машина трения «рис. 3» представляет собой закрепленный в роликоподшипнике шарик 2, вращающийся с постоянной скоростью и контактирующий с тремя неподвижными шариками 1. На поверхность контакта наносят смазочный материал (жидкий или пластичный). Постепенно увеличивая осевую нагрузку  $P$ , и, соответственно, контактное давление, можно определить нагрузку сваривания, показатель износа и коэффициент трения. В процессе возрастания  $P$  на неподвижных роликах появляется пятно износа, характеризующее испытуемый смазочный материал.

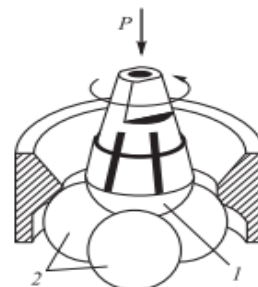


Рис. 1. Схема испытания смазочных материалов на четырехшариковой машине трения

### Результаты и обсуждение

В результате исследования рынка современных приборов и оборудования для проведения трибологических испытаний материалов были выявлены их преимущества и недостатки.

### Заключение

Современные приборы для проведения трибологических испытаний — это достаточно дорогие приборы (например макро скретч тестер от компании Anton Paar стоит около 15 миллионов рублей) и для компаний часто более целесообразно

приобрести оборудование не целиком, а отдельными блоками.

1. Белов В.К., Губарев Е.В., Кривко О.В., Папшев А.В., Гофман Н.Г., Самородова Э.Г. Определение адгезионных характеристик покрытий с использованием современного скретч теста. Часть 1. Возможности использования современного скретч теста для определения адгезионных свойств покрытий // Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации. 2020. Т. 76. № 2. С. 143-152.
2. Трибология – машиностроению: Труды XIII Международной научно-технической конференции – М.: ИМАШ РАН, 2020. – 376 с.
3. Харченко М.В., Дема Р.Р., Нефедьев С.П. Универсальный испытательный комплекс по определению триботехнических характеристик смазочных материалов на базе серийной машины трения СМЦ-2//Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2017. №10 (691). С. 60-68.

## СОДЕРЖАНИЕ

№ п.п.	Авторы, название статей и организаций	Стр.
1	Аборкин А.В. <b>ГАЗОДИНАМИЧЕСКИЕ ПОКРЫТИЯ ИЗ МУЛЬТИАРМИРОВАННЫХ ПОРОШКОВЫХ СМЕСЕЙ НА ОНОВЕ Al-Mg</b> <i>ВлГУ, Владимир, Россия</i>	3
2	Албагачиев А.Ю. <b>МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ ТРЕНИЯ ПРИ КОЛЕБАНИЯХ СДВИГА И СКОРОСТИ</b> <i>ИМАШ РАН, Москва, Россия</i>	6
3	Албагачиев А.Ю., Караванова А.Г., Яковлева А.П. <b>ПОВЫШЕНИЕ КАЧЕСТВА ПОВЕРХНОСТИ ЗУБЬЕВ БЛОКОВ ШЕСТЕРЕН АВИАЦИОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ</b> <i>ИМАШ РАН, Москва, Россия; МГТУ им. Н. Э. Баумана, Москва, Россия</i>	8
4	Албагачиев А.Ю. <b>РЕЗОНАНС ПРИ СВАРКЕ ТРЕНИЕМ С ПЕРЕМЕШИВАНИЕМ</b> <i>ИМАШ РАН, Москва, Россия</i>	11
5	Бирюков В.П., Якубовский А.А. <b>ИССЛЕДОВАНИЕ КОЭФФИЦИЕНТОВ ТРЕНИЯ ПОЛИМЕРОВ В РАЗЛИЧНЫХ УСЛОВИЯХ ТРЕНИЯ</b> <i>ИМАШ РАН, Москва, Россия</i>	13
6	Бирюков В.П., Горюнов Я.А. <b>ИССЛЕДОВАНИЕ ТРИБОТЕХНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ФОТОПОЛИМЕРА</b> <i>ИМАШ РАН, Москва, Россия</i>	15
7	Бобылев А.А., Щербаков М.Е. <b>ОБ АЛГОРИТМАХ ИДЕНТИФИКАЦИИ ПАРАМЕТРОВ ВНУТРЕННЕГО СЛОЯ ТРЕХСЛОЙНОЙ УПРУГОЙ ПОЛОСЫ</b> <i>МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия</i>	18
8	Буяновский И.А., Хрущов М.М., Суляндзига Д.А., Самусенко В.Д., Большаков А.Н. <b>ВЛИЯНИЕ МИКРОСТРУКТУРЫ И СОСТАВА ЛЕГИРОВАННЫХ МОЛИБДЕНОМ И ВОЛЬФРАМОМ НАНОУГЛЕРОДНЫХ ПОКРЫТИЙ-ОРИЕНТАНТОВ НА ИХ АНТИФРИКЦИОННЫЕ СВОЙСТВА ПРИ ТРЕНИИ В РЕЖИМЕ ГРАНИЧНОЙ СМАЗКИ</b> <i>ИМАШ РАН, Москва, Россия; МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия</i>	21
9	Буяновский И.А., Самусенко В.Д., Петрова И.М. <b>ДИАЛКИЛДИТИОФОСФАТЫ МЕТАЛЛОВ КАК ПРИСАДКИ К МАСЛАМ И ИХ СМАЗОЧНЫЕ СВОЙСТВА</b> <i>ИМАШ РАН, Москва, Россия</i>	24



- 10 Веремейчик А.И., Холодарь Б.Г. 27  
**К ИССЛЕДОВАНИЮ ТЕМПЕРАТУРНОГО ПОЛЯ ПРИ  
СКАНИРУЮЩЕЙ ЛАЗЕРНОЙ ЗАКАЛКЕ**  
*БрГТУ, Брест, Беларусь*
- 11 Витязь П.А., Хейфец М.Л., Сенють В.Т., Афанасьев В.П., Колодяжный Д.Ю. 30  
**ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ФОРМИРОВАНИЯ ПРИРОДНЫХ  
АЛМАЗОВ, ИСПОЛЬЗУЕМЫХ В КАЧЕСТВЕ СЫРЬЯ ДЛЯ  
ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ**  
*ОИМ НАН, Минск, Беларусь; ИПФ НАН, Минск, Беларусь; ИГМ СО РАН,  
Новосибирск, Россия; МГТУ «СТАНКИН», Москва, Россия*
- 12 Власов И.И., Севальнёв Г.С. 32  
**ВЛИЯНИЕ СТРУКТУРНОГО СОСТОЯНИЯ ЭНТРОПИЙНЫХ  
СПЛАВОВ НА ОСНОВЕ Ni-Co-Cr НА МЕХАНИЧЕСКИЕ И  
ТРИБОТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ**  
*ВИАМ, Москва, Россия*
- 13 Власов Д.Д., Волкова О.Ю. 34  
**ПРЕИМУЩЕСТВА ВОЛОКНИСТЫХ КОМПОЗИТОВ С  
КРИВОЛИНЕЙНЫМ АРМИРОВАНИЕМ ПРИ ВИБРАЦИОННОМ  
ВОЗДЕЙСТВИИ**  
*ИМАШ РАН, Москва, Россия*
- 14 Волохов Д.А., Аноприенко А.К. 37  
**ВЫБОР РАЦИОНАЛЬНЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ РЕЖИМОВ  
ПРОЦЕССА ТЕРМИЧЕСКОГО СВЕРЛЕНИЯ НЕРЖАВЕЮЩЕЙ СТАЛИ**  
*ИМАШ РАН, Москва, Россия*
- 15 Гаврилина Л.В., Печейкина М.А., Раков Д.Л., Сухоруков Р.Ю. 40  
**АДДИТИВНЫЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ПРОЦЕСС ИЗГОТОВЛЕНИЯ  
ДЕТАЛЕЙ ВНУТРИ ОБЪЕМА ПОРОШКА**  
*ИМАШ РАН, Москва, Россия; МЭИ, Москва, Россия*
- 16 Гаврилина Л.В., Печейкина М.А., Раков Д.Л., Сухоруков Р.Ю. 43  
**АНАЛИЗ СТЕПЕНИ ИННОВАЦИОННОСТИ ПРИ СТРУКТУРНОМ  
СИНТЕЗЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ**  
*ИМАШ РАН, Москва, Россия; МЭИ, Москва, Россия*
- 17 Гадолина И.В., Ерпалов А.В., Кажлаев Р.Г. 46  
**МОДЕЛИРОВАНИЕ СЛУЧАЙНОГО ПРОЦЕССА ПО АДРЕСНОЙ  
МАРКОВСКОЙ МАТРИЦЕ С ЦЕЛЮ ОЦЕНКИ ВАРИАБЕЛЬНОСТИ  
НАГРУЖЕНИЯ**  
*ИМАШ РАН, Москва, Россия; ЮУрГУ, Челябинск, Россия*
- 18 Ганиев С.Р., Гантимиров Б.М. 49  
**ИЗБИРАТЕЛЬНЫЙ ПЕРЕНОС ПРИ ФРЕТТИНГЕ СТАЛЬНЫХ И  
МЕТАЛЛОПОЛИМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ**  
*ИМАШ РАН, Москва, Россия*

- 19 Ганиев С.Р., Касилов В.П., Кислогунова О.Н.,  
Бутикова О.А., Конев Е.М., Кочкина Н.Е.  
**ПРИМЕНЕНИЕ ВОЛНОВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ  
РАСТВОРОВ ХИТОЗАНА**  
*ИМАШ РАН, Москва, Россия; ИХР РАН, Иваново, Россия* 52
- 20 Гантимиров Б.М., Аноприенко А.К.  
**К ВОПРОСУ ПРОВЕДЕНИЯ ИСПЫТАНИЙ ПРИ ФРЕТТИНГЕ**  
*ИМАШ РАН, Москва, Россия* 54
- 21 Гаффанов Р.Ф., Михайлов Д.С., Бодунов Д.М.  
**ПРОЧНОСТНОЙ РАСЧЕТ ДИАФРАГМЕННОГО ЭЛЕКТРОНАСОСА С  
ПОМОЩЬЮ ЦИФРОВЫХ МОДЕЛЕЙ**  
*ООО «РАССВЕТ», Москва, Россия; ООО «ДСМ Металлургия», Москва, Рос-  
сия; ИМАШ РАН, Москва, Россия* 56
- 22 Горохов А.Д., Угурчиев А.М., Шаргородский В.П.  
**РОЛЬ СИМУЛЯТОРОВ В РАЗРАБОТКЕ И ТЕСТИРОВАНИИ  
РОБОТОТЕХНИКИ: АНАЛИЗ ПОПУЛЯРНЫХ РЕШЕНИЙ И  
ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ**  
*ИМАШ РАН, Москва, Россия* 58
- 23 Горячева И.Г., Яковенко А.А.  
**РОЛЬ МИКРОГЕОМЕТРИИ ПОВЕРХНОСТЕЙ ПРИ ОЦЕНКЕ  
КОНТАКТНОЙ ЖЕСТКОСТИ СОПРЯЖЕНИЙ**  
*Институт механики МГУ, Москва, Россия; ИПМех РАН, Москва, Россия* 61
- 24 Гришняев И.Н.  
**ВОЛНОВАЯ ОБРАБОТКА ЛИГНИНОЦЕЛЛЮЛОЗНОГО СЫРЬЯ В  
УСТАНОВКАХ ПАРОВОГО ВЗРЫВА**  
*ИМАШ РАН, Москва, Россия* 63
- 25 Дмитриев А.И., Шугуров А.Р.  
**ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПОКРЫТИЙ  
СИСТЕМЫ TiAlTaSiN**  
*ИФПМ СО РАН, Томск, Россия* 66
- 26 Егунова Т.Н., Баурова Н.И.  
**ИССЛЕДОВАНИЕ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ  
ЭПОКСИДНОПЕСЧАНЫХ КОМПОЗИТОВ, ПРИМЕНЯЕМЫХ ПРИ  
РЕМОНТЕ МАШИН**  
*МАДИ, Москва, Россия* 69
- 27 Елагина О.Ю., Буклаков А.Г., Дубинов Ю.С.  
**О ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ВОЗМОЖНОСТЯХ И РЕАЛИЗОВАННЫХ  
ПРОЕКТАХ В ОБЛАСТИ АДДИТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ  
ГУБКИНСКОГО УНИВЕРСИТЕТА**  
*РГУ нефти и газа, Москва, Россия* 72

- 28 Емжуев А.М., Краско А.С., Преображенская Е.В., Кружкова М.С. 74  
**ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОИЗВОДСТВА ИЗДЕЛИЙ С  
ФУНКЦИОНАЛЬНЫМИ ГАЗОТЕРМИЧЕСКИМИ ПОКРЫТИЯМИ  
ПОСРЕДСТВОМ АВТОМАТИЗАЦИИ УПРАВЛЕНИЯ  
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМ ПРОЦЕССОМ**  
*МИРЭА, Москва, Россия; МГТУ, Москва, Россия*
- 29 Ерофеев В.И., Герасимов С.И., Лисенкова Е.Е. 77  
**ВОЛНОВАЯ ДИНАМИКА ПРИ ВЫСОКОСКОРОСТНОМ ДВИЖЕНИИ  
ОБЪЕКТОВ ПО УПРУГИМ, ВЯЗКОУПРУГИМ И НЕЛИНЕЙНО-  
УПРУГИМ НАПРАВЛЯЮЩИМ**  
*ФГБНУ «ФИПИ», Нижний Новгород, Россия*
- 30 Ерофеев М.Н., Уфимцев В.Г., Бодунов Д.М., Кириллов С.Н. 78  
**МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ПОЛУЧЕНИЯ И ОБРАБОТКИ СИГНАЛОВ  
ПРИ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ ИСПЫТАНИЯХ МАТЕРИАЛОВ**  
*ИМАШ РАН, Москва, Россия; ООО «ВТИ», Москва, Россия*
- 31 Жданов А.С. 80  
**ЭЛЕКТРОННАЯ КОРРЕКЦИЯ ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО БАЗИСА  
МНОГООСЕВЫХ ВИБРОДАТЧИКОВ**  
*ИМАШ РАН, Москва, Россия*
- 32 Зорин В.А., Буй Ван Тхань 83  
**ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ НОВЫХ КОНСТРУКЦИОННЫХ  
МАТЕРИАЛОВ И ПРОЦЕССОВ ИЗГОТОВЛЕНИЯ СТУПИЦЫ НА  
НАДЕЖНОСТЬ И БЕЗОПАСНОСТЬ АВТОМОБИЛЯ**  
*МАДИ, Москва, Россия*
- 33 Иванников А.Ю., Юсупов В. С. 86  
**ПОЛУЧЕНИЕ ПОРОШКОВОГО ПОКРЫТИЯ ИЗ  
ВЫСОКОЭНТРОПИЙНОГО Fe-Cr-Ni-Mn-Co СПЛАВА**  
*ИМЕТ РАН, Москва, Россия*
- 34 Ильющенко А.Ф., Лешок А.В., Роговой А.Н. 87  
**СПЕЧЕННЫЕ ФРИКЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ: КОНЦЕПЦИЯ  
РАЗРАБОТКИ, ОПЫТ ВНЕДРЕНИЯ**  
*ГНУ ИПМ, Минск, Беларусь*
- 35 Исхакова П.В., Баранникова С.А. 90  
**ОЦЕНКА ПОВРЕЖДЕННОСТИ МЕТАЛЛА УЛЬТРАЗВУКОВЫМ  
МЕТОДОМ ПРИ ТЕРМО-СИЛОВОМ ВОЗДЕЙСТВИИ**  
*ИФПМ СО РАН, Томск, Россия*
- 36 Казаков Ю.Н., Стебаков И.Н., Шутин Д.В. 92  
**ВЫСОКОПРОИЗВОДИТЕЛЬНЫЕ СУРРОГАТНЫЕ МОДЕЛИ  
ПОДШИПНИКОВ ЖИДКОСТНОГО ТРЕНИЯ ДЛЯ ЗАДАЧ  
ГЛУБОКОГО ОБУЧЕНИЯ С ПОДКРЕПЛЕНИЕМ**  
*ОГУ имени И.С. Тургенева, Орел, Россия*

- 37 Калибабчук А.О., Калибабчук М.П. 95  
**ЦИФРОВОЙ ДВОЙНИК ЭЛЕКТРОБУСА С АСИНХРОННЫМ  
ДВИГАТЕЛЕМ И УЛЬТРАЗВУКОВЫМ ДАТЧИКОМ ДИСТАНЦИИ**  
*МГТУ, Москва, Россия; ВАС им. Будённого, Санкт-Петербург, Россия*
- 38 Карцев С.В., Гаврилов Д.А. 97  
**АНАЛИЗ РАБОТЫ И ПРИЧИНЫ ПОТЕРИ РАБОТОСПОСОБНОСТИ  
ЗАПОРНОЙ АРМАТУРЫ НЕФТЕПРОВОДОВ**  
*ИМАШ РАН, Москва, Россия*
- 39 Карцев С.В., Свиящук А.Н., Кулаков О.И., Свиящук Н.Н. 100  
**ИССЛЕДОВАНИЕ ИЗНОСОСТОЙКОСТИ ТОНКОПЛЕНОЧНЫХ  
ПОКРЫТИЙ, СФОРМИРОВАННЫХ НА ОБРАЗЦАХ ИЗ СТАЛИ 65Г  
(PESVD ПРОЦЕСС)**  
*ИМАШ РАН, Москва, Россия*
- 40 Керопян А.М., Романова А.Т. 103  
**Трибологические процессы, происходящие при  
эксплуатации колесно-рельсового транспорта в  
условиях отрицательных температур арктического  
региона**  
*МНИПИИТИ, Москва, Россия; РУТ (МИИТ), Москва, Россия*
- 41 Клеветов Д.В., Мусатов Р.Л., Аборкин А.В., А.Л. Симаков 105  
**ОЦЕНКА КАЧЕСТВА ФИНИШНОЙ ОБРАБОТКИ  
РАСПРЕДЕЛИТЕЛЕЙ АКСИАЛЬНО-ПОРШНЕВЫХ ГИДРОМАШИН С  
НАКЛОННЫМ ДИСКОМ ПО ИНТЕНСИВНОСТИ ТЕПЛОВЫДЕЛЕНИЯ  
ПРИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ОБКАТКЕ**  
*ВНИИ «Сигнал», Ковров, Россия; ВлГУ, Владимир, Россия;  
КГТА, Ковров, Россия*
- 42 Ключев В.А., Савенко В.И. 108  
**О ТРИБОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИКАХ ПОЛИМЕРНЫХ  
МАТЕРИАЛОВ**  
*ИФХЭ РАН, Москва, Россия*
- 43 Ковалев А.А., Рогов Н.В., Кулаков О.И. 111  
**ИССЛЕДОВАНИЕ ИЗНОСОСТОЙКОСТИ ПОКРЫТИЙ НА ОСНОВЕ  
КАРБИДА ХРОМА С НИКЕЛЬ-ХРОМОВОЙ СВЯЗКОЙ, ПОЛУЧЕННЫХ  
МЕТОДОМ ВЫСОКОСКОРОСТНОГО ГАЗОПЛАМЕННОГО  
НАПЫЛЕНИЯ, ПОСЛЕ ИХ ШЛИФОВАНИЯ**  
*МГТУ, Москва, Россия; ИМАШ РАН, Москва, Россия*
- 44 Козлов Д.А. 114  
**ИССЛЕДОВАНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ СВОЙСТВ БРОНЗОВЫХ  
ПОКРЫТИЙ, НАНЕСЕННЫХ НА СТАЛЬНЫЕ ДЕТАЛИ,  
РАБОТАЮЩИЕ В УСЛОВИЯХ ТРЕНИЯ СКОЛЬЖЕНИЯ ПРИ  
ВЫСОКИХ НАГРУЗКАХ**  
*ИМАШ РАН, Москва, Россия*

- 45 Константинов В.М., Лешок В.А. 117  
**АКТИВАЦИЯ ТЕРМОДИФФУЗИОННОГО НАСЫЩЕНИЯ  
НИЗКОУГЛЕРОДИСТОЙ СТАЛИ МЕТОДОМ ОКИСЛЕНИЯ  
ПОВЕРХНОСТИ**  
*БНТУ, Минск, Беларусь*
- 46 Корольков О.Е., Угурчиев У.Х., Новикова Н.Н. 119  
**ВЛИЯНИЕ ДЛИТЕЛЬНОСТИ ИМПУЛЬСНОГО ТОКА НА  
ДЕФОРМИРУЕМОСТЬ ТИТАНОВОГО СПЛАВА VT6**  
*ИМАШ РАН, Москва, Россия*
- 47 Кравченко И.Н., Жачкин С.Ю., Трифонов Г.И., Федюнин П.А. 121  
**РАЗРАБОТКА НОВЫХ СОСТАВОВ ПОРОШКООБРАЗНЫХ  
КОМПОЗИЦИЙ ДЛЯ ПЛАЗМЕННОГО НАПЫЛЕНИЯ  
ИЗНОСОСТОЙКИХ ПОКРЫТИЙ НА РАБОЧИЕ ПОВЕРХНОСТИ  
ДЕТАЛЕЙ МАШИН И ОБОРУДОВАНИЯ**  
*ИМАШ РАН, Москва, Россия; ВУНЦ ВВС «ВВА», Воронеж, Россия;  
ВГАУ, Воронеж, Россия*
- 48 Куксенова Л.И., Савенко В.И. 124  
**РОЛЬ ЭФФЕКТА РЕБИНДЕРА В ФОРМИРОВАНИИ  
СТРУКТУРНОМЕХАНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ПОВЕРХНОСТНЫХ  
СЛОЕВ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ ТРИБОТЕХНИЧЕСКОГО  
НАЗНАЧЕНИЯ**  
*ИМАШ РАН, Москва, Россия; ИФХЭ РАН, Москва, Россия*
- 49 Кулаков О.И., Фролов А.Д., Иванов Г.Ю. 127  
**ВЛИЯНИЕ НАНОМОДИФИКАТОРОВ НА ОСНОВЕ СЕРПЕНТИНА В  
ИНДУСТРИАЛЬНОМ МАСЛЕ В УСЛОВИЯХ ВОЗРАТНО-  
ПОСТУПАТЕЛЬНОГО ТРЕНИЯ**  
*ИМАШ РАН, Москва, Россия*
- 50 Кулаков О.И., Фролов А.Д., Иванов Г.Ю. 129  
**ВЛИЯНИЕ ОРИЕНТИРОВАНИЯ СЛОЁВ ПРИ 3D-ПЕЧАТИ НА  
ФРИКЦИОННЫЕ СВОЙСТВА PLA ПОЛИМЕРОВ**  
*ИМАШ РАН, Москва, Россия*
- 51 Кулаков О.И., Фролов А.Д., Иванов Г.Ю. 132  
**ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ КОНЦЕНТРАЦИИ СОЖ НА  
КОЭФФИЦИЕНТ ТРЕНИЯ**  
*ИМАШ РАН, Москва, Россия; МИРЭА, Москва, Россия*
- 52 Кулаков О.И. 134  
**МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРНЫХ И СИЛОВЫХ  
ХАРАКТЕРИСТИК ПРИ СВЕРЛЕНИИ**  
*ИМАШ РАН, Москва, Россия; МИРЭА, Москва, Россия*
- 53 Кушнир А.П. 137  
**ЦИФРОВОЙ ДВОЙНИК ГЕРОТОРНОГО МОТОРА**  
*ИМАШ РАН, Москва, Россия*

- 54 Лагута В.С. 139  
**УЧЕТ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ НОМЕНКЛАТУРЫ ВЫПУСКА ДЛЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ГПС**  
*МГТУ, Москва, Россия*
- 55 Ло Юань, Казаков Ю.Н., Чжоу Иньчунь, Ли Шенбо, Савин Л.А. 142  
**ПРОБЛЕМАТИКА ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ ПОДШИПНИКОВ ОСЕЙ САТЕЛЛИТОВ ПЛАНЕТАРНЫХ МУЛЬТИПЛИКАТОРОВ МОЩНЫХ ВЕТРОГЕНЕРАТОРОВ**  
*ОГУ, Орел, Россия; SF Oilless Bearing Group Co. LTD., Цзясин, Китай; Сямыньский технологический университет, Сямынь, Китай*
- 56 Liu Yifan, Li Shengbo, Kazakov Yu.N., Savin L.A. 145  
**THE RESEARCH ON THE DAMPING EFFECT OF MULTILAYER STEEL SHEET ELASTIC DAMPERS IN ROTOR SYSTEMS**  
*ОГУ, Орел, Россия; Сямыньский технологический университет, Сямынь, Китай*
- 57 Мельникова Д.А. 148  
**ИЗГОТОВЛЕНИЕ КОРПУСНОЙ ДЕТАЛИ БИОНИЧЕСКОГО ПРОТЕЗА С ПРИМЕНЕНИЕМ SLA**  
*МИРЭА, Москва, Россия*
- 58 Мисоченко А.А. 150  
**ОСОБЕННОСТИ ПРОЯВЛЕНИЯ ДЕФОРМАЦИОННЫХ МАРТЕНСИТНЫХ ПРЕВРАЩЕНИЙ В СПЛАВАХ НА ОСНОВЕ TiNi В ПРОЦЕССЕ ПРОКАТКИ С ИМПУЛЬСНЫМ ТОКОМ**  
*ИМАШ РАН, Москва, Россия*
- 59 Михеев А.В., Тананов М.А. 153  
**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ФУЛЛЕРЕНОВ НА СМАЗОЧНЫЕ СВОЙСТВА МОТОРНОГО МАСЛА**  
*ИМАШ РАН, Москва, Россия*
- 60 Мышечкин А.А., Скрипник С.В. 156  
**РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ ЦИФРОВЫМ МОДЕЛИРОВАНИЕМ В ПРОГРАММЕ QFORM ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ГОРЯЧЕЙ ШТАМПОВКИ ПОКОВОК С ГЛУБОКИМИ ПОЛОСТЯМИ**  
*МИРЭА, Москва, Россия*
- 61 Нгуен Т.Х., Казаков Ю.Н., Поликарпов А.В. 158  
**ГИБРИДНЫЕ ПОДШИПНИКИ ЖИДКОСТНОГО ТРЕНИЯ**  
*ОГУ, Орел, Россия*
- 62 Нефёдкин Д.Ю., Севальнёв Г.С. 161  
**ФОРМИРОВАНИЕ СТРУКТУРЫ И МАГНИТНЫХ СВОЙСТВ МАРТЕНСИТНОСТАРЕЮЩЕЙ СТАЛИ 21НKMТ В ПРОЦЕССЕ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ**  
*НИЦ «Курчатовский институт», Москва, Россия*

- 63 Нефёлов И.С. 164  
**ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ РЕЖИМОВ 3D-ПЕЧАТИ И СПОСОБОВ ПОСТОБРАБОТКИ НА ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ИЗДЕЛИЙ, ИЗГОТОВЛЕННЫХ ИЗ ТЕРМОПЛАСТИЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ МЕТОДОМ 3ДПЕЧАТИ**  
*МАДИ, Москва, Россия*
- 64 Панин С.С., Брызгалов Е.А., Яковенко Н.И. 167  
**ИССЛЕДОВАНИЯ ПОЛУЧЕНИЯ ТОНКОДИСПЕРСНОЙ ЭМУЛЬСИИ НА ОСНОВЕ НЕСМЕШИВАЮЩИХСЯ ЖИДКОСТЕЙ С ПОМОЩЬЮ ВОЛНОВЫХ АППАРАТОВ**  
*ИМАШ РАН, Москва, Россия*
- 65 Панов А.Н., Ромашова Е.Ю. 169  
**ДУАЛИЗМ УПРАВЛЕНИЯ РИСКАМИ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ. ПРИМЕНЕНИЕ СРЕДСТВ ПОВЫШЕНИЯ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ**  
*ЮРС-РУСЬ, Санкт-Петербург, Россия; ИМАШ РАН, Москва, Россия*
- 66 Панов А.Н., Ромашова Е.Ю., Складнова М.С. 172  
**К ВОПРОСУ О РИСКАХ ПРИМЕНЕНИЯ ЦИФРОВЫХ МОДЕЛЕЙ В МАШИНОВЕДЕНИИ**  
*ЮРС-РУСЬ, Санкт-Петербург, Россия; ИМАШ РАН, Москва, Россия*
- 67 Петрова И.М., Буяновский И.А., Гадолина И.В. 174  
**ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ ПОДХОД К ОЦЕНКЕ СРОКА СЛУЖБЫ УЗЛОВ ТРЕНИЯ**  
*ИМАШ РАН, Москва, Россия*
- 68 Погорелов М.Д., Сумин Р.В., Бокова Т.А., Волков Н.С., Зырянова Т.К. 176  
**ИССЛЕДОВАНИЕ СТОЙКОСТИ ОКСИДНОГО ПОКРЫТИЯ СТАЛИ 12X18N10T ПРИ КОНТАКТНОМ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ С ПАРОВОДЯНОЙ СМЕСЬЮ В СРЕДЕ СВИНЦОВОГО ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ**  
*НГТУ, Нижний Новгород, Россия*
- 69 Прокопенко А.К., Морозов А.И. 178  
**ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ УЛУЧШЕНИЯ РЕЖИМА РАБОТЫ УЗЛОВ ТРЕНИЯ ШВЕЙНОГО ОБОРУДОВАНИЯ МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНЫМИ НАНОПОКРЫТИЯМИ**  
*РГУ имени А. Н. Косыгина, Москва, Россия*
- 70 Прокопенко А.К., Корнеев А. А. 180  
**ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ИННОВАЦИОННЫХ ТРИБОТЕХНОЛОГИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ «ЭФФЕКТА БЕЗЫЗНОСНОСТИ» ДЛЯ УЗЛОВ ТРЕНИЯ МАШИН И МЕХАНИЗМОВ**  
*РГУ имени А. Н. Косыгина, Москва, Россия*
- 71 Пухальский В.А., Албагачиев А.Ю. 182  
**СИСТЕМА ОБЕСПЕЧЕНИЯ КАЧЕСТВА ПРОДУКЦИИ ЗА ВЕСЬ ЕЁ ЖИЗНЕННЫЙ ЦИКЛ**  
*ИМАШ РАН, Москва, Россия*

- 72 Раков Д.Л. 187  
**СТРУКТУРНЫЙ СИНТЕЗ ОБОБЩЕННЫХ СХЕМ РАБОЧИХ МАШИН**  
*ИМАШ РАН, Москва, Россия*
- 73 Сахвадзе Г.Ж. 190  
**ОСОБЕННОСТИ ТЕХНОЛОГИИ ЛАЗЕРНОЙ УДАРНОЙ СВАРКИ**  
*ИМАШ РАН, Москва, Россия*
- 74 Серебрянный В.В., Хейфец М.Л., Грецкий Н.Л. 193  
**ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ МЕХАТРОННОГО ОБОРУДОВАНИЯ  
В ГИБРИДНОМ ПРОИЗВОДСТВЕ**  
*МГТУ «Станкин», Москва, Россия; ИПФ НАН Беларуси, Минск, Беларусь*
- 75 Ситдииков Д.С., Лещинский Б.С. 196  
**ИНТЕГРАЦИЯ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА И ЦИФРОВЫХ  
ДВОЙНИКОВ В МОДЕЛИРОВАНИЕ НАКОПЛЕНИЯ ПОВРЕЖДЕНИЙ  
ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ ИЗДЕЛИЙ**  
*ВАС им. Будённого, Санкт-Петербург, Россия*
- 76 Скворцов О.Б., Стащенко В.И. 198  
**ВИБРОАКУСТИЧЕСКИЙ ОТКЛИК В МЕТАЛЛАХ И СПЛАВАХ НА  
ЭЛЕКТРОИМПУЛЬСНОЕ ВОЗДЕЙСТВИЕ**  
*ИМАШ РАН, Москва, Россия*
- 77 Скворцов О.Б., Стащенко В.И. 200  
**ПРИМЕНЕНИЕ УДАРНЫХ И ВИБРАЦИОННЫХ ПРОЦЕССОВ,  
ВЫЗВАННЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИМИ ИМПУЛЬСАМИ ТОКА, ПРИ  
ОБРАБОТКЕ И СБОРКЕ ИЗДЕЛИЙ ИЗ МЕТАЛЛОВ**  
*ИМАШ РАН, Москва, Россия*
- 78 Складнова М.С. 203  
**АНСАМБЛИЕВЫЕ МЕТОДЫ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ  
ДЛЯ АНАЛИЗА ПРОЦЕССОВ ТРЕНИЯ И ИЗНОСА**  
*ИМАШ РАН, Москва, Россия*
- 79 Скоренцев А.Л., Русин Н.М., Акимов К.О., Никонов А.Ю. 205  
**ВЛИЯНИЕ МОЩНОСТИ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ПРИ СЛС НА  
СТРУКТУРУ И ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ СВОЙСТВА  
АНТИФРИКЦИОННОГО АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА**  
*ИФПМ СО РАН, Томск, Россия*
- 80 Слюсарев А.А., Панин М.И., Цепаев П.А., 208  
Гареев А.Р., Кулаков О.И., Соболева Т.А.  
**ИССЛЕДОВАНИЕ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ, ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ  
И ФРИКЦИОННЫХ СВОЙСТВ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ  
С УГЛЕРОДНОЙ МАТРИЦЕЙ, ПРИМЕНЯЕМЫХ В ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ  
УСЛОВИЯХ В СОСТАВЕ АВИАЦИОННЫХ ТОРМОЗНЫХ СИСТЕМ**  
*АО «НИИГрафит», Москва, Россия; ИМАШ РАН, Москва, Россия*



- 81 Смирнов А.А., Ерофеев М.Н. 213  
**АНАЛИЗ РАБОТЫ БЕТОННО-РАСТВОРНОГО УЗЛА И ПРИЧИНЫ ВЫХОДА ИЗ СТРОЯ АГРЕГАТОВ И УЗЛОВ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ**  
*ИМАШ РАН, Москва, Россия*
- 82 Смирнов Н.И. 215  
**ТРИБОЛОГИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДНЫХ ЛОПАСТНЫХ НАСОСОВ**  
*ИМАШ РАН, Москва, Россия*
- 83 Смоленцев А.Н. 218  
**ПРЕИМУЩЕСТВА ПРИМЕНЕНИЯ ВРАЩАТЕЛЬНО-ЛИНЕЙНЫХ МОДУЛЕЙ В МАНИПУЛЯТОРАХ ДЛЯ ФИНИШНОЙ РАЗМЕРНОЙ ОБРАБОТКИ ЛОПАТОК ГАЗОТУРБИННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ**  
*ИМАШ РАН, Москва, Россия*
- 84 Столяров В.В. 220  
**ЭЛЕКТРОПЛАСТИЧЕСКИЙ ЭФФЕКТ В АМОРФНЫХ И КРИСТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛАХ**  
*ИМАШ РАН, Москва, Россия*
- 85 Хабибуллин Ф.Ф. 223  
**ПАРАМЕТРИЧЕСКИЙ СИНТЕЗ БАЗОВЫХ NR МЕХАНИЗМОВ РОБОТОТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ**  
*КНИТУ-КАИ, Казань, Россия*
- 86 Хейфец М.Л. 226  
**СРЕДСТВА ИЗМЕРЕНИЯ И КОНТРОЛЯ ДЛЯ МЕТРОЛОГИЧЕСКОГО И ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ КАЧЕСТВА ПРОДУКЦИИ**  
*ИПФ НАН, Минск, Беларусь*
- 87 Цырков А.В. 229  
**УПРАВЛЕНИЕ БИЗНЕС-ПРОЦЕССАМИ (НА ПРИМЕРЕ ПРОЕКТНО-ПРОИЗВОДСТВЕННОГО КОМПЛЕКСА МАШИНОСТРОЕНИЯ)**  
*МИРЭА, Москва, Россия*
- 88 Цырков А.В. 232  
**ПРОГРАММНАЯ ПЛАТФОРМА ИНТЕГРАЦИИ АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ СИСТЕМ**  
*МИРЭА, Москва, Россия*
- 89 Чернышев В.И., Поляков Р.Н., Фомина О.В., Горин А.В. 235  
**ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИКИ СИСТЕМЫ ВИБРОЗАЩИТЫ НА ОСНОВЕ МЕХАНИЗМА НАЛОЖЕНИЯ СВЯЗЕЙ**  
*ОГУ имени И.С. Тургенева, Орел, Россия*
- 90 Чижиков В.И., Курнасов Е.В. 238  
**ЗАДАЧА СИНТЕЗА НЕЙРОСЕТИ УПРАВЛЯЕМОЙ КОНСТРУКЦИИ НА ПРИМЕРЕ ДВУХ СОПРЯЖЁННЫХ РОБОТОВ**  
*МИРЭА, Москва, Россия*

- 91 Шуляк В.А., Демченко Д.В., Буковский П.О. 241  
**ТРИБОЛОГИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА НИТРАТНЫХ ГРАФИТОВЫХ  
ФОЛЫ**  
*МГУ, Москва, Россия; ИПМех РАН, Москва, Россия*
- 92 Шутин Д.В., Фетисов А.С., Литовченко М.Г., Савин Л.А. 244  
**МЕТОДОЛОГИЯ ОПТИМАЛЬНОГО СИНТЕЗА РЕГУЛИРУЕМЫХ  
ПОДШИПНИКОВ ЖИДКОСТНОГО ТРЕНИЯ И ИХ КОНТРОЛЛЕРОВ**  
*ОГУ, Орел, Россия*
- 93 Шутин Д.В., Бондаренко М.Э., Поляков Р.Н., Казаков Ю.Н. 247  
**ПРЕДИКТИВНЫЙ АНАЛИЗ ИЗНОСНОЙ И УСТАЛОСТНОЙ  
ДЕГРАДАЦИИ АКТИВНЫХ И ПАССИВНЫХ ПОДШИПНИКОВ  
ЖИДКОСТНОГО ТРЕНИЯ**  
*ОГУ, Орел, Россия*
- 94 Яковлева А.П., Албагачиев А.Ю 250  
**НАУКОЕМКИЕ ТЕХНОЛОГИИ ПОВЫШЕНИЯ РЕСУРСА РАБОТЫ  
ДЕТАЛЕЙ МАШИН И МЕХАНИЗМОВ**  
*МГТУ, Москва, Россия; ИМАШ РАН, Москва, Россия*
- 95 Ярмухаметов И.И. 253  
**СОВРЕМЕННЫЕ ПРИБОРЫ И ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ  
ТРИБОЛОГИЧЕСКИХ ИСПЫТАНИЙ МАТЕРИАЛОВ**  
*ИМАШ РАН, Москва, Россия*

Подписано в печать 26.12.2024 г.  
Формат 70x108 1/16. Бумага офсетная. Печать офсетная.  
Усл.-печ. л. - 23,28. Тираж - 20 экз. Заказ № 301.  
Отпечатано в ИМАШ РАН.  
119334, г. Москва, ул. Бардина, 4.