

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего  
образования  
«Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого»

На правах рукописи



Яковлев Станислав Николаевич

**ВЫБОР КРИТЕРИЕВ РАБОТОСПОСОБНОСТИ ДЕТАЛЕЙ МАШИН ИЗ  
ПОЛИУРЕТАНА**

Специальность 2.5.2 Машиноведение (технические науки)

**ДИССЕРТАЦИЯ**

на соискание ученой степени доктора технических наук

Санкт-Петербург 2024

## Оглавление

ВВЕДЕНИЕ.....	5
Глава1 Состояние вопроса и постановка задач исследования.....	14
1.1 Обзор современного состояния проблемы.....	14
1.2 Цель и постановка задач исследования.....	17
1.3 Выводы по главе 1.....	20
Глава 2 Экспериментальное изучение физико-механических свойств полиуретана, как конструкционного материала деталей машин.....	21
2.1 Общая характеристика типов и технологических форм современных конструкционных полиуретанов.....	21
2.2 Основные физико-механические свойства полиуретанов.....	25
2.3 Экспериментальная установка для исследования долговечности и изнашивания полиуретанов.....	70
2.4 Методика экспериментального исследования.....	75
2.5 Методика обработки экспериментальных данных.....	79
2.6 Выводы по главе 2.....	83
Глава 3 Разработка технологии отливки заготовки и выбор эффективного способа дальнейшей механической обработки эластомерно-металлических деталей.....	85
3.1 Экспериментальная отработка временных и температурных режимов отливки деталей машин из полиуретана.....	85
3.2 Выбор метода чистовой и финишной обработки эластомерно- металлических деталей.....	90
3.3 Анализ колебательных процессов в упругом слое при обработке маложестких эластомерно-металлических деталей.....	100
3.4 Выводы по главе 3 .....	112

Глава 4 Выбор критериев работоспособности деталей машин из полиуретана, работающих при статическом и динамическом нагружении .....	114
4.1 Общие сведения, классификация деталей машин из полиуретана и выбор критериев работоспособности.....	114
4.2 Экспериментальное определение деформации полиуретановых деталей, работающих на сжатие и сдвиг при статическом нагружении.....	121
4.3 Расчет полиуретановых деталей машин, работающих при динамическом нагружении .....	136
4.4 Особенности конструирования полиуретановых деталей машин.....	162
4.5 Выводы по главе 4 .....	168
Глава 5 Экспериментальное определение коэффициента трения качения массивной полиуретановой шины в контакте с жестким основанием.....	171
5.1 Классификация и основные конструктивные параметры массивных шин .....	171
5.2 Сопротивление качению массивных полиуретановых шин.....	181
5.3 Гистерезисный нагрев упругого полиуретанового обода и основные виды отказов колес.....	193
5.4 Выводы по главе 5 .....	205
Глава 6 Исследование трения и износа полиуретана в контакте с различными поверхностями в режиме скольжения и качения.....	207
6.1 Экспериментальное определение коэффициента трения скольжения полиуретана по абразивной поверхности.....	207
6.2 Износостойкость полиуретана и предельные значения критерия мощности в контакте с различными поверхностями в режиме скольжения.....	214
6.3 Износ массивных полиуретановых шин при качении с проскальзыванием.....	224
6.4. Основные виды износа полиуретана.....	231
6.5 Выводы по главе 6 .....	237

Глава 7 Инженерная методика расчета колес с упругим ободом из полиуретана, работающих в режиме динамического нагружения .....	239
7.1 Надежность работы массивных полиуретановых шин в контакте с цементно-бетонным покрытием пола производственного помещения.....	239
7.2 Определение долговечности массивных полиуретановых шин в зависимости от условий нагружения.....	247
7.3 Методика проектировочного и проверочного расчета массивных шин.....	254
7.4 Выводы по главе 7 .....	261
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	263
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	269
Приложение 1. Акты внедрения результатов диссертационной работы .....	280

## Введение

**Актуальность темы исследования.** В современном машиностроении существуют критически важные детали, без которых невозможна нормальная эксплуатация конкретных машин. Ситуация обостряется, когда материалы и технологии, требующиеся для изготовления таких изделий, являются импортнозависимыми, а поставка запасных частей, как правило – экономически невыгодной. К ответственным деталям такого рода относятся колеса с упругим ободом для промышленного транспорта, валы и ролики с массивным эластомерным покрытием (резиновым, силиконовым, полиуретановым и др.), для полиграфии, бумажной промышленности, транспортно-технологических систем и т.п.

Актуальность диссертационного исследования для отечественной промышленности определяется необходимостью замены традиционного эластомера – резины на более совершенный современный материал – полиуретан с целью улучшения конструктивных, технологических и эксплуатационных качеств деталей машин. Полиуретановые эластомеры, как конструкционный материал деталей машин, в сравнении с резинами, обладают рядом важных преимуществ, которые позволяют получить более компактные и надежные детали.

Полиуретан, при использовании его в качестве эластомерного материала упругого обода колеса, при одинаковой твердости с резиной, обладает статическим модулем при сжатии в 2 раза большим, чем у резины. Как следствие нагрузка, воспринимаемая массивной шиной из полиуретана больше, чем у резиновой, что позволяет уменьшить размер шины из полиуретана в сравнении с резиновой при равных нагрузках, либо при одинаковых размерах значительно увеличить нагрузку на них.

Кроме того, колеса с упругим ободом из полиуретана обладают меньшим сопротивлением качению в сравнении с резиновыми, примерно на 30 % и как следствие меньшим расходом энергии.

Актуальным также является вопрос замены резины, используемой в качестве конструкционного материала для изготовления виброизоляторов, на более совершенный полиуретановый эластомер. Проведенные экспериментальные исследования виброизоляционных свойств полиуретановых эластомеров, показали их превосходство над резинами по всем основным параметрам примерно на 20 %, к важнейшим из них относится модуль внутреннего трения эластомера, циклическая прочность и предельная температура, при которой происходит разрушение эластомерного материала при динамическом нагружении.

Технология изготовления эластомерно-металлических деталей из полиуретана значительно проще и экологичнее, нежели вулканизация резиновых деталей машин. Полимеризация деталей машин из полиуретана происходит при температуре на 30...40 градусов ниже, чем вулканизация резиновых деталей машин.

Эксплуатационные качества деталей машин с упругим эластомерным покрытием из полиуретана такие как износостойкость, надежность сцепления с опорной поверхностью, предельная температура и др. превосходят данные показатели у резин примерно на 20 %.

На сегодняшний день очень актуальным является вопрос выбора критериев работоспособности деталей машин из полиуретана, работающих в условиях статического и динамического нагружения, с целью увеличения срока службы эластомерно-металлических деталей. Кроме того, распространение полиуретана в качестве конструкционного материала сдерживает отсутствие научно-обоснованных методик проектирования эластомерно-металлических деталей, на преодоление которого и направлена данная работа.

**Степень разработанности темы исследования.** Проектированием и изготовлением эластомерно-металлических деталей машин занимаются крупные компании Германии (Continental, Blicke), Великобритании (Dunlop, Avon), США (Goodyear, B. F. Goodrich) и других стран.

Наибольший вклад в создание методов расчета эластомерно-металлических деталей, работающих при статическом и динамическом нагружении, внесли Э. Э.

Лавендел, S. Solota, А. В. Чичинадзе, J. S. Oxley, М. М. Резниковский, А. Schallamach, А. И. Лукомская, S. Solota, С. Б. Патнер, В. Н. Тарнавский, А. М. Кислицин, Е. Т. Григорьев, К. Schafer, В. И. Дырда, Н. Kahraman, А. Е. Белкин, Janus Datta, Ю. А. Державец, К. Hizera, В. К. Крыжановский, О. Franssen, В. В. Бурлов.

Основы технологии и промышленного оборудования для переработки эластомерных материалов в изделие приведены в работах С. А. Любартовича, Г. В. Матвеева и др.

Большой вклад в решение проблем деформативности эластомерных материалов внесли Е. Т. Григорьев, В. К. Семенов и др.

Основным недостатком работ перечисленных авторов является отсутствие экспериментальных данных, которые описывали бы поведение эластомеров при длительном динамическом нагружении. В основном научные рассуждения носят качественный характер, но при этом отсутствуют эмпирические данные, в частности о температуре нагрева эластомерного массива в зависимости от условий нагружения. На преодоление этого недостатка и направлена данная диссертационная работа.

**Объект исследования.** В качестве объекта исследования нами выбраны эластомерно-металлические детали машин, работающие на сжатие и сдвиг в условиях статического и динамического нагружения. К ним относятся колеса промышленных транспортных средств, ролики и валы технологического оборудования и виброизоляторы.

**Предмет исследования.** Предметом исследования является экспериментально-теоретическое обоснование рациональной конструкции деталей машин из полиуретана, а также выбор критерия работоспособности в зависимости от вида нагружения и условий работы.

**Цель исследования:** разработка научно-обоснованной методики проектирования эластомерно-металлических деталей машин, работающих на сжатие и сдвиг при статических и динамических нагрузках.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие **задачи:**

1. Очертить область применения полиуретановых эластомеров, как конструкционного материала, для упругих и износостойких элементов деталей машин.

2. Разработать и внедрить технологию отливки эластомерно-металлических деталей, выявить особенности и отработать режимы шлифования упругого полиуретанового покрытия.

3. Спроектировать и изготовить специальную экспериментальную установку для изучения вопросов нагрева, изнашивания и долговечности деталей вращения с упругим полиуретановым ободом, работающих в режиме динамического нагружения.

4. Спроектировать и изготовить специальную экспериментальную установку для изучения вопросов нагрева и долговечности виброизоляторов, работающих на сдвиг в режиме динамического нагружения.

**Соответствие паспорту специальности** - содержание диссертации соответствует п. 2 «Теория и методы проектирования машин и механизмов, систем приводов, узлов и деталей машин» паспорта научной специальности 2.5.2 – «Машиноведение» (технические науки).

**Научная новизна результатов исследования:**

1. Экспериментальным путем получены дополнительные сведения об изменении физико-механических свойств полиуретановых эластомеров, работающих в режиме длительного динамического нагружения.

2. Отработаны температурно-временные параметры технологического процесса изготовления эластомерно-металлических деталей с применением новых для отечественной промышленности видов полиуретанов.

3. В зависимости от характера нагружения, было выделено три группы деталей машин, для каждой из которых был определен свой критерий работоспособности: износостойкость, предельная температура или величина относительной деформации сжатия.



4. Впервые в отечественной инженерной практике получена эмпирическая зависимость для точного определения момента сопротивления качению массивной шины.

5. Получена эмпирическая зависимость для определения коэффициента трения и интенсивности изнашивания полиуретановых эластомеров в режиме скольжения и качения в контакте с нормализованной абразивной поверхностью, имитирующей шероховатость цементнобетонного покрытия производственного пола.

6. Разработана методика проектировочного расчета массивных полиуретановых шин исходя из величины относительной деформации упругого обода и методика проверочного расчета на основании предельной температуры и допускаемого износа упругого обода.

**Теоретическая значимость.** Теоретическая значимость заключается в углубленном исследовании физико-механических свойств конструкционных полиуретановых эластомеров, работающих в режиме длительного динамического нагружения.

В диссертационной работе предложены новые понятия, описывающие физико-механические свойства конструкционных полиуретановых эластомеров, в частности коэффициент циклического размягчения и коэффициент динамического ужесточения.

Большое внимание в работе уделено разработке теоретических вопросов контактирования массивной шины с жестким основанием и возможности проскальзывания упругого обода на краях площадки контакта.

**Практическая значимость.** Решена важная для отечественного машиностроения проблема перехода на новый эластомерный материал – полиуретан, обладающий рядом преимуществ в сравнении с традиционным эластомером – резиной.

Решение поставленной задачи позволяет получать более компактные и надежные эластомерно-металлические детали, снижать расход энергии при

использовании массивных полиуретановых шин, обладающих меньшим сопротивлением качению в сравнении с резиновыми шинами примерно на 30 %.

Кроме того, применение полиуретана позволяет увеличить долговечность массивных шин, силу трения в контакте с абразивной поверхностью и как следствие надежность сцепления с опорной поверхностью.

Предельная температура, при которой происходит разрушение полиуретана, примерно на 20 % выше, чем у резин. Снижение температуры полимеризации полиуретановых деталей в сравнении с температурой вулканизации резиновых деталей на 30 ... 40 градусов ведет к повышению экологичности производства.

**Методология и методы исследования.** Сложность и недостаточная изученность поставленных задач, обуславливает приоритетное использование теоретико-экспериментальных подходов, математическое и физическое моделирование объектов исследования и происходящих процессов, отличающихся заведомо нелинейным характером.

При решении поставленных задач использовались методические подходы, характерные для специальности «Машиноведение» и направленные на получение необходимых технологических, конструктивных и эксплуатационных параметров деталей.

Особое внимание уделялось планированию экспериментального исследования и дальнейшей обработке полученных экспериментальных данных методами математической статистики.

#### **Положения, выносимые на защиту:**

1. Новые экспериментальные данные о физико-механических свойствах полиуретановых эластомеров, применяемых в качестве конструкционного материала деталей машин.

2. Режимы шлифования упругого полиуретанового покрытия, обеспечивающие геометрическую точность деталей вращения и минимальные показатели радиального боя и шероховатости поверхности для полиуретанов различной твердости с использованием различных инструментов.

3. Предложены три критерия работоспособности эластомерно-металлических деталей машин, в зависимости от условий работы и назначения конкретной детали.

4. Эмпирические зависимости по определению величины износа в зависимости от условий нагружения для эластомерно-металлических деталей, которые при своей работе контактируют с твердой абразивной поверхностью в режиме качения или скольжения.

5. Эмпирические зависимости по определению температуры нагрева для эластомерно-металлических деталей, работающих в режиме постоянного динамического нагружения в зависимости от условий нагружения и полученные экспериментальным путем, значения предельных температур нагрева полиуретана, на основании которых принимается заключение о работоспособности детали.

6. Для полиуретановых деталей, работающих в режиме статического нагружения, определены исходя из опыта эксплуатации рекомендуемые величины относительной деформации сжатия.

**Достоверность результатов исследования и рекомендаций** основана на корректном использовании методов математической статистики и интеллектуальном анализе экспериментальных данных. Достоверность и обоснованность выводов, приведенных в работе, подтверждается согласованностью полученных экспериментальных данных с теоретическими положениями, с данными, приведенными в работах других авторов, апробацией и обсуждением научных результатов на всероссийских и международных конференциях и подтверждена экспертизой научных статей в ведущих российских и международных изданиях.

**Апробация и внедрение результатов исследования.** Основные положения работы и результаты исследований докладывались и обсуждались на научно-методических семинарах Института машиностроения (ЛМЗ-ВТУЗ) и Института машиностроения, материалов и транспорта СПбПУ в период с 2000 года по 2023 год. Кроме того, основные научные результаты обсуждались на научно-технических конференциях в СПбПУ, в том числе на научно-практической

Конференции с международным участием «Неделя науки 2016», Санкт-Петербург, Россия, 14-19 ноября 2016 года.

Технология переработки полиуретана и методика проектирования эластомерно-металлических деталей вращения были реализованы при изготовлении колес с упругим сплошным покрытием из полиуретана для вилочных и балансирных погрузчиков “Raimond”, электротележек “Keller” и штабеллеров ”Atlet” и ”Rocla” для фирмы «Максидом», рольганги для фирмы «Интов-Эласт», штабелеров для Выборгского, Светогорского и Архангельского ЦБК.

Результаты диссертационного исследования используются в производственной практике ООО «Поли С.П.Б.» при проектировании и производстве полиуретановых виброизоляторов буксового подвешивания путевых железнодорожных машин взамен резиновых виброизоляторов «Mega» (Германия). Методика расчета массивных шин используется в производственной практике ООО «ОМП» при изготовлении транспортных платформ и сварочных роликовых вращателей, взамен массивных шин фирмы «Blickle» (Германия).

**Публикации.** По материалам диссертации опубликовано 32 научных работы. Из них 8 статей из списка Web of Science и Scopus, 23 статьи в рецензируемых научных изданиях, включенных в перечень ВАК Министерства образования и науки Российской Федерации и монография.

**Личный вклад в науку.** Научные проблемы и задачи, решенные в диссертационной работе, достигнутые теоретические и практические результаты сформулированы и обоснованы автором лично.

Автор самостоятельно спроектировал и изготовил две специальные экспериментальные установки для изучения вопросов нагрева, изнашивания и долговечности эластомерно-металлических деталей и лично участвовал в экспериментальной отработке температурно-временных параметров отливки деталей и отработке режимов шлифования упругого полиуретанового покрытия валов.

Автором разработана общая научная концепция исследований, представленных в диссертационной работе. Отраженные в работе научные

результаты были получены автором самостоятельно в период с 2000 года по 2023 год.

**Структура и объем диссертации.** Диссертационная работа состоит из введения, семи глав, заключения, списка литературы и приложения. Полный объем диссертации составляет 283 страницы, 82 рисунка и 25 таблиц. Список литературы содержит 99 наименований.

## **Глава 1 Состояние вопроса и постановка задач исследования**

### **1.1 Обзор современного состояния проблемы**

В современном машиностроении широкое распространение получили детали машин, имеющие форму деталей вращения с упругим эластомерным покрытием. К данному классу деталей относятся колеса погрузчиков-штабелеров, опорные ролики различного технологического оборудования, бегунки ступеней эскалаторов и т. д.

В соответствии со своим функциональным назначением данный класс деталей машин работает в контакте с жестким основанием в режиме динамического нагружения. При работе, вследствие внутреннего трения материал упругого обода подвергается гистерезисному нагреву.

Основы проектирования эластомерно-металлических деталей, заложенные инженерами и учеными во второй половине двадцатого столетия, на сегодняшний день устарели и нуждаются в совершенствовании. Доказательством этого является низкая долговечность и участвовавшие отказы эластомерно-металлических деталей машин.

Проектировочный расчет деталей машин с упругим ободом, в частности массивных шин согласно [42] проводили на основе допустимого контактного давления в контакте шины с твердой опорной поверхностью, но при этом не учитывались процессы, происходящие в материале упругого обода.

Допускаемое контактное давление массивной шины с опорной поверхностью лишь частично определяет долговечность и работоспособность массивной шины.

Появление на рынке новых эластомерных материалов, к которым относится полиуретан, потребовало обобщения и систематизации накопленного за последние годы опыта проектирования и эксплуатации эластомерно-металлических деталей машин.

Применение полиуретана, как конструкционного материала, на сегодняшний день сдерживает отсутствие научно-обоснованных методик проектирования эластомерно-металлических деталей машин. На преодоление этого отставания и направлена эта диссертационная работа.

Большой вклад в развитие теории упругости и пластичности применительно к эластомерам, в основном на примере резиновых смесей, внесли Н.И. Безухов, Ю.В. Зеленов и др. Проблемы механики полимеров рассмотрены в работах А.А. Аскадского, Л.Б. Гуревича, Г.Л. Слонимского, А.П. Тобольского. Также большое внимание уделено обобщению мирового и отечественного опыта в области создания научных основ и экспериментальной техники для измерения механических свойств полимеров.

Основы теории прочности полимерных материалов и механизмы их разрушения заложены в работах Г.М. Бартенева [2]. В его работах большое внимание уделено вопросам термодинамической и кинетической теории разрушения полимеров, вопросам молекулярного строения, физического состояния, механическим и теплофизическим свойствам.

Усталостные явления, происходящие в высокополимерах, при гистерезисном нагреве, и предшествующие разрушению материала, освещены в работах И.Х. Диллона, А. Кабояши, Б.М. Горелика [8] и др.

Огромный вклад в изучение физико-механических свойств резин их систематизацию и стандартизацию внесли А.И. Лукомская и М.М. Резниковский [41]. Они представили подробное описание методов и приборов, применяемых для механических испытаний каучуков, резиновых смесей и вулканизатов и дали краткую характеристику важнейших особенностей механических свойств этих материалов.

Опыт промышленной переработки и перспективы применения современных технологических форм полиуретановых эластомеров в промышленности освещен в работах С.А. Любартовича [24], Г.В. Матвеева, Л.М. Огибалова. Ими разработаны основы технологии и оборудования для переработки полимерных материалов в изделие.

Наибольший вклад в решение проблем прочности и деформативности резиновых деталей машин и разработку методик проектирования эластомерно-металлических деталей внесли Э.Э. Лавендел [23], Е.Т. Григорьев, В.И. Дырда, А.Е. Белкин, И.З. Даштиев, В.К. Семенов и др.

Основы проектирования резиновых деталей машин создал В.Л. Бидерман, Он создал теорию сетчатых оболочек, разработал методы расчета резинкордных упругих элементов и пневматических шин.

Большой вклад в создание методов расчета резино-металлических деталей, работающих при статическом и динамическом нагружении, внес В.Н. Потураев [35]. В его работах подробно рассмотрены вопросы определения динамического модуля упругости резиновых деталей. Большое внимание уделено вопросам гистерезисного сопротивления и связанного с ним теплообразования при циклическом нагружении.

Ценные сведения по разновидностям и свойствам конструкционных пластмасс представлены в работах В.К. Крыжановского и В.В. Бурлова [22]. В их работах приведены основные правила инженерного конструирования изделий с учетом их конкретного назначения и способа производства, приведены данные по проектировочным и проверочным расчетам типовых механических передач, упругих элементов, уплотнений и соединений деталей машин. Приведены основы расчета волновых редукционных механизмов с гибкими и жесткими зубчатыми звеньями из пластмасс, разнообразные по конструкции сильфоны, фасонные, трубчатые и тарельчатые пружины.

Особенности проектирования деталей машин из полиуретана представлены в работах Ш.М. Билика, Ю.А. Державца, Л.А. Кондакова и др.

Основным недостатком работ перечисленных авторов является отсутствие экспериментальных данных, которые описывали бы поведение эластомеров при длительном динамическом нагружении. В основном научные рассуждения носят качественный характер, но при этом отсутствуют конкретные данные, в частности о температуре нагрева в зависимости от условий нагружения.



## 1.2 Цель и постановка задач исследования

В данной диссертационной работе в качестве объекта исследования выбраны детали машин, которые при своей работе в основном испытывают деформацию сжатия или сдвига в условиях статического или динамического нагружения. В основном это детали двух групп: колеса с упругим ободом и виброизоляторы. При своей работе они испытывают нагружение по определенному циклу, чаще всего это отнулевой или симметричный цикл нагружения.

Полиуретан, как конструкционный материал, не применяют для работы на растяжение, ввиду его большой чувствительности к концентраторам напряжений, в частности к царапинам, надрывам и т. д. Его также не используют при работе на изгиб и кручение, ввиду большой податливости.

Детали вращения типа колес промышленных транспортных средств, ролики и валы конвейеров, а также амортизаторы испытывают при работе постоянное динамическое нагружение и как следствие, происходит нагрев полиуретана.

При нагревании происходит значительное изменение физико-механических свойств полиуретана, как конструкционного материала, и это изменение необходимо изучить и учитывать при проектировании деталей машин с упругим полиуретановым массивом. При нагревании полиуретана происходит его размягчение. Величина, которой можно оценить этот процесс является модуль упругости, который определяет деформативность рассматриваемой конкретной детали.

Целью данной работы является разработка научно-обоснованной методики проектирования эластомерно-металлических деталей машин, работающих на сжатие и сдвиг в условиях статического и динамического нагружения.

Для достижения поставленной цели необходимо было решить ряд задач, важнейшие из которых следующие:

1. Определить область применения полиуретана, как перспективного конструкционного материала для деталей машин с упругим полиуретановым

массивом, работающим на сжатие и сдвиг при статическом и динамическом нагружении.

2. Дополнительно, экспериментальным путем определить изменение физико-механических свойств полиуретана, как конструкционного материала деталей машин с упругим полиуретановым массивом. Подробному изучению подлежат следующие параметры:

- зависимость величины температуры нагрева упругого полиуретанового массива, работающего в условиях динамического нагружения от рабочих параметров, в частности от скорости нагружения и величины относительной деформации полиуретанового обода;

- коэффициент динамического ужесточения, который оценивает увеличение модуля упругости полиуретана при динамическом нагружении, в зависимости от скорости нагружения для конструкционных полиуретанов различной твердости;

- величина предельной температуры, при которой происходит разрушение полиуретана, вследствие температурного нагрева;

- коэффициент циклического размягчения, который учитывает уменьшение модуля упругости полиуретана при сжатии в зависимости от числа циклов нагружения;

- зависимость модуля упругости полиуретана при сжатии от температуры нагрева.

3. Отработать технологию реакционного литья полиуретанов в свободную форму и определить температурно-временные параметры литья формовых эластомерно-металлических деталей машин из полиуретана.

4. Спроектировать и изготовить специальную экспериментальную установку для изучения вопросов нагрева, изнашивания и долговечности полиуретановых роликов, геометрия которых соответствует деталям вращения с упругим покрытием. Кроме того, предусмотреть на рычаге нагружающего устройства место для установки кронштейна, в котором с помощью цангового зажима, устанавливаются полиуретановые образцы, которые проходят испытания в режиме скольжения.

5. Дополнительно спроектировать и изготовить вторую экспериментальную установку для изучения вопросов нагрева и долговечности виброизоляторов, работающих на сдвиг.

Особый интерес представляют данные о поведении полиуретана при длительном динамическом нагружении, когда происходят процессы разрыва вторичных поперечных связей внутри молекулярной структуры полиуретана и происходит очевидное снижение модуля упругости полиуретанового эластомера при сжатии.

Очевидно, что разрушение вторичных химических связей внутри полиуретанового эластомерного материала приведет к заметному увеличению статической деформации виброизолятора, под действием веса амортизируемого объекта.

На сегодняшний день получить точные научные сведения о поведении виброизоляционных эластомерных материалов можно по результатам экспериментальных исследований, которые были проведены в рамках представленного диссертационного исследования.

Точные сведения о физико-механических свойствах полиуретана необходимы конструктору при проектировании различных машинных агрегатов, в частности при расчете осадки виброизоляторов.

Современное машиностроение предъявляет строгие требования по центрированию выходных и входных валов различных агрегатов. Центрирование необходимо для устранения осевой и радиальной расцентровки, когда оси вращения соединяемой муфтой валов, отклонены от единой оси вращения.

При нарушении центровки соединяемых механизмов, возникают избыточные вибрации, нагрев упругих элементов муфты, ускоренный выход подшипников из строя и ослабление или поломка крепежных деталей.

Величина расцентровки валов современных силовых агрегатов при использовании упругих втулочно-пальцевых муфт согласно ГОСТ21424-75 составляет 0,05 мм, и эту величину необходимо выдерживать при длительной работе.

### **1.3 Выводы по главе 1**

1. Проведен анализ экспериментальных и теоретических исследований по конструированию деталей вращения с упругим эластомерным покрытием.
2. Определены цели диссертационного исследования и задачи, которые необходимо решить.

## **Глава 2 Экспериментальное изучение физико-механических свойств полиуретана, как конструкционного материала деталей машин**

### **2.1 Общая характеристика типов и технологических форм современных конструкционных полиуретанов**

Полиуретановые эластомеры, образующие широкий класс высокомолекулярных каучукоподобных соединений были впервые синтезированы 13 ноября 1937 года Отто Байером и его сотрудниками в Германии. Ученые выяснили, что используя принцип аддитивной (ступенчатой) полимеризации можно получать полиуретан из диизоцианата и жидкого полиэфира или полиэстера.

С течением времени производство полиуретанов во всем мире росло и к 80-м годам достигло объема в 4 миллиона тонн.

Перспективность полиуретанов для современной промышленности обусловлена тем, что их свойства согласно [66, 69, 70, 72, 74, 76, 79] существенно дополняют возможности использования других эластомеров, каучуков, резин и пр.

По своим конструкционным и технологическим возможностям полиуретаны – наиболее универсальный полимерный материал. Полиуретан характеризуется высокими физико-механическими свойствами, имеет большой диапазон твердости, эластичности, низкую истираемость, высокую прочность, высокое сопротивление раздиру, маслобензостойкость, кислотостойкость и рабочий температурный интервал от  $-35^{\circ}\text{C}$  до  $+75^{\circ}\text{C}$ .

Переработку компонентов исходного сырья в изделие из полиуретана производят смешиванием преполимера (изоцианата) и удлинителя цепи молекул. Исторически первыми в промышленных целях использовали системы изоцианатов в смеси с диаминами. Позднее широкое распространение получили системы с

полиолами, обладающие меньшей токсичностью и повышенной стабильностью при хранении.

В состав полиуретанового эластомера входит также некоторое количество химических сшивок и веществ-модификаторов, целенаправленно придающих необходимые технологические и потребительские свойства.

Ведущими западными странами, производящими полиуретан, продолжают оставаться США, а в Европе – Германия, Великобритания, Франция и Италия. Сходные по составу и характеристикам полиуретаны могут иметь различные фирменные обозначения. Здесь дан краткий обзор лишь основных их типов и технологических форм [38, 55, 67, 75, 77], которые могут быть использованы в качестве конструкционного материала для создания эластомерно-металлических деталей. Исключены формовочные материалы, материалы для быстрого прототипирования, защитные покрытия, пенистые и губчатые материалы и т.п.

Наиболее распространенным типом современных конструкционных полиуретанов являются двухкомпонентные системы горячей полимеризации. Среди них наиболее распространены следующие торговые марки:

- «Вулколлан» (Vulkollan), фирма Bayer (Германия). Твердость от 65 ShA до 70 ShA, характерна высокая прочность на отдир и раздир. Обладает высокой износостойкостью. Диапазон рабочих температур от  $-35^{\circ}\text{C}$  до  $+75^{\circ}\text{C}$ . Стоек к нефтепродуктам и жирам, а также атмосферному воздействию. Переработка реакционным литьем.

- «Байтек НС» (Baytec NC), фирма Bayer (Германия). Твердость от 10 ShA до 65 ShA. Термостабильность в диапазоне от  $-30^{\circ}\text{C}$  до  $+75^{\circ}\text{C}$ . Стоек к нефтепродуктам и жирам, а также атмосферному воздействию. Динамические характеристики прочности несколько ниже, чем у «Вулколлана», но стабильность и технологичность улучшены. Переработка реакционным литьем.

- «Дуотан» (Duothane), фирма Synair (США) и CIL(Великобритания). Твердость полиуретана марок QA 45...95 ShA, марок QE 55...95 ShA. Обладают высокими механическими свойствами и высокой износостойкостью. Обладает

характерной демпфирующей способностью, стоек к воздействию влаги и озона. Термостабилен в диапазоне от  $-30^{\circ}\text{C}$  до  $+70^{\circ}\text{C}$ . Переработка реакционным литьем.

- «СКУ-7», «СКУ-ПФП» и др., отечественные полиуретаны, близкие «Вулколлану» и «Дуотану» по своим физико-механическим показателям, однако отличаются токсичностью, а также продолжительной до 2...4 ч и высокотемпературной до  $120^{\circ}\text{C}$  полимеризацией.

Также находят применение двухкомпонентные системы холодной полимеризации:

- «Байтек Реактив» (Baytec Reaktiv) – технологическая форма полиуретана «Байтек». Твердость от 73 ShA до 81 ShA. Переработка реакционным напылением или ротационным литьем при невысокой температуре. Толщина слоя 2...3 мм.

- «Сил Каст» (Cil Cast), фирма CIL (Великобритания). Твердость от 15 ShA до 80 ShA. Обладает высокой прочностью, эластичностью и износостойкостью. Стоек к озону, ультрафиолетовому облучению, к влаге и химическим реагентам. Термостабилен, огнестоек, имеет высокое электрическое сопротивление. Переработка реакционным литьем.

Особое положение среди литьевых полиуретановых эластомеров занимают однокомпонентные системы горячей полимеризации, имеющие неоспоримое преимущество перед двухкомпонентными системами. Важнейшими торговыми марками являются следующие:

- «Монотан» (Monothane), фирма Synair (США) и CIL(Великобритания). Твердость от 10 ShA до 90 ShA. Имеет хорошие механические свойства и высокую износостойкость. Стабилен во влажной и масляной среде. Стоек к растворителям. Переработка литьем с последующей выдержкой при  $135^{\circ}\text{C}$  в течение 6...8 ч.

- «Байтек ЕК» (Baytec EK), фирма Bayer (Германия) – форма полиуретана «Байтек», аналогичная «Монотану». Реакционная переработка пропиткой текстильного субстрата с последующей выдержкой при  $110...130^{\circ}\text{C}$  в течение 2...3 ч.

На сегодняшний день полиуретаны, это непрерывно развивающийся класс эластомеров, ассортимент которых ориентирован на многообразие технологии переработки в изделие. Изделия из полиуретана используются во всех отраслях современной промышленности: машиностроении, кабельной и электротехнической промышленности, автопроме, обувной промышленности и т.д. [73, 80, 81, 89, 93, 94]. Соединение исходных компонентов производят при помощи смесительно-дозировочных машин, на вальцах или вручную.

Важнейшие для машиностроения конструкционные полиуретаны, перерабатываются реакционным литьем, прессованием, инъекцией, экструзией, напылением, навивкой и др. специальными методами. В процессе различных видов переработки происходит полимеризация эластомера. Разработана рецептура для горячей (при 80...135<sup>0</sup>С) и для холодной (при 20<sup>0</sup>С) полимеризации.

В последние десятилетия полиуретан стали широко использовать в производстве лакокрасочных материалов (ЛКМ). На сегодняшний день ЛКМ на основе полиуретана одни из самых бурно развивающихся, востребованных и в наибольшей степени соответствующих современным представлениям о промышленных лакокрасочных материалах. Лаки и краски на основе полиуретана имеют очень разнообразные свойства: твердые и мягкие, эластичные и жесткие и т.д. Полиуретаны обладают превосходной адгезией к древесине, пластику, металлу и т.д. В последние годы стали широко использовать водоразбавимые ЛКМ на основе полиуретана, которые полностью удовлетворяют высоким современным экологическим требованиям.

На сегодняшний день наибольшее распространение получили двухкомпонентные полиуретаны на основе полиола (полиэфир или полиэстер) и изоцианата (MDI или TDI). В состав исходного сырья входит также полимеризатор (гликоль, диамин или вода) и некоторые модификаторы. Исходные компоненты в несвязанном состоянии токсичны. После полимеризации дозированной смеси компонентов изделие из полиуретана становится безопасным для пользователя.

С целью упрощения технологии переработки созданы однокомпонентные системы. В них входят одновременно два полиола (полиэфир и полиэстер) и



изоцианат, находящиеся в связанном состоянии. Благодаря этой особенности исходное сырье нетоксично. Полимеризация производится путем нагрева композиции.

## 2.2. Основные физико-механические свойства полиуретанов

Полиуретаны относятся к синтетическим полимерным материалам, в основной цепи которых содержатся уретановые группы – NH – CO - O -.

В макромолекулах полиуретана могут содержаться и другие функциональные группы: простые, эфирные и сложноэфирные, мочевиные, амидные и т.д. Свойства полиуретанов зависят от природы и длины участков цепи между уретановыми группами, структуры цепей (линейная или сетчатая), молекулярной массы и т.д. Полиуретаны могут быть вязкими жидкостями или являться твердыми веществами. Их твердость изменяется от 15 единиц по Шору по шкале А до твердых пластиков твердостью 97 единиц по Шору по шкале Д.

Сложность технического процесса изготовления полиуретанов обуславливает некоторые отклонения физико-механических свойств полиуретана от номинальных значений даже для деталей одной партии. Обычно отклонения свойств полиуретана от номинального значения находятся в пределах  $\pm 4\%$ , лишь при очень хорошо отлаженном техническом процессе удается сузить эти пределы до величины  $\pm 2\%$ . Вследствие колебаний физико-механических свойств полиуретанов большое значение приобретает проверка этих свойств путем испытаний.

Отечественные и зарубежные стандарты на методы испытаний эластомеров, которые были разработаны для резин и пластмасс, затем были распространены на полиуретаны, представлены в таблицах 2.1, 2.2.

Для разработки научно-обоснованного метода расчета эластомерно-металлических деталей требуется дополнительно исследовать комплекс параметров, характеризующих работу полиуретана, как в образце, так и в составе конкретной конструкции.

Таблица 2.1 - Отечественные методы испытаний физико-механических свойств эластомеров

Стандарт	Номер
Пластмассы. Методы механических испытаний. Общие требования.	ГОСТ 14359-69
Резина. Общие требования к проведению физико-механических испытаний.	ГОСТ 269-66 СТ СЭВ 983-89
Пластмассы. Метод испытаний на сжатие.	ГОСТ 4651-82 СТ СЭВ 2896-81
Резина. Метод испытаний на кратковременное статическое сжатие.	ГОСТ 265-77
Пластмассы. Методы определения модуля упругости при растяжении, сжатии и изгибе.	ГОСТ 9550-81 СТ СЭВ 2435-80
Резина. Метод определения эластичности по отскоку на приборе Шоба.	ГОСТ 27110-86 СТ СЭВ 108-85

Таблица 2.2 - Зарубежные методы испытаний физико-механических свойств эластомеров

Характеристика	ASIM (США)	DIN (Германия)	ISO (международный)
Твердость по Шору	D-2240	53505	R868
Упругость по откосу, %	D-2632	53512	4462
Модуль упругости при 100 % растяжении, Мпа	D-412	53504	37
Предел прочности при растяжении, Мпа	D-412	53504	37
Удлинение при разрыве, %	D-412	53504	37
Сопротивление раздиру, КН/м	D-624	53504	37

Твердостью полиуретана является его способность оказывать сопротивление механическому проникновению в него более твердого тела, называемого индентором.

Измерение твердости полиуретана строго регламентировано. Наиболее распространенным способом является определение твердости твердомером ТМ - 2 по ГОСТ 263-75(СТ СЭВ 1198-78). Определение твердости заключается в измерении глубины погружения стальной иглы с плоским наконечником, находящейся под воздействием силы пружины. Шкала твердости имеет диапазон от 1 до 100 по Шору.

Вследствие неоднородности полиуретана измерение его твердости нужно производить в нескольких точках и для расчетов брать среднее значение результатов измерения. Отклонение твердости от среднего значения составляет для полиуретана твердостью 65 ShA  $\pm 1$  %, а для твердости 95 ShA  $\pm 2$  %.

Измерение твердости полиуретана происходит в области его упругих деформаций, вследствие чего его твердость является характеристикой упругих свойств. Этим твердость полиуретана отличается от твердости металлов, у которых измерение твердости происходит в области пластических деформаций.

Вследствие этого величина твердости полиуретана может быть использована для определения показателей упругости, например, статического модуля упругости при сжатии. Следует упомянуть, что статический модуль упругости предполагает скорость деформации, установленную стандартами для испытаний не более 0,4 мм/с.

Твердость, определяемая твердомером, является условным показателем, а статический модуль упругости - это определенная физическая величина, применяемая для инженерных расчетов. Определить твердость полиуретанов можно быстро, просто и в любых условиях, а определение статического модуля упругости при сжатии требует специального оборудования, значительной затраты времени на проведение эксперимента и расчета.

Для получения экспериментальной зависимости статического модуля упругости от твердости полиуретана необходимо было выяснить следующие вопросы: влияние толщины образца на величину твердости, определить минимальное количество единичных испытаний для определения твердости и

выяснить минимальное время выдержки индентора твердомера в нагруженном состоянии.

Для определения влияния толщины образца  $H$  на величину твердости были испытаны образцы толщиной от 1 до 10 мм. Твердость образца становится постоянной и не зависит от толщины испытываемой пластины, начиная с образца толщиной 4 мм для полиуретана твердостью 95 ShA, и с образца толщиной 6 мм для полиуретана твердостью 65 ShA (см. рисунок 2.1).

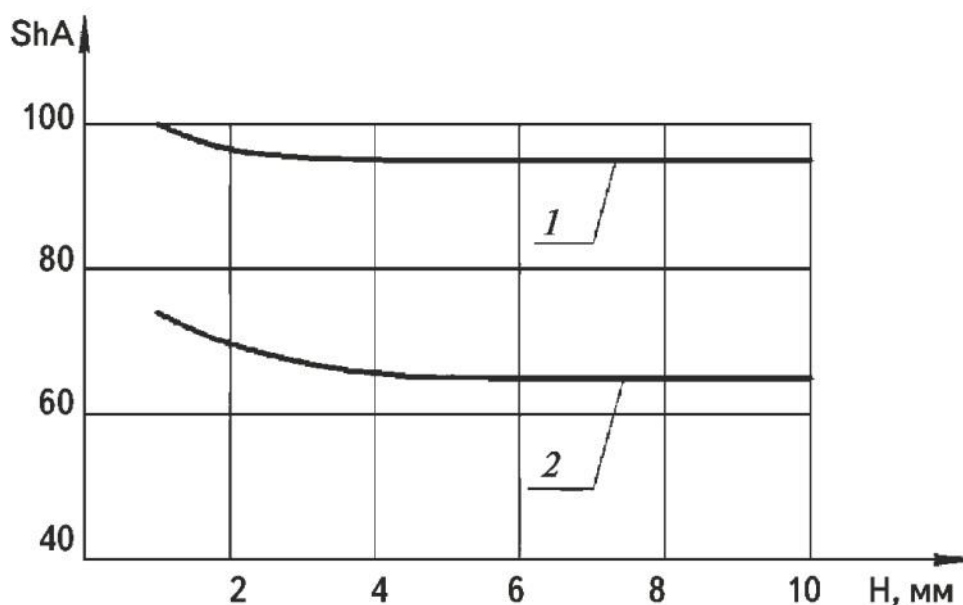


Рисунок 2.1 - Зависимость твердости полиуретана от толщины образца:

1 – полиуретан 95 ShA; 2 - полиуретан 65 ShA

Согласно ГОСТ 263-75 показатель твердости определяется как средняя величина из трех измерений. Известно, что ошибка при определении среднего значения зависит от числа измерений. При вычислении среднего значения (для разного числа измерений) была применена методика расчета для случайных ошибок, не подчиняющихся нормальному закону.

В этой серии экспериментов и других, которые содержит данная работа, обработка экспериментальных данных производилась методами математической статистики. При этом количество измерений или количество деталей, участвующих в проведении экспериментальных исследований, выбиралось такое, чтобы

погрешность представленных в работе эмпирических зависимостей находилась в пределах 6...8%.

Учитывая определенную нестабильность физико-механических свойств полиуретана для двух полиуретановых пластин толщиной 6 мм и твердостью 95 ShA и 65 ShA, было проведено 200 измерений твердости. Твердость определяли в различных точках пластины, отстоящих друг от друга примерно на 10 мм.

Среднее из 200 измерений было принято за истинное среднее значение. Далее общее число измерений мы поделили на группы, содержащие 1, 3, 5, 10 и т.д. единичных измерений. Для каждой группы измерений определялись средние значения и их средне - квадратичные ошибки. Для одного измерения эта ошибка оказалась равной  $\pm 1,5 \%$ , для трех измерений  $\pm 0,7 \%$ , для 5 измерений  $\pm 0,5 \%$ , для 10 измерений  $\pm 0,3 \%$  и т.д.

С увеличением числа измерений ошибка в определении среднего значения уменьшалась. Все значения твердости определялись нами как средние величины из 5 измерений в различных точках полиуретановой пластины. Учитывая незначительную разницу между значениями из 3 и 5 измерений на практике можно пользоваться ГОСТ 263-53 и определять среднюю величину из 3 измерений.

В ГОСТ 263-75 не указано время выдержки иглы твердомера в нагруженном состоянии. Для полиуретанов твердостью от 95 ShA до 70 ShA продолжительность испытания, исключая самые кратковременные, практически не влияет на показания твердости. Лишь у полиуретана твердостью 65 ShA наблюдается незначительная релаксация напряжений, которая заканчивается в течении 5 секунд.

Таким образом, чтобы определить твердость по разработанной методике, необходимо:

1. Для испытания брать образцы полиуретана толщиной не менее 6 мм.
2. Число измерений для определения среднего значения твердости должно быть не менее 5.
3. Показания твердомера снимать примерно через 5 секунд после начала испытания.

По результатам большого количества экспериментальных замеров, для полиуретанов различной твердости, была получена зависимость статического модуля упругости при сжатии от твердости полиуретана (см. рисунок 2.2).

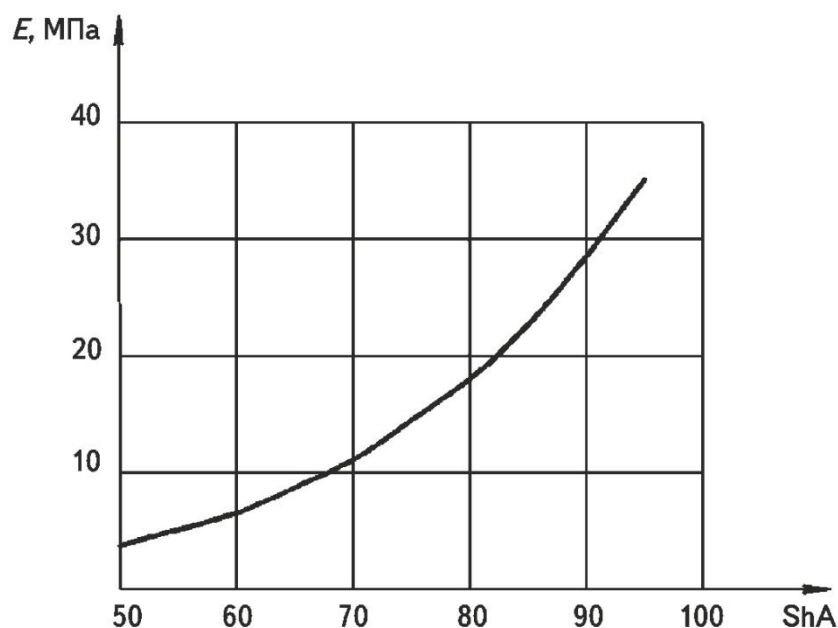


Рисунок 2.2 - Зависимость между статическим модулем упругости при сжатии и твердостью полиуретана

Зависимость, представленная на рисунке 2.2, аппроксимируется простой формулой:

$$E_{cm} = 0,02 ShA + \frac{ShA^4}{2,55 \cdot 10^6}, \quad (2.1)$$

где  $E_{cm}$  - статический модуль упругости;  $ShA$  – твердость в единицах по Шору.

При исследовании вопросов абразивного изнашивания полиуретановых образцов в режиме скольжения по нормализированной абразивной поверхности, имитирующей цементобетонное покрытие производственных полов, был отмечен резкий рост изнашивания с ростом температуры во фрикционном контакте.

Рост изнашивания обусловлен размягчением полиуретана с ростом температуры и как следствие большим заглублением абразива в полиуретан в ходе испытаний. В связи с этим был проведен эксперимент по определению зависимости твердости полиуретана от температуры.

Для исследования были взяты образцы полиуретана твердостью 75 ShA, 85 ShA и 95 ShA, а также образцы резины, вырезанной из протекторной части пневматической шины твердостью 72 ShA. Замер твердости образцов производился при комнатной температуре +20 °С, при температуре 0 °С после суточной выдержки на улице зимой и при температуре + 40 °С, + 60°С и + 80°С после 2-х часовой выдержки в горячей проточной воде.

По результатам эксперимента была построена зависимость твердости полиуретановых эластомеров от температуры (см. рисунок 2.3).

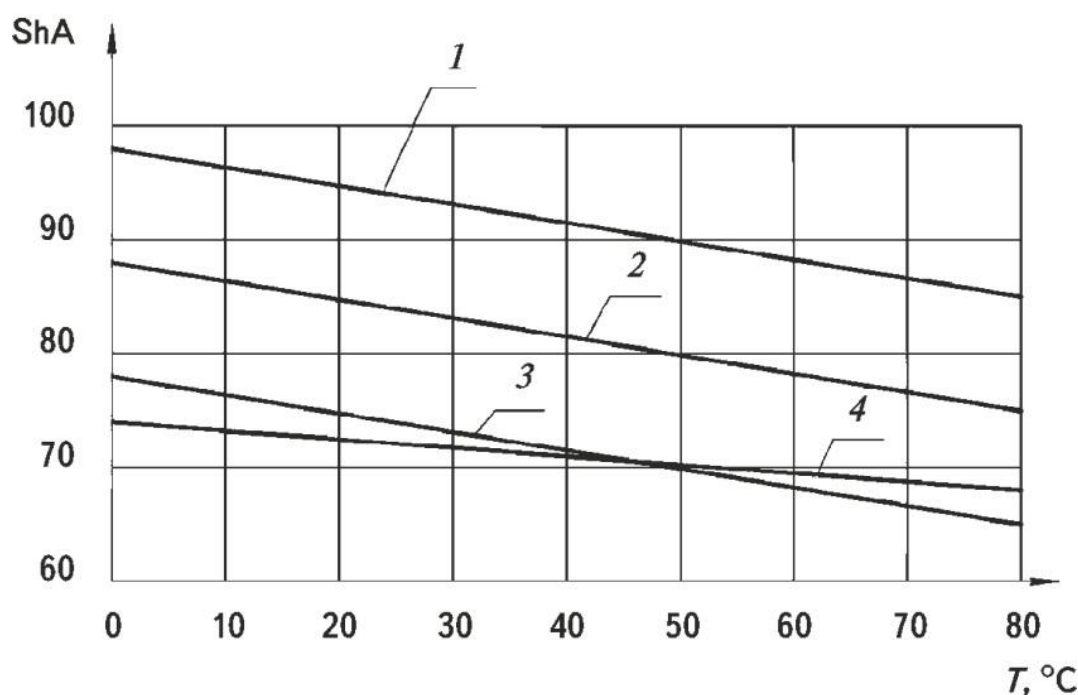


Рисунок 2.3 - Зависимость твердости от температуры: 1- полиуретан 95 ShA; 2 - полиуретан 85 ShA; 3 - полиуретан 75 ShA; 4 – протекторная резина

Представленные на рисунке 2.3 зависимости твердости полиуретана от температуры хорошо описываются линейной зависимостью. Для полиуретанов зависимость будет иметь следующий вид:

$$ShA = 98 - \frac{T^{\circ}C}{6,2} - (95 - ShA), \quad (2.2)$$

где  $ShA$  – твердость полиуретана в единицах по Шору;  $T^{\circ}C$  – температура полиуретана в °С.

Для резины аппроксимация выглядит следующим образом:

$$ShA = 74 - \frac{T^0 C}{13,3}, \quad (2.3)$$

где  $ShA$  – твердость резины в единицах по Шору;  $T^0 C$  – температура резины в  $^0 C$ .

Как видно из рисунка 2.3 у полиуретана твердостью 75  $ShA$  и резины твердостью 72  $ShA$  примерно при  $45^0 C$  имеется одна твердость около 70  $ShA$ . При дальнейшем нагревании полиуретан имеет меньшую твердость, чем резина. Поэтому для тяжелых условий работы при больших линейных скоростях и удельном давлении во фрикционном контакте изнашивание в режиме скольжения у полиуретана примерно на 20...30 % больше, чем у резины.

Эти значения подтверждаются результатами эксперимента. Необходимо отметить, что данный абразивный износ при больших скоростях и давлении характерен, например, для массивных шин. Он реализуется на практике в случае буксования, движения «юзом» и при макропроскальзывании рулевого колеса.

Растяжение и сжатие полиуретана, как и других конструкционных материалов сопровождается изменением поперечных размеров детали: при растяжении поперечные размеры уменьшаются, а при сжатии увеличиваются. Между относительной поперечной  $\varepsilon'$  и относительной продольной  $\varepsilon$  деформациями при простом растяжении или сжатии в пределах применимости закона Гука существует постоянное соотношение, величина которого  $\mu$ , называется коэффициентом Пуассона и определяется как  $\mu = \frac{\varepsilon'}{\varepsilon}$ .

Для всех материалов значение коэффициента Пуассона лежит в пределах 0...0,5. Коэффициент Пуассона наряду с модулем упругости является параметром, характеризующим упругие свойства материала.

Для полиуретана, имеющего широкие пределы деформации, со значительным изменением размеров детали как в направлении действия силы, так и в перпендикулярных направлениях, коэффициент Пуассона  $\mu$ , вычисленный по приведенной формуле, не будет постоянным.

Поэтому для определения  $\mu$ , может быть рекомендована зависимость следующего вида:

$$\mu = 0,5 \left( 1 - \frac{l}{v} \frac{dV}{dh} \right), \quad (2.4)$$



где  $h$  и  $l$  - геометрические размеры образца;  $V$  - объем образца.

При  $\frac{dV}{dh} \rightarrow 0$   $\mu = 0,5$ .

Найденные на основании этой формулы значения коэффициента Пуассона для образцов полиуретана различной твердости в условиях сжатия при сухом трении на торцах составили  $\mu = 0,465 \dots 0,485$ .

При проведении инженерных расчетов с достаточной точностью можно принимать коэффициент Пуассона  $\mu = 0,5$ , что находится в полном соответствии с представлениями о полиуретане, как о материале с высокой объемной упругостью, в результате чего он может рассматриваться как практически несжимаемое тело.

Полиуретан относится к материалам, для которых характерны высокая упругость и эластичность. Следует упомянуть, что в некоторых языках (например, в английском и немецком) понятия упругости и эластичности не различаются. В русском языке упругостью называется свойство тел восстанавливать свою форму и объем (твердые тела) или только объем (жидкости и газы) после прекращения действия внешних сил.

Под эластичностью понимается способность материала или изделия испытывать значительные упругие обратимые деформации без разрушения при сравнительно небольших усилиях. Так, для деформации растяжения полиуретана характерны удлинения в 500 % и более.

Эластичность полиуретана обусловлена их особой молекулярной структурой. Схематично эта структура представляет собой длинные гибкие молекулярные цепи, соединенные через некоторые промежутки поперечными связями [82, 84, 88].

Полиуретановые эластомеры в свободном (недеформированном) состоянии представляют собой аморфные вещества, у которых отсутствует кристаллическая решетка, при этом макромолекулы расположены в произвольном порядке, без какой - либо регулярности.

При приложении статической нагрузки макромолекулы полиуретанового эластомера частично распрямляются и переходят в ориентированное состояние (см. рисунок 2.4).

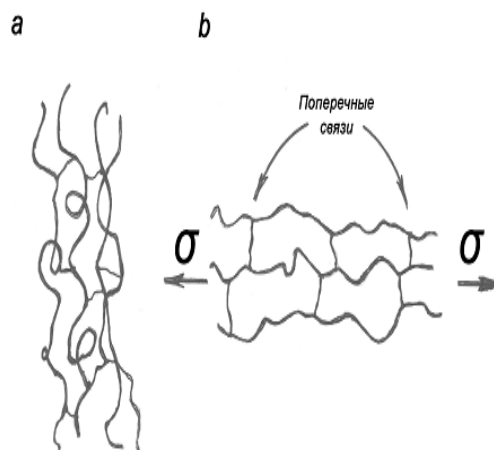


Рисунок 2.4 - Схема, иллюстрирующая деформацию макромолекул полиуретановых эластомеров, соединенных поперечными связями: а – эластомер в исходном недеформированном состоянии; б – состояние эластомера в процессе деформирования под действием приложенных напряжений

После снятия нагрузки макромолекулы полиуретанового эластомера возвращаются в исходное состояние.

Полиуретановые цепи в отличие от большинства молекулярных цепей других полимеров, содержат большое количество высокополярных групп, и поскольку они не так жестко соединены первичными химическими связями, эти полярные группы могут свободно располагаться относительно друг друга, образуя прочные вторичные химические связи.

Большое количество полярных групп не позволяет цепям скользить относительно друг друга под нагрузкой, что обуславливает более высокий модуль упругости полиуретанов, чем у резин, при одинаковой твердости.

Кривые «напряжение – деформация» при сжатии для полиуретановых эластомеров аналогичны подобным кривым других эластомерных материалов, в частности резин [34]. Как и у других эластомеров, вид кривой меняется при увеличении деформации, так что эластичность не может быть оценена в полной мере с помощью модуля Юнга. Кривые «напряжение – деформация» (см. рисунок 2.5) для полиуретанов твердостью 65 ShA, 85 ShA и 95 ShA при рабочих деформация сжатия показывают явную нелинейность после 10 % деформации.

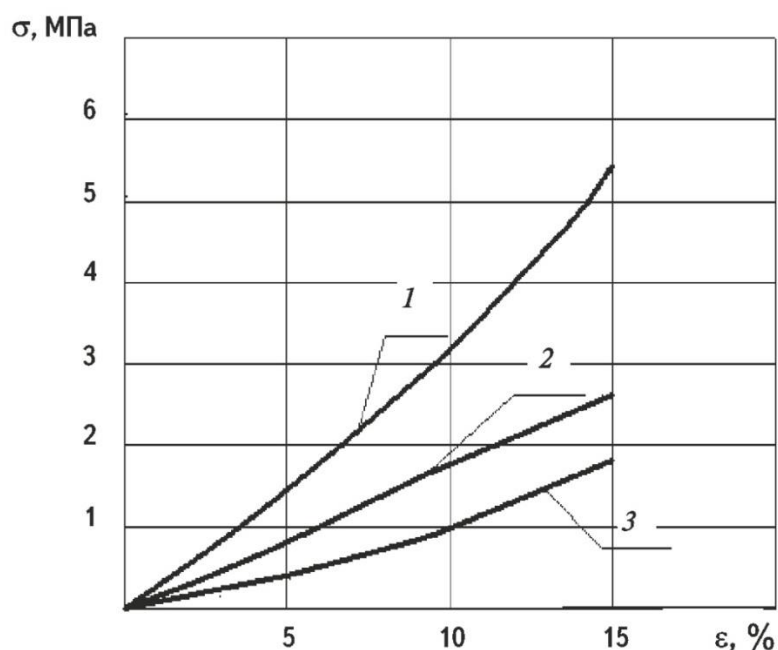


Рисунок 2.5 - Кривые «напряжение – деформация» для полиуретанов:  
1 – полиуретан 95 ShA; 2 - полиуретан 85 ShA; 3 - полиуретан 65 ShA

Приведенные кривые «напряжение – деформация» хорошо описываются зависимостью «нагрузка – деформация»:

$$F = E_{cm0} S \left( \frac{1}{\lambda^2} - \lambda \right), \quad (2.5)$$

где  $F$  - нагрузка на образец;  $E_{cm0}$  - начальный модуль упругости при сжатии;  $S$  - площадь поперечного сечения образца;  $\lambda = 1 - \frac{\delta}{H}$  - отношение высоты деформированного образца к начальной высоте;  $\delta$  - деформация образца;  $H$  - начальная высота образца.

Зависимость (2.5) в диапазоне рабочих деформаций ( $\lambda = 0,05 \dots 0,2$ ) хорошо (с точностью  $\pm 7\%$ ) совпадает с экспериментами. При увеличении деформации вид кривой меняется, деформация постепенно переходит из упругой в высокоэластичную.

Согласно Бартеневу Г.М. [2] различают три составляющие деформации полимеров:

1. Упругая деформация, свойственная для обычных твердых тел. Она обратима и связана с изменением межмолекулярных и межатомных расстояний, а также изменением валентных узлов.
2. Высокоэластичная деформация, характерная только для полимеров в высокоэластичном состоянии, также обратимая, но связанная с изменением конфигурации макромолекул. Весь комплекс уникальных физико-механических свойств полиуретанов определяется деформацией именно этого типа.
3. Пластическая деформация, связана с необратимым перемещением макромолекул друг относительно друга, развивается только в случае разрушения материала.

В дальнейшем расчет полиуретановых деталей машин, работающих на сжатие будем производить с использованием методов, основанных на применении формул сопротивления материалов [33].

В частности связь между напряжением  $\sigma$  и деформацией  $\varepsilon$  будем представлять в виде  $\sigma = \beta \varepsilon E$ , где  $\beta$  – коэффициент, учитывающий физико-механические свойства материала, форму детали и т.д. Эта формула была предложена в работе [23] и впоследствии неоднократно применялась для расчета различных эластомерных деталей.

Вместе с тем такая форма записи уравнения  $\sigma(\varepsilon)$  является весьма приближенной, а ее применимость к расчету деталей машин должна сочетаться с проведением трудоемких экспериментальных исследований в каждом конкретном случае.

При проведении экспериментальных исследований по долговечности упругого полиуретанового обода массивных шин была получена эмпирическая

зависимость по определению температуры нагрева полиуретана в зависимости от скорости нагружения  $V$  и величины относительной деформации  $\varepsilon$ .

Испытания проводились на роликах, геометрические размеры которых: относительная толщина обода  $h/D = 0,10 \dots 0,14$  и относительная ширина  $b/D = 0,2 \dots 0,5$  полностью совпадает с геометрией таких деталей вращения с упругим ободом, как массивные шины, бегунки ступеней эскалатора метрополитена и т. д.

При испытаниях полиуретановый ролик контактировал с массивным стальным беговым барабаном экспериментальной установки. При этом линейная скорость в контакте ролика с барабаном  $V_l = 0,4 \dots 1$  м/с примерно соответствует скоростям работы технологического и транспортного оборудования.

Теплопередача от разогретого, вследствие динамического нагружения, упругого полиуретанового обода экспериментального ролика происходит по трем направлениям:

1. От внутреннего диаметра упругого обода по направлению к металлическому центру ролика.
2. От торцевых поверхностей упругого обода в окружающее пространство.
3. От наружного диаметра упругого обода к стальному беговому барабану.

Отличие в условиях передачи тепла от упругого полиуретанового обода экспериментального ролика и реально работающих деталей машин с упругим ободом может находиться только в одном из трех перечисленных направлений, а именно в третьем.

Из приведенных в качестве примера деталей вращения с упругим ободом из полиуретана только бегунки ступеней эскалатора полностью соответствуют условиям эксперимента, когда наружный диаметр упругого обода контактирует со стальной поверхностью.

В случае массивной шины теплоотдача от наружного диаметра упругого обода происходит через плоскость контакта обода с бетонным полом. Условия теплообмена упругого полиуретанового обода в контакте со сталью и бетоном примерно одинаковы. При этом необходимо помнить, что теплопередача через наружный диаметр является одной из трех примерно равнозначных составляющих.

Замеры температуры полиуретанового упругого обода бегунков ступеней эскалатора в метрополитене сразу после остановки эскалатора показали хорошее совпадение с расчетным значением температуры, полученным по формуле (2.6).

Разница между расчетной температурой и фактической, измеренной с помощью термопары составляет от 1 до 2 градусов. Аналогичные замеры температуры производились на прижимных полиуретановых роликах деревообрабатывающего комбината, и они показали такие же результаты.

Хорошее совпадение расчетной и фактической температур обусловлено двумя факторами:

1. Экспериментальный полиуретановый ролик также как бегунок ступени эскалатора и прижимной ролик находятся в условиях постоянного динамического нагружения, для которого свойственен установившийся температурный баланс между количеством теплоты выделяемым в полиуретановом ободе и количеством теплоты, рассеиваемой в окружающую среду.
2. Условия нагружения деталей вращения с упругим ободом, такие как линейная скорость и величина относительной деформации обода, определяющие количество выделенной теплоты строго фиксированы и остаются постоянными в течении рабочего времени.

Приведенная эмпирическая зависимость (2.6) по определению температуры нагрева упругого полиуретанового обода справедлива для случая постоянного динамического нагружения, когда наступает температурный баланс между количеством теплоты выделяемым в результате деформации обода и количеством теплоты, рассеиваемой в окружающую среду.

Температура нагрева полиуретанового массива определяется по следующей формуле:

$$T = T_B + 6,9V^{1,65} + 0,95 \cdot \varepsilon, \quad (2.6)$$

где  $T_B$  - температура окружающего воздуха;  $\varepsilon$  - величина относительной деформации полиуретанового массива;  $V$  – линейная скорость нагружения.

Из зависимости (2.6) следует, что температура нагрева линейно зависит от величины деформации, а от скорости нагружения температура имеет степенную зависимость. Таким образом, полиуретан в большей степени «разогревает» скорость нагружения, когда полимерные молекулы не успевают деформироваться с «предлагаемой» скоростью. При этом процесс деформирования сопровождается потерей энергии на внутреннее трение (гистерезис), и часть энергии выделяется в окружающее пространство в виде тепла.

В данной серии экспериментов были получены предельные значения температуры полиуретана и величины относительной деформации, при которых наступает разрушение упругого обода.

При проведении испытаний по определению долговечности упругого полиуретанового обода была проведена отдельная серия испытаний, при которой нагрузка на экспериментальный ролик увеличивалась ступенчато с интервалом 2 процента относительной деформации обода. На каждом режиме испытание проводилось в течение одного часа, для достижения установившегося теплового баланса. По достижении разрушения упругого обода экспериментального ролика замерялась с помощью термопары температура в зоне разрушения и фиксировалась величина относительной деформации обода, при которой произошло разрушение ролика.

Для получения достоверных экспериментальных данных проводились испытания 6 роликов каждой твердости. Благодаря высокой стабильности физико-механических свойств полиуретана и строгости соблюдения режима нагружения при проведении эксперимента, отклонение от номинального значения предельной температуры составило  $\pm 2\%$ .

Полученные экспериментальные значения предельных температур для конструкционных полиуретанов различной твердости, в дальнейшем будут использоваться при проведении проверочных расчетов полиуретановых деталей машин, работающих в условиях динамического нагружения, представлены в таблице 2.3.

Таблица 2.3 - Предельные значения температуры и величины относительной деформации

Твердость полиуретана	$T_{max}$ , °C	$\varepsilon_{max}$
95 ShA	70	0,09
85 ShA	65	0,12
75 ShA	60	0,14

Разрушение обода происходит в его центре, где находится зона наибольших деформаций. После разрушения полиуретан становится несколько более темного цвета, а разрушенный материал образует шарики диаметром 2...4 мм.

Для подтверждения приведенных в таблице 2.3 данных был проведен дополнительный эксперимент.

Образцы полиуретана в виде цилиндров диаметром 20 мм и высотой 24 мм помещали в горячую проточную воду, нагревали в течении часа до температуры разрушения и затем помещали под нагружающее устройство рычажного типа.

На рычаг последовательно помещали гири и в определенный момент раздавался треск, после которого без увеличения нагрузки происходило бесконтрольное увеличение деформации и разрушение образца.

Разрушение происходило по середине образца при величине относительной деформации, приведенной в таблице 2.3.

Полиуретан после деструкции в зоне разрушения имел форму шариков, которые по-видимому образуются под действием сил поверхностного натяжения.

При проведении экспериментального исследования по определению долговечности упругого полиуретанового обода было зафиксировано и измерено с помощью стрелочного индикатора с ценой деления 0,01 мм увеличение радиальной деформации ролика в результате нагрева.

Стрелочный индикатор был установлен в одной вертикальной плоскости с экспериментальным роликом, что позволяло измерять фактическую радиальную деформацию ролика. Индикатор устанавливался в кронштейне, который был прикреплен к рычагу нагружающего устройства. Ножка индикатора опиралась на



корпус экспериментальной установки и при приложении нагрузки определялась фактическая радиальная деформация ролика.

Благодаря большой жесткости корпуса экспериментальной установки и высокой точности ее изготовления, замер радиальной деформации полиуретанового ролика производился во время вращения бегового барабана. При этом суммарный радиальный бой бегового барабана и экспериментального полиуретанового ролика измеренный с помощью стрелочного индикатора составлял не более 0,01 мм.

Учитывая тот факт, что основным физическим параметром, определяющим деформативность полиуретанового ролика, является модуль упругости, путем расчетов по формуле (7.12) была построена зависимость модуля упругости полиуретана от температуры для полиуретанов твердостью 75 ShA, 85 ShA и 95 ShA (см. рисунок 2.6).

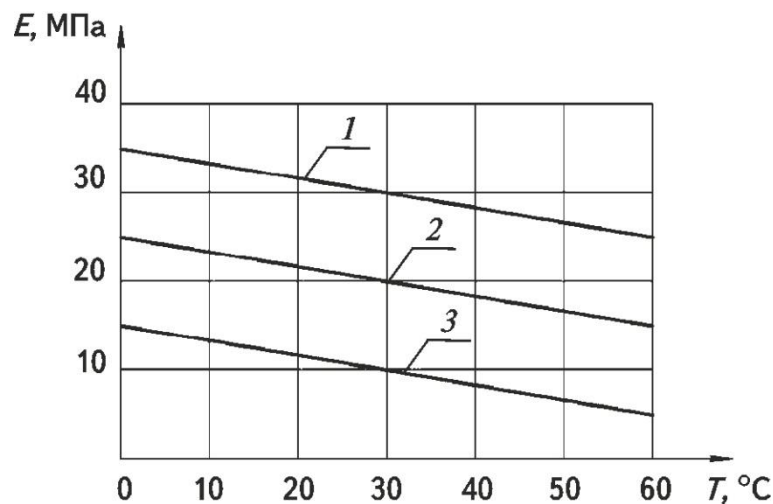


Рисунок 2.6 - Зависимость модуля упругости полиуретана от температуры:

1 – полиуретан 95 ShA; 2 - полиуретан 85 ShA; 3 - полиуретан 75 ShA

Приведенные на рисунке 2.6 зависимости хорошо аппроксимируются линейной зависимостью, в частности для полиуретана твердостью 95 ShA, она будет выглядеть следующим образом:

$$E = 35 - 0,16 T - (95 - ShA), \quad (2.7)$$

где  $E$  – модуль упругости;  $T$  – температура;  $ShA$  – твердость полиуретана в единицах по Шору.

Для подтверждения полученных расчетных зависимостей были проведены замеры модуля упругости на испытательной машине в соответствии с ГОСТ 9550-81 полиуретановых образцов предварительно нагретых в горячей проточной воде.

Результаты расчетов и испытания показали хорошее совпадение.

В основе любого деформирования полиуретана лежат сложные явления, неразрывно связанные с его молекулярным строением, обуславливающим специфичность перехода из равновесного состояния в неравновесное. Если к полиуретану приложить деформирующее усилие, то равновесие его макромолекулярных конформаций нарушится.

В дальнейшем при сохранении внешнего нагружения система будет стремиться к определенному равновесному состоянию. При этом в материале возникнут процессы, вызванные с переходом системы от неравновесного состояния к равновесному в результате теплового движения макромолекул. Эти процессы называются релаксационными и лежат в основе всех особенностей, которые сопровождают деформирование полиуретана и проявляются во временных и температурных изменениях свойств материала.

При деформировании полиуретана зависимость «сила-деформация» различна при нагружении и разгрузке образца. Образующаяся при этом, замкнутая петля, называется петлей гистерезиса, при этом она широко используется при описании виброизоляционных свойств современных конструкционных полиуретановых эластомеров.

Она представлена на рисунке 2.7, *а* и *б* и представляет собой разность между удельной работой, затраченной при нагружении и работой, полученной при разгрузке системы. Эти особенности поведения полиуретановых эластомеров обусловлены их молекулярным строением и широко используются для гашения вибраций в технике.

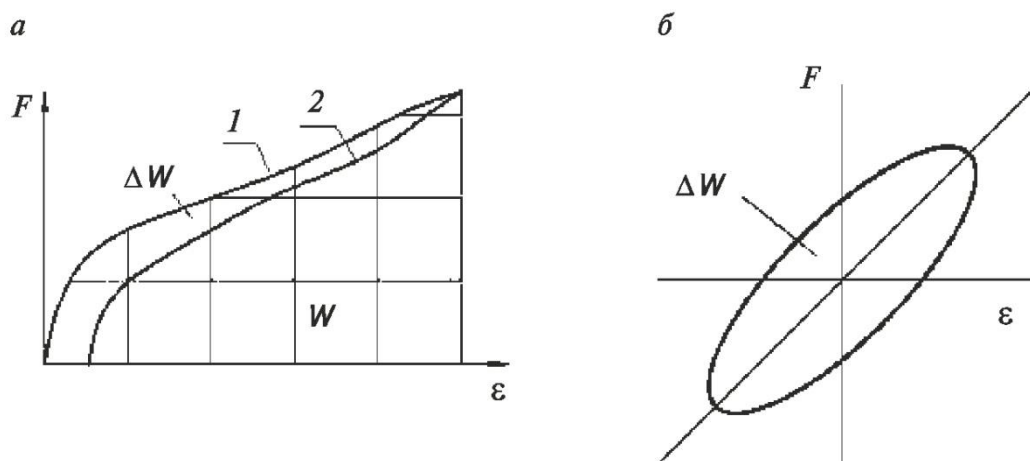


Рисунок 2.7 - Петли гистерезиса при статической (а) и циклической (б) деформациях: 1 – кривая нагружения; 2 – кривая разгрузки

Степень гашения колебаний значительно возрастает с повышением частоты вынужденных колебаний. В диапазоне частот 10...50 Гц при равной твердости полиуретаны имеют те же показатели, что и резина, причем динамические свойства мало меняются при изменении твердости [85].

Для изучения вопросов величины гистерезисных потерь и остаточной деформации, характерных для полиуретана, в зависимость от числа циклов нагружения были проведены испытания образцов полиуретана твердостью 85 ShA. Использовались цилиндрические образцы диаметром 20 мм и высотой 24 мм. Диаграмма сжатия  $F - \varepsilon$  (см. рисунок 2.8) при различных значениях числа циклов нагружения показывает возрастание остаточной деформации образца с увеличением количества циклов нагружения.

Испытания проводились при температуре окружающего воздуха 20 градусов по Цельсию.

Анализируя полученные результаты следует отметить, что рост остаточной деформации, обусловлен изменением структуры эластомера при циклическом нагружении.

Кроме того, по мере увеличения  $N$  происходит рост деформации образца при фиксированной нагрузке, что очевидно связано с размягчением полиуретана (уменьшение модуля упругости) при большом числе циклов нагружения.

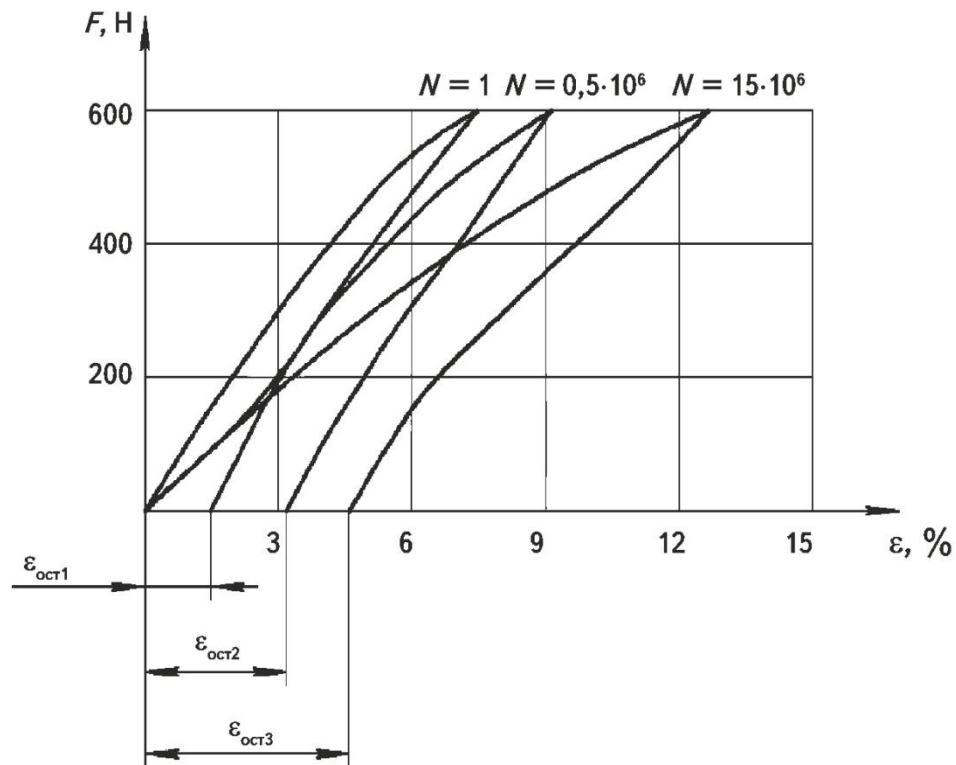


Рисунок 2.8 - Диаграмма сжатия  $F - \epsilon$  в зависимости от числа циклов нагружения для образцов из полиуретана твердостью 85 ShA

Полиуретан, как и резина относится к классу конструкционных материалов, которые принято называть эластомерами. Для эластомеров, в отличии от металлов, характерны три отличительных свойства:

- Эластичность – способность материала к большим обратимым деформациям, достигающим 250 %. При этом, у большинства металлов рабочие деформации составляют доли процента;
- Большое внутреннее трение, способное поглощать механические колебания, при этом нагреваться и рассеивать часть полученной от амортизируемого объекта энергии в виде тепла в окружающее пространство.

Величина этой энергии доходит до 45% за один цикл нагружения, это превосходит показатели других материалов на 2...3 порядка;

- Малосжимаемость – при которой модуль объемной упругости также на три порядка больше модуля упругости при сжатии.

Гашение механических колебаний в диапазоне частот от 10 до 60 Гц основывается на преобразовании кинетической энергии амортизируемого объекта в тепловую энергию с последующим ее рассеиванием (диссипацией) в окружающую среду.

Преобразование механической энергии в тепловую осуществляется благодаря внутреннему трению (гистерезису), который обусловлен вязкоупругой природой полиуретанового массива амортизатора.

Полиуретановые амортизаторы, используются для уменьшения амплитуды вынужденных циклических колебаний от недостаточно уравновешенных объектов. Они используются также для рассеяния больших количеств энергии при ударном воздействии (буфера, ограничители перемещений, швартовые кранцы и т. д.).

Расчетными характеристиками амортизатора являются его жесткость и способность уменьшать (гасить) амплитуду колебаний за счет внутреннего трения материала (гистерезис). Чем меньше жесткость полиуретанового амортизатора, тем больше его деформация и меньше частота собственных колебаний системы. Виброизоляция согласно [32, 45, 48, 92,98], будет тем лучше, чем больше отношение частот вынужденных колебаний (приходящих от амортизируемого объекта) и свободных колебаний системы, определяемых в первую очередь вязкоупругими свойствами виброизоляционного массива амортизатора.

Эффективность виброизоляторов уменьшать амплитуду колебаний характеризуется коэффициентом виброизоляции  $\eta$ , который определяется по следующему уравнению:

$$\eta = \frac{\sqrt{1 + \left(\frac{f_B}{f_C}\right)^2 \frac{4\vartheta^2}{4\pi^2 + \vartheta^2}}}{\sqrt{\left[1 - \left(\frac{f_B}{f_C}\right)^2\right]^2 + \left(\frac{f_B}{f_C}\right)^2 \frac{4\vartheta^2}{4\pi^2 + \vartheta^2}}}, \quad (2.8)$$

где  $f_B$  – частота вынужденных колебаний ( частота колебаний возбуждающей силы);  $f_C$  – частота собственных колебаний системы агрегат-полиуретан;  $\vartheta$  – логарифмический декремент затухания колебаний виброизолирующей системы.

Чем меньше коэффициент виброизоляции  $\eta$ , тем лучше виброизоляция амортизируемого объекта.

Принимая во внимание тот факт, что частота вынужденных колебаний величина заданная, то становится очевидным, что для уменьшения амплитуды колебаний необходимо снижать частоту собственных колебаний системы агрегат - амортизатор. С этой целью, в качестве конструкционного материала амортизаторов, применяют мягкие полиуретаны твердостью 40...50 ShA, в результате чего, частота собственных колебаний составляет от 4 до 8 Гц [96].

На сегодняшний день виброизоляционные свойства конструкционных эластомеров, применяемых при изготовлении амортизаторов, принято оценивать по пяти параметрам:

1. Оценка величины внутреннего трения эластомера с помощью коэффициента поглощения энергии.
2. Динамический модуль и модуль внутреннего трения эластомера.
3. Ползучесть эластомеров.
4. Циклическая прочность эластомеров.
5. Предельная температура, при которой вследствие нагрева, происходит разрушение эластомерного материала.

В данном разделе будут приведены экспериментальные данные по первым двум параметрам, данные по остальным приведены отдельно.

При сжатии полиуретана зависимость «нагрузка – деформация» различна при нагружении и разгрузке образца. Образующаяся при этом петля гистерезиса представляет собой разность между работой, затраченной при нагружении и работой, полученной при разгрузке системы.

В общем случае петля гистерезиса характеризует количество энергии, рассеиваемой в материале при его деформировании и идущей на нагрев материала, активацию химических связей и т. д.

Отношение площади петли  $\Delta W$ , заключенной между кривыми 1 и 2, (см. рисунок 2.7, а), к общей площади  $W$ , характеризующей потенциальную энергию деформированного образца, называют коэффициентом поглощения энергии  $\Psi = \Delta W/W$ .

Он составляет для полиуретанов величину от 8 до 45%. Величину  $\Psi$ , % определяют по результатам испытания образцов по следующей формуле:

$$\Psi = \frac{\int_0^{\varepsilon} F_1 d\varepsilon - \int_0^{\varepsilon} F_2 d\varepsilon}{\int_0^{\varepsilon} F_1 d\varepsilon} \cdot 100\%, \quad (2.9)$$

где  $F_1$  – кривая нагружения образца;  $F_2$  – кривая разгрузки образца.

Перед проведением испытаний, образцы должны пройти процедуру нормализации, когда их сжимают до  $\varepsilon = 20\% \dots 20$  раз (По стандарту ИСО нагружение необходимо произвести 6 раз).

При этом происходит разрушение случайных вторичных химических связей (поперечные сшивки), которые образуются при полимеризации образцов. Это разрушение сопровождается характерным потрескиванием.

Необходимо отметить, что коэффициент поглощения энергии  $\Psi$  является важнейшим параметром, который определяет выбор конструкционного полиуретана для работы конкретной конструкции.

Так, например, для буфера и демпфера (поглотителя и рассеивателя энергии) большое значение  $\Psi$  является полезным, так как упрощает конструкцию устройства, которому становится не нужным внешний элемент трения.

В тоже время, для виброизоляторов, работающих при циклических вынужденных колебаниях, большое значение  $\Psi$  при малой теплопроводности

полиуретана может привести к перегреву и тепловому разрушению полиуретанового массива амортизатора.

Коэффициент поглощения энергии  $\Psi$  полиуретановых образцов определяли на испытательной машине (см. рисунок 2.9) с механическим приводом МИ 20 – УМ с максимальным усилием  $P = 20$  кН и скоростью нагружения  $0,4$  мм/с, что соответствует скорости деформации образцов при определении модуля упругости при сжатии.

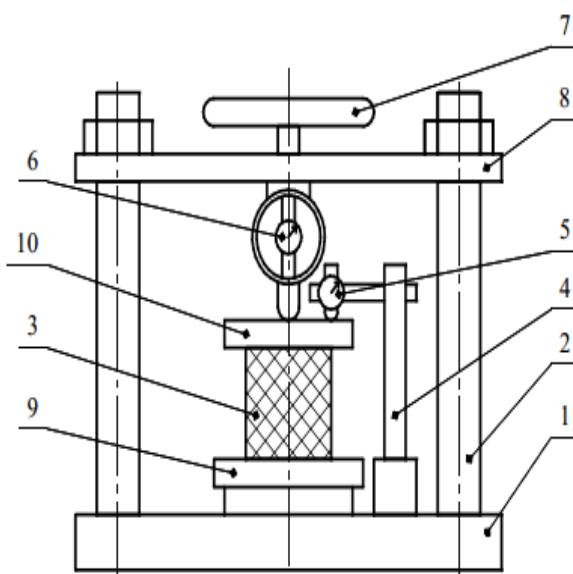


Рисунок 2.9 - Кинематическая схема установки для испытания эластомеров на сжатие: 1 – основание; 2 – направляющие стойки; 3 – образец; 4 – стойка; 5 – индикатор; 6 – кольцевой динамометр; 7 – привод; 8- траверса

В качестве устройства для измерения нагрузки при испытаниях использовали кольцевой динамометр, изготовленный из специальной термообработанной стали с улучшенными упругими свойствами. Внутри кольца для регистрации его деформации (и как следствие определения усилия, действующего на образец) располагается стрелочный индикатор с ценой деления  $0,001$  мм.

Измерение деформации образца осуществляли с помощью стрелочного индикатора с ценой деления  $0,01$  мм, закрепленного на магнитной стойке.



Анализируя полученные экспериментальные данные, можно отметить, что кривые нагружения и разгрузки являются монотонно возрастающими на данном отрезке функциями и принимают неотрицательные значения. Для вычисления интегралов согласно формуле (2.9) удобнее всего пользоваться формулой Симпсона.

Экспериментальные исследования по определению коэффициента поглощения энергии  $\Psi$  трех торговых марок (Адипрен, Вибротан и Эласт) твердостью 50 ShA, известных мировых производителей, выявили крайне незначительное различие в показателях, которое находится в пределах технической погрешности. Величина коэффициента поглощения энергии  $\Psi$  составляет при этом примерно 9,5 %.

При постоянном динамическом нагружении полиуретанов, проявляется чрезвычайно сложный характер взаимосвязи между деформацией и напряжением, который обусловлен вязкоупругой природой эластомерных материалов.

Среди важнейших характеристик материала, определяющих его поведение при постоянном динамическом нагружении, являются зависимости действительной  $E'$  и мнимой  $E''$  частей комплексного модуля от условий нагружения, которые включают в себя частотные и амплитудные зависимости:

$$E_{\text{компл}} = E' + E'', \quad (2.10)$$

где  $E'$  – действительная часть комплексного модуля эластомера;  $E''$  – мнимая часть комплексного модуля эластомера.

Действительную часть комплексного модуля эластомера называют динамическим модулем, который определяет упругую энергию, аккумулируемую эластомерным материалом при деформировании. Необходимо отметить, что динамический модуль в точности совпадает по фазе с деформацией эластомера.

Мнимая часть комплексного модуля эластомера соответствует модулю внутреннего трения эластомера, который определяет величину рассеянной энергии (диссипация) при постоянном динамическом нагружении.

Представленные характеристики (динамический модуль и модуль внутреннего трения) в значительной степени определяют виброизоляционные характеристики современных эластомерных материалов.

При экспериментальном исследовании виброизоляционных свойств эластомерных материалов широко используют в качестве характеристики тангенс угла потерь, определяемый как отношение модуля внутреннего трения к динамическому модулю материала:

$$\tan \delta = \frac{E''}{E'}, \quad (2.11)$$

где  $\delta$  – угол сдвига фаз между деформацией и напряжением внутри эластомерного материала.

Тангенс угла потерь, рассчитываемый по формуле (2.11) является важнейшей характеристикой виброизоляционных свойств эластомерных материалов, который определяет величину динамического гистерезиса и как следствие все процессы теплообразования, происходящие в виброизоляционном полиуретановом массиве виброизолятора при постоянном динамическом нагружении.

Установка для определения модуля внутреннего трения эластомерных материалов при знакопеременном изгибе с вращением в соответствии с ГОСТ 10828-75 (см. рисунок 2.10) позволяет плавно изменять скорость вращения асинхронного электродвигателя и проводить испытания во всем диапазоне механических колебаний силовых агрегатов, приходящихся обычно на диапазон от 10 до 50 Гц.

Плавное изменение частоты вращения асинхронного электродвигателя достигается использованием частотного преобразователя после модернизации экспериментальной установки.

Для эффективной работы установки вместе с частотой изменялось и подаваемое напряжение, которое менялось в зависимости от момента на валу асинхронного электродвигателя.

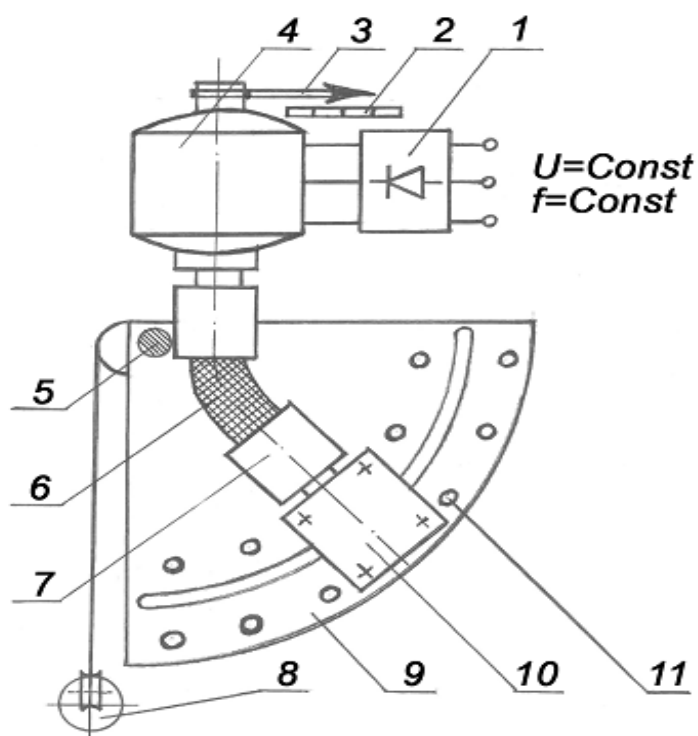


Рисунок 2.10 - Кинематическая схема установки для определения модуля внутреннего трения полиуретана при знакопеременном изгибе с вращением:  
 1 – частотный преобразователь; 2 – шкала; 3 – индикаторная стрелка; 4 – электродвигатель; 5 – ось; 6 – образец; 7 – цанговый зажим; 8 – груз; 9 – платформа; 10 – корпус; 11 – отверстие

Опытный образец 6 устанавливается в зажимах 7, первый из которых закреплен на выходном валу электродвигателя, а второй на вращающейся оси, установленной в корпусе 10. Благодаря перемещению корпуса 10 по платформе 9 мы можем задавать величину определенной относительной деформации экспериментального образца.

Для фиксации корпуса 10 в определенном положении служат отверстия 11. С помощью уравнивающего груза 8, производится измерение изгибающего момента, исследуемого эластомерного образца, необходимого для расчета динамического модуля.

Для проведения экспериментального исследования были изготовлены методом реакционного литья полиуретановые образцы (см. рисунок 2.11) трех торговых марок Адипрен, Вибротан и Эласт.

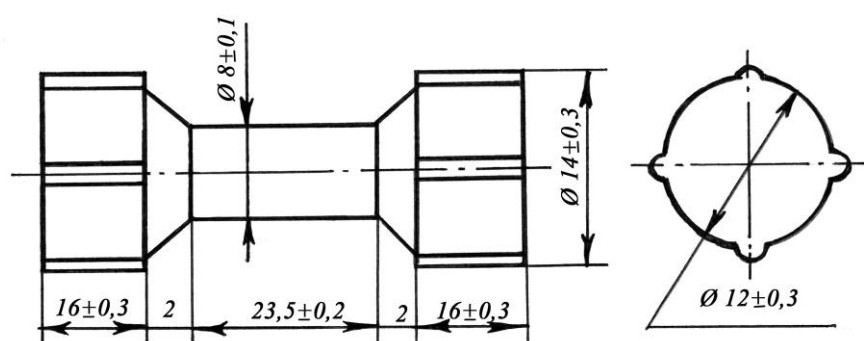


Рисунок 2.11 - Образец для определения динамического модуля и модуля внутреннего трения полиуретана при знакопеременном изгибе с вращением

После проведения экспериментального исследования были получены зависимости динамического модуля полиуретановых эластомеров (см. рисунок 2.12) трех торговых марок от частоты нагружения в диапазоне от 10 Гц до 50 Гц для относительной деформации образца  $\varepsilon = 0,2$ , так как именно эта величина относительной деформации эластомерного массива виброизолятора является рабочей.

Анализируя полученные зависимости, необходимо отметить рост динамического модуля с увеличением частоты нагружения. Это ужесточение полиуретановых эластомеров связано с невозможностью быстрой деформации макромолекул при нагружении.

Обозначенная неспособность полиуретановых эластомеров к быстрой деформации является следствием их молекулярного строения, которое в основном определяет их поведение при динамическом нагружении.

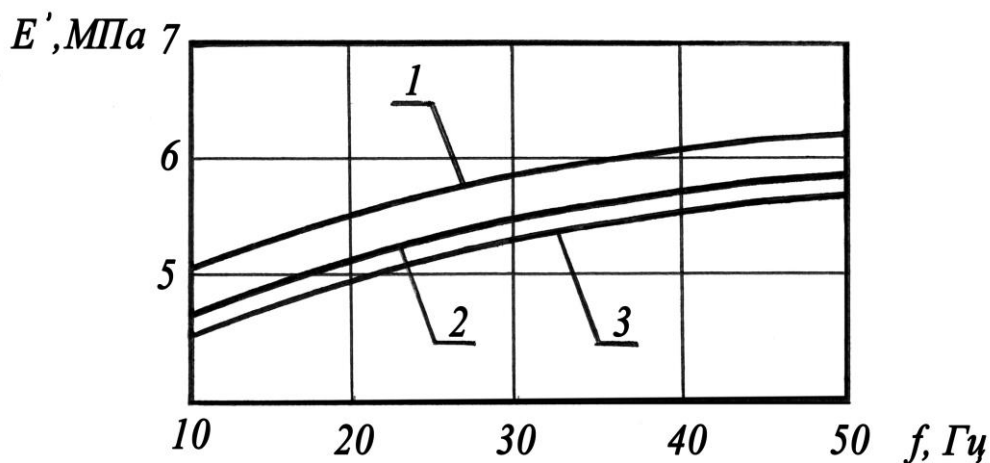


Рисунок 2.12 - Изменение динамического модуля эластомеров от частоты нагружения при амплитуде  $\varepsilon = 0,2$ : 1 - Эласт; 2 – Вибротан; 3 – Адипрен

В тоже время необходимо отметить, что происходит нагрев полиуретановых образцов при испытании от  $25^{\circ}\text{C}$  для частоты нагружения 10 Гц до  $35^{\circ}\text{C}$  для 50 Гц, который приводит к противоположному явлению – размягчению эластомера при нагревании.

На основании проведенных экспериментальных исследований были получены зависимости изменения динамического модуля полиуретановых эластомеров при частоте 37 Гц для различных амплитуд нагружения.

Данная частота выбрана на основании длительных наблюдений за работой различных силовых агрегатов и соответствует номинальной частоте вращения коленчатого вала двигателя внутреннего сгорания в 2200 об/мин.

Экспериментальное исследование физико-механических свойств опытных образцов важно производить в условиях, точно соответствующих рабочим режимам нагружения полиуретана, при его работе в условиях постоянного динамического нагружения.

Экспериментальные данные зависимости динамического модуля от амплитуды нагружения (см. рисунок 2.13) свидетельствуют о падении динамического модуля материала в соответствии с температурой нагрева. Температура нагрева виброизоляционного массива возрастает с увеличением относительной деформации сжатия, так как макромолекулы полиуретанового эластомера переходят строго ориентированное состояние и диссипативная возможность (способность виброизоляционного материала рассеивать тепло) резко падает.

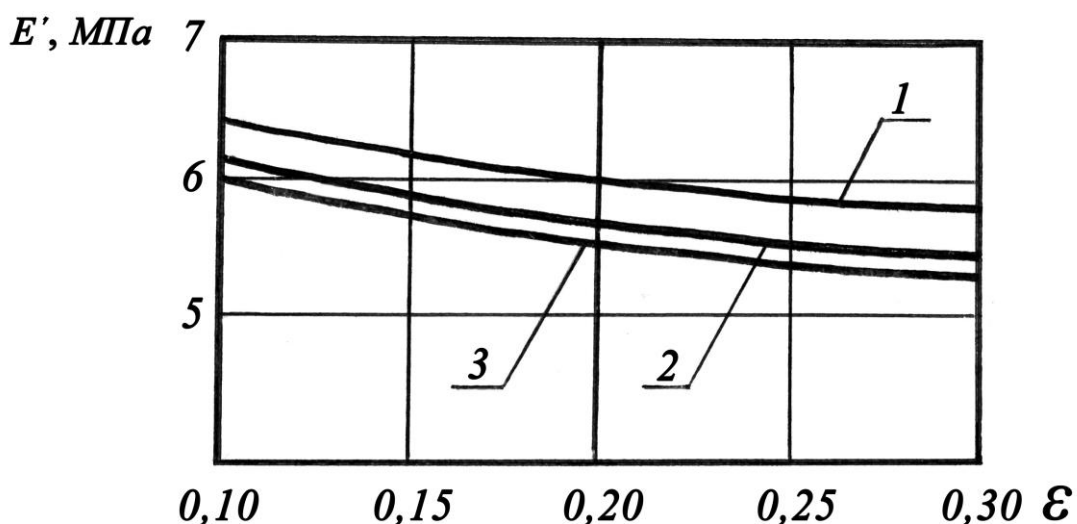


Рисунок 2.13 - Изменение динамического модуля эластомеров от амплитуды нагружения при частоте 37 Гц: 1 – Эласт; 2 – Вибротан; 3 – Адипрен

Для получения экспериментальных данных об изменении модуля упругости при циклическом нагружении, были произведены испытания полиуретановых образцов на сжатие. Образцы имели форму цилиндра диаметром 20 мм и высотой 24 мм и имели твердость 75 ShA, 85 ShA и 95 ShA. Перед испытанием проводилась стабилизация образца путем его многократного нагружения до величины средней рабочей деформации.

Затем производился замер величины модуля упругости и ему присваивалось нулевое или начальное значение  $E_{ст0}$ . Деформация образца в ходе испытания составляла  $\varepsilon = 15\%$  и скорость нагружения  $V_{лин} = 2$  м/с, что соответствует средним нагрузкам на полиуретан, используемый в качестве упругого покрытия деталей вращения в транспортном и технологическом оборудовании. В ходе эксперимента производились замеры статического модуля упругости образца через каждые 100 тысяч нагружений.

По результатам испытаний были построены зависимости статического модуля упругости при сжатии от числа циклов нагружения (см. рисунок 2.14), которые свидетельствуют об очевидном падении модуля упругости с ростом числа циклов нагружения, что связано с разрушением пространственных связей внутри эластомера.

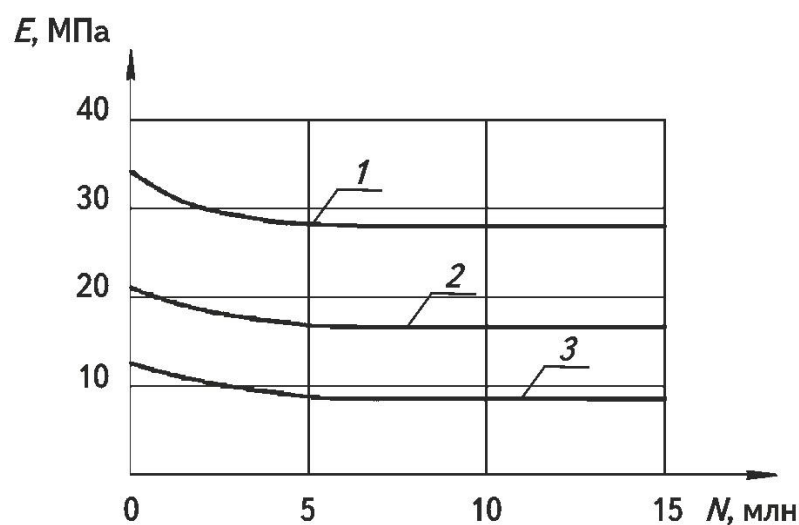


Рисунок 2.14 - Изменение статического модуля упругости при сжатии в зависимости от числа циклов нагружения:

1 – полиуретан 95 ShA; 2 - полиуретан 85 ShA; 3 - полиуретан 65 ShA

Полученные экспериментальные зависимости хорошо аппроксимируются следующей зависимостью:

$$E_{cm} = \frac{E_{cm0}}{1+0,1 N^{0,35}}, \quad (2.12)$$

где  $E_{cm}$  - статический модуль упругости при произвольном количестве циклов нагружения;  $E_{cm0}$  - начальный статический модуль упругости образца при сжатии, прошедшего стабилизацию;  $N$  - количество циклов нагружения.

После проведения испытаний образец твердостью 95 ShA от своего начального значения модуля упругости «потерял» 5 МПа, 85 ShA потерял 3 МПа и 75 ShA соответственно около 2 МПа, что составляет примерно 15 % от начальной величины.

Приведенные экспериментальные данные изменения статического модуля упругости при сжатии в зависимости от числа циклов нагружения достаточно точно характеризуют циклическую прочность данного типа полиуретана. Величину уменьшения модуля упругости или размягчения предлагается оценивать коэффициентом циклического размягчения  $K_{ц.р.}$

В нашем случае:

$$K_{ц.р.} = \frac{1}{1+0,1 N^{0,35}}. \quad (2.13)$$

Изменение модуля упругости полиуретана при сжатии в зависимости от числа циклов нагружения, представленное на рисунке 2.14, характеризует падение модуля упругости с ростом числа циклов нагружения. Согласно [27, 83], оно связано с разрушением вторичных химических связей внутри эластомера.

Кривая описывающая изменение модуля упругости полиуретана качественно совпадает с кривой Веллера, характеризующей усталостную прочность металлов.

Количество циклов нагружения в 15 миллионов, после которого падения модуля упругости не происходит, говорит о том, что прошел период стабилизации материала и дальнейшего снижения величины модуля упругости происходить не будет.

Эта величина в 15 миллионов нагружения для полиуретанов аналогична базовому числу циклов нагружения, свойственному металлам, после которого падения прочности также не происходит. 15 миллионов нагружений соответствует примерно 4200 часам работы массивной шины штабеллера-погрузчика.



Значительно большее (на порядок и выше) количество нагружений испытывают при работе полиуретановые виброизоляторы.

При проведении экспериментов по определению долговечности полиуретановых виброизоляторов, работающих на сдвиг и на сжатие в условиях динамического нагружения, проводился контрольный замер деформативности амортизатора после 30 и 50 миллионов нагружения.

Контрольный замер показал постоянство статической деформации после 15 миллионов нагружений. Таким образом мы можем считать, что величина модуля упругости при сжатии остается неизменной после 15 миллионов нагружений.

Данный коэффициент необходимо учитывать при точных расчетах деформативности полиуретановых деталей, подверженных при работе длительному динамическому нагружению.

Механические свойства полиуретана очень чувствительны к скорости нагружения. С увеличением скорости нагружения происходит увеличение модуля упругости полиуретана.

В качестве характеристики полиуретана в изделии, работающего в режиме динамического нагружения можно использовать коэффициент динамического ужесточения – отношение динамического модуля упругости к статическому.

Экспериментально была получена зависимость коэффициента динамического ужесточения от скорости нагружения для полиуретанов различной твердости:

$$K_{\partial y} = 1 + \frac{V^{1,28-0,0054 ShA}}{20-0,19 ShA}, \quad (2.14)$$

где  $V$  - линейная скорость;  $ShA$  - твердость полиуретана в единицах по Шору.

Приведенная экспериментальная зависимость (2.14) по определению коэффициента динамического ужесточения применима для расчета деталей вращения с упругим покрытием из полиуретана транспортного и технологического оборудования в интервале скоростей от 0.4 м/с до 5 м/с.

Приведенный коэффициент необходимо учитывать при расчете деформации деталей из полиуретана при динамическом нагружении.

Явление уменьшения напряжений в полиуретане с течением времени при постоянной величине деформации называется релаксацией напряжений. Явление релаксации особенно ощутимо на уплотнительных прокладках, находящихся под постоянной деформацией. Вследствие релаксации напряжений такие прокладки со временем ослабевают и теряют уплотнительные свойства.

Величина релаксации напряжений полиуретана зависит от уровня нагрузки и скорости деформирования, их значения представлены в таблице 2.4.

Таблица 2.4 - Релаксация напряжений сжатия при  $\varepsilon = 10\%$

Скорость нагружения, мм/мин	Изменение напряжений сжатия $\varepsilon$ , % через промежутки времени					
	1 мин	3 мин	5 мин	10 мин	20 мин	60 мин
1	94 %	93 %	92 %	91 %	90 %	89 %
10	95 %	94 %	93 %	92 %	91 %	90 %

В связи с релаксацией напряжений упругий обод массивной шины не может удерживаться на центре посадки с натягом и должен быть надежно закреплен с помощью адгезивов. При необходимости иметь разборную конструкцию обод должен быть армирован стальными деталями.

Особенности молекулярного строения полиуретана лежат в основе зависимости его механических свойств от времени нагружения. Если к полиуретановому образцу приложить постоянную нагрузку, то соответствующая ей деформация будет расти во времени. Этот рост деформации при постоянной нагрузке называется ползучестью. Он представлен в таблице 2.5.

Таблица 2.5 - Ползучесть при длительном нагружении

$\sigma$ , Мпа	Деформация сжатия $\varepsilon$ , % при выдержке нагрузки в течение:					
	1 мин	5 мин	10 мин	30 мин	60 мин	120 мин
2	29 %	30 %	31 %	32 %	33 %	34 %
4	40 %	42 %	43 %	43 %	44 %	45 %

Характеристика ползучести должна учитываться при проектировании массивных шин подъемно-транспортного оборудования, неизбежно испытывающих статические нагрузки в режиме стоянки.

В каталогах фирм, производящих полиуретаны, приводятся ограниченные данные об основных физико-механических параметрах выпускаемых торговых марок. К этим данным относятся: твердость по Шору,  $ShA$ ; упругость по отскоку, %; предел прочности при растяжении, МПа; модуль упругости при 100 % растяжении, МПа; удлинение при разрыве, % и сопротивление раздиру, кН/м.

Вопросы твердости полиуретанов были рассмотрены выше, поэтому перейдем к вопросу упругости по отскоку.

Испытания на упругость по отскоку заключаются в нанесении удара по испытываемому образцу с помощью жесткого бойка, падающего с определенной высоты. Так как высота отскока после удара по образцу обратно пропорциональна потере энергии, то отношение высоты отскока бойка к начальной высоте его сбрасывания может служить мерой эластичности материала. Упругость по отскоку вычисляют в процентах по формуле:

$$R = \frac{h}{H} \cdot 100\%, \quad (2.15)$$

где  $h$  – высота отскока бойка маятника после удара;  $H$  – высота подъема бойка маятника в исходном положении.

Во всех стандартных методиках в качестве ударника используют маятник, падающий с определенной высоты и ударяющий по испытываемому образцу, находящемуся с маятником в одной вертикальной плоскости. Маятники выполнены в виде сферических ударников и отличаются конструкцией в зависимости от стандарта. Для испытаний упругости по отскоку необходимо изготавливать специальные образцы в виде плоских шайб диаметром 50 мм и толщиной 6 мм.

Размеры и форма образцов, применяемых для испытания (см. рисунок 2.15), существенно влияют на получаемые в ходе экспериментальных замеров результаты.

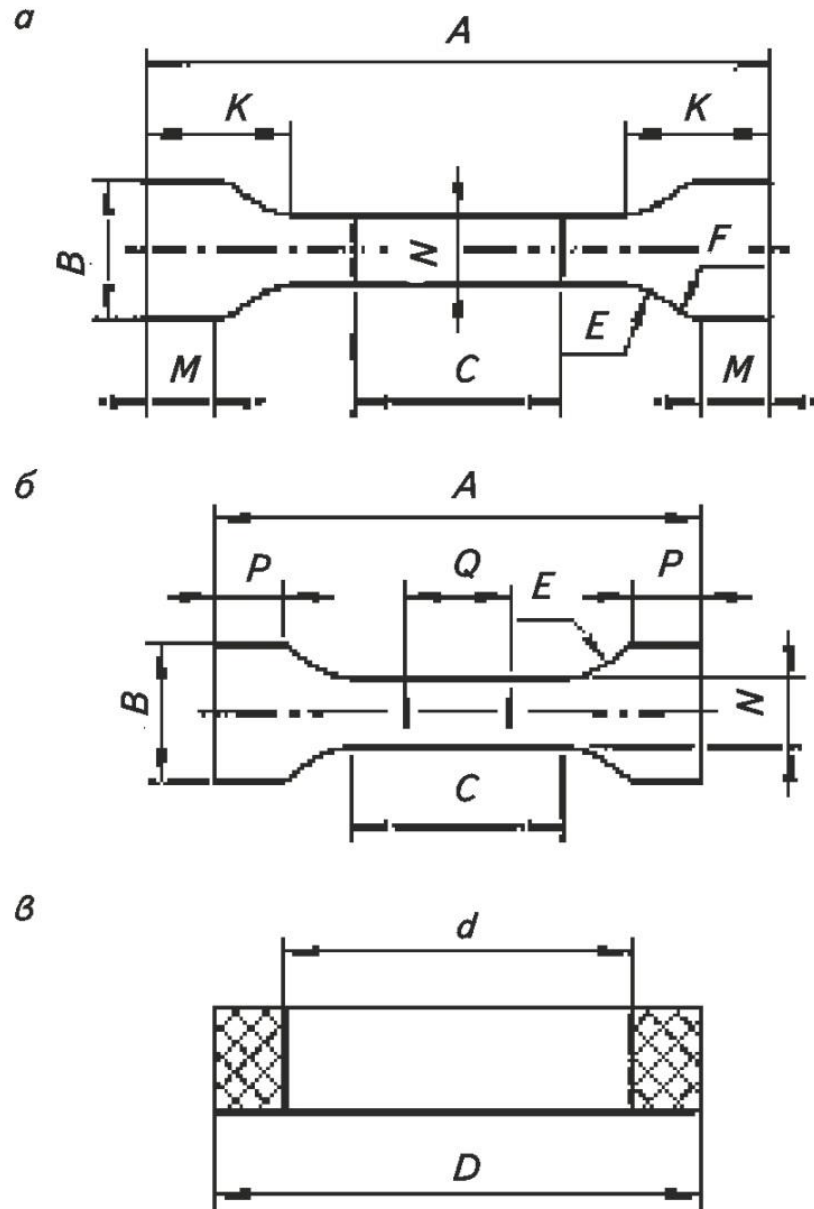


Рисунок 2.15 - Формы и размеры стандартных образцов:

*a* – по ASTM D412 и ГОСТ 270-75;

*б, в* – по DIN 53504: *A* - общая длина; *B* – ширина конца; *C* – длина центральной части, имеющей параллельные стопоры; *N* – ширина центральной части, имеющей параллельные стороны; *E* – малый радиус; *F* – большой радиус; *P, K* – длина концов; *Q* – длина рабочего участка (расстояние между внутренними метками);  $(A - 2K)$  – расстояние между зажимами (между внешними метками); *D* – наружный диаметр кольца; *d* – внутренний диаметр кольца

Основным видом испытания по определению упруго-прочностных свойств полиуретана является определение предела прочности при растяжении, обычно сопровождаемое измерением нагрузок при заданных удлинениях, определением модуля упругости при 100 % растяжении, а также удлинением при разрыве.

Применение кольцевых образцов облегчает замер деформации, но делает ее неоднородной, вследствие трения образцов о ролики. Разрыв образцов происходит раньше в более напряженных внутренних участках. Поэтому обычно на кольцевых образцах получаются заниженные показатели прочности. Помимо этого, вырубка кольцевых образцов более сложна и менее надежна, так как требует наличия строго центрированных круглых штанцевых ножей.

Образцы в виде двусторонних лопаток приняты большинством стран. Их форма выбрана таким образом, чтобы обеспечить разрыв в центральной, однородно деформируемой зоне образца (рабочем участке), где не сказывается краевой эффект. Для этого центральная часть делается существенно более узкой, чем края. При однородной деформации, зная длину рабочего участка и площадь его поперечного сечения, легко рассчитать деформацию и напряжение по измеренному расстоянию между метками и растягивающим усилием.

Сравнение размеров образцов, рекомендованных различными стандартами (отечественным, международным, американским и германским), в виде двусторонних лопаток, представлены в таблице 2.6.

Таблица 2.6 - Размеры штанцевых ножей для вырубki образцов по различным стандартам

Обозначение размера образца	Размер	ГОСТ 270-75					ISO / TS 45		ASTM D412						DIN 53504
		Тип образца													
		А	Б	В	Г	Д	І	ІІ	А	В	С	Д	Е	F	І
А	Общая длина	110	110	75	75	55	115	75	140	140	115	110	125	125	120
В	Ширина концов	25±1	25±1	12,5±1	12,5±1	9±1	25	12,5	25	25	25	16	16	16	25
С	Длина центральной части	25±1	30±1	25±1	25±1	12,5±1	33	25	59	59	33	33	59	59	15
Д	Ширина центральной части	6,5±0,3	3,2±0,2	4±0,1	2±0,1	2±0,1	6	4	12,7	6,35	6,35	3,2	3,2	6,35	5
Е	Малый радиус	14,1±0,5	14,1±0,5	8±0,5	9±0,5	7±0,5	14	8	14,3	14,3	14,3	14,3	14,3	14,3	30
F	Большой радиус	25±1	20,3±1	12,5±1	12,5±1	9±1	25	12,5	25,4	25,4	25,4	15,9	15,9	15,9	P-30*
Q	Длина рабочего участка	25±0,5	25±0,5	20±0,5	20,±0,5	10±0,25	25	20	-	-	-	-	-	-	10
А – 2 К	Расстояние между зажимами	50±1	50±1	40±1	40±1	25±1	-	-	-	-	-	-	-	-	-

\*P – расстояние от конца образца до начала закругления радиусом E.

Толщина образцов  $h_0$  в виде двусторонних лопаток  $(1,0 \pm 0,2)$  мм или  $(2,0 \pm 0,2)$  мм, кольцевых образцов  $(6 \pm 0,2)$  мм.

В качестве упруго-прочностных характеристик определяют:

1. Модуль упругости при 100 % растяжении по формуле:

$$E_{100} = \frac{F_{100} \cdot l_0}{h_0 \cdot N (l_{100} - l_0)}, \quad (2.16)$$

где  $F_{100}$  – нагрузка на образец при его 100 % растяжении;  $h_0$  – первоначальная минимальная толщина образца в рабочем участке;  $N$  – первоначальная ширина рабочего участка образца, определяемая шириной штанцевого ножа;  $l_0$  – первоначальная длина рабочей части образца;  $l_{100}$  – длина образца при 100 % растяжении.

2. Предел прочности полиуретана при растяжении, МПа:

$$\sigma_s = F / S_0, \quad (2.17)$$

где  $F$  – нагрузка, вызывающая разрыв образца;  $S_0$  – первоначальная площадь поперечного сечения образца в рабочем участке.

Для образцов прямоугольного сечения:

$$S_0 = N \cdot h_0, \quad (2.18)$$

где  $N$  – первоначальная ширина рабочего участка образца, определяемая шириной штанцевого ножа;  $h_0$  – первоначальная минимальная толщина образца в рабочем участке.

3. Относительное удлинение полиуретана  $\varepsilon_p$  при разрыве образцов выражаемое в процентах вычисляют по формуле:

$$\varepsilon_p = \frac{(l_p - l_0)}{l_0} \cdot 100\%, \quad (2.19)$$

где  $l_p$  – расстояние между метками в момент разрыва образца;  $l_0$  – расстояние между метками образца до испытания.

При испытаниях на раздир обязательным требованием является наличие на испытуемом образце участка с концентратором напряжения, от вершины которого начинается разрушение при нагружении.

Основные типы образцов, испытываемые на раздир для различных стандартов (см. рисунок 2.16).



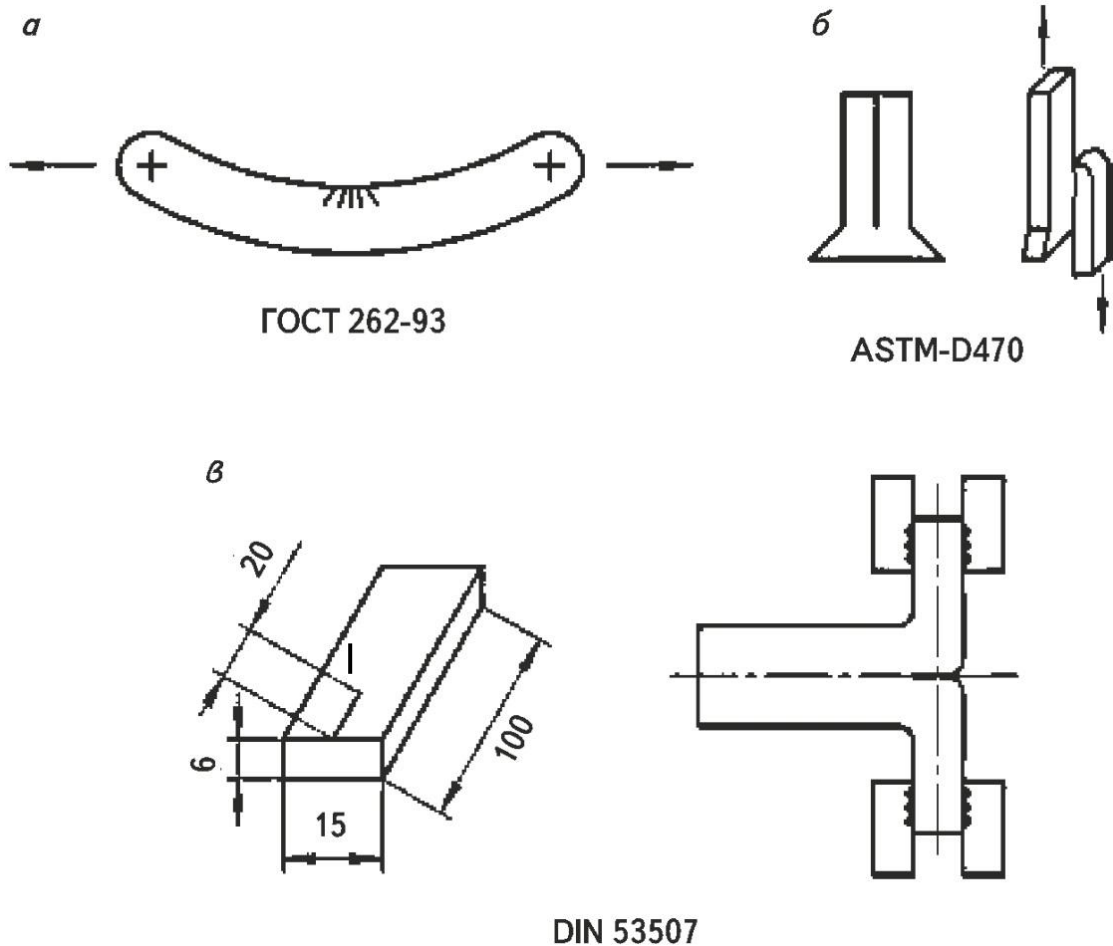


Рисунок 2.16 - Типы образцов, испытываемые на раздир:

*a* – ГОСТ 262-93; *б* – ASTM - D470; *в* – DIN 53507

Поскольку это требование можно реализовать различными способами, возникло большое количество методов, которые по способу реализации раздира были классифицированы на группы:

1. Непосредственное раздирание;
2. Раздирание перпендикулярно к направлению растяжения;
3. Расслоение по направлению растяжения.

При испытаниях образцы устанавливают в зажимах разрывной машины и растягивают со скоростью 8 мм/с при этом фиксируют максимальную силу, при разрушении образца. Сопротивление раздиру  $T_S$  в килоньютонах на метр толщины вычисляют по формуле  $T_S = F/d$ , где  $F$  – максимальная сила при раздире образца;  $d$  – толщина образца.

Основные физико-механические характеристики полиуретана торговой марки «Дуотан», представлены в таблице 2.7.

Таблица 2.7 - Физико-механические характеристики полиуретана «Дуотан» серии QA 900/A250MX

Характеристики	Полиэстер MDI					
	65	70	80	85	90	95
Твердость по Шору, А	65	70	80	85	90	95
Упругость по отскоку, %	40	38	36	35	34	30
Модуль упругости при сжатии, МПа	8	12	18	24	28	35
Удлинение при разрыве, %	550	520	500	480	460	450
Соппротивление раздиру, кН/м.	50	55	60	65	70	80

Необходимо отметить, что данная серия обладает повышенной абразивной стойкостью. Однокомпонентный полиуретан «Монотан» имеет пониженную механическую прочность при высокой абразивной стойкости. Основные физико-механические характеристики полиуретана торговой марки «Монотан», представлены в таблице 2.8.

Таблица 2.8 - Физико-механические характеристики полиуретана «Монотан»

Характеристики	Полиэфир, полиэстер, TDI			
	70	80	90	100
Твердость по Шору, А	70	80	90	100
Упругость по отскоку, %	25	24	23	22
Модуль упругости при сжатии, МПа	11	17	26	34
Удлинение при разрыве, %	600	550	500	400
Соппротивление раздиру, кН/м.	37,5	44,7	60,8	75,1

Широкому распространению в машиностроении в качестве конструкционного материала деталей машин полиуретан обязан уникальному

сочетанию присущих ему конструкционных качеств: прочности, эластичности и износостойкости [68, 78, 87,97,99].

Сравнение потребительских свойств полиуретанов и резин на основе различных каучуков, представлены в таблице 2.9.

Таблица 2.9 - Потребительские свойства эластомеров

Свойства		Каучуки					Полиуретаны
		Натуральный	Бутадиен-стирольный	Нитрильный	Неопреновый	Бутдиловый	
Предел прочности на растяжение, Мпа	Ненаполненный эластомер	Выше 21	Ниже 7	Ниже 7	Выше 21	18	28
	Наполненный эластомер	Выше 21	Выше 14	Выше 14	Выше 21	18	46
Сопротивление раздиру		Х	С	С	С/Х	С	И
Абразивная стойкость		0	Х	0	Х	С/Х	И
Старение в атмосфере		П	П	С	О	Х/О	0
Стойкость к окислению кислородом		Х	Х	С	Х	Х	О
Стойкость к углеводородам	Алифатическим	П	П	О	Х	П	О
	Ароматическим	П	П	С	С	П	Х
Стойкость к нефти и маслам		П	П	О	Х	П	О

Примечание. Обозначено: И – исключительно; О – отлично; Х – хорошо; С – средне; П – плохо

Полиуретан практически лишен таких недостатков, как затвердевание и растрескивание, свойственное широкому классу конструкционных резин, когда на несопряженных поверхностях образуется сетчатая структура и начинается растрескивание материала. На первом этапе определяется картина сетчатой

структуры, а на втором образуются углубления в материале, которые являются источником дальнейшего разрушения.

Стоимость полиуретана несколько выше, чем резины. Однако совокупный экономический эффект применения полиуретана вместо резины оказывается высоким как благодаря большей долговечности изделий, так и за счет применения энергосберегающих технологий синтеза компонентов и их промышленной переработки.

Все основные свойства эластомеров зависят от окружающей среды, которая может вызывать в материале физические или механические изменения. Физические изменения в большинстве случаев (хотя и не везде) обратимы. Так, полиуретаны набухают в некоторых жидкостях. Однако, если образцы удалить из этой среды и высушить, они восстановят свои первоначальные размеры. Это не всегда верно в отношении других эластомеров или пластмасс, так как они могут содержать пластификаторы, которые вымываются данной жидкостью. В этом случае происходит необратимая усадка материала.

В полиуретанах, подвергающихся действию высоких температур, могут происходить два процесса: временное ухудшение свойств, вызванное общим ослаблением связей и деструкция – разрушение материала, при котором происходит необратимое изменение химической структуры.

В первом случае все свойства меняются в одинаковой степени. Для большинства полиуретанов согласно [68], показатели упругости при 45...55 °С составляют лишь 50 % от величин при комнатной температуре. Аналогичные значения получены и для прочностных свойств и истираемости, так что неизбежен вывод о нецелесообразности эксплуатации полиуретанов при температуре выше 70 °С. Это явление свойственно не только полиуретанам, оно наблюдается в той или иной степени у всех синтетических каучуков.

Второй процесс – деструкция. Деструкция – это процесс разрушения материала, который обычно протекает при температуре 70...80 °С, и начинается у полиуретанов с разрушения вторичных химических связей (поперечных сшивок).

При низких температурах полиуретановые эластомеры изменяют свои свойства, но деструкции при этом не происходит и изменения носят обратимый характер. Главное изменение заключается в увеличении модуля упругости при температуре ниже  $0^{\circ}\text{C}$ , что сопровождается увеличением показателей твердости, сопротивления разрыву, жесткости при кручении и снижением эластичности. Две из перечисленных величин могут ограничить использование полиуретана при низких температурах – это уменьшение эластичности и увеличение жесткости.

Нижний предел температуры, при котором возможно использование ПУ в качестве конструкционного материала находится в пределах  $-20^{\circ}\text{C} \dots -30^{\circ}\text{C}$ . Температура стеклования полиуретана – это температура, при которой материал становится хрупким, находится в пределах  $-30^{\circ}\text{C} \dots -40^{\circ}\text{C}$ . Она зависит от упорядоченности молекулярной структуры полиуретана. Хотя все полиуретаны становятся значительно более жесткими при низких температурах, хрупкость обычно не проявляется, пока температура не снизится до  $-40^{\circ}\text{C} \dots -60^{\circ}\text{C}$ .

При длительной эксплуатации полиуретановой конструкции в ней происходят необратимые процессы, приводящие в конечном итоге к изменению физико-механических характеристик материала. Такие процессы согласно [64] обусловлены циклической усталостью и старением полиуретана. При этом циклическую усталость связывают с воздействием механических факторов, а понятие «старение» охватывает все действующие факторы: механические, физические и химические, которые вызывают необратимые изменения свойств материала.

Старению полиуретана согласно [40], способствует длительное соприкосновение с атмосферным воздухом. Под действием кислорода и влаги воздуха, особенно при более высокой температуре и под воздействием солнечных лучей, на поверхности полиуретана образуется сетка мелких трещин, полиуретаны меняют цвет на более темный, теряют свою эластичность и прочность. Интенсивность старения полиуретана зависит главным образом от состава полиуретана и уменьшается при добавлении в него противостарителей.

### 2.3 Экспериментальная установка для исследования долговечности и изнашивания полиуретанов

Единственным надежным способом, позволяющим однозначно ответить на вопрос, каково сцепление и износ, а также долговечность полиуретанового обода в эксплуатации, является в настоящее время проведение испытаний в условиях, характерных для эксплуатационного режима.

С учетом вышеизложенного при постановке настоящей работы было намечено решить следующие задачи:

1. Спроектировать и изготовить специальный стенд для испытания полиуретановых роликов и образцов.
2. Получить зависимости для определения интенсивности изнашивания полиуретановых роликов при качении с проскальзыванием.
3. Исследовать зависимость коэффициента трения скольжения и интенсивности изнашивания от нагрузки и скорости для полиуретанов различной твердости при трении без смазки.
4. Получить зависимость для определения долговечности и надежности сцепления полиуретановых шин с бетонным полом в зависимости от скорости нагружения и величины относительной деформации обода для полиуретанов различной твердости.

Испытательный стенд относится к барабанному типу [20] с вращающейся наружной рабочей поверхностью. В качестве двигателя используется мотор-редуктор мощностью  $P_{эл} = 0,75$  кВт и частотой вращения выходного вала  $n_{вых} = 40$  об/мин.

На кинематической схеме экспериментальной установки (см. рисунок 2.17) представлены основные элементы, определяющие проведение экспериментального исследования.

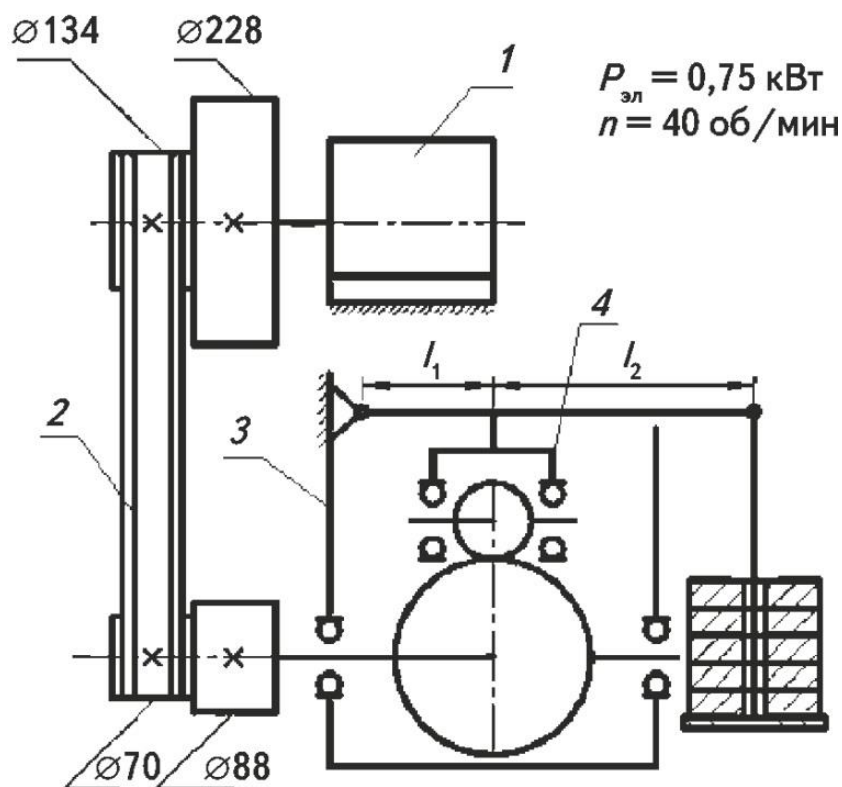


Рисунок 2.17 - Кинематическая схема установки: 1 – мотор – редуктор; 2 – ременная передача; 3 – корпус установки; 4 – кронштейн с роликами

Повышающая клиноременная передача позволяет получить 4 различные линейные скорости в точке фрикционного контакта полиуретанового образца и бегового барабана диаметром 146 мм, выступающего в роли контртела.

Эти скорости 1; 0,8; 0,6; 0,4 м/с примерно соответствуют скоростям работы современного технологического и транспортного оборудования.

При проектировании нагружающего устройства необходимо было сделать выбор между нагружением с помощью пружин или с использованием силы тяжести от подвешенных грузов.

Учитывая тот факт, что пружины не всегда надежны, и в номинальную нагрузку легко вносятся погрешности, в частности из-за влияния температуры, было решено нагружение полиуретановых образцов или роликов производить с использованием силы тяжести от подвешенных грузов.

В качестве нагружающего устройства в экспериментальной установке используется рычаг второго рода. На рычаге имеется 2 различных места для крепления кронштейнов: в первом случае в кронштейне установлен цанговый зажим с полиуретановым образцом для его испытания в режиме скольжения, во втором случае в кронштейне на подшипниках качения устанавливается полиуретановый ролик для проведения испытаний в режиме качения. Для наглядности беговой барабан и экспериментальный ролик условно повернуты на 90 градусов.

Нагружающее устройство (см. рисунок 2.18) позволяет проводить испытания полиуретановых образцов в режиме скольжения.

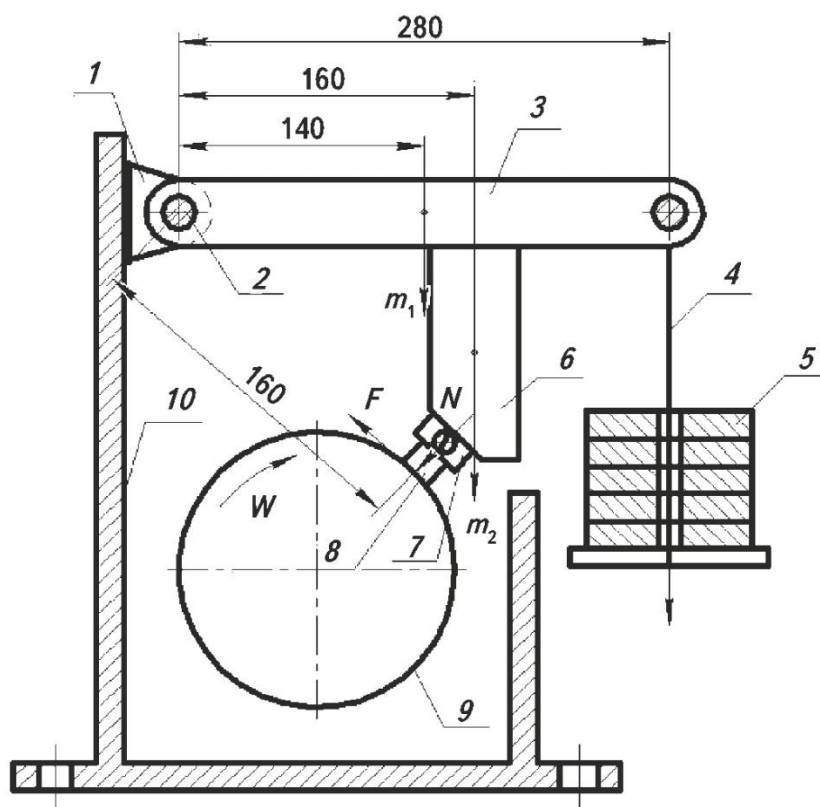


Рисунок 2.18 – Нагружающее устройство для испытания образцов в режиме скольжения: 1- проушина; 2 – ось; 3 – рычаг; 4 – подвес; 5 - груз; 6 – кронштейн; 7 – цанга; 8 – образец; 9 – барабан; 10 – корпус

Нормальная нагрузка  $N$ , действующая на образец, равна нагружающему моменту, деленному на плечо, равное 160 мм. Нагружающий момент состоит из 4



частей: трех постоянных и одной переменной. Постоянными являются масса рычага, массы кронштейнов и масса подвеса. Переменной является масса, которую мы вешаем на подвес.

Для минимизации погрешности нагружения было произведено экспериментальное определение центра тяжести рычага в сборе с одним кронштейном, а затем с другим. Эти данные о рычажной системе были использованы для расчета тарировочных постоянных и для построения тарировочных диаграмм, устанавливающих соответствие между величиной груза помещенного на подвес и нагрузкой, приложенной к образцу.

При отсутствии грузов на подвесе нормальная нагрузка, действующая на образец, определенная по правилу моментов (как частное от деления нагружающего момента на плечо приложения силы)  $N = 60$  Н.

Данная нагрузка распределяется по номинальной площади контакта  $S_H$ , очерченной габаритными размерами барабана и испытуемого образца.

Полиуретановые образцы изготавливались в виде цилиндра диаметром 20 мм и высотой  $H = 12$  мм. Половина высоты (см. рисунок 2.19) используется для зажима в цанге, а вторая половина предназначена непосредственно для истирания по абразивной поверхности.

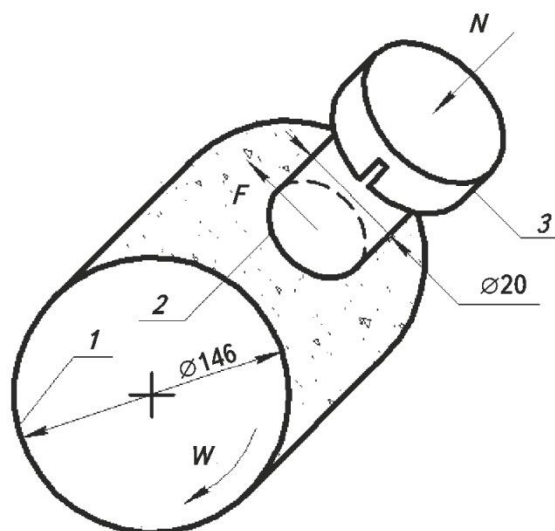


Рисунок 2.19 - Определение номинальной площади контакта: 1 – барабан; 2 – образец; 3 – цанга

Номинальная площадь контакта  $S_H$  определяется следующим образом:

$$\begin{aligned}
 S_H &= 2\pi \int_{\sqrt{R^2-r^2}}^R \sqrt{1+y'^2} \cdot y dx = 2\pi \int_{\sqrt{R^2-r^2}}^R \sqrt{1 + \frac{x^2}{R^2+r^2}} \cdot \sqrt{R^2+r^2} \cdot dx = \\
 &= 2\pi R \int_{\sqrt{R^2-r^2}}^R dx = 2\pi R(R - \sqrt{R^2-r^2}).
 \end{aligned} \tag{2.20}$$

При  $R = 73$  мм и  $r = 10$  мм,  $S_H = 315$  мм<sup>2</sup>.

Таким образом при отсутствии грузов на подвесе в соответствии с тарировочной диаграммой нормальное давление составляет  $P = \frac{F}{S_H} \approx 0,2$  МПа. Для получения  $P = 0,4$  МПа на подвесе необходимо поместить груз массой  $m_4 = 4,3$  кг, для  $P = 0,6$  МПа  $m_4 = 8$  кг и т.д.

Для измерения силы трения в электрической цепи последовательно включен ваттметр и микроамперметр для точного измерения потребляемой электрической мощности.

Таким образом, можно изучать влияние на изнашивание и долговечность полиуретана следующих параметров: нормальной нагрузки, скорости нагружения и твердости полиуретана.

Недостатком данного экспериментального стенда является увеличенная радиальная деформация испытуемого полиуретанового ролика и уменьшенная длина контакта ролика с беговым барабаном, в отличие от контакта с жестким основанием.

Для устранения данного недостатка замер радиальной деформации в зависимости от нагрузки производился с использованием фальшплощадки (см. рисунок 2.20), у которой поверхность  $A$ , имеет шероховатость, свойственную для сухого бетонного пола.

Фальшплощадка была изготовлена из алюминиевого сплава. На поверхности  $A$  с помощью шарошки была нанесена шероховатость, имитирующая поверхность бетонного пола.

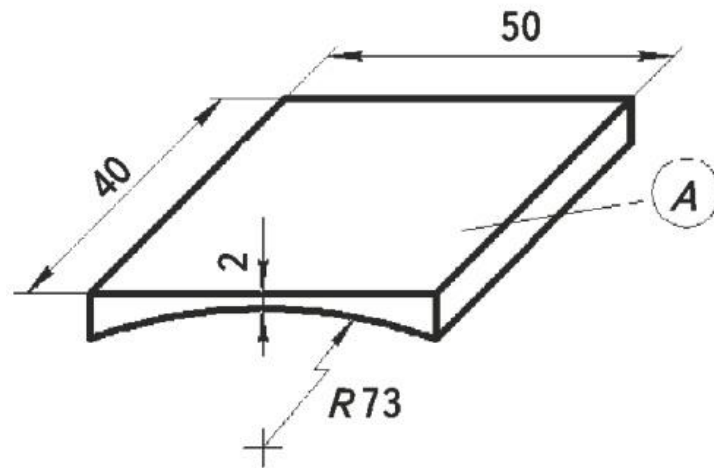


Рисунок 2.20 - Фальшплощадка для замера радиальной деформации

В ходе экспериментальных исследований электрическая часть установки была дополнена частотным преобразователем, благодаря которому стало возможно бесступенчатое изменение скорости во фрикционном контакте экспериментального ролика с беговым барабаном.

#### 2.4 Методика экспериментального исследования

Важнейшей составной частью научных исследований в современном машиностроении является эксперимент, основу которого составляет научно поставленный опыт с точно учитываемыми и управляемыми условиями проведения.

Основной частью нашего экспериментального исследования является изучение физико-механических свойств новых для нашей промышленности современных конструкционных полиуретанов, а также проверка справедливости научных гипотез, и на этой основе широкое и глубокое изучение темы научного исследования.

Дополнительное изучение физико-механических свойств конструкционных полиуретанов проводилось в лабораторных условиях с применением типовых

приборов с использованием специально спроектированной и изготовленной экспериментальной установки.

Для моделирования процессов, происходящих в упругом полиуретановом покрытии, например, массивной шины, работающей в режиме постоянного динамического нагружения, изучалось влияние одних параметров нагружения при варьировании других. Это экспериментальное исследование позволяет получить добротные сведения о поведении материала с требуемой повторяемостью.

Экспериментальное исследование физико-механических свойств конструкционных полиуретанов проводилось с использованием роликов с упругим полиуретановым покрытием в режиме качения и полиуретановых образцов цилиндрической формы в режиме скольжения.

Для экспериментального определения долговечности были изготовлены три партии полиуретановых роликов твердостью 75 ShA, 85 ShA и 95 ShA.

Ролики имели наружный диаметр 46 мм, ширину 20 мм и толщину полиуретанового обода 6 мм.

Данные размеры соответствуют приобретенным практикой пропорциям обода:

- относительная толщина  $h/D = 0,08 \dots 0,14$  (при меньшей толщине уменьшается демпфирующая способность полиуретанового обода, повышается уровень шума генерируемого колесом при его качении и возрастает вероятность отслаивания обода от центра)

- относительная ширина  $b/D = 0,2 \dots 0,5$  (при большей ширине обода вероятность неравномерного распределения линейной нагрузки в связи с перекосом колеса)

В серии экспериментов изучалось влияние параметров нагружения ролика (линейная скорость и величина относительной деформации обода) на температуру его нагрева, так как рабочая температура полиуретанового массива в конечном счете определяет долговечность изделия.

При проведении экспериментального исследования нагружение полиуретановых роликов производилось в заранее намеченных пределах относительной деформации упругого обода, которые примерно соответствуют рабочему диапазону нагружения.

В частности, для полиуретана твердостью 75 ShA эти пределы составляют от 10 до 20, для 85 ShA от 8 до 18 и для 95 ShA от 5 до 15 процентов. Нагружение производилось с интервалом 2 процента.

Линейная скорость в контакте экспериментального полиуретанового ролика и стального бегового барабана определена кинематической схемой установки и составляет соответственно: 0,4; 0,6; 0,8 и 1 м/с.

Таким образом мы можем производить экспериментальное исследование по определению влияния на нагрев и как следствие на долговечность следующих параметров: величины относительной деформации обода, линейной скорости и твердости полиуретана.

Методика проведения эксперимента, которая определяет последовательность умственных и физических действий, для достижения цели исследования, выглядит следующим образом:

1. В кронштейн экспериментальной установки на подшипниках качения устанавливается полиуретановый ролик определенной твердости.

2. Ременная передача экспериментальной установки настраивается на определенную скорость.

3. В соответствии с тарировочными диаграммами, на подвес нагружающего устройства устанавливается определенный груз, который обеспечивает требуемую величину относительной деформации упругого полиуретанового обода. Причем величина относительной деформации обода лежит в заранее намеченных пределах и благодаря высокой точности изготовления и высокой жесткости экспериментальной установки, непосредственно во время проведения исследования можно с помощью стрелочного индикатора фиксировать радиальную деформацию ролика.

4. Включается вращение установки и по прошествии примерно 15 минут, когда наступает температурный баланс между количеством теплоты выделяемым в результате деформации обода и количеством теплоты, рассеиваемой в окружающую среду, производится останов вращения экспериментальной установки и замер температуры нагрева упругого покрытия с помощью термопары.

5. Затем на подвес нагружающего устройства помещаются дополнительные груза, которые обеспечивают увеличение относительной деформации обода на 2 процента и эксперимент повторяется.

6. По прошествии всего диапазона нагрузок, производят перестройку экспериментальной установки на другую линейную скорость и эксперименты продолжаются.

Полученные экспериментальные данные заносятся в таблицу и в дальнейшем обрабатываются методами математической статистики.

В нашем экспериментальном исследовании ролики применяются также для получения эмпирических зависимостей по интенсивности циклового изнашивания массивных шин в режиме качения с проскальзыванием по абразивной поверхности, имитирующей шероховатость цементобетонного покрытия производственного пола.

В качестве базы при проведении данных испытаний принимаем 1 миллион нагружений, что соответствует примерно 40 часам испытаний при  $V_n = 1 м/с$  и пробегу 144 км.

Отдельная серия экспериментов в диссертационном исследовании посвящена изучению вопросов изнашивания полиуретанов различной твердости в контакте с различными поверхностями в режиме скольжения.

Методика проведения экспериментального исследования незначительно отличается от описанной ранее и здесь приводится не будет. Характер научного исследования будет понятен при ознакомлении с главой посвященной трению и износу полиуретанов в контакте с различными поверхностями в режиме скольжения.

## 2.5 Методика обработки экспериментальных данных

Очень важным вопросом любого экспериментального исследования является выбор методов обработки и анализа полученных экспериментальных данных.

Обработка экспериментальных данных сводится к систематизации полученных в ходе проведения эксперимента цифр, их классификации и подробному анализу. При этом результаты экспериментов должны быть сведены в удобочитаемые формы записи, такие как таблицы и графики.

Конечной целью при обработке экспериментальных данных является установление эмпирических зависимостей, описывающих те или иные процессы, происходящие в молекулярной структуре полиуретана и определяющие его поведение при тех или иных параметрах нагружения.

Кроме того, к целям экспериментального исследования можно отнести аппроксимацию связей между различными параметрами, установление критериев работоспособности, доверительных интервалов и т. д.

Результаты экспериментального исследования должны безусловно отвечать трем статистическим требованиям:

- минимальная дисперсия отклонения относительно неизвестного параметра;
- требование состоятельности оценок, при котором с увеличением числа испытаний оценка исследуемого параметра должна стремиться к его истинному значению;
- отсутствие систематических ошибок в процессе вычисления параметров.

Вся процедура обработки экспериментальных данных может быть разделена на 2 этапа.

На первом этапе производится первичная обработка данных, полученных во время проведения экспериментального исследования с целью определения предполагаемых результатов в соответствии с разработанной ранее научной гипотезой. К этому этапу относится и статистическая обработка полученных во время проведения эксперимента данных, позволяющая произвести отбраковку ошибочных сведений.

Так в частности, согласно ГОСТ 420-77 при проведении стандартных испытаний на изнашивание эластомерных материалов в режиме скольжения, в качестве результата испытания принимаем среднее значение для трех образцов при одинаковых условиях нагружения при условии, что они отличаются от среднего не более чем на 10%.

В заключении, полученные данные экспериментального исследования для удобства использования и лучшей наглядности сводим в таблицу. Обычно это достаточно большое количество однотипных измерений и лучшей формой их представления является таблица.

На втором этапе, по полученным при экспериментальном исследовании данным, строят графики, и благодаря аппроксимации с помощью математических формул, описываем происходящие в полиуретане, изменения физико-механических свойств с наименьшей погрешностью.

Графики дают визуальное представление о связи между величинами, что крайне важно при интерпретации полученных экспериментальных данных, так как графическая информация легко воспринимается, вызывает больше доверия и обладает значительной емкостью.

На основе графика легче сделать вывод о соответствии теоретических расчетов экспериментальным данным исследования. На основе графического представления исследуемых зависимостей в данной работе представлена большая часть экспериментального исследования.

Подобная обработка всегда проста и наглядна, не требует сложных вычислений, взамен мы получаем вполне приемлемые по точности результаты.

Главными параметрами, которые определяют поведение полиуретана при динамическом нагружении являются:

- линейная скорость, которая изменяется от 0,4 м/с до 1 м/с;
- нормальное давление в контакте ролика или образца с твердой поверхностью, которое изменяется от 0,2 МПа до 2,5 МПа.

Большинство приведенных в данной работе экспериментальных зависимостей распространяется на группу конструкционных полиуретанов твердостью от 75 ShA



до 95 ShA. Таким образом наше исследование касается трех переменных и целью экспериментального исследования является установление зависимостей в заранее намеченных пределах изменения переменных.

В подобных случаях целесообразнее всего использовать, при обработке экспериментальных данных, факториальный анализ и вывести отдельное влияние каждой переменной на результат эксперимента. Этот вопрос мы не будем обсуждать здесь подробно, но для детального ознакомления можно рекомендовать книгу Фишера [71].

Перед проведением каждого экспериментального исследования составлялась программа, где определялась цель исследования, обосновывалось количество измерений.

Первая серия экспериментов относится к прямым измерениям, в результате которых, методом наименьших квадратов, получены эмпирические зависимости описывающие физико-механические свойства полиуретана, как конструкционного материала деталей машин.

При планировании экспериментальных исследований по изучению вопросов трения и изнашивания мы исходили из необходимости получения эмпирических зависимостей доверительный интервал которых составлял бы 0.95.

Принимая во внимание высокую стабильность физико-механических свойств полиуретановых эластомеров, с целью минимизации затрат на проведение испытаний, было принято решение ограничить количество измерений и принять его равным  $n = 12$ , при этом коэффициент Стьюдента был равен  $t = 2.20$ .

Более сложных методов математической обработки потребовала обработка данных усталостных испытаний.

Как известно, важнейшей задачей усталостных испытаний является экспериментальное определение зависимости между выносливостью экспериментального полиуретанового ролика и режимом его нагружения.

В связи с определенным рассеянием долговечности (количество часов до разрушения), испытание одного ролика на данном уровне нагружения является недостаточным, поэтому на одном уровне испытывается несколько роликов.

Такая последовательность повторения простых испытаний называется многократными испытаниями.

Результаты испытаний представляются парой чисел  $\varepsilon$ ,  $N$ , которые обеспечивают более точное значение среднего или медианы, кроме того, такие испытания дают возможность получить среднюю характеристику рассеяния (диссипация), которая обычно измеряется средним квадратичным отклонением, а когда количество испытываемых роликов на каждом уровне нагружения достаточно велико, то можно получить статистическое распределение долговечности.

Известно, что усталостные испытания стоят достаточно дорого и требуют много времени. Поэтому, при планировании серии испытаний необходимо ориентироваться на получение максимальных сведений при наименьших затратах.

С этой целью необходимо применять эффективные статистические методы с полным использованием данных, полученных в результате испытаний.

Исходя из опыта статистической обработки результатов циклических усталостных испытаний резин [5, 8], было принято решение для одного уровня деформации испытывать 3 ролика.

Полученные в результате экспериментального исследования значения числа циклов нагружения до разрушения роликов, наносили на логарифмически нормальную вероятностную бумагу. По оси абсцисс в логарифмическом масштабе откладывали в возрастающем порядке долговечность роликов при циклическом нагружении.

Ординаты точек при этом подсчитывали по формуле, предложенной Вейбуллом [5], а также для сравнения по формуле, предложенной Хальдом [71]. В результате сравнения приходим к выводу, что для оценки вероятности разрушения при построении функций распределения логарифмов долговечностей следует рекомендовать формулу Вейбулла, обуславливающую меньшую систематическую ошибку по сравнению с формулой Хальда.

В теории вероятности для описания функции распределения (наработки до отказа) чаще всего используют нормальное, логарифмически нормальное, Вейбулла и экспоненциальное теоретическое распределение случайной величины.

Для аппроксимации результатов усталостных испытаний и определения вероятности отказа, вызванного процессом деструкции полиуретана, наиболее подходящим является распределение Вейбулла.

В частности, оно широко используется для описания распределения наработки до отказа подшипников качения, происходящего в результате усталостного выкрашивания контактирующих поверхностей.

В заключении необходимо отметить, что при проведении экспериментального исследования по изучению изменения физико-механических свойств полиуретана при постоянном динамическом нагружении, мы во много ориентировались на проведение подобных исследований касающихся резин. У полиуретана и резины есть один важный объединяющий их признак – это эластичность, способность к большим обратимым деформациям.

Но, так как полиуретан, это более совершенный материал, и он обладает значительно большей, по сравнению с резиной стабильностью физико-механических свойств экспериментальное исследование по сравнению с резинами оказалось менее затратным.

## **2.6 Выводы по главе 2**

1. Подтверждены высокие потребительские качества полиуретана в сравнении с резинами.

2. Экспериментальным путем получены важнейшие физико-механические свойства полиуретана, как конструкционного материала деталей машин, которые в дальнейшем необходимо использовать при конструировании эластомерно-металлических деталей.

3. Для дальнейшего исследования и создания методики проектирования эластомерно-металлических деталей разработана и изготовлена экспериментальная установка для исследования вопросов долговечности и изнашивания полиуретанов.

## **Глава 3 Разработка технологии отливки заготовок и выбор эффективного способа дальнейшей механической обработки эластомерно-металлических деталей**

### **3.1 Экспериментальная отработка временных и температурных режимов отливки деталей машин из полиуретана**

Конструкция эластомерно-металлических деталей жестко связана с технологией их изготовления. В данном разделе основное внимание будет уделено двум аспектам: технологии литья эластомерно-металлических деталей с упругим слоем, а также механической обработке упругого слоя методами резания, фрезерования и шлифования.

Исследование новых и не изученных в России эластомеров потребовало отработки временного и температурного режимов переработки полиуретанов. Опыт механической обработки резиновых покрытий не может быть полностью перенесен на полиуретаны в связи с определенными различиями физико-механических свойств этих эластомеров.

В разделе заново выбраны рациональные методы и режимы механической обработки эластомеров применительно к литым полиуретанам.

Для изготовления литейных форм эластомерно-металлических деталей с упругим покрытием из полиуретана могут быть согласно [4, 9, 14, 15, 59] использованы различные материалы, не выделяющие газы при нагревании до 130...150<sup>0</sup>С.

При быстром прототипировании применяют силикон или формовочные полиуретаны. При серийном промышленном производстве предпочтение отдается металлам, преимущественно сталям.

Рекомендуемая шероховатость внутренних поверхностей формы (см. рисунок 3.1) не более  $Ra\ 1,25$ .

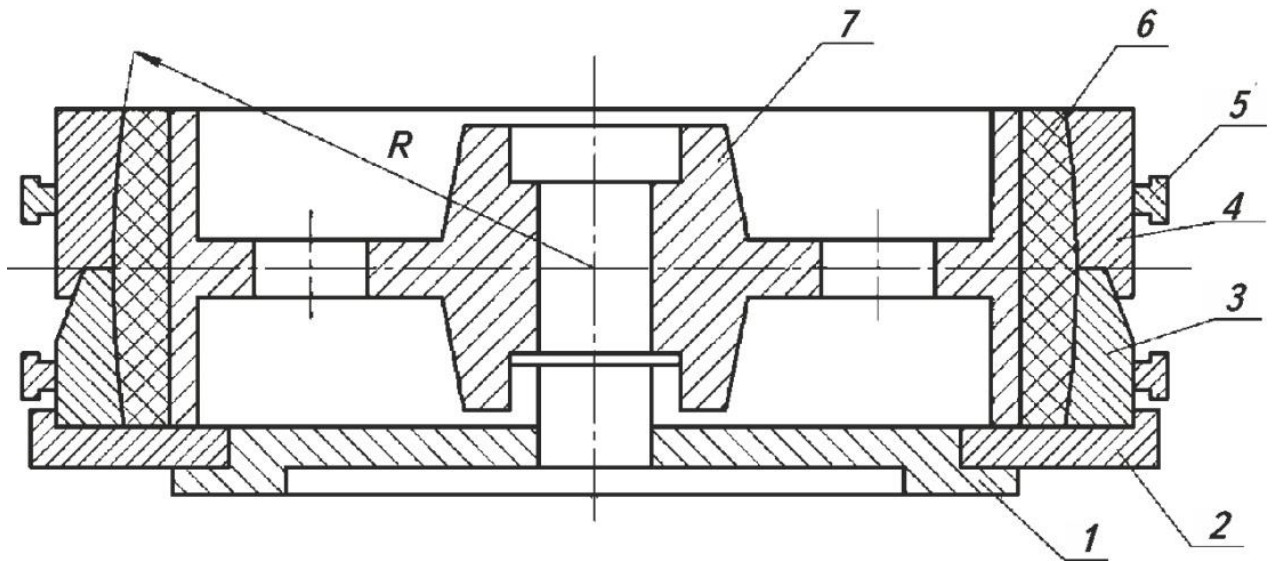


Рисунок 3.1 - Форма для отливки сплошного упругого полиуретанового обода колеса погрузчика: 1 – центр; 2 – основание; 3 – нижняя полуформа; 4 – верхняя полуформа; 5 – захват; 6 – полиуретан; 7 – колесо

Форма состоит из двух частей, которые при совмещении образуют полость, габариты и профиль которой соответствует наружным размерам готовой шины.

Наружный диаметр массивной шины погрузчика изготавливается в виде сферы радиусом  $R$  для уменьшения неравномерности распределения нагрузки по ширине обода, которое может возникнуть в следствие перекоса колеса при сборке, а также при его эксплуатации.

Заливаемую полиуретаном поверхность металлической арматуры будь то стальной валик для полиграфии, стальной бандаж сменного обода колеса погрузчика, стальной или силуминовый центр колеса обрабатывают механическим путем с шероховатостью  $Ra\ 2,5 \dots 1,25$ .

Никакие механические средства крепления, как винтовая нарезка, паз «ласточкин хвост» и т.п. для полиуретанов в отличии от резино-металлических деталей не требуются. Перечисленные средства крепления затрудняют очистку поверхности арматуры перед заливкой и препятствуют адгезии.

На термическом участке необходимо иметь две печи. Первую из них используют для предварительного нагрева исходных компонентов полиуретана, а вторую для полимеризации эластомерно-металлических деталей.

Технологический процесс изготовления эластомерно-металлических деталей с применением двухкомпонентного полиуретана горячей полимеризации «Дуотан» включает в себя три основные операции.

Первая операция - это подготовка арматуры, формы и компонентов материала к заливке. Она включает в себя последовательность следующих шагов:

- Арматуру (центр колеса или стержень валика) очищают механическим путем от грязи, окалины и коррозии, обезжиривают и подвергают пескоструйной или, что более экологично, дробеструйной обработке. Для стальной поверхности используют чугунную дробь (для нержавеющей стали корундовый песок). Дробь должна иметь острые грани и размер 200...400 мкм. Предварительная очистка и обезжиривание арматуры проводится во избежание загрязнения дроби. Сжатый воздух, поступающий в дробеструйную установку, должен быть очищен от влаги и масла.
- Обработка острой дробью создает требуемую матовую поверхность арматуры, при этом увеличивается площадь поверхности контактирования металла и полиуретана и тем самым усиливается связь арматуры с упругим полиуретановым слоем. Матовая поверхность арматуры улучшает смачиваемость поверхности адгезивом, что особенно актуально для кромок эластомерно-металлических деталей.
- В течение 2...3 ч очищенную арматуру повторно обезжиривают и покрывают фирменным адгезивом «Сил Бонд 49СФ» слоем толщиной 20...50 мкм. Затем этот слой сушат при комнатной температуре в течение 60 минут. Если подготовленная арматура не поступает на заливку в срок до 6 часов, проводится консервация путем запекания слоя адгезива при 100...140 °С в течение 30 минут. Впоследствии непосредственно перед заливкой законсервированную арматуру необходимо предварительно освежить, нанеся на нее тонкий слой адгезива.

- Внутренние поверхности форм очищают, обезжиривают и покрывают слоем фирменного антиадгезива «СилРелиз». После этого форму высушивают при комнатной температуре в течение 10...15 минут.
- Подготовленную арматуру помещают в заливочную форму. Все стыки разъемной формы должны быть тщательно уплотнены во избежание утечки заливаемой массы. С этой целью используют ленту «ФУМ» или другой материал, не выделяющий газы при нагревании до 150 °С.
- Компоненты материала – преполимер и отвердитель, разогревают до 50...55 °С, для чего емкости с этими материалами помещают в печь с температурой, не превышающей 73 °С. Перед заливкой литьевые формы подогревают до температуры 50...55 °С.

Вторая операция – это заливка компонентов полиуретана в литьевую форму. Существует два способа заливки: ручная заливка и заливка с помощью дозирующе-смесительных литьевых машин.

При ручной заливке необходимо выполнить последовательность следующих шагов:

- Разогретые компоненты развешивали в технологическую тару в требуемом весовом отношении, после чего при необходимости порознь вакуумировали до полного удаления пузырьков воздуха в течении не более, чем 10 минут.
- В тару разового использования заливали отвердитель, затем вводили соответствующее количество преполимера. Композицию перемешивали в течение 2 минут с помощью механической мешалки. Ручное перемешивание не обеспечивает стабильности механических свойств. Заливку смеси производили не позднее 1 минуты после смешивания.

Заливка литьевых форм с использованием дозирующе-смесительных литьевых машин на сегодняшний день наиболее производительный и распространенный способ заливки. После заполнения обеих емкостей литьевой машины компонентами, их разогревают до температуры 50...55 °С, при необходимости проводят вакуумирование до полного удаления пузырьков воздуха в течение не более, чем 10 минут. Затем с помощью заливочного пистолета



производят заполнение литевой формы компонентами полиуретана. Залитые вручную или с помощью машины литевые формы помещают в печь с температурой 90...110 °С.

Третья операция – это полимеризация литевых форм в печи. Существует два процесса: одноступенчатый и двухступенчатый.

Одноступенчатый процесс используется в том случае, когда повторное использование форм не требуется, они могут досрочно не выниматься из печи. В этом случае, общее время полимеризации при температуре 90...110 °С составит 9...17 часов.

Двухступенчатый процесс используется для более интенсивного использования литевых форм, при этом полимеризацию проводят в два этапа. После предварительной полимеризации в течение 45 минут заполненные формы вынимают из печи. После извлечения из форм, отливки немедленно возвращают в печь для дальнейшей полимеризации при температуре 90...110 °С в течение 8...16 часов.

После охлаждения отливку (свободную от формы или в форме) извлекают из печи с помощью приспособления с соблюдением мер предосторожности.

Технологический процесс изготовления эластомерно-металлических деталей с применением однокомпонентного полиуретана горячей полимеризации «Монотан» включает в себя три основные операции: подготовка арматуры и формы, заливка формы и полимеризация.

Подготовка арматуры и формы происходит аналогично процессу переработки полиуретана «Дуотан».

Заливка формы однокомпонентным полиуретаном торговой марки «Монотан» в большинстве случаев происходит с использованием дозирующе-смесительных литевых машин. Залитую форму помещают в разогретую до 70°С печь, в которой по мере дальнейшего повышения температуры начинается процесс полимеризации. При прохождении 110°С обеспечивается естественный процесс дегазации залитого материала. При этой температуре рекомендуется выдержка в течение 2 ч.

Для завершения полимеризации требуется выдержка в печи при температуре 135<sup>0</sup>С в течение 6...12 часов в зависимости от размеров изделия и толщины полиуретанового слоя. После охлаждения отливку извлекают из формы с помощью приспособления.

### **3.2 Выбор метода чистовой и финишной обработки эластомерно-металлических деталей**

Предварительная обработка рабочей поверхности деталей вращения после их отливки может производиться на стандартных токарных станках. В связи с высокой податливостью слоя полиуретана твердостью менее 65 ShA, удаляемого с поверхности вращения заготовки детали, обычные лезвийные резцы непригодны. При работе они не режут полиуретан, а сдвигают, мнут и рвут его. Исключение представляет подрезка торцев тонким резцом.

Для черновой обработки сравнительно мягких полиуретанов, и особенно для удаления отработанного слоя эластомера с целью повторного использования арматуры, эффективными оказались, резцы кольцеобразной формы [3, 19, 21, 30].

Данные резцы при работе формируют сливную стружку, обеспечивают большие продольные подачи при радиальном заглублении, достаточном для обработки за один проход. Обработанная кольцевыми резцами поверхность имеет волнистость большой амплитуды и для получения требуемой цилиндричности и минимизации радиального боя полиуретанового слоя при вращении необходима финишная обработка.

Для обработки полиуретана твердостью 90 ShA могут использоваться стандартные лезвийные резцы. Из производственной практики обработки валов для полиграфии и других деталей вращения были получены рекомендуемые ниже режимы обработки резцами полиуретанового покрытия, представлены в таблице 3.1.

Таблица 3.1 - Режимы обработки полиуретанового покрытия валов резцами

Тип резца	Твердость 65 ShA			Твердость 90 ShA		
	Заглубление $a$ , мм	Окружная скорость $V$ , м/с	Продольная подача $v$ , мм/об	Заглубление $a$ , мм	Окружная скорость $V$ , м/с	Продольная подача $v$ , мм/об
Кольцевой	5...10	1,2...1,5	6...8	-	-	-
Лезвийный	-	-	-	5...10	1,2...1,5	0,3...0,4

Точность формы деталей вращения типа колеса или ролика обычно обеспечивают шлифованием. Качество поверхности должно обеспечиваться специализированными методами шлифования или полирования. Однако, процессы шлифования эластомеров разработаны недостаточно, и в этой связи был выполнен анализ рациональных технологий и инструментов.

С помощью керамических абразивных кругов на основе оксида алюминия или карбида кремния опытный шлифовщик может добиться сравнительно гладкой поверхности эластомера.

В процессе шлифования эластомерных материалов часто возникают прижоги, в результате выделяется дым и распространяется неприятный запах. Шлифовка эластомеров керамическими кругами возможна для твердых покрытий  $\geq 90$  ShA на жесткой арматуре.

При шлифовании упругого полиуретанового покрытия валов необходимо учитывать две важные особенности обработки литевых конструкционных полиуретанов.

Первой особенностью механической обработки полиуретанов является его низкая температура плавления и низкая теплопроводность. Отсюда следует главное требование к шлифованию полиуретана, заключающееся в том, что его нельзя перегревать и как следствие шлифование необходимо производить с

использованием смазочно-охлаждающих жидкостей или обдува сжатым воздухом зоны резания полиуретанового эластомера.

Перегрев полиуретана при шлифовании, в случае нарушения выработанных производственной практикой режимов шлифования, может привести к прижогам, плавлению и в крайних случаях даже возгоранию полиуретана. Появление прижогов на шлифованной поверхности полиуретанового эластомера недопустимо, так как это приводит к потере товарного вида детали и нарушению требований к шероховатости поверхности.

Второй важной особенностью шлифования эластомерных поверхностей, является зависимость модуля упругости эластомерных материалов (резина, силикон, полиуретан и д. р.) от скорости деформирования.

Данная особенность обусловлена молекулярным строением эластомерных материалов, когда при высокой скорости деформации, в материале не успевают произойти перегруппировки макромолекул и материал ужесточается.

Учитывая зависимость жесткости полиуретана от скорости, приходим к выводу, что для обеспечения требуемой шероховатости полиуретановой поверхности требуется регулируемая скорость шлифования. Как следствие шлифовальные головки должны иметь привод от асинхронного электродвигателя с регулируемой скоростью вращения.

В середине прошлого века в передовых промышленно-развитых странах, на рынке абразивного инструмента, появились высокопористые шлифовальные круги на керамической связке из карбида кремния. Данная группа кругов обладает хорошей самозатачиваемостью и позволяет благодаря, точечному взаимодействию режущей кромки абразива с полиуретаном, шлифовать детали с меньшим выделением тепла в зоне резания по сравнению с обычными кругами.

Получение высокопористого строения при производстве шлифовальных кругов возможно различными способами:

- химическим газообразованием;
- пенообразованием;
- выгорающими добавками.

При полусухом и пластическом формовании абразивных кругов часто используют выгорающие добавки из органических материалов (кокс, торф, опилки, пробковая крошка). Некоторые из этих добавок придают формовочной массе такие свойства, которые приводят к растрескиванию круга. Другие добавки плохо выгорают, образуют много золы или обладают низкой прочностью, образуя много пыли и мелких частиц. В последнее время наиболее эффективной добавкой признана дробленая вишневая косточка.

Размер пор колеблется в широком диапазоне размеров от 0,1 мм до 1 мм, при этом общая пористость высокопористого круга примерно 40 ... 50%. Функционально крупные поры способствуют рассредоточению мелкой стружки внутри пор абразивного круга и подвода смазочно-охлаждающей технологической жидкости через данные поры под действием центробежных сил.

Режимы обработки упругого полиуретанового покрытия валов различными абразивными инструментами, выработанные на производственной базе фирмы «СПБ», представлены в таблице 3.2.

Таблица 3.2 - Режимы шлифования полиуретанового покрытия

Тип инструмента	Твердость 65 ShA			Твердость 90 ShA		
	Заглубление $a$ , мм	Окружная скорость $V$ , м/с	Продольная подача, $V_A$ мм/об	Заглубление $a$ , мм	Окружная скорость $V$ , м/с	Продольная подача, $V_A$ мм/об
Абразивный круг	0,5...1	180	0,35	0,1...0,5	155	0,5
Игольчатая фреза	0,5...1,5	170	0,50	1,5...2	145	0,35
Абразивная лента	0,1...0,3	165	0,25	0,1...0,2	138	0,25

Для преодоления ограничений по скорости, присущей абразивным кругам, был разработан новый класс режущего инструмента - игольчатые фрезы на стальной основе. Они могут работать при очень больших окружных скоростях и производить более грубую обработку, но при этом не требуют большей мощности привода,

нежели абразивные круги. В процессе их работы выделяется много тепла и дыма и становится необходимым использование смазочно-охлаждающих жидкостей.

В производственной практике фирмы «СПБ» широко используется игольчатая фреза типа «SSG» диаметром 10" (254 мм), рекомендованную для предварительной обработки эластомерных материалов средней твердости.

Процессы резания игольчатой фрезой весьма специфичны. Вооружение фрезы фирмы «Робберхог» в виде открытых конических карбид-вольфрамовых игл имеет открытую структуру, в результате чего механическая обработка только в некоторой степени схожа с фрезерованием. Обычное вооружение «SSG» - иглы, размещенные в случайном порядке по режущей поверхности фрезы (см. рисунок 3.2).

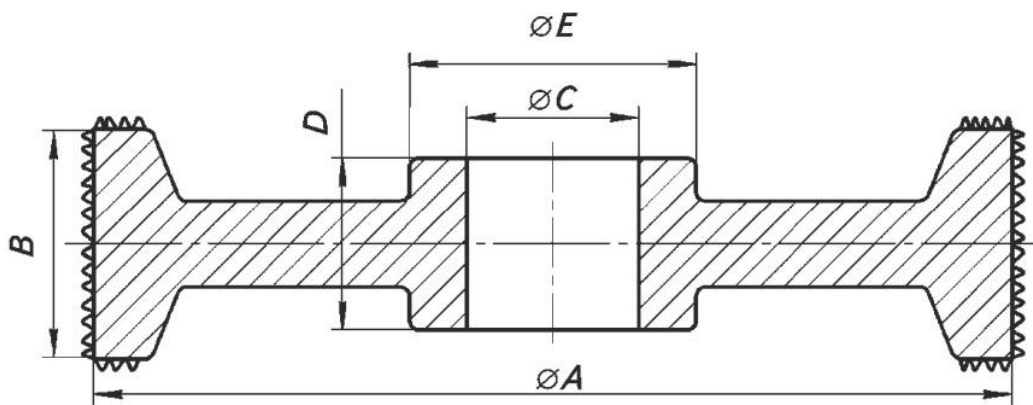


Рисунок 3.2 - Игольчатая фреза фирмы «Робберхог»

Более совершенное вооружение «MCM», состоящее из одинаковых конических игл, равномерно размещенных ровными рядами. Иглы типа «SSG» или «MCM» приварены к центру, изготовленному из высокопрочной закаленной стали, что позволяет использовать фрезы на больших окружных скоростях.

Срок службы фрез превышает срок службы абразивных кругов, но наиболее важное их достоинство – повышение производительности труда. При частоте вращения 3000 об/мин при обработке валов, покрытых полиуретаном «Монотан» 40...90 ShA была получена шероховатость не выше  $Ra$  1,0.

Во избежание возникновения колебательных процессов, особенно при недостаточно жесткой арматуре изделия, целесообразно предусмотреть привод (по типу шлифовальной головки) с переменной частотой вращения игольчатой фрезы.

При обработке полиуретана выявлены следующие преимущества игольчатых фрез:

- При обработке эластомеров игольчатыми фрезами выделяется меньше тепла, и требуется меньшая мощность привода, чем при шлифовании абразивным кругом;
- Фреза эффективна при окружных скоростях от 30 до 100 м/с соответственно для высоких и низких показателей твердости полиуретана;
- Правка фрезы может быть выполнена с высокой точностью, и поэтому за один проход может производиться как черновая, так и чистовая обточка;
- Благодаря обработке за один проход значительно экономится время, затрачиваемое на смену инструмента при использовании других методов обработки.

При визуальном контроле качества финишной обработки полиуретанового покрытия довольно часто выявляются рисунки сложного вида. Пятна, видимые лучше на твердом покрытии, ухудшают товарный вид детали даже тогда, когда класс шероховатости остается в допустимых пределах. Надрывы на полиуретановой поверхности печатных валов, характерные для мягких полиуретанов, являются безусловным браком.

Анализ рисунка в виде полос на поверхности обрабатываемой детали вращения весьма информативен для диагностики состояния инструмента и станка, а также для подбора эффективных режимов обработки. Выделены однократные дефекты и причины, приводящие к их возникновению (в реальности имеются комбинированные дефекты и консолидированные источники их возникновения).

Характерные для игольчатых фрез дефекты шлифованной поверхности печатного вала (см. рисунок 3.3).

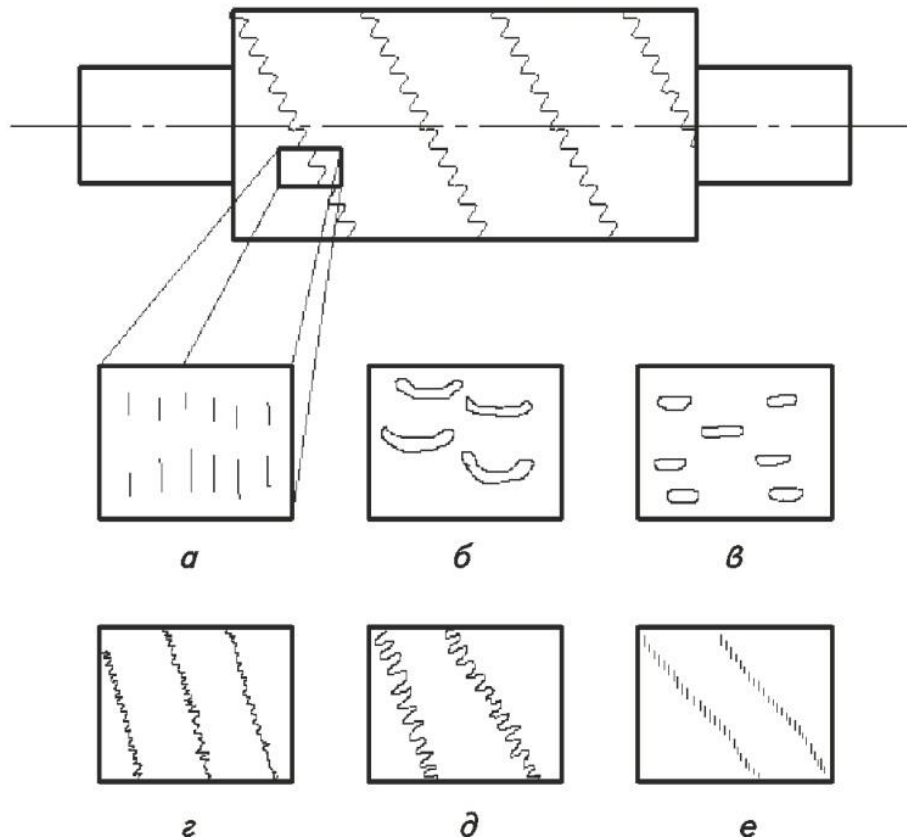


Рисунок 3.3 - Типы рисунка на обрабатываемой поверхности полиуретанового покрытия вала: *a* – «царапины»; *б* – «апельсиновая корка»; *в* – «вырывы»; *г* – «спирали продольной подачи»; *д* – «спирали отскока фрезы»; *е* – «спирали поперечной подачи»

Исходя из производственной практики шлифовки печатных валов игольчатыми фрезами были сформулированы причины возникновения того или иного дефекта обрабатываемой поверхности и приведены рекомендации по их устранению:

- «Царапины» - фреза не заточена или иглы слишком грубые для данной твердости материала (см. рисунок 3.3, *a*). Необходимо произвести правку игольчатой фрезы;
- «Апельсиновая корка» - следствие натягивания и надрыва чешуек мягкого материала (см. рисунок 3.3, *б*). Для устранения этого дефекта следует увеличить окружную скорость фрезы или использовать фрезу с более мелкими иглами;



- «Вырывы» - чаще встречаются на твердых материалах, но они нередки и при средней твердости (см. рисунок 3.3, в). Причина – затупление игл фрезы. Необходимо заправить фрезу;
- «Спирали продольной подачи» - скорость продольной подачи не соответствует частоте вращения детали (см. рисунок 3.3, г). Следует синхронизировать скорость продольной подачи и окружную скорость фрезы;
- «Спирали отскока фрезы» - иглы фрезы на передней кромке неравномерно изношены и вызывают колебания упругого слоя (см. рисунок 3.3, д). Необходимо произвести правку игольчатой фрезы;
- «Спирали поперечной подачи» - глубина поперечной подачи превышает режущую способность игл фрезы (см. рисунок 3.3, е). Следует уменьшить заглубливание фрезы в полиуретановый слой.

Третьим видом режущего инструмента, применяемым для финишной обработки упругого полиуретанового покрытия валов, являются абразивные ленты.

Абразивные ленты в принципе более эффективны, чем керамические круги. Первоначально изделие может быть обработано крупнозернистой лентой, а затем окончательно отшлифовано более мелкозернистой. Особенно эффективно согласно [50, 56] использование бесконечных абразивных лент для малоотходных заготовок колес и валов, получаемых литьем. Однако не все технические способы могут быть использованы.

При шлифовке по методу фирмы «Метабо» (см. рисунок 3.4. а) прижимной ролик, даже обрешиненный, чрезмерно деформирует обрабатываемую поверхность. Налипание стружки эластомера на прижимной ролик приводит к возникновению вибраций и вызывает сход ленты с направляющих роликов. Абразивная лента обычно не позволяет получить большую глубину врезания за один проход, а смена ленты занимает время.

Более перспективен метод фирмы «Ремко» (см. рисунок 3.4. б), где используется свободная ветвь полотна абразивной ленты. Особенно эффективен процесс полирования доводочной лентой, проблематичный при других способах финишной обработки.

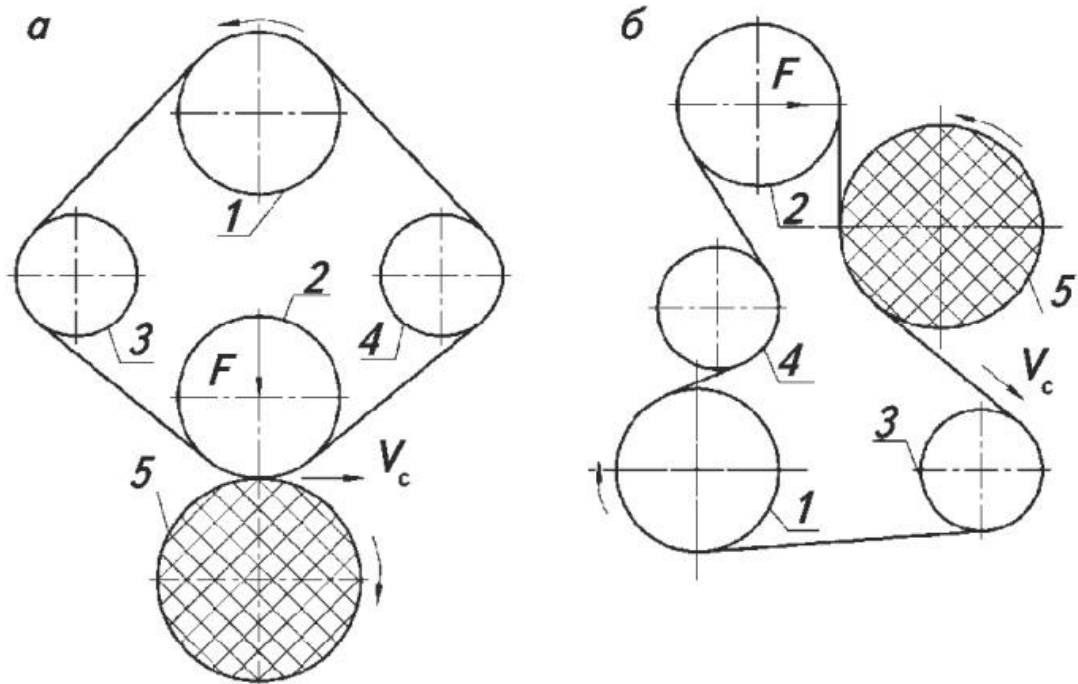


Рисунок 3.4 - Способы финишной обработки полиуретановых поверхностей вращения абразивными лентами: *а* – шлифовальный станок фирмы «Метабо»: 1 – ведущий ролик; 2 – прижимной ролик; 3,4 – натяжные ролики; 5 – полиуретановая поверхность; *б* – шлифовальная головка фирмы «Ремко»: 1 – ведущий ролик; 2,3 – прижимной ролик; 4 – натяжные ролики; 5 – полиуретановая поверхность

Основные преимущества полирования полиуретанов по методу «Ремко»:

- Жесткость станка практически не влияет на качество обработки, поэтому становится возможным использование обычных токарных станков;
- Малые силы резания позволяют производить полирование полиуретанового покрытия, нанесенного на маложесткую арматуру;
- Низкая теплонапряженность процесса обеспечивает наивысшие показатели шероховатости, что важно для печатных валов.

По результатам исследования были сформулированы требования к шлифовально-полировальной головке. Во избежание прижогов полиуретана

линейная скорость полотна абразивной ленты  $V = 12...20$  м/с, число пробегов ленты длиной  $L$ , м:  $U = V/L < 15$ , давление в контакте  $p = 0,5...1$  МПа в зависимости от твердости полиуретана и требований к шероховатости изделия. Для шлифования твердых полиуретанов целесообразно использовать смазочно-охлаждающие жидкости или обдувку воздухом.

Финишная обработка упругого покрытия вала с помощью притиров применяется для получения высокого качества полиуретанового покрытия ( $Ra$  0,63...0,32), устранения мелких дефектов и придания детали товарного вида. Притирка полиуретанового покрытия производилась с использованием свободных зерен порошкообразных абразивов, в частности карбида кремния. Доводку полиуретанового покрытия начинали с грубого номера микрошлифпорошка (М 28) и заканчивали более тонкими (М 10).

Осуществление финишной обработки требует, чтобы абразивные зерна шлифпорошка вдавливались в поверхность притира. Это вдавливание зерен в его поверхность называется процессом шаржирования притира.

Для шаржирования притир покрывается тонким и ровным слоем доводочного шлифпорошка, который вдавливается в поверхность притира с помощью вращающегося каленого металлического ролика. После равномерного насыщения поверхности притира абразивом, его излишки удаляются. Очевидно, что материал притира должен быть достаточно мягким, чтобы шлифпорошок хорошо вдавливался в притир.

В производственной практике научно-производственной фирмы «СПБ», на базе которой производилась отработка шлифования и дальнейшая доводка полиуретановой поверхности использовались притиры из дерева. Для сравнительно мягких полиуретанов, твердостью 65...70 ShA из липы, для полиуретанов твердостью 75...85 ShA из березы.

Производительность процесса притирки и качество обработанной поверхности зависит от применяемых абразивных материалов, свойств смазывающих веществ, материала притира и режима доводки, т. е. давления

инструмента на обрабатываемую поверхность и скорость продольной подачи притира по отношению к обрабатываемой поверхности.

В качестве смазывающего вещества использовали смесь веретенного масла с керосином и добавляли в полученную смесь в качестве загустителя стеариновую кислоту и канифоль, в очень небольших количествах, 2...3 % от общего объема приготавливаемой смазки.

Смазку наносят шпателем на шаржированный притир тонким слоем. Излишек этой смеси в процессе шлифования выдавливается из зоны резания и снижает производительность труда и качество обрабатываемой полиуретановой поверхности.

Процесс доводки идет наиболее производительно при удельном давлении 1,5...2,5 Н/мм, в зависимости от твердости обрабатываемой полиуретановой поверхности, соответственно меньшие значения для более мягких полиуретанов и большие для твердых. Дальнейшее повышение удельного давления ухудшает качество притирки, при этом не повышается производительность труда.

Большое значение для шероховатости обрабатываемой полиуретановой поверхности имеет скорость продольной подачи притира вдоль цилиндрической поверхности детали. По мере увеличения скорости перемещения притира растет сьем материала с поверхности, но одновременно резко возрастает теплообразование в зоне резания, которое приводит к образованию прижогов полиуретановой поверхности, оплавлению материала и к очевидному браку детали.

Скорость продольного перемещения притира при предварительном проходе составляет от 0,02 до 0,03 м/с в зависимости от твердости полиуретана, а при окончательной доводке от 0,01 до 0,015 м/с.

### **3.3 Анализ колебательных процессов в упругом слое при обработке маложестких эластомерно-металлических деталей**

Важнейшими факторами, определяющими качество шлифуемой полиуретановой поверхности вала, являются поперечные колебания вала и автоколебания упругого шлифуемого слоя.

При диагностике состояния шлифовального оборудования, а также при эмпирическом подборе режимов шлифования, весьма информативен анализ рисунка в виде полос на поверхности обрабатываемой детали вращения.

Точки  $O$  и  $O_1$  – центры вращения обрабатываемой детали и шлифовального круга (см. рисунок 3.5).

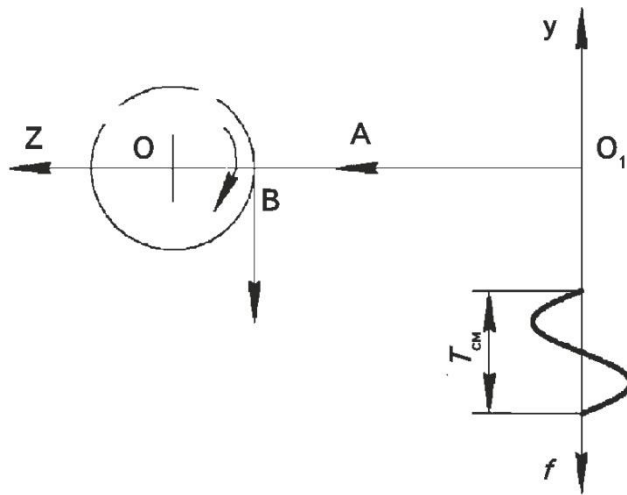


Рисунок 3.5 - Расчетная схема колебаний арматуры

Линейная скорость обрабатываемой поверхности деталей вращения:

$$V_B = \omega \cdot r = \frac{2\pi \cdot n}{60} \cdot \frac{d}{2} = \frac{\pi d n}{60} = \frac{n L_{\text{пов}}}{60}, \quad (3.1)$$

где  $L_{\text{пов}} = \pi \cdot d$  – длина обрабатываемой поверхности;  $d$  – диаметр обрабатываемого вала;  $n$  – частота вращения обрабатываемого вала.

Период колебаний силы смещения:

$$T_{\text{см}} = 1 / f_{\text{см}}, \quad (3.2)$$

где  $f_{\text{см}}$  – частота смещающей силы.

Части периметра обрабатываемой поверхности детали вращения подвергаются большей или меньшей глубине резания:

$$L + \Delta = 0,5 T_{\text{см}} \cdot V$$

$$L - \Delta = 0,5T \text{ см} \cdot V_B, \quad (3.3)$$

где  $\Delta$  – глубина резания.

Обратная часть поверхности вала за время действия одного периода колебаний силы имеет смещение:

$$L = T \text{ см} \cdot V_B \quad (3.4)$$

С учетом (3.1) и (3.2) зависимость (3.4) имеет вид:

$$L = T \text{ см} \cdot \pi \cdot d \cdot n / 60 \quad (3.5)$$

Если в длине окружности обрабатываемого вала укладывается целое число отрезков  $L \pm$ , то с каждым оборотом вала участки более и менее глубокого врезания инструмента будут создавать устойчивый дефект (рисунок) обрабатываемой поверхности:

$$L_{\text{пов}} / L = m,$$

где  $m = \pi \cdot d \cdot 60 / (\pi \cdot d \cdot T \text{ см} \cdot n) = 60 f_{\text{см}} / n$  – число целое.

Условия появления рисунка зависят только от соотношения частоты вращения обрабатываемого вала  $n$  и частоты силы смещения  $f_{\text{см}}$ , но они не зависят от диаметра детали.

Если частота колебаний  $f_{\text{см}}$  обусловлена конструктивно, то для исключения возможности появления рисунка следует изменить частоту вращения  $n$ .

В проведенном эксперименте при  $n = 50$  об/мин методами вибродиагностики были выявлены частоты  $f_{\text{см}1} = 24$  Гц;  $f_{\text{см}2} = 30$  Гц, связанные с собственными колебаниями мало жесткой арматуры (стержня) валика. Для составляющей  $f_{\text{см}1} = 24$  Гц:

$m = 60 \cdot 24 / 50 = 28,8$  условие появления рисунка не выполняется, но выполняется для составляющей  $f_{\text{см}2} = 30$  Гц:  $m = 60 \cdot 30 / 50 = 36$ . На поверхности валика должно образоваться 36 темно-светлых полос. Результат подсчета этих полос на реальной поверхности вала совпал с расчетным значением.

Автоколебания обрабатываемого упругого полиуретанового покрытия отличаются от вынужденных поперечных колебаний вала тем, что вынужденные колебания эластомерного покрытия вала при шлифовании вызываются чаще всего изменением режущей способности круга или его засаливанием.

Автоколебания полиуретанового эластомерного покрытия при его шлифовании приводят к повреждениям поверхности, которые сильно портят внешний вид шлифуемой поверхности.

Необходимо отметить, что автоколебания полиуретанового слоя на сегодняшний день изучены крайне незначительно. Основные рекомендации, которые можно дать для устранения колебаний этого типа имеют экспериментальное происхождение.

Основные экспериментальные данные, относящиеся к самовозбуждающимся колебаниям следующие:

- С увеличением продолжительности шлифования амплитуда волнистости рабочей поверхности круга нарастает по зависимости, близкой к экспоненциальной;
- Частота колебаний определяется наименее жесткой частью технологической системы (упругий полиуретановый слой);
- Частота колебаний сохраняется практически постоянной и слабо зависит от изменения режимных параметров;
- Частота колебаний повышается с увеличением жесткости технологической системы, в частности с ростом твердости обрабатываемого полиуретана и степени твердости и высоты шлифовального круга.

Характерным свойством автоколебательной системы является тот факт, что период автоколебаний определяется свойствами самой системы, а не навязывается извне. Это – основное отличие автоколебаний от вынужденных колебаний. Для автоколебаний существенно то, что для восполнения потерь энергии должен существовать постоянный источник энергии, который должен создавать постоянно действующую силу, в нашем случае – это сила резания полиуретанового покрытия.

Финишную обработку деталей вращения типа вала, ролика или колеса по наиболее традиционной технологии обычно ведут при попутном движении шлифовального круга и детали с линейными скоростями соответственно  $V_u$  и  $V_в$  и скоростью осевой подачи  $V_a$ . Тогда тангенциальной составляющей скорости резания является относительная скорость  $V_t = V_u + V_в$ . Главный вектор силы

резания (см. рисунок 3.6) может быть представлен тремя проекциями: осевой  $F_a$ , тангенциальной  $F_t$  и радиальной  $F_r$ .

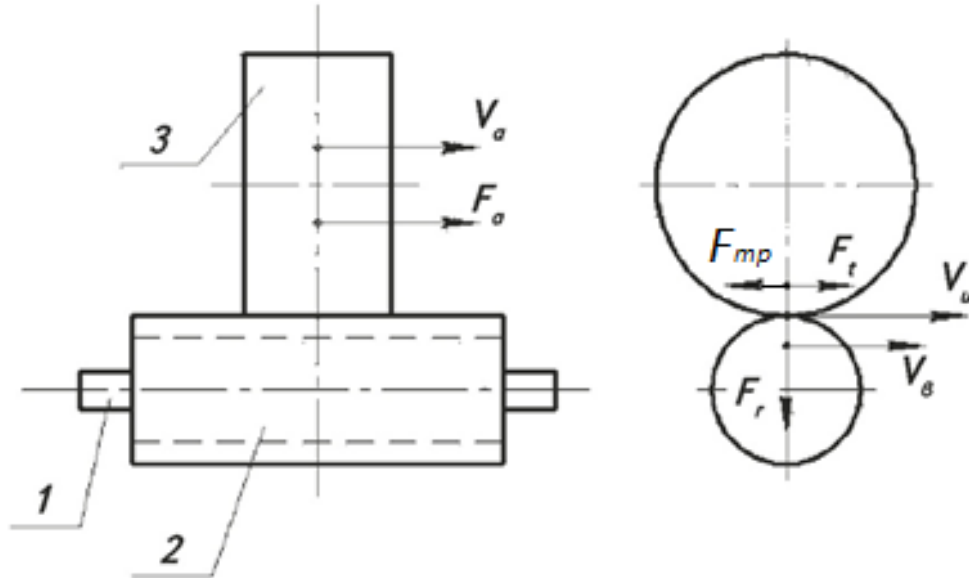


Рисунок 3.6 - Обработка ролика с упругим покрытием с помощью шлифовального круга: 1 – вал; 2 – эластомерное покрытие; 3 – абразивный круг

В данном разделе не рассматривается формообразование вала под действием радиальной  $F_r$  и осевой  $F_a$  составляющих. Формирование шероховатости на обрабатываемой поверхности определяется преимущественно тангенциальной составляющей силы резания  $F_t$ .

Эту силу уравнивает переменная по величине сила трения в контакте  $F_{mp} = f F_r$ . Переменная нагрузка вызывает осциллирующие перемещения обрабатываемой поверхности в тангенциальном направлении  $x \geq 0$ . В итоге, даже если окружная скорость абразивного круга постоянна и равна  $V_t$ , то относительная скорость перемещения поверхности эластомера переменна:

$$V_{t\theta} = V_t + dx / dt \quad (3.6)$$



Проблема механической обработки мало жестких деталей представляет серьезную научную проблему, и применительно к обработке металлов систематически исследуется школой В.Л. Вейца [6] и др.

В работе [13] отмечено, что изменение силы трения  $F_{тр}$  в такт движения при определенных фазовых соотношениях между тангенциальными и радиальными смещениями является причиной автоколебаний.

В общем случае сила трения может зависеть от координаты  $x$  упругих смещений, а также от их скорости  $dx/dt$  или ускорения  $d^2x/dt^2$ . При финишной обработке глубина врезания инструмента мала, поэтому отклонением линии действия силы трения можно пренебречь, и, тем самым, принять функцию  $F_{тр}(x) \rightarrow 0$ .

Инерционные связи пренебрежимо малы, тогда  $F_{тр}(d^2x/dt^2) = 0$ . Напротив, зависимость силы трения от скорости  $F_{тр}(dx/dt)$  у эластомеров существенна.

Тангенциальная сила трения – это сила сопротивления сдвигу поверхностного участка покрытия, являющаяся суммой молекулярной  $F_{мол}$  и механической  $F_{мех}$  составляющих:

$$F_{тр} = F_{мол} + F_{мех} \quad (3.7)$$

Диссипация энергии в процессе трения сопровождается повышением температуры соответственно на граничной поверхности и внутри объема соприкасающихся тел. Процесс трения в контакте инструмента и покрытия вала также рассматривают в двух аспектах, и коэффициент трения соответственно представляют в виде суммы молекулярного  $f_{мол}$  и механического  $f_{мех}$  компонентов:

$$f = f_{мол} + f_{мех} \quad (3.8)$$

При исследовании частных коэффициентов трения  $f_{мол}$ ,  $f_{мех}$  обрабатываемый поверхностный слой представляют в виде некоторой среды, упругие и вязкие свойства которой характеризуют коэффициентами жесткости  $c_t$  и вязкости  $\eta$ .

Здесь коэффициент жесткости при упругом тангенциальном смещении покрытия вала:  $c_t = dF_t/dx$ ; коэффициент вязкости при сравнительно малых

деформациях :  $\eta = \sigma_t t / \varepsilon_t$ , где  $\sigma_t$  - нормальные напряжения при локальной деформации в тангенциальном направлении,  $\varepsilon_t$  - деформация;  $t$  - время.

Следуя работе [90], допустимо ограничиться простыми моделями сред: Фойхта (см. рисунок 3.7, а), для мягких покрытий и Максвелла (см. рисунок 3.7, б), для твердых покрытий.

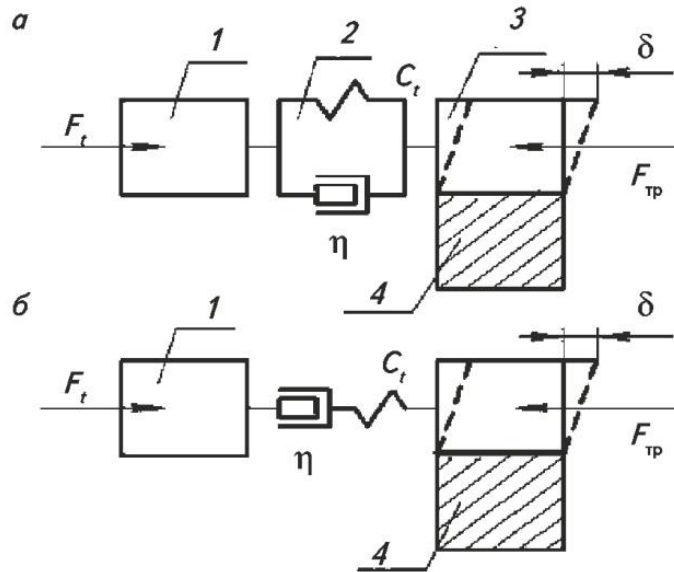


Рисунок 3.7 - Точечная колебательная система: а – модель Фойхта; б – модель Максвелла: 1 – звено, движущееся с постоянной скоростью; 2 – упруго-диссипативный элемент; 3 – звено, движущееся с переменной скоростью; 4 – неподвижное основание

Функциональные зависимости для коэффициентов трения:

$$f_{\text{мол}} = A \zeta(E / \sigma_t^k) \operatorname{tg} \delta, \quad (3.9)$$

$$f_{\text{мех}} = H \xi(\sigma_t / E)^n \operatorname{tg} \delta, \quad (3.10)$$

где  $A$  – постоянная;  $H$  – коэффициент, зависящий от формы неровностей;  $\zeta$  – функция молекулярной способности поверхности;  $\xi$  – геометрический коэффициент;  $k < 1$ ;  $n \rightarrow 1$  – показатели степени;  $\operatorname{tg} \delta$  – тангенс угла потерь или коэффициент демпфирования вязкоупругого материала.

Коэффициент  $f_{\text{мол}}$  прямо пропорционален отношению  $E / \sigma_t^k$ , а коэффициент  $f_{\text{мех}}$  обратно пропорционален отношению  $E / \sigma_t$ . По мере увеличения скорости  $V_{t \text{ э}}$  коэффициент  $f_{\text{мол}}$  растет, а коэффициент  $f_{\text{мех}}$  падает (см. рисунок 3.8, а), что обуславливает существование минимума характеристики силы трения  $F_{\text{тр}}$  (см. рисунок 3.8, б).

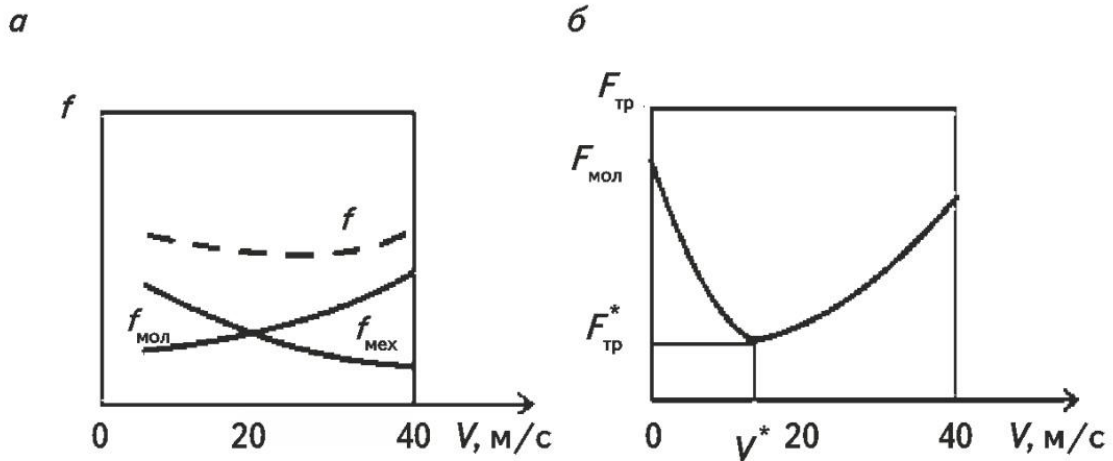


Рисунок 3.8 - Возбуждение релаксационных автоколебаний: а – изменение коэффициентов трения; б – изменение силы трения от скорости

В работе [6] показано, что на восходящем участке силы трения при  $V_{t \text{ э}} > V_{t \text{ э}}^*$  возникшие колебания затухают, а при  $V_{t \text{ э}} < V_{t \text{ э}}^*$  - усиливаются.

Для рассматриваемой задачи перекрестные связи коэффициентов трения могут быть интерпретированы следующим образом:  $f_{\text{мол}}$  растет с увеличением твердости эластомера (экспериментально подтверждено для сухого контакта полиуретана марки «Монотан»), а  $f_{\text{мех}}$  растет при увеличении шероховатости поверхности.

Тангенциальное смещение слоя эластомера  $x$  (см. рисунок 3.9, а) происходит, когда сила  $F_t$  превысит некоторое предельное значение силы трения  $F_{\text{тр lim}} = f^* F_r$  при относительной скорости  $V_{t \text{ э}}^*$ , соответствующий коэффициент трения здесь обозначен  $f^*$ . Если упругое сопряжение доминирует над молекулярным сцеплением (характерно для твердых покрытий), то смещение происходит после

разрушения молекулярной связи, при этом сила  $F_t$  резко, скачком, падает до значения  $F_t = F_{\text{мол.}}$ .

Такой срыв (релаксация) будет отмечен на поверхности детали матовым пятном местного износа (см. рисунок 3.9, в). Если молекулярное сцепление превосходит упругое сопряжение (характерно для мягких покрытий), то тангенциальное смещение происходит после разрушения упругой связи, при этом сила  $F_t$  скачком падает до  $F_{\text{мол.}}$ . Релаксация этого типа отмечена чешуйкой материала, отстоящей над микро-разрывом (см. рисунок 3.9, б).

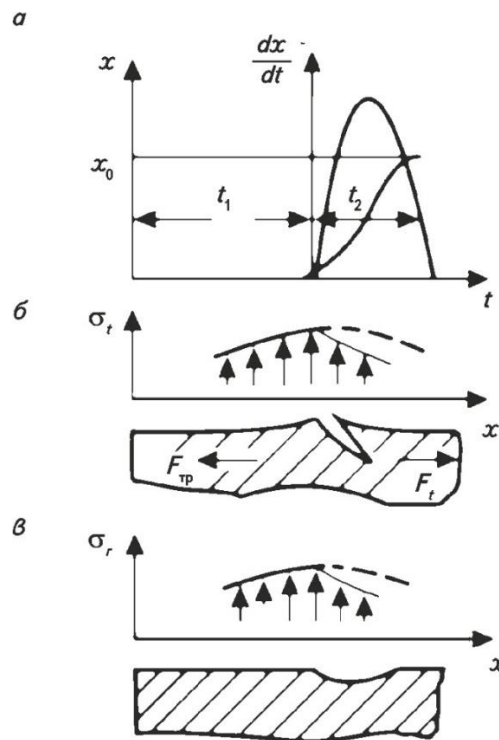


Рисунок 3.9 - Повреждение поверхности вала при разрывных релаксационных

автоколебаниях: а – смещение поверхности  $x$  и скорость смещения  $dx/dt$ ;

б – микро-разрыв; в – местный износ

Пренебрегая кривизной детали вращения, можно принять модель линейных перемещений колебательной системы (Рисунок 3.7), которая содержит возбудитель колебаний (инструмент) 1, вязко - упругий элемент (обрабатываемый поверхностный слой) 2, деформируемое тело (массивное эластомерное покрытие

вала) 3, закрепленное (тонким слоем адгезива) на жестком основании (стальной центр или стержень) 4.

Релаксационные автоколебания в системе инструмент – эластомерное покрытие могут возникнуть при скоростях меньших, чем критическая скорость [6]:

$$V_{t \vartheta}^* \approx \Delta f g / \left[ \lambda_t \sqrt{(e^{2\vartheta} - 1)} \right], \quad (3.11)$$

где  $\Delta f = f_0 - f$  - перепад коэффициентов трения при  $V_{t \vartheta} = 0$  и при  $V_{t \vartheta} > 0$  на обрабатываемой поверхности;  $g$  – ускорение свободного падения;  $\vartheta$  - логарифмический декремент колебаний;  $\lambda_t$  - частота собственных колебаний.

Частота собственных колебаний системы  $\lambda_t$  определяет период автоколебаний [50]:

$$T = t_1 + t_2, \quad (3.12)$$

где  $t_1 \approx \pi / \lambda_t$  - длительность периода в состоянии  $V_{t \vartheta} = 0$ ;  $t_2 = 2\Delta f g / (\lambda_t^2 V_{t \vartheta})$  – длительность перемещения при  $V_{t \vartheta} > 0$ .

Чем меньше скорость движения  $V_{t \vartheta}$ , тем более резко выражен процесс автоколебаний. При увеличении скорости  $V_{t \vartheta}$  длительность остановок в относительном движении  $t_1$  уменьшается, в результате смещение покрытия в процессе обработки становится более равномерным. Амплитуда колебаний стремится к значению, которое возможно при  $V_{t \vartheta} = 0$ :

$$A_c \rightarrow F_{\text{мол лим}} / C_t. \quad (3.13)$$

Точное теоретическое решение поставленной задачи затруднено, тем не менее, анализ приведенных аналитических зависимостей позволяет получить практические рекомендации [13].

Для предотвращения автоколебаний, следуя (3.11), необходимо, чтобы скорость обработки находилась в зоне  $V_{t \vartheta} > V_{t \vartheta}^*$ . Это условие может быть удовлетворено при выборе скорости  $V_{t \vartheta}$  по предварительно рассчитанной величине  $V_{t \vartheta}^*$ . Если скорость  $V_{t \vartheta}$  технологически predetermined (нерегулируемый электропривод), то должны быть приняты меры для снижения  $V_{t \vartheta}^*$ .

Для повышения качества обрабатываемой поверхности можно рекомендовать следующие меры:

1. Уменьшить перепад коэффициентов трения  $\Delta f$ , который возможен при сближении обоих компонентов  $f_{\text{мол}}$  и  $f_{\text{мех}}$  по (3.9) и (3.10).

При низкой твердости покрытия вала (50 *ShA* и ниже) молекулярное сцепление превосходит упругое сопряжение, и для предотвращения микро разрывов необходимо снизить коэффициент  $f_{\text{мол}}$  (см. рисунок 3.9), исключить рост отношения  $(E / \sigma_t^k)$ . Желательно использование смазывающих жидкостей, паст или твердых материалов. Возможно также охлаждение обрабатываемой поверхности сжатым воздухом.

При высокой твердости покрытия (выше 70 *ShA*) упругое сопряжение доминирует над молекулярным сцеплением, которое может быть нарушено.

Для недопущения пятен износа необходимо принять меры к снижению коэффициента  $f_{\text{мех}}$  см. (3.10), а именно не допускать рост отношения  $(\sigma_t / E)^n$ . Использование смазывающих материалов противопоказано. Необходим подбор рациональных характеристик абразивного инструмента.

2. Увеличить логарифмический декремент колебаний  $\vartheta$ .

Логарифмический декремент у вязких материалов мало зависит от уровня максимальных деформаций, и растет при уменьшении модуля упругости. Радикально рост  $\vartheta$  достигается заменой вида эластомерного материала (с иными физико-механическими характеристиками).

3. Увеличить частоту собственных колебаний системы инструмент - эластомерное покрытие  $\lambda_t$ .

Частота собственных колебаний системы  $\lambda_t = (c_t / m)^{0,5}$  возрастает с увеличением коэффициента жесткости  $c_t$ , значение которого в зоне упругих деформаций эластомера коррелирует с модулем Юнга  $E = d \sigma_t / d \varepsilon_t$ , а в зоне пластичности – с модулем пластичности  $E_{\text{п}} < E$ ; здесь  $m$  – масса деформируемого объема покрытия, которая определяется толщиной упругого слоя  $h$  и глубиной врезания инструмента.

Кроме того, для повышения класса шероховатости следует рекомендовать:

4. Уменьшение амплитуд релаксационных колебаний до  $A_c$  по (3.13).

5. Уменьшение периода релаксационных колебаний  $T_t$  по (3.12) и, соответственно, повышение частоты собственных колебаний  $\lambda_t$ , что согласуется с рекомендацией 3.

Рекомендации 2, 3 должны учитываться при конструировании, а рекомендации 1, 4 и 5 при разработке технологического процесса.

В связи с трудностями теоретического решения многофакторной задачи о финишной обработке эластомерного покрытия, для практических задач разработки технологического процесса возможно использование критериальных подходов. В качестве аналогии следует упомянуть работу [49], где для пар трения чугун по чугуну, стали, бронзе или текстолиту введен критерий, при соблюдении которого релаксационные автоколебания не возникают:

$$F_t / c_t > [F_t / c_t], \quad (3.14)$$

где  $F_t$  – тангенциальная сила, приложенная к ползуну;  $c_t$  – коэффициент жесткости.

При известной из эксперимента зависимости коэффициента трения  $f$  от скорости  $V_t$  критерий  $[F_t / c_t]$ , линейно зависящий от скорости  $V_t$ , по смыслу близок к значению отношения, полученного из (3.11):

$$\Delta f / \lambda_t = V_{t^*} (e^{2\theta} - 1)^{0,5} / g. \quad (3.15)$$

Зависимость (3.15) можно использовать как эмпирический критерий вида  $V_{t^*} > V_{t^*}^*$  для конкретных конструкций и технологических методов финишной обработки. В частности, при шлифовке опытного ролика диаметром 90 мм с покрытием из ПУ «Монотан» 80 ShA, с помощью абразивного круга 25A40M2 диаметром 260 мм, при частоте вращения круга 1500 об/мин, для шероховатости обработанной поверхности  $Ra$  1...1,2 получено значение  $V_{t^*}^* = 18$  м/с.

При сравнение различных методов финишной обработки полиуретанового покрытия необходимо отметить следующие особенности:

1. Абразивные круги, даже при тщательном подборе пористости и зернистости, а также режима обработки показывают большую нестабильность качества обрабатываемой поверхности (надрывы, пятна износа) в сравнении с игольчатыми фрезами и абразивными лентами.

2. Игольчатые фрезы типа «SSG» с произвольным расположением режущих игл можно рекомендовать для обработки мягких (50 *ShA* и ниже) полиуретановых покрытий. Для твердых покрытий (70 *ShA* и выше) необходимо применять игольчатые фрезы типа «MCM» с равными рядами, которые благодаря прерывистому характеру резания способствуют гашению автоколебаний упругого полиуретанового покрытия.

3. Абразивные ленты можно рекомендовать для обработки маложестких валов, когда глубина врезания ленты минимальна. При этом свободная ветвь ленты обладает большой радиальной податливостью и высокой демпфирующей способностью, благодаря чему колебания быстро затухают.

### **3.4 Выводы по главе 3**

1. Соблюдение выработанных в производственной практике временных и температурных режимов отливки полиуретановых деталей машин, а также методики подготовки литейных форм и арматуры обеспечивает достижение близких к каталожным физико-механических параметров одно- и двухкомпонентных полиуретанов горячей полимеризации.

2. Показано, что высокую производительность процесса черновой обработки поверхностей вращения, преимущественно для более мягких полиуретанов, обеспечивает применение кольцевых резцов.

3. Для полиуретанов высокой твердости (70 *ShA* и выше) предпочтительно использовать высокопористые круги, которые обеспечивают стабильность качества обрабатываемой поверхности.

4. Для одноступенчатого процесса обработки деталей вращения типа валов с покрытием средней и высокой твердости, не требующих тонкого полирования поверхности, наиболее эффективны игольчатые фрезы.



5. Для деталей вращения, требующих полирования до шероховатости ниже  $Ra\ 1,0$  целесообразно шлифование и полирование при  $Ra < 0,63 \dots 0,32$  свободным полотном бесконечной абразивной ленты.

6. Для получения высокого качества полиуретанового покрытия ( $Ra\ 0,63 \dots 0,32$ ), устранения мелких дефектов и придания детали товарного вида очень эффективным методом оказалась доводка с помощью притиров.

## **Глава 4 Выбор критериев работоспособности деталей машин из полиуретана, работающих при статическом и динамическом нагружении**

### **4.1. Общие сведения, классификация деталей машин из полиуретана и выбор критерия работоспособности**

Главной задачей конструирования деталей машин является, как известно, определение таких размеров, при которых они были бы прочны и экономичны. Требования прочности и экономичности деталей в известном смысле противоположны друг другу, так как, обеспечение прочности требует увеличения размеров деталей, а это приводит к увеличению их стоимости и снижению экономичности конструкции. Поэтому важнейшей задачей расчета деталей машин является определение оптимальных размеров детали, при которых обеспечены условия прочности без излишних запасов, то есть соблюдены условия экономии материала.

Помимо критерия прочности, который безусловно является главным критерием работоспособности, к деталям машин предъявляется требование длительной работоспособности и высокой надежности под действием приложенных нагрузок. Это требование особенно важно для деталей из полиуретана, работа которых обычно происходит при значительных статических и динамических нагрузках, вызывающих большие деформации деталей. Сохранение ими первоначальных размеров, формы и упругих характеристик приобретает в этих условиях первостепенное значение.

Детали машин должны быть совершенной формы, обеспечивающей наиболее высокую технологичность их изготовления и монтажа. Они должны иметь минимальный вес и использовать наименее дорогие материалы.

Перечисленные основные требования к деталям машин могут быть удовлетворены только при наличии методики расчета, основанной на достоверном

учете физико-механических свойств материала, величины и характера действующей нагрузки.

Действующие на детали машин в процессе работы нагрузки можно разделить на статические и динамические.

Динамические нагрузки, действующие на детали машин, различают по характеру и времени действия. По характеру динамические нагрузки могут быть стационарными и нестационарными, знакопеременными и постоянными по знаку, периодическими и непериодическими. По времени действия они бывают медленно изменяющиеся, когда время изменения нагрузки близко ко времени протекания релаксационных процессов в материале, и ударными. В практике, очевидно, распространены промежуточные по времени нагрузки, скорость изменения которых находится между медленно изменяющимися и ударными.

Расчет деталей машин, работающих при статических нагрузках в силу специфических свойств полиуретана, как материала, обладающего значительным внутренним сопротивлением, существенно отличается от расчета деталей, работающих при динамических нагрузках. Это отличие заключается прежде всего в том, что полиуретановые детали вследствие высокой эластичности материала могут допускать значительные относительные деформации, достигающие в отдельных случаях 100%, с полным восстановлением геометрической формы и размеров, если прикладываемая нагрузка носит статический, медленно изменяющийся характер или если динамическая нагрузка носит разовый характер, когда динамические нагружения следуют одно за другим с известными перерывами по времени.

Важнейшим критерием, определяющим работоспособность деталей машин из полиуретана, является температура полиуретанового массива. Для полиуретановых деталей, испытывающих воздействие статических и разовых ударных нагрузок температура полиуретана не превышает температуру других деталей и не относится к физическим величинам, определяющим работоспособность детали.

У полиуретановых деталей подверженных динамическому нагружению вследствие внутреннего трения происходит нагрев полиуретана и постоянное повышение температуры детали. С повышением температуры в полиуретане протекают необратимые физико-химические процессы, ухудшающие его эластичность, причем протекают они тем быстрее, чем выше температура нагрева полиуретана. Тепловое разрушение полиуретана приводит к выходу детали из строя.

Отличительной особенностью этого процесса является тот факт, что нагрев полиуретана может происходить при деформациях, в несколько раз меньше допустимых с точки зрения их полной обратимости, сохранения механических свойств и полного восстановления геометрической формы и размеров.

Из этого следует, что при расчете полиуретановых деталей, работающих при динамической нагрузке, необходимо исходить не только из условия недопустимости деформаций, вызывающих разрушение или потерю механических свойств, но также и из условия недопустимости такого нагрева полиуретана, который вызывал бы тепловое разрушение.

Нагрев полиуретана определяется прежде всего скоростью и величиной деформации полиуретанового массива. Поэтому на совокупность этих параметров, определяющих режим деформации детали при динамическом нагружении должны быть наложены ограничения, сохраняющие работоспособность детали.

Таким образом, расчет полиуретановых деталей, работающих при статических и разовых динамических нагрузках, существенно отличается от расчета деталей, работающих при динамических нагрузках.

Расчет деталей в последнем случае существенно усложняется тем что, нагрев их зависит не только от режима деформации и свойств полиуретана, но и от условий охлаждения деталей, которые в свою очередь, определяются их конструкцией, температурой и движением окружающей среды.

Учесть аналитическим путем, все многообразие факторов, влияющих на тепловой режим работы детали очень трудно. Поэтому при конструировании и расчетах полиуретановых деталей, работающих под действием динамических

нагрузок, важнейшая роль принадлежит эксперименту, как наиболее достоверному способу оценки работоспособности деталей в конкретных условиях.

В зависимости от вида нагружения выделим две основные группы деталей машин из полиуретана:

1. Упругие детали, испытывающие воздействие статических и разовых ударных нагрузках:

- прокладки и уплотнения;
- универсальные шарниры в рычажных системах;
- упругие буферы – ограничители перемещений.

2. Упругие и износостойкие детали, испытывающие воздействие динамических нагрузок:

- валы для полиграфии и целлюлозно-бумажного производства;
- массивные шины, опорные колеса, бегунки;
- амортизаторы.

Помимо представленных двух групп можно выделить третью группу, в которой полиуретан при работе не испытывает каких - либо значительных деформаций, и где используются его специфические свойства.

В частности, его высокая стойкость к абразивному изнашиванию используется в водяных насосах большой производительности для футеровки внутренних поверхностей.

Диэлектрические свойства и высокая текучесть полиуретана используется для герметизации электрических машин, работающих в воде. Химическая стойкость полиуретана используется при изготовления уплотнительных манжет и подшипников скольжения работающих в агрессивных средах.

Как известно, в курсе сопротивления материалов рассматриваются четыре основных вида деформации:

- растяжение или сжатие;
- сдвиг;
- изгиб;
- кручение.

Комбинация этих четырех видов деформации позволяет моделировать все случаи изменения размеров и формы деталей машин, которые они претерпевают под действием внешних сил. Однако разные материалы по-разному оказывают сопротивление тому или иному виду деформации, по-разному изменяют свою форму под влиянием приложенной нагрузки.

Полиуретан как конструкционный материал, применяется для изготовления деталей машин, работающих главным образом на деформацию сжатие и сдвига.

Полиуретан воспринимает и другие виды деформации, проявляя при этом весьма ценные конструкционные свойства. Так для деформации растяжения полиуретана характерна большие удлинения, достигающие 500%. Однако трудности прочного и надежного крепления полиуретанового массива, работающего на растяжение с другими деталями и большая чувствительность растянутого полиуретана к концентраторам напряжений (царапины, надрывы), сильно ограничивают его применение.

При работе на изгиб полиуретановые детали отличаются высокой эластичностью и практически не могут нести нагрузку. Аналогичные причины ограничивают применение полиуретановых деталей, работающих на кручение. Полиуретан практически не может сопротивляться срезу.

Во всех перечисленных случаях ограниченного применения полиуретана, детали из него предназначаются не для восприятия и передачи силовых нагрузок, они выполняют роль эластичных кинематических связей.

Основные требования, предъявляемые к деталям машин из полиуретана, как и к машинам в целом, характеризуются работоспособностью, надежностью, технологичностью, экономичностью и эстетичностью. Работоспособность и надежность деталей являются главными условиями эффективной работы любой машины.

Работоспособность деталей машин характеризуется рядом показателей-критериев, важнейшими среди которых являются:

- Прочность;
- Износостойкость;

- Теплостойкость;
- Жесткость;
- Устойчивость;
- Виброустойчивость.

Прочность является главным критерием, определяющим работоспособность деталей машин, и определяется как способность конструкции, ее частей и деталей выдерживать определенную нагрузку без разрушения.

Прочность является основным критерием при расчете деталей машин, работающих в условиях статического нагружения. Учитывая тот факт, что полиуретановые детали машин при работе испытывают явление релаксации, приводящее в некоторых случаях к разгерметизации механизмов, вследствие ослабления уплотнения с использованием эластомерных прокладок, предлагается использоваться вместо допускаемых напряжений величину минимальной предельно допускаемой относительной деформации полиуретанового массива.

Износостойкость является одним из важнейших критериев работоспособности, которая может явиться причиной отказа детали, в связи с потерей геометрической формы и размеров. Износостойкость является эффективным критерием работоспособности для деталей вращения с упругим покрытием из полиуретана, таких как массивные шины, опорные колеса и т. д., которые при своей работе контактируют с цементно-бетонным покрытием пола производственного помещения и подвергаются при работе интенсивному изнашиванию. Для деталей данного класса, в виде предельного критерия, определяющего работоспособность детали, принимают величину предельно допускаемого износа упругого обода.

Теплостойкость является самым эффективным критерием работоспособности для полиуретановых деталей машин, работающих в условиях постоянного динамического нагружения. Вследствие высокого внутреннего трения (гистерезис) полиуретановый массив детали при динамическом нагружении разогревается.

Важнейшей инженерной задачей является экспериментальное определение предельной температуры для полиуретана данной твердости, при которой происходит деструкция полиуретанового массива детали. Вполне очевидно, что для соблюдения работоспособности детали необходимо выполнять условие, при котором рабочая температура полиуретанового массива должна быть меньше предельной температуры для полиуретана данной твердости.

Жесткость, определяется как способность конструкции и ее элементов противостоять изменению формы и размеров под действием внешних нагрузок. Учитывая высокую эластичность полиуретана и его практическую неспособность противостоять изгибу и кручению, жесткость как критерий работоспособности к полиуретановым деталям машин не применяется.

Устойчивость, есть способность конструкции и ее элементов сохранять определенную начальную форму упругого равновесия. При конструировании полиуретановых деталей машин и выборе их размеров следует учитывать условия устойчивости деталей при сжатии осевой нагрузкой.

При сжатии длинных деталей при потере устойчивости происходит переход деформации продольного сжатия в продольный изгиб детали. Для полиуретана с закрепленными торцами рекомендуется, чтобы отношение высоты цилиндра к диаметру было не более 1,7. При превышении этого соотношения возникает опасность потери устойчивости при осевом сжатии.

Виброустойчивость - это свойство детали сохранять свою форму под действием динамических нагрузок в определенном спектре частот. Полиуретан, как конструкционный материал устойчив к действию вибрационных нагрузок и обладает хорошей способностью к поглощению механической энергии колебаний и дальнейшему рассеянию энергии в окружающее пространство в виде тепла.

В современном машиностроении широко распространена замена традиционного материала амортизаторов резины на более совершенный полиуретан.

Исходя из всего вышесказанного, можно сделать следующие выводы:



1. В качестве основного критерия при проектировании деталей машин с упругим полиуретановым массивом, подверженных статическому нагружению принимаем величину относительной деформации полиуретанового массива. Величину допускаемой относительной деформации полиуретанового массива принимаем исходя из опыта изготовления и эксплуатации конкретного типа деталей.
2. При проектировании деталей машин из полиуретана, работающих при динамическом нагружении, основным критерием работоспособности является температура полиуретанового массива. И как следствие, важнейшей задачей является экспериментальное определение предельной температуры полиуретанового массива при которой происходит разрушение материала, а также получение эмпирической зависимости температуры нагрева полиуретана от условий нагружения.
3. В качестве основного критерия работоспособности полиуретановых деталей вращения с упругим ободом, контактирующих при своей работе с твердой поверхностью принимаем износостойкость. Проверочный расчет на изнашивание упругого полиуретанового обода производим исходя из условий нагружения. Долговечность, в частности, массивной шины определяем, руководствуясь величиной допускаемого износа упругого обода.

#### **4.2 Экспериментальное определение деформации полиуретановых деталей, работающих на сжатие и сдвиг при статическом нагружении**

Сжатие является основным видом деформации, которому подвержено большинство полиуретановых и полиуретано - металлических деталей машин. При этом они как правило имеют цилиндрическую, прямоугольную и значительно реже коническую форму.

Расчет деталей машин, работающих на сжатие заключается в определении зависимости деформации детали от величины приложенной нагрузки.

Теоретически строгое и точное решение задачи по определению характеристик упругости полиуретановых деталей машин, работающих на сжатие можно получить методами теории упругости.

Классическая линейная теория упругости разрабатывалась преимущественно для материалов, допускающих большие напряжения при малых деформациях, в основном для металлов. При этом наряду с другими гипотезами, в линейной теории упругости в качестве исходных гипотез принимаются две следующие: между деформациями и напряжениями существует линейная зависимость, относительные деформации в материале пренебрежимо малы по сравнению с единицей.

В дальнейшем нам необходимо разработать достаточно простые приближенные формулы для инженерных расчетов полиуретановых деталей при статическом сжатии, которые давали бы результаты согласующиеся с экспериментальными данными.

Основным физико-механическим параметром, определяющим деформативность полиуретановых деталей как при статическом, так и динамическом нагружении является согласно [46, 47, 57] модуль упругости.

В отличие от металлов для которых модуль упругости почти не изменяется, для полиуретановых деталей модуль упругости при сжатии не является постоянной величиной и зависит от формы, размеров и величины деформации полиуретанового массива.

Полиуретан, как эластомер, при испытаниях на сжатие показывает линейную зависимость между напряжением и деформацией в весьма небольших пределах начальных деформаций.

В целом у полиуретана зависимость напряжение – деформация нелинейная и обычно не монотонна. Следовательно, полиуретан, как не подчиняющийся закону Гука нельзя охарактеризовать одним постоянным значением модуля упругости при сжатии, рассчитываемым из отношения напряжения к деформации. На нелинейном участке модуль упругости материала можно определить в дифференциальной форме.

При сжатии полиуретана площадь контакта детали с опорными плитами увеличивается по мере роста снижающей нагрузки и уменьшения высоты детали.

Сила трения между торцами полиуретана и плитами столь значительна что делает невозможным расширение торцов. Вследствие того, что площадь торцов остается неизменной, часть боковой поверхности полиуретана приходит в соприкосновение с плитами.

Описанное явление, связанное с влиянием торцов или так называемым краевым эффектом, приводит к ужесточению полиуретановых деталей при сжатии. Если соприкасающиеся поверхности полиуретана и металла гладкие и покрыты слоем смазки, то эффект торцов будет отсутствовать.

При подобных условиях происходит определение модуля упругости при сжатии согласно ГОСТ 9550-81. Очевидно влияние эффекта торцов будет максимальным при полимеризации полиуретана к металлическим плитам.

При наличии эффекта торцов деформация полиуретанового элемента характеризуется некоторым условным модулем упругости  $E_{изд}$ , присущим не материалу, а рассматриваемому изделию.

Для учета краевого эффекта были проведены эксперименты с тремя различными условиями взаимодействия полиуретана и сжимающих пластин:

1. Деформация полиуретанового образца между гладкими, смазанными стальными плитами.
2. Деформация полиуретанового образца между стальными плитами с шероховатостью Ra 1,25.
3. Деформация полиуретанового образца с закрепленными торцами, когда полиуретан и опорные пластины полимеризуются в литьевой форме.

По результатам экспериментов можно сделать следующие выводы:

1. При смазанных торцах модуль упругости изделия  $E_{изд}$  будет совпадать с модулем упругости полиуретана и коэффициент учитывающий трение на торцах  $K_{тор}=1$ .
2. В случае трения полиуретана по стальным пластинам с шероховатостью Ra 1,25 происходит незначительное ужесточение образца, которое можно учесть коэффициентом  $K_{тор Ra 1,25}=1,05$ .

3. При закрепленных торцах, когда полиуретан и стальные пластины полимеризуются в литьевой форме, коэффициент  $K_{\text{тор полим.}}=1,1$ .

Как видим, влияние эффекта торцов на деформативность полиуретанового образца колеблется в узких пределах.

Большее влияние на жесткость изделия оказывает соотношение между размерами образца. Как известно, с уменьшением высоты жесткость образца возрастает.

Физический смысл увеличения жесткости изделия заключается в постепенном переходе от высокоэластичной деформации сжатия к практически полной упругой объемной деформации полиуретана, модуль которой на три порядка выше, чем модуль одноосного сжатия.

Это ужесточение принято для эластомеров оценивать так называемым фактором формы  $\Phi$  – отношением площади нагруженной поверхности к свободной площади. Для цилиндрических образцов фактор формы равен:

$$\Phi = D/4H, \quad (4.1)$$

где  $D$  – диаметр цилиндра;  $H$  - высота цилиндра.

Коэффициент формы для цилиндрических полиуретановых образцов по результатам большого количества замеров деформативности определяется по формуле:

$$K_{\text{фор}} = (0,8 + \Phi), \quad (4.2)$$

где  $\Phi$  – фактор формы.

Попутно заметим, что фактор формы стандартных образцов для определения модуля упругости при сжатии по ГОСТ 9550-81 равен 0,2 (диаметр 32 мм и высота 38 мм) и тогда коэффициент формы стандартного образца равен  $K_{\text{фор}} = 0,8 + 0,2 = 1$ .

На основании зависимости (4.2) определяется начальный или исходный модуль упругости при сжатии для цилиндрического образца произвольной формы.

Например, при уменьшении высоты образца в 2 раза коэффициент формы  $K_{\Phi}=1,2$  и модуль упругости для полиуретана твердостью 85ShA с величины  $E=21\text{МПа}$  возрастает до  $25,2\text{МПа}$ .

Если цилиндрическая деталь имеет осевое отверстие диаметром  $d$ , то фактор формы запишется следующим образом:

$$\Phi = \frac{\frac{\pi D^2}{4} - \frac{\pi d^2}{4}}{\pi D H + \pi d H} = \frac{D-d}{4H}, \quad (4.3)$$

Для деталей прямоугольной формы фактор  $\Phi$  будет иметь следующий вид:

$$\Phi = \frac{ab}{2(a+b)H}, \quad (4.4)$$

где  $a$  и  $b$  – стороны основания детали;  $H$  – высота прямоугольника.

В отличие от резин, у которых согласно [7] деформативность не зависит от твердости, полиуретаны различной твердости имеют различные величины ужесточения при сжатии. Твердые полиуретаны ужесточаются при сжатии больше, нежели мягкие.

По результатам большого количества замеров деформативности полиуретанов различной твердости получено выражение для коэффициента деформативности при сжатии:

$$K_{\text{дефор}} = \left(1 + \frac{ShA^{1,17}}{1000}\right). \quad (4.5)$$

Учитывая все выше изложенное, можно определить модуль упругости полиуретана при сжатии в изделии по следующей формуле:

$$E_{\text{изд}} = E_{\text{см}_0} \cdot K_{\text{тор}} \cdot K_{\text{фор}} \cdot K_{\text{деф}} = E_{\text{см}_0} \cdot K_{\text{тор}} (0,8 + \Phi) \cdot \left(1 + \frac{ShA^{1,17}}{1000}\right), \quad (4.6)$$

где  $E_{\text{см}_0}$  – начальный модуль упругости полиуретана при сжатии;  $K_{\text{тор}}$  – коэффициент, учитывающий трение на торцах изделия;  $\Phi$  – фактор формы изделия;  $ShA$  – твердость полиуретана по Шору.

Для случая осевого сжатия цилиндрического образца при малых деформациях (менее 20%) зависимость сила - деформации может быть представлена в следующем виде:

$$F = \frac{\beta_1 E_{uz\delta} S \delta}{H}, \quad (4.7)$$

где  $\beta_1$  – коэффициент ужесточения при сжатии цилиндра;  $E_{uz\delta}$  – модуль упругости полиуретана при сжатии в изделии;  $S$  – площадь сечения;  $\delta$  – осадка;  $H$  – высота, мм.

Коэффициент  $\beta_1$  является функцией безразмерного параметра  $\gamma = r/H$ , характеризующего отношение радиуса цилиндра к высоте.

По результатам большого количества замеров деформативности полиуретановых цилиндров различной геометрии была получена экспериментальная зависимость (см. рисунок 4.1).

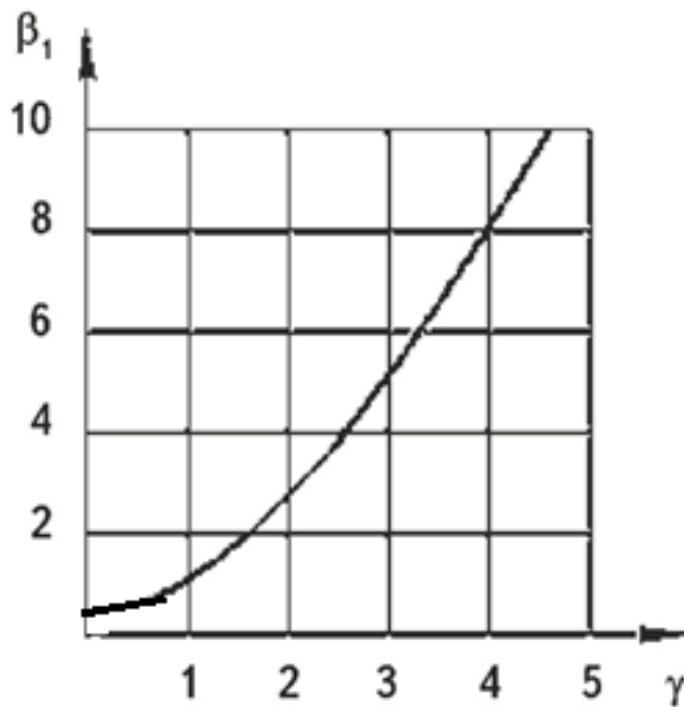


Рисунок 4.1 - Зависимость коэффициент  $\beta_1$  от параметра  $\gamma$

Представленная зависимость хорошо аппроксимируется следующим выражением:

$$\beta_1 = 0,73 + 0,46\gamma^2 \quad (4.8)$$

Подобную качественно зависимость для резин получил Э.Э. Лавендел [23] с использованием метода разрешающей функции.

Для определения жесткости сплошного цилиндра при осевом сжатии для  $\gamma = 0,5 \dots 4,5$  можно рекомендовать формулу:

$$c = \frac{E_{uz0}S}{H} \beta_1 = \frac{E_{uz0}S}{H} (0,73 + 0,46\gamma^2) \quad (4.9)$$

Осадку цилиндра можно определить по формуле:

$$\delta = \frac{FH}{\beta_1 E_{uz0}S} = \frac{FH}{E_{uz0}S(0,73 + 0,46\gamma^2)} \quad (4.10)$$

В случае, если продольная жесткость конструкции должна быть увеличена, а поперечная сохранена неизменной конструктор может заменить одно изделие несколькими элементами (см. рисунок 4.2).

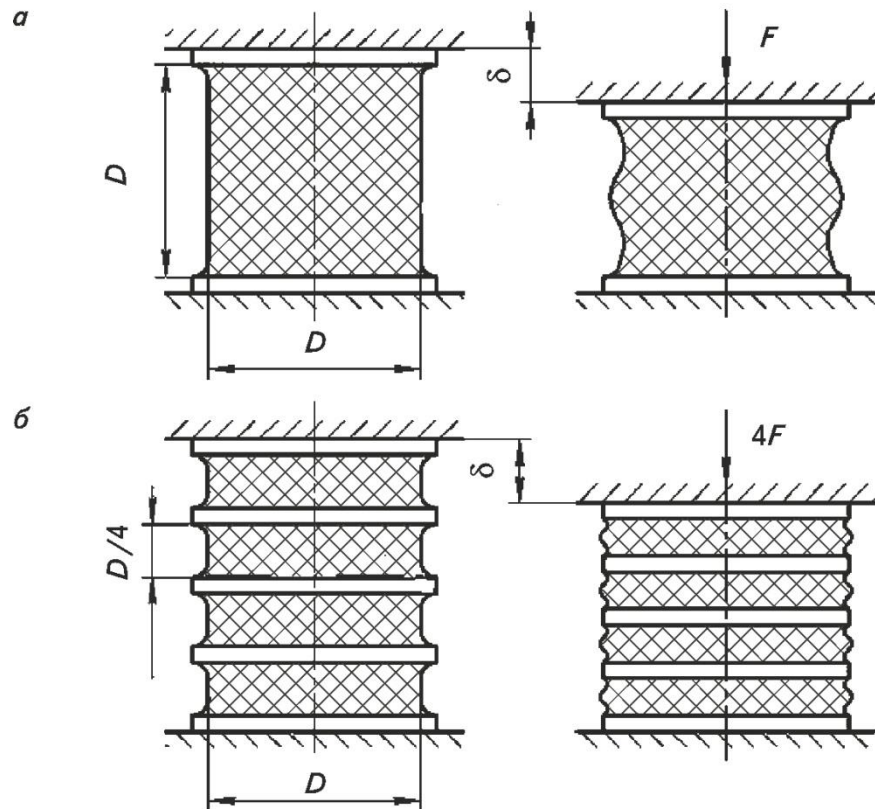


Рисунок 4.2 - Сравнение жесткости единичного (а) и составного (б) амортизаторов

На рисунке 4.2, а представлен единичный блок с коэффициентом формы  $\Phi = 1/4$ . Если его заменить набором из четырех последовательно расположенных блоков, каждый толщиной в одну четвертую единичного блока, то коэффициент формы будет равен 1. Так как модуль упругости при сжатии приблизительно

пропорционален коэффициенту формы, тогда жесткость составного амортизатора из четырех тонких блоков в 4 раза выше, чем у единичного блока. Таким образом, если заменить один блок набором из  $n$  тонких блоков, каждый толщиной в  $1/n$  толщины первоначального, то жесткость составного элемента при сжатии будет в  $n$  раз больше жесткости единичного блока.

При необходимости конструирование изделий меньшей жесткости может быть произведено за счет размещения в изделии серии отверстий, расположенных вдоль действия силы или выбором более мягкого полиуретана.

При конструировании полиуретановых деталей и выборе их размеров, следует учитывать условия устойчивости деталей под действием осевой нагрузки.

При сжатии длинных деталей при потере устойчивости происходит переход деформации продольного сжатия в продольный изгиб детали. Согласно критерию Эйлера, критическое напряжение сжатия, при котором происходит переход к продольному изгибу, определяется по формуле:

$$\sigma = \frac{4F}{\pi D^2}. \quad (4.11)$$

при этом критическая нагрузка:

$$F = \frac{\pi^2 EJ}{H^2}. \quad (4.12)$$

Подставляя в формулу (4.11)  $D = 4H\Phi$  и  $J = \frac{\pi D^4}{64}$  получим:

$$\sigma = \pi^2 E \Phi^2. \quad (4.13)$$

Пользуясь полученной формулой можно по заданному допускаемому напряжению проверить продольную устойчивость цилиндрической детали, имеющей фактор формы  $\Phi$ , или найти допускаемую относительную деформацию по формуле:

$$[\varepsilon] = \pi^2 \Phi^2. \quad (4.14)$$

Для эластомеров с закрепленными торцами, рекомендуется чтобы, отношение высоты цилиндра к диаметру было не более 1,7.

При превышении этого отношения возникает опасность потери устойчивости при осевом сжатии.



Исходя из опыта расчетов, изготовления и эксплуатации полиуретановых деталей, работающих на сжатие можно рекомендовать в качестве допускаемых относительных деформаций следующие величины:

1. Для деталей испытывающих только статическую нагрузку,  $[\varepsilon] = 0,20 \dots 0,25$
2. Для деталей, испытывающих статическую нагрузку со случайными или регулярными кратковременными динамическими нагрузками, следующими с интервалом по времени,  $[\varepsilon] = 0,15 \dots 0,20$
3. Для деталей, испытывающих постоянные динамические нагрузки,  $[\varepsilon] = 0,10 \dots 0,15$ .

Учитывая незначительное отклонение (до 8%) полиуретана при сжатии от закона Гука и принимая выработанные практикой допускаемые относительные деформации в качестве основы расчета, допускаемое напряжение сжатия можно определить по формуле:

$$[\sigma_{сж}] = E_{стo}[\varepsilon]$$

При выборе  $[\varepsilon]$  в указанных выше пределах, более высокие значения необходимо принимать для более мягких полиуретанов, а меньшие значения для твердых полиуретанов. Значения допускаемых напряжений представлены в таблице 4.1.

Таблица 4.1 - Допускаемые напряжения сжатия для различных видов нагружения.

Параметр	Допускаемые напряжения, МПа		
Твердость по Шору	75±1	85 ± 1	95 ± 1
Начальный статический модуль упругости при сжатии, Мпа	15	21	35
Допускаемое напряжение сжатия при статических нагрузках, МПа	3,7	4,6	7
Допускаемое напряжение сжатия при статических нагрузках с эпизодическими динамическими нагрузками, Мпа	3,0	3,5	5,2
Допускаемое напряжение сжатия при постоянных динамических нагрузках, Мпа	2,2	2,5	3,5

Приведенные величины допускаемых напряжений могут быть рекомендованы для предварительной оценки прочности полиуретановых деталей. Окончательное суждение о прочности и долговечности полиуретановых деталей может быть получено лишь после испытаний их в эксплуатационных условиях.

Полиуретановые детали, работающие на сдвиг, имеют различную форму, но наиболее часто применяются детали в виде цилиндров или параллелепипедов. Нагрузка прикладывается обычно к двум параллельным металлическим пластинам, между которыми находится полиуретановый массив.

Под действием сдвигающей силы  $F$  (см. рисунок 4.3, а) полиуретановый элемент испытывает не только сдвиг, но и изгиб, вследствие чего в нем, наряду с касательными, возникают и нормальные напряжения.

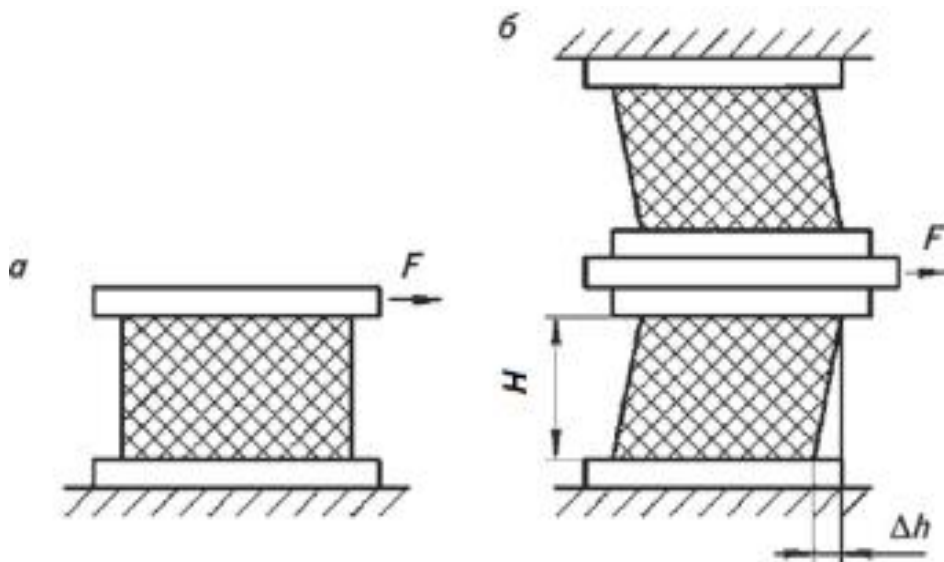


Рисунок 4.3 - Схема приложения нагрузки к эластомерно - металлическим деталям, работающим на сдвиг: а – единственный блок; б – двойной блок

При деформации, параллельность сторон полиуретанового элемента связанных с металлическими пластинами, нарушается.

Исходя из производственной практики, для исключения перекоса применяются детали, состоящие из двух полиуретановых массивов (см. рисунок 4.3, б). Если сдвигающая сила прикладывается к средней пластине, при этом

наружные пластины закреплены неподвижно, то полиуретановый элемент испытывает так называемый сложный сдвиг, а по их граням действуют только касательные напряжения.

Если исходить из равномерного распределения касательных напряжений по плоскости сдвига, то связь между напряжением и силой устанавливается, как известно следующей формулой:

$$\tau = \frac{F}{S}, \quad (4.15)$$

где  $F$  - нагрузка, приложенная к детали;  $S$  – площадь плоского сдвига.

Деформация  $\Delta h$  (см. рисунок 4.3, б) называется абсолютным сдвигом, а отношение  $\gamma = \Delta h/H$  называется относительным сдвигом.

Как показывают многочисленные исследования, относительный сдвиг  $\gamma$  и касательное напряжение  $\tau$  пропорциональны друг другу и связаны между собой законом Гука, согласно которому:

$$\tau = G\gamma. \quad (4.16)$$

В теории упругости установлены следующие зависимости:

$$K = E/3(1 - 2\mu) \quad (4.17)$$

$$G = E/2(1 + \mu), \quad (4.18)$$

где  $K$  – объемный модуль упругости;  $\mu$  – коэффициент Пуассона.

Из этих формул легко получить:

$$\mu = (3K - 2G)/2(3K + G). \quad (4.19)$$

$$E = 9KG/(3K + G). \quad (4.20)$$

Как известно, у полиуретана твердостью 85 ShA  $K \approx 2720$  МПа, а  $G \leq 7$  МПа. Поэтому если в числителе выражения (4.19) и в знаменателе выражения (4.20) пренебречь величинами  $2G$  и  $G$ , которые весьма малы по сравнению с величиной  $3K$ , то погрешность не будет превышать 0,1%. При этом из формулы (4.20) следует зависимость:

$$E = 3G . \quad (4.21)$$

Следует отметить, что уравнение (4.21) справедливо для деформации чистого сжатия. Таким образом, даже в этом случае податливость детали на сдвиг в 3 раза больше, чем на сжатие. Если же принять во внимание тот факт, что модуль сжатия изделия в значительной степени зависит от формы и размеров детали, то эта зависимость будет выражена более резко.

Расчет полиуретановых деталей, работающих на сдвиг, значительно проще, чем расчет деталей, испытывающих деформацию сжатия. Объясняется это тем, что модуль сдвига полиуретана в пределах практически применяемых деформаций полиуретановых деталей может приниматься постоянным независимым от величины деформации.

Однако модуль сдвига полиуретана, как и модуль сжатия зависит от соотношения геометрических размеров детали, или фактора формы.

По результатам большого количества экспериментальных замеров деформативности полиуретановых деталей при сдвиге было получено выражение для определения модуля сдвига изделия в зависимости от фактора формы:

$$G_{\text{изд}} = \frac{G_{cd}}{1 + \frac{0,007}{\Phi^2}}, \quad (4.22)$$

где  $G_{cd}$  - модуль сдвига полиуретана;  $\Phi$  - фактор формы.

Подобное качественно выражение приведено в работе [29] для резин.

Как видно из формулы (4.22) с увеличением высоты детали при неизменном поперечном размере, т.е с уменьшением фактора формы, уменьшается и модуль упругости изделия  $G_{\text{изд}}$ . Это объясняется тем, что с увеличением высоты детали ее деформация происходит не только за счет сдвига, но и за счет поперечного изгиба.

Кроме того, из эксперимента следует небольшое различие в деформативности полиуретанов различной твердости.

Мягкие полиуретаны более склонны к поперечному изгибу, нежели твердые. Это явление будем учитывать коэффициентом деформативности при сдвиге:

$$K_{\text{деф.сд.}} = 0,6 + 0,005 ShA. \quad (4.23)$$

Окончательно для определения модуля сдвига изделия имеем выражение:

$$G_{\text{изд}} = \frac{G_{\text{сд}}}{1 + \frac{0,007}{\phi^2}} \cdot (0,6 + 0,005 Sh). \quad (4.24)$$

При проведении инженерных расчетов полиуретановых деталей на сдвиг линейная зависимость между напряжениями и деформацией может приниматься до значительных величин  $\gamma$ , равных 0,6...0,7. Однако график  $G(\gamma)$  показывает незначительное снижение модуля сдвига с увеличением деформации (см. рисунок 4.4)

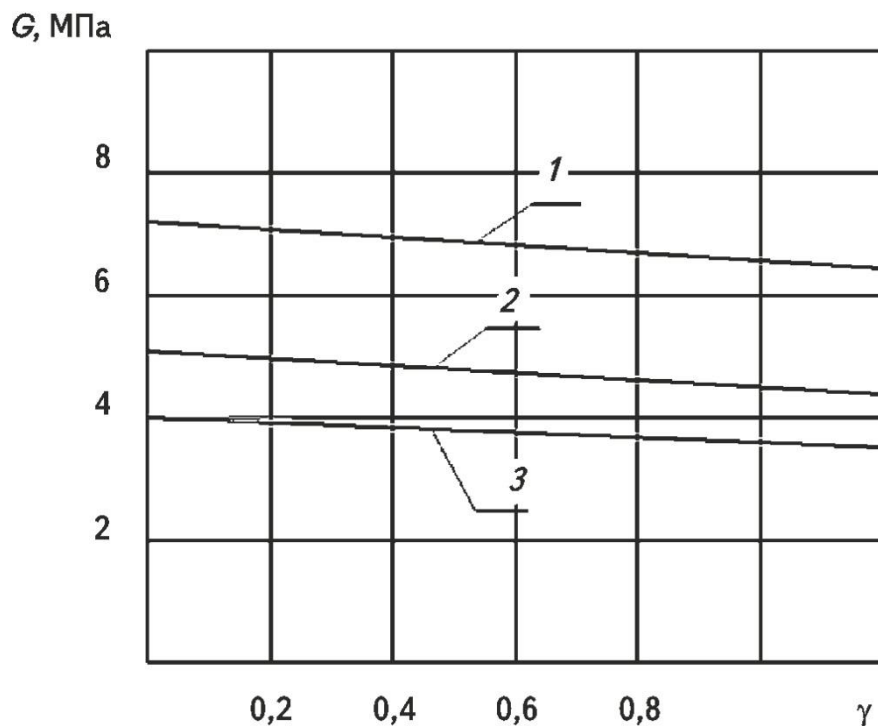


Рисунок 4.4 - Зависимость модуля сдвига полиуретана от величины относительной деформации: 1 – твердость 85ShA; 2 - твердость 80ShA; 3 – твердость 75ShA

Незначительное снижение модуля упругости при сдвиге можно не учитывать при обычных инженерных расчетах. При этом ошибка в определении жесткости деталей в пределах статического сдвига  $\gamma=0,3...0,4$  не превышает 2...5% для полиуретана твердостью 75...85ShA.

Замеры деформативности полиуретана при сдвиге показали характерное соответствие между модулем упругости при сжатии и модулем упругости при сдвиге, зависимость (4.21).

В соответствии с экспериментальными замерами можно принимать модуль сдвига равным одной третьей от начального модуля упругости при сжатии:

$$G_{сд} = 1/3E_{сж0}, \quad (4.25)$$

где  $E_{сж0}$  – начальный модуль упругости при сжатии.

С учетом линейной зависимости  $F(\gamma)$  и постоянства модуля сдвига определение деформации полиуретановых деталей может производиться на основе зависимости вытекающей из закона Гука:

$$\delta = \frac{FH}{G_{изд}S}, \quad (4.26)$$

где  $F$  – нагрузка, приложенная к детали;  $H$  – высота детали;  $G$  – модуль упругости изделия, определяемый по формуле (4.24);  $S$  – площадь поперечного сечения детали по плоскости сдвига.

При выборе допускаемых напряжений для полиуретановых деталей, работающих при статических нагрузках, вызывающих деформацию сдвига, можно исходить из допускаемых относительных деформаций, в пределах которых имеет место чистый сдвиг. Чистый сдвиг характеризуется наличием только касательных напряжений, при этом сохраняются форма и размеры поперечного сечения во всех плоскостях, параллельных плоскости сдвига.

Для полиуретанов, используемых для изготовления виброизоляторов, эластичных шарниров и других аналогичных деталей величина относительного сдвига может достигать максимальных величин  $\gamma = 0,6...0,7$ , в частности у виброизоляторов при пуске или остановке двигателя.

Учитывая высокую стабильность физико-механических свойств полиуретана, прочность крепления полиуретанового массива к металлу при полимеризации, а также основываясь на опыте расчетов, изготовления и эксплуатации эластомерно – металлических деталей, можно рекомендовать в качестве допускаемых относительных деформаций сдвига следующие величины:

1. Для деталей испытывающих только статическую нагрузку,  $[\gamma] = 0,5 \dots 0,6$
2. Для деталей, испытывающих статическую нагрузку со случайными или регулярными кратковременными динамическими нагрузками, следующими с интервалом по времени,  $[\gamma] = 0,35 \dots 0,45$
3. Для деталей, испытывающих постоянные динамические нагрузки,  $[\gamma] = 0,15 \dots 0,25$ .

Принимая указанные допускаемые относительные деформации в качестве основы расчета и имея для полиуретана каждой твердости свой модуль упругости  $G_{cd}$ , можно определить допускаемое напряжение сдвига  $[\tau]$  как  $[\tau] = G_{cd}[\gamma]$ .

Более высокие значения  $\gamma$  следует принимать для мягких полиуретанов, а меньшие значения  $\gamma$  для полиуретанов повышенной твердости. Допускаемые напряжения сдвига представлены в таблице 4.2.

Таблица 4.2 - Допускаемые напряжения сдвига для различных видов полиуретанов

Параметр	Допускаемое напряжение, МПа		
	65±1	75±1	85±1
Твердость по Шору	65±1	75±1	85±1
Модуль сдвига, Мпа	4	5	7
Допускаемое касательное напряжение сдвига при статических нагрузках, Мпа	2,4	2,8	3,5
Допускаемое касательное напряжение сдвига при статических нагрузках с эпизодическими кратковременными динамическими нагрузками, Мпа	1,8	2,0	2,4
Допускаемое касательное напряжение сдвига при постоянных динамических нагрузках, Мпа	1,0	1,0	1,0
Допускаемое касательное напряжение при сдвиге с поворотом, МПа *	1,3	1,4	1,5
Допускаемое касательное напряжение при сдвиге с кручением, МПа **	1,1	1,2	1,3

Примечание: \* - сдвиг с поворотом характерен для работы сайлент –блока;  
 \*\* - сдвиг с кручением характерен для работы амортизаторов – шайб.

Аналогичное качественное соотношение допускаемых напряжений для резин приведено в работе [34].

Располагая величиной допускаемого напряжения, проектирование полиуретановых деталей по заданной жесткости  $c = \frac{GS}{H}$  можно производить в следующем порядке.

Исходя из опытов расчета и эксплуатации эластомерно – металлических деталей выбираем полиуретан определенной твердости и с помощью таблицы 4.2 принимаем допускаемое напряжение, соответствующее характеру действующей нагрузки и определяем относительную деформацию сдвига  $\gamma = \frac{[\tau]}{G}$ .

Далее, исходя из конструктивных соображений принимаем либо площадь сечения детали в плоскости сдвига, либо высоту детали или ее абсолютный сдвиг. Если по конструктивным соображениям удобнее задаваться высотой детали или абсолютным сдвигом, то на основании зависимости  $\gamma = \Delta h/H$  при известном относительном сдвиге определяются обе эти величины.

После того как известно  $H$  определяется площадь плоскости сдвига по формуле  $S = \frac{cH}{G}$  и далее, задаваясь одним из размеров  $a$  или  $b$  находят второй из них.

Если из конструктивных соображений удобнее задаваться размерами основания  $a$  и  $b$ , т.е. площадью плоскости сдвига  $S$ , то сначала определяем абсолютный сдвиг детали по формуле  $\Delta h = \frac{GS\gamma}{c}$ , а затем и высоту как  $H = \Delta h/\gamma$ . Точно также по заданной жесткости  $c$  могут определяться размеры деталей произвольной формы, работающей на сдвиг.

#### **4.3 Расчет полиуретановых деталей машин, работающих при динамическом нагружении**



Как известно полиуретан является высокоэластичным материалом. Одним из проявлений высокоэластичного характера деформации полиуретана является зависимость модуля упругости от режима деформации. Если принять во внимание тот факт, что большинство полиуретановых деталей машин выполняют главным образом функции упругих звеньев, испытывающих в процессе работы импульсные, знакопеременные, высокочастотные периодические и непериодические нагрузки, то становится очевидной необходимость пристального изучения особенностей механических свойств полиуретана при динамическом нагружении.

Если тело деформируется так медленно, что все перегруппировки молекул успевают произойти за время деформации, то эластичность полиуретана проявляется полностью.

Если же деформация происходит быстро, то молекулы полиуретана не успевают изменять свою форму или изменяют ее частично. В этом случае согласно [63] эластические свойства не успевают проявляться совсем или проявляются частично, а полиуретан становится более жестким.

Таким образом, сопротивление полиуретана деформированию должно зависеть от скорости приложения нагрузки и, следовательно, значение модуля упругости также будет функцией скорости деформации.

При проектировании полиуретановых деталей машин, работающих под действием динамических нагрузок, основным интерес представляют следующие вопросы:

1. Получение качественных и количественных зависимостей изменения модуля упругости от скорости деформации для полиуретанов различной твердости.
2. Определение температуры полиуретанового массива в зависимости от скорости деформирования и величины относительной деформации для полиуретанов различной твердости.
3. Влияние нагрева, количества циклов нагружения полиуретана на его физико-механические свойства.
4. Изучение долговечности полиуретановых деталей при различных условиях нагружения.

Решение перечисленных задач может вестись как теоретическим, так и экспериментальным путем.

Однако, учитывая специфические особенности полиуретана как материала, наиболее простым и достоверным путем изучения его свойств, следует считать путь экспериментальный.

Экспериментальные данные по исследованию первых трех вопросов будут приведены далее, а четвертый вопрос будет освещен в главе о массивных шинах.

Учитывая тот факт, что работа большинства полиуретановых деталей происходит при скоростях деформации, значительно превосходящих скорости релаксационных процессов, большое значение имеет установление зависимости вида:

$$E_{дин} = k_{д.у.} E_{ст 0}. \quad (4.27)$$

согласно которой динамический модуль упругости полиуретана, соответствующий заданной скорости деформации, определялся бы как произведение начального статического модуля упругости при сжатии и параметра  $k_{д.у.}$ , именуемого как коэффициент динамического ужесточения, учитывающего влияние скорости деформации на модуль упругости полиуретана данной твердости.

Параметр  $K_{д.у.}$  в общем случае должен представлять собой зависимость, учитывающую скорость деформации и твердость полиуретана. Необходимо отметить что зависимость, которую нужно отыскать трудно поддается теоретическому анализу. Поэтому наиболее прямым и достоверным путем его определения является эксперимент.

При проведении экспериментов по изучению долговечности деталей вращения с полиуретановым ободом была отмечена разность радиальной деформации полиуретанового ролика в состоянии покоя и при вращении.

Учитывая тот факт, что основным параметром, определяющим деформативность полиуретанового ролика, является модуль упругости полиуретана, расчетным путем была получена зависимость коэффициента динамического ужесточения от скорости нагружения для полиуретанов различной твердости:

$$K_{\partial,y} = \frac{E_{\partialин}}{E_{cm 0}} = 1 + \frac{V^{1,28-0,0059ShA}}{20-0,19ShA}, \quad (4.28)$$

где  $V$  – линейная скорость;  $ShA$  – твердость полиуретана в единицах по Шору.

Анализируя зависимость (4.28) можно отметить, что коэффициент динамического ужесточения растет с увеличением скорости деформирования по экспоненциальной зависимости, у более твердых полиуретанов рост менее значительный.

С увеличением твердости полиуретана коэффициент динамического ужесточения линейно возрастает.

Значения коэффициента динамического ужесточения для различных скоростей деформирования и разной твердости полиуретанов представлены в таблице 4.3.

Таблица 4.3 - Коэффициент динамического ужесточения

Твердость полиуретана, ShA	Скорость деформирования, м/с			
	0,5	1,0	1,5	2,0
75	1,10	1,17	1,25	1,32
85	1,15	1,26	1,36	1,46
95	1,30	1,51	1,70	1,88

Необходимо отметить, что замеры деформации ролика проводились в начале эксперимента, при температуре 20 С. В дальнейшем при вращении ролика под нагрузкой происходит повышение температуры обода, которое приводит к увеличению радиальной деформации.

Учитывая тот факт, что основным физическим параметром, определяющим деформативность полиуретанового ролика, является модуль упругости, путем расчетов по формуле (7.12) была построена зависимость модуля упругости полиуретана от температуры.

Данное уменьшение модуля упругости полиуретана будем учитывать с помощью коэффициента температурного размягчения:

$$K_{m.p.} = 1 - 0,0033T_n . \quad (4.29)$$

С учетом всего вышесказанного модуль упругости полиуретана, работающего при динамическом нагружении определяется по формуле:

$$E_{дин} = E_{стo} K_{д.у.} K_{m.p.} \quad (4.30)$$

При конструировании полиуретановых деталей, работающих в режиме динамического нагружения, следует выбирать такие размеры и конструкцию, чтобы избежать значительного роста температуры.

При периодических многократных деформациях полиуретана, высокоэластичная деформация отстает по фазе от приложенной силы, так как перегруппировка гибких молекул происходит не мгновенно, а со временем. При этом образуется петля гистерезиса. Петля гистерезиса при многократных деформациях в большинстве случаев играет при эксплуатации отрицательную роль (за исключением виброизоляторов), так как является источником образования тепла в полиуретане.

По результатам большого количества замеров температуры полиуретанового ролика при различных режимах нагружения была получена эмпирическая зависимость для определения температуры нагрева полиуретанового массива в зависимости от скорости нагружения и величины относительной деформации:

$$T = \frac{T_г + 6,9 V_l^{1,65} + 95[\varepsilon]}{1,67 - 0,007 ShA} . \quad (4.31)$$

Или в развернутом виде:

$$T = \frac{T_г + 6,9 V_l^{1,65} + 95 \sqrt[3]{\left(\frac{F}{2E_{дин} b d \sqrt{\frac{h}{d}}}\right)^2}}{1,67 - 0,007 ShA} , \quad (4.32)$$

где  $T_г$  - температура окружающего воздуха;  $\varepsilon$  - величина относительной деформации;  $V_l$  - линейная скорость нагружения;  $F$  - нагрузка на ролик;  $E_{дин}$  -

динамический модуль нагружения;  $b$  - ширина ролика;  $d$  - диаметр ролика;  $h$  - толщина обода;  $ShA$  – твердость полиуретана в единицах по Шору.

Приведенное выражение получено для случая сжатия полиуретанового массива деталей вращения определенной геометрической формы, для которых свойственны определенные рабочие скорости и соответствующее охлаждение воздухом при их вращении.

Учитывая стабильность физико-механических свойств полиуретана, высокую достоверность сведений о нагрузках и методики расчета коэффициент запаса по предельной температуре и деформации принимаем равными 1,3. С учетом вышеизложенного перепишем зависимость (4.32) в следующем виде:

$$\frac{T_{lim}}{[K_T]} = \frac{T_0 + 6,9V_{max}^{1,65} + 0,95 \frac{\varepsilon_{lim}}{[K_\varepsilon]}}{1,67 - 0,007ShA}, \quad (4.33)$$

где  $T_{lim}$  - предельно допускаемая температура (см. таблицу 2.3);  $\varepsilon_{lim}$  - предельно допускаемая относительная деформация (см. таблицу 1.3);  $[K_T]$  - допускаемый коэффициент запаса по температуре;  $[K_\varepsilon]$  - допускаемый коэффициент запаса по деформации.

Значения предельной температуры, относительной деформации и максимальной скорости нагружения для основных конструкционных полиуретанов, работающих в условиях динамического нагружения, при температуре окружающего воздуха равного 20° С представлены в таблице 4.4.

Таблица 4.4 - Значения предельной температуры, деформации и максимальной скорости для полиуретанов различной твердости

Параметр	Твердость полиуретана, ShA		
	75	85	95
Предельная температура, °С	60	65	70
Максимально допустимая относительная деформация при динамическом нагружении, %	14	12	9
Максимальная скорость деформирования, м/с	1.8	2.0	2.9

Для массивных полиуретановых изделий, работающих в режиме динамического нагружения во избежание повышения температуры следует предусмотреть в конструкции осевые отверстия для уменьшения теплообразования, улучшения теплоотдачи, а также предусмотреть систему охлаждения.

Опыт эксплуатации массивных полиуретановых изделий, работающих в режиме постоянного динамического нагружения, показывает, что очаг разрушения находится в центре полиуретанового элемента. Введение отверстий в этой зоне изделия резко повышает долговечность детали.

Для изучения вопросов теплообразования и усталостного разрушения полиуретановых виброизоляторов, работающих на сдвиг, был спроектирован и изготовлен специальный стенд. Стенд позволяет моделировать простейший случай одноосного гармонического нагружения полиуретанового массива испытуемого виброизолятора, испытывающего при работе несимметричный цикл нагружения (см. рисунок 4.5).

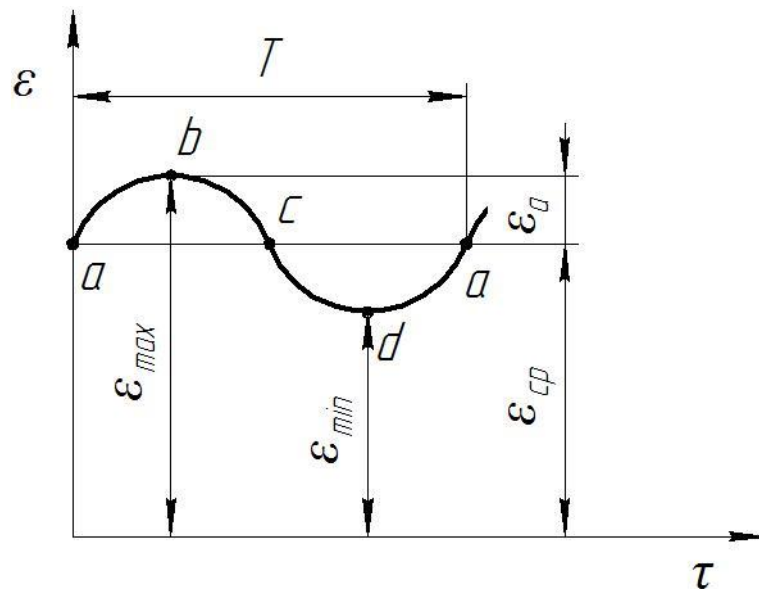


Рисунок 4.5 - Режим несимметричного цикла нагружения:  $\varepsilon_{cp}$ - среднее значение деформации;  $\varepsilon_a$  - амплитудное значение деформации;  $\varepsilon_{max}$  – максимальное значение деформации;  $\varepsilon_{min}$  – минимальное значение деформации;  $T$ - период колебаний

Полупериод колебаний, обозначенный на рисунке 4.5 буквами  $a$   $b$   $c$ , соответствует деформации сдвига, при которой происходит удаление центральной пластины виброизолятора от нулевого положения. Участок  $c$   $d$   $a$ , соответствует деформации сдвига, при которой происходит приближение центральной пластины виброизолятора к нулевому положению. При этом нулевое положение соответствует среднему значению статической деформации.

Среднее значение деформации  $\varepsilon_{cp}$  виброизолятора, чаще всего обусловлено весом амортизируемого объекта. Для описания характеристики несимметричного цикла наряду с частотой и амплитудой переменной составляющей необходимо указывать заданное среднее значение деформации.

Величина нагрева испытуемого виброизолятора очевидно в первом приближении может быть рассмотрена как результат взаимного наложения статической, не изменяющейся во времени деформации (определяющей среднее напряжение цикла) и переменной динамической нагрузки, симметричной относительно статической.

Наиболее простым предположением, которое могло бы быть принято для описания совместного действия статической и динамической нагрузок, является предположение об аддитивности их действия, то есть о том, что температура нагрева в этих условиях является суммой температур от статического и динамического (симметричного) нагружения.

Такого рода предположение в ряде случаев оказывается достаточным для количественной оценки выделяемого тепла при несимметричных циклах, когда средняя составляющая относительно невелика.

В общем случае, однако приходится считаться с тем, что статическая деформация полиуретанового массива согласно [25] переводит структуру макромолекул полиуретана в ориентированное состояние, что в свою очередь косвенно влияет на динамическую составляющую.

Кинематическую схему испытательного стенда для моделирования динамического нагружения полиуретановых виброизоляторов, работающих на сдвиг (см. рисунок 4.6).

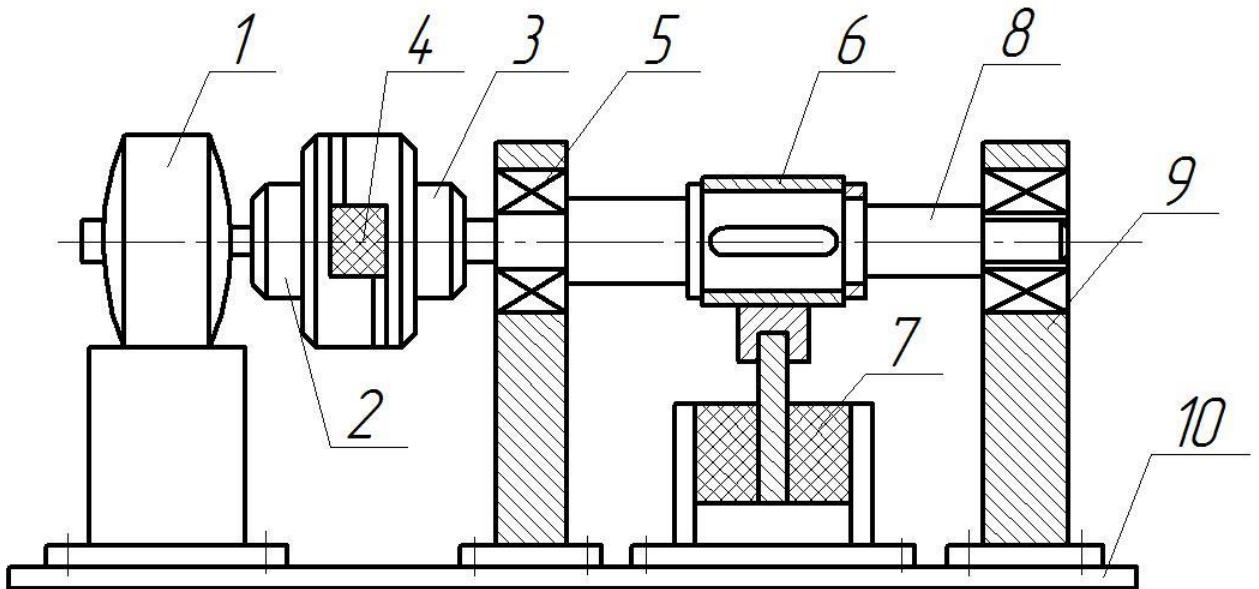


Рисунок 4.6 - Кинематическая схема испытательного стенда: 1 – электродвигатель; 2,3 – полумуфты; 4 – упругий элемент; 5 – подшипник; 6 – кулачок; 7 – виброизолятор; 8 – вал; 9 – корпус подшипника; 10 – основание

Испытательный стенд состоит из асинхронного электродвигателя 5АИ71 В2 мощностью  $P_{эл.} = 1,1$  кВт с частотой вращения  $n_{эл.} = 3000$  об/мин с регулируемой частотой вращения, упругой муфты и вала с кулачком, установленного на подшипниках качения. Электродвигатель и подшипники качения вала установлены на основании.

Благодаря регулируемой частоте вращения вала электродвигателя, мы сможем изучать нагрев полиуретанового массива испытуемого виброизолятора во всем интервале обычно применяемых механических частот нагружения. Эти частоты находятся в диапазоне от 10 до 50 Гц и обусловлены частотой вращения коленчатого вала двигателя силовой установки, для уменьшения колебаний которой и используются виброизоляторы.

С помощью виброизоляторов достигается значительное уменьшение динамических усилий и тем самым предупреждается возникновение усталостных поломок, то есть увеличивается долговечность машин.



При конструировании полиуретановых виброизоляторов следует учитывать тот факт, что степень деформации полиуретана существенно зависит от вида нагружения.

Наибольшие деформации бывают при нагрузках, вызывающих сдвиг полиуретана, наименьшие при нагрузках, вызывающих сжатие полиуретанового массива. Вследствие этого виброизоляторы сдвига обладают сравнительно небольшой грузоподъемностью, но сравнительно большим рабочим диапазоном деформирования, в котором сохраняется линейная зависимость между величиной нагрузки, приложенной к виброизолятору и соответствующей деформацией виброизолятора. Данная зависимость называется характеристикой виброизолятора.

Схему нагружающего устройства для испытания виброизоляторов (см рисунок 4.7).

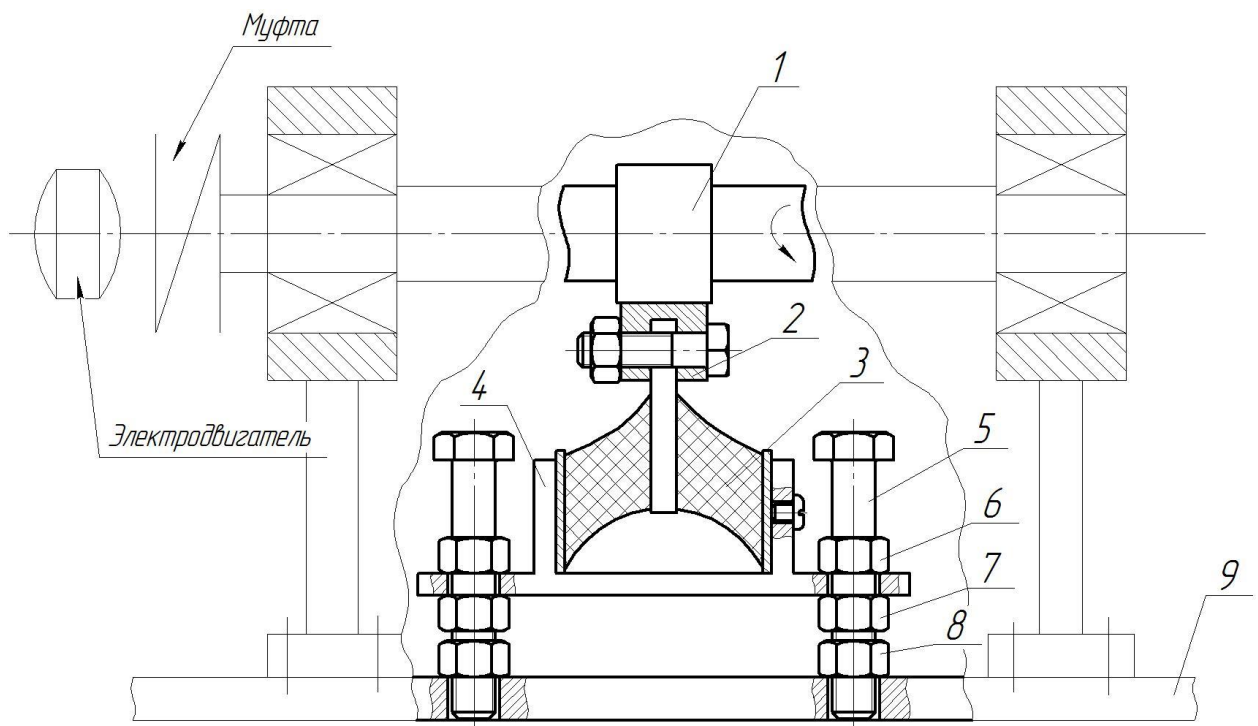


Рисунок 4.7 - Схема нагружающего устройства: 1 – эксцентрик; 2 – пята; 3 – виброизолятор; 4 – кондуктор; 5 - направляющий винт; 6 - контр-гайка; 7 - подъемная гайка; 8 - фиксирующая гайка; 9 – основание

Полиуретановые виброизоляторы сдвига обладают сравнительно небольшой жесткостью и обычно устанавливаются сзади или спереди двигателя и служат для снижения колебаний двигателя при работе на холостом ходу и номинальных оборотах. Данные виброизоляторы также очень полезны для предотвращения поворота двигателя при резком переходе от тягового режима к тормозному.

На рисунке 4.7 испытываемый амортизатор, закрепленный в кондукторе с помощью болтов, изображен в свободном состоянии.

Для создания статического нагружения необходимо открутить контр-гайки и вращая подъемные гайки поднять виброизолятор на величину определенной статической деформации, при которой будет проводиться очередная серия испытаний. После этого необходимо закрутить контр-гайки и измерить величину статической деформации подготовленного к испытаниям виброизолятора.

Профиль эксцентрика (см. рисунок 4.8).

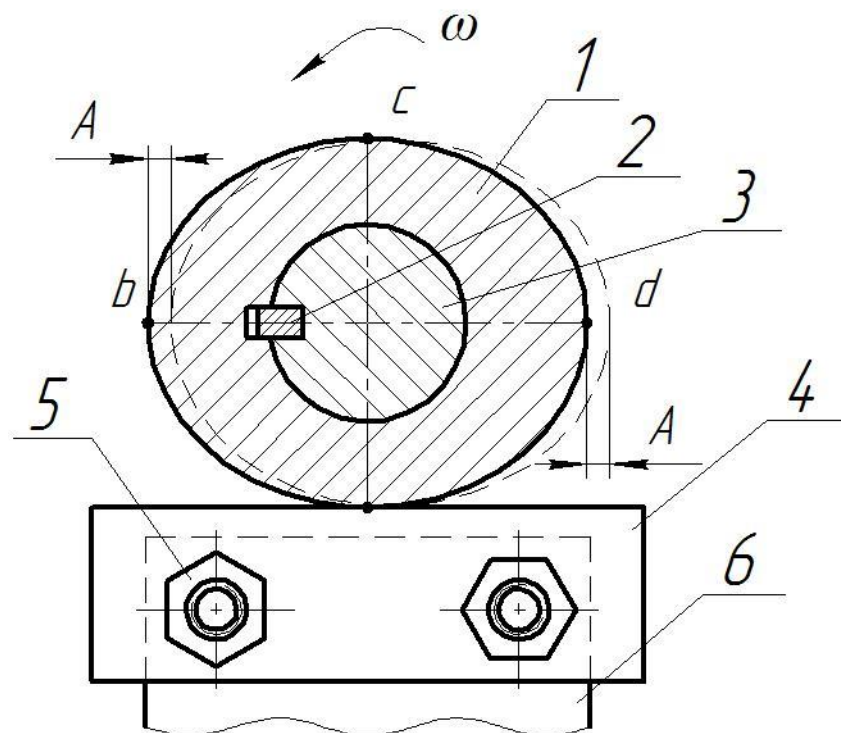


Рисунок 4.8 - Профиль кулачка, моделирующий динамическое нагружение виброизолятора: 1- эксцентрик; 2 - шпонка; 3 - вал; 4 - пята; 5 – болт; 6 - центральная пластина виброизолятора

Переменная динамическая нагрузка, действующая на виброизолятор, моделируется с помощью вращающегося кулачка. Учитывая тот факт, что колебания происходят по гармоническому закону  $U(t) = A \sin(\omega t + \varphi)$ , где  $A$  – амплитуда колебаний или отклонение от нулевого положения,  $\omega$  – угловая скорость вала,  $\varphi$  – начальная фаза колебаний, профиль эксцентрика точно соответствует синусоидальному закону нагружения кулачкового механизма с плоским толкателем.

Величина эксцентриситета  $A$  кулачка соответствует величине  $\varepsilon_a$  – амплитудного значения деформации.

При вращении кулачка пята, выполняющая роль плоского толкателя и жестко связанная с центральной пластиной виброизолятора моделирует динамическое нагружение виброизолятора.

Когда пята контактирует с участком  $a$   $b$   $c$  профиля кулачка происходит удаление центральной пластины виброизолятора от нулевого положения и в точке  $b$  деформация достигает своего максимума.

При дальнейшем вращении кулачка под действием упругой деформации, которая возникает в полиуретановом массиве после приложения статической деформации, происходит приближение центральной пластины амортизатора к нулевому положению и в точке  $d$  деформация соответствует минимальному значению.

Для проведения экспериментального исследования были изготовлены пять кулачков с эксцентриситетом 0,5; 0,75; 1; 1,5; 2 мм. Первые три эксцентрика примерно соответствуют амплитудам наиболее распространенных механических колебаний современных двигательных установок. Остальные два служат для моделирования форсированных по амплитуде нагрузок и экспериментального определения предельных температур полиуретанового массива виброизолятора, при которых происходит разрушение материала.

На основании вышеизложенного приходим к заключению, что мы можем изучать процесс теплообразования в полиуретановом массиве виброизолятора в

зависимости от следующих параметров: частоты нагружения, амплитуды колебаний и величины статической деформации.

Помимо перечисленных трех переменных, на нагрев полиуретанового массива влияет геометрия виброизолятора (коэффициент формы  $\Phi$ ) и твердость полиуретана.

В дальнейшем нам предстоит провести экспериментальное исследование по определению температуры нагрева полиуретанового массива виброизолятора, как функции перечисленных ранее пяти переменных, в заранее намеченных пределах их изменения.

Для экспериментального исследования нагрева полиуретанового массива виброизолятора и изучения вопросов долговечности в зависимости от условий нагружения и конструкции виброизолятора были изготовлены три партии виброизоляторов твердостью 60 ShA, 70 ShA и 80 ShA.

Конструкцию экспериментальных виброизоляторов с полиуретановым массивом (см. рисунок 4.9).

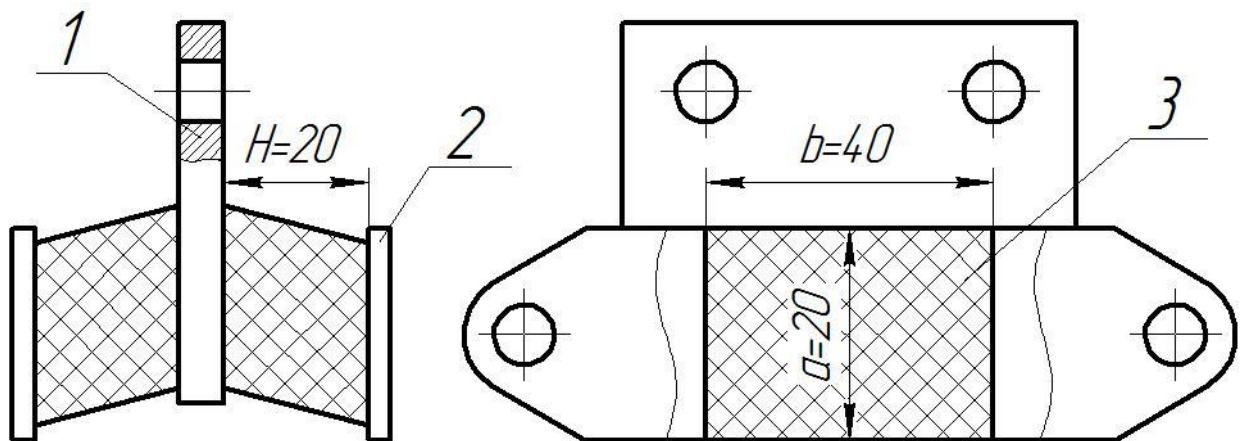


Рисунок 4.9 - Размеры полиуретанового массива экспериментального виброизолятора: 1 - центральная пластина; 2 - боковая пластина; 3 - полиуретановый массив

Перед началом эксперимента, исходя из опыта расчетов и эксплуатации деталей машин с полиуретановым массивом определили диапазон изменения

статической нагрузки, действующей на виброизолятор. Были приняты в зависимости от твердости полиуретана следующие величины статической деформации: 1,2,3, и 4 мм, что при высоте полиуретанового массива амортизатора 20 мм соответствует относительному сдвигу от 0,05 до 0,25.

Частоту нагружения амортизатора разбили на пять фиксированных частот: 10, 20, 30, 40 и 50 Гц при которых проводили замер температуры нагрева полиуретанового массива испытуемого виброизолятора. Сам испытуемый виброизолятор устанавливали в кондуктор, закрепляли с помощью болтов и вращая подъемные гайки следили за контактом пяты и эксцентрика.

Далее равномерно вращая подъемные гайки, с помощью колумбуса, контролировали равномерность подъема кондуктора относительно плиты. По достижении требуемой величины статической деформации виброизолятора, положение кондуктора фиксировалось с помощью контргаяк.

Затем с помощью пульта управления, расположенного на частотном преобразователе, включали вращение электродвигателя и по прошествии определенного времени производили замер температуры полиуретанового массива виброизолятора. Значения температура нагрева представлены в таблице 4.5.

Таблица 4.5 - Температура нагрева полиуретанового виброизолятора твердостью 70 ShA при различных значениях относительного сдвига.

Величина относительного сдвига	0,05	0,10	0,15	0,20
Температура полиуретанового массива, °С	29	32	37	42

Испытания проводились с частотой нагружения 50 Гц, амплитудой колебаний 0,75 мм и температурой окружающего воздуха 20 градусов.

Время прогрева полиуретанового массива зависит от величины статического нагружения, амплитуды и частоты нагружения. Благодаря непосредственному постоянному контакту термопары и полиуретанового массива

виброизолятора экспериментальным путем было определено время прогрева полиуретана, после которого повышения температуры не происходит.

Для легкого режима, которому соответствуют малая величина статической деформации, амплитуды и частоты нагружения это время составляет 8 минут, для тяжелого режима, когда благодаря большой величине статической деформации макромолекулы полиуретана становятся в строго ориентированное состояние, амплитуда и частота нагружения имеют максимальные значения, прогрев происходит в течение 5 минут.

Теперь перейдем непосредственно к анализу полученных экспериментальных данных.

Как говорилось ранее, температура нагрева полиуретанового массива испытуемого виброизолятора есть сумма температур от постоянной статической деформации и переменной динамической.

При приложении определенной статической деформации в нашем случае деформации сдвига, молекулярная структура полиуретана переходит в ориентированное состояние, при котором изменяются межмолекулярные и межатомные расстояния, а также изменяются валентные углы.

Схематично молекулярная структура полиуретана представляет собой длинные гибкие молекулярные цепи, соединенные через некоторые промежутки поперечными связями.

Полиуретановые цепи в отличие от большинства молекулярных цепей других полимеров содержат большое количество высокополярных групп, и поскольку они не так жестко соединены первичными химическими связями, эти полярные группы могут свободно располагаться относительно друг друга, образуя прочные вторичные химические связи.

Большое количество полярных групп не позволяет цепям скользить относительно друг друга под нагрузкой. Очевидно, что более твердые полиуретаны имеют большее количество поперечных вторичных химических связей, чем мягкие.

Данные о температуре нагрева виброизолятора в зависимости от величины относительного сдвига (см. рисунок 4.10).

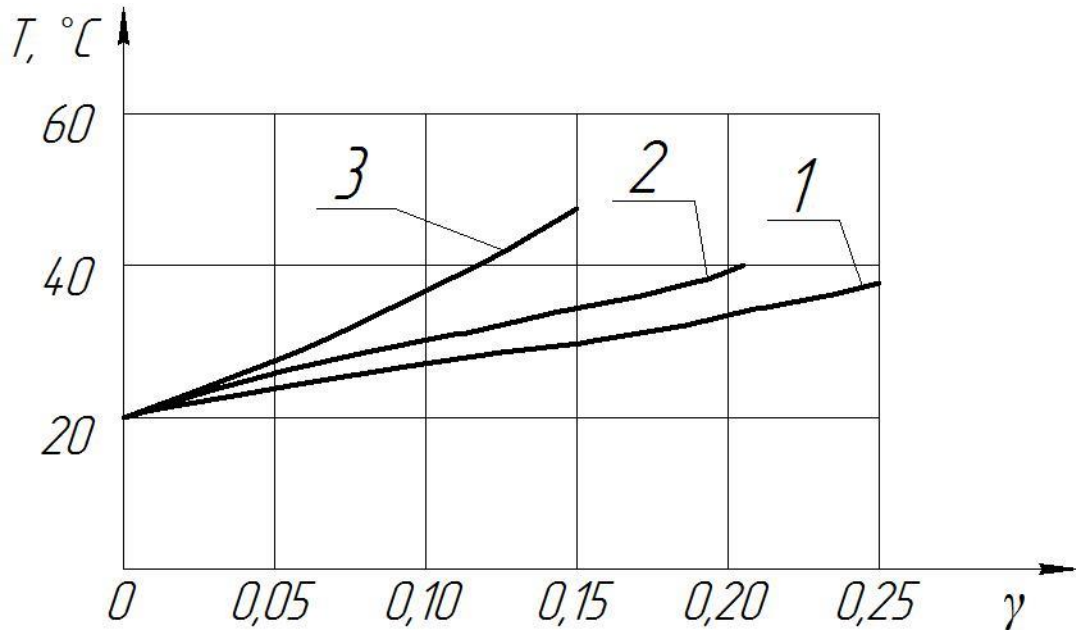


Рисунок 4.10 - Температура нагрева виброизолятора в зависимости от величины относительного сдвига при частоте 30 Гц и амплитуде  $a = 1$  мм: 1 - полиуретан 60 ShA; 2 – полиуретан 70 ShA; 3 - полиуретан 80 ShA

Необходимо дополнить, что эксперимент проводился при температуре окружающего воздуха  $20^{\circ}\text{C}$ .

Из рисунка 4.10 следует очевидный вывод: при одинаковой величине статического нагружения и равных условиях динамического нагружения температура нагрева полиуретанового массива испытуемого виброизолятора у твердого полиуретана выше, чем у мягкого. Зависимость температуры нагрева от величины относительного сдвига носит степенной характер.

Численно величину нагрева полиуретанового массива испытуемого виброизолятора от величины статического нагружения при фиксированном динамическом нагружении можно определить по формуле:

$$T = \frac{95\gamma^{2,5-0,017ShA}}{2-0,018ShA}, \quad (4.34)$$

где  $\gamma$ - величина относительного сдвига;  $ShA$  - твердость полиуретана в единицах по Шору.

Далее перейдем к обсуждению вопроса зависимости температуры нагрева полиуретана испытуемого виброизолятора от условий динамического нагружения, но в начале приведем некоторые основные понятия из теории колебательных процессов.

Простейшим и наиболее важным видом периодических колебаний являются гармонические (синусоидальные) колебания, при которых колеблющаяся величина изменяется во времени по следующему закону:

$$U(t) = A \sin(\omega t + \varphi). \quad (4.35)$$

Здесь  $A$ ,  $\omega$ ,  $\varphi$ - постоянные параметры. Параметр  $A$  равен наибольшему значению колеблющейся величины и называется амплитудой гармонических колебаний или просто амплитудой. Постоянный параметр  $\varphi$ , называется начальной фазой колебаний, а аргумент  $\omega t + \varphi$  называется фазой колебаний в момент времени  $t$ . Параметр  $\omega$  является угловой частотой. Период гармонических колебаний выражается через угловую частоту следующим образом:

$$T = \frac{2\pi}{\omega} = \frac{1}{f}, \quad (4.36)$$

где  $f$  – частота, Гц.

Для представления колебаний используем круговую диаграмму (см. рисунок 4.11).

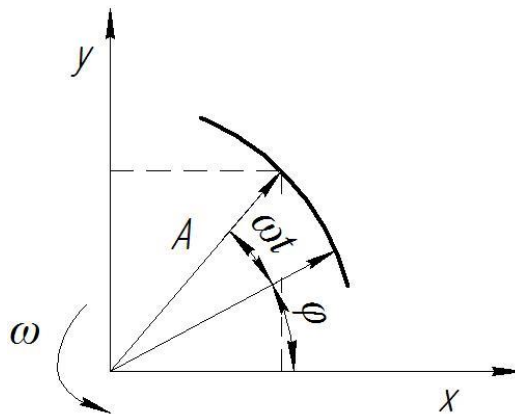




Рисунок 4.11 - Круговая диаграмма для простых гармонических колебаний

Для этого на плоскости введем вектор длиной  $A$ , который вращается с постоянной угловой скоростью, равной  $\omega$ . Начальное положение вектора задается углом  $\varphi$ . Проектируя конец вектора на вертикальную ось, получим закон движения в форме (4.35).

Скорость при гармонических колебаниях:

$$V = \frac{dU}{dt} = \omega A \cos(\omega t + \varphi) \quad (4.37)$$

и соответственно ускорение:

$$W = \frac{d^2U}{dt^2} = -\omega^2 A \sin(\omega t + \varphi) \quad (4.38)$$

Таким образом скорость  $V(t)$  и ускорение  $W(t)$  при гармонических колебаниях также изменяются во времени по синусоидальному закону с той же частотой, что и перемещение  $U(t)$ . Амплитуды скорости и ускорения равны соответственно  $\omega A$  и  $\omega^2 A$ .

Максимальную линейную скорость нагружения полиуретана, которая в сильнейшей степени определяет величину нагрева будем определять по формуле:

$$V_{л} = 2\pi f A \quad (4.39)$$

Зависимость температуры нагрева полиуретанового массива амортизатора от частоты нагружения.

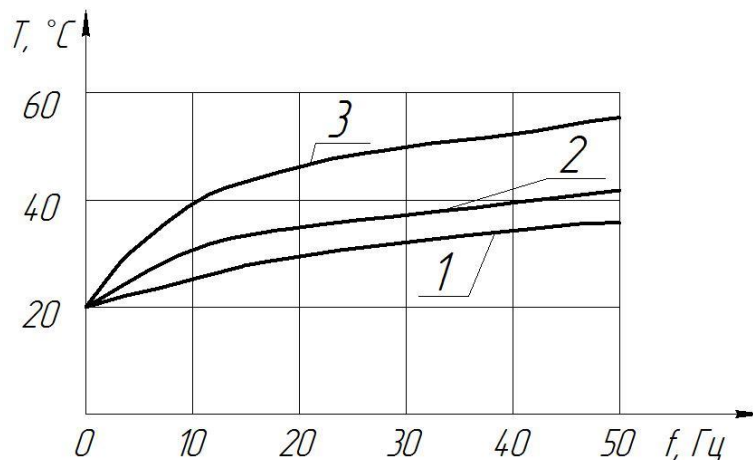


Рисунок 4.12 - Температура нагрева виброизолятора в зависимости от частоты нагружения при амплитуде  $a = 1$  мм и величине относительного сдвига  $\gamma = 0,15$ : 1- полиуретан 60 ShA; 2- полиуретан 70 ShA; 3- полиуретан 80 ShA

Представленные на рисунке 4.12. зависимости хорошо аппроксимируются следующим выражением:

$$T_p = T_B + 41(2\pi fA)^{1,9-0,005ShA}, \quad (4.40)$$

где  $T_B$  - температура окружающего воздуха,  $T_B=20^\circ\text{C}$

Анализируя зависимость (4.40), приходим к выводу, что температура нагрева полиуретанового массива испытуемого виброизолятора растет с увеличением скорости деформирования с таким же примерно показателем степени что и при сжатии, приведенном в работе [58].

Твердые полиуретановые массивы нагреваются больше, нежели мягкие при остальных одинаковых параметрах нагружения. Небольшое различие в показателях степени необходимо отнести на счет погрешности проведения эксперимента и математической обработки статистических данных.

Далее перейдем к изучению вопроса нагрева полиуретанового виброизолятора в зависимости от коэффициента формы, сказав при этом, что все приведенные предыдущие зависимости получены на виброизоляторах с коэффициентом формы  $\Phi = 0,33$  при высоте полиуретанового массива амортизатора  $H=20$  мм.

Для проведения экспериментальных исследований были изготовлены две партии виброизоляторов, по четыре штуки каждая, с высотой полиуретанового массива  $H = 25$  мм и  $H = 30$  мм и коэффициентом формы соответственно  $\Phi = 0,27$  и  $\Phi = 0,22$ .

Были также изготовлены дополнительно кондуктора, в которые устанавливаются испытуемые виброизоляторы и крепятся винтами к плите. Присоединительные размеры крепежных отверстий всех кондукторов одинаковы.

Экспериментальные данные о температуре нагрева виброизоляционного массива (см. рисунок 4.13).

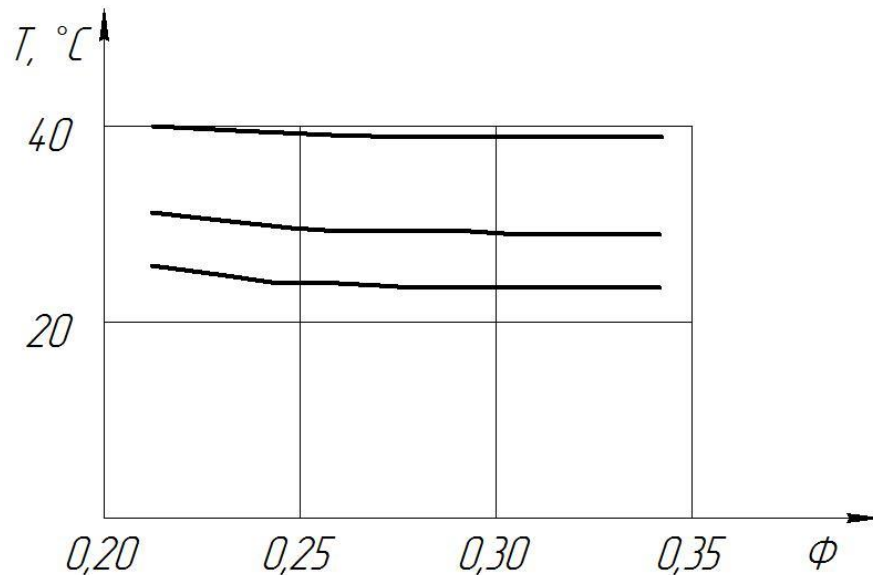


Рисунок 4.13 - Зависимость температуры нагрева виброизолятора от коэффициента формы при статическом нагружении  $\gamma = 0,10$  и динамическом нагружении с частотой 30 Гц и амплитудой  $a = 1$  мм: 1- полиуретан 60 ShA; 2- полиуретан 70 ShA; 3 - полиуретан 80 ShA

Полученные зависимости хорошо совпадают с результатами исследований, приведенными в работе [31].

Очевидно, что снижение температуры нагрева полиуретанового массива амортизатора связано с увеличением площади теплоотдачи и переходом от деформации сдвига к деформации изгиба.

Окончательно, выражение для определения температуры нагрева полиуретанового амортизатора, работающего на сдвиг при динамическом нагружении выглядит следующим образом:

$$T = T_{\text{в}} + \frac{95\gamma^{2,5-0,017ShA} + 41(2\pi fA)^{1,9-0,005ShA}}{2-0,018ShA} \cdot \frac{1}{1,57-\Phi^2}, \quad (4.41)$$

где  $\Phi$  - коэффициент формы.

Из выражения (4.41) следует подтверждение нашего предположения об аддитивности действия статического и динамического нагружения.

Далее рассмотрим результаты форсированных испытаний, при которых были получены значения предельных температур нагрева полиуретанового массива, при которых происходит разрушение полиуретана.

Параметры статического нагружения виброизоляторов заранее определены в соответствии с твердостью полиуретана, на основании опыта проектирования, изготовления и эксплуатации эластомерно-металлических деталей машин и при проведении форсированных испытаний эти параметры строго соблюдались.

Для создания форсированных по скорости деформирования нагрузок использовались эксцентрики с амплитудой 1,5 и 2 мм. На сегодняшний день данные амплитуды колебаний не являются рабочими и возможны только в момент пуска и остановки силового агрегата.

Для достижения предельных температур полиуретанового виброизолятора использовалась следующая методика.

Для виброизолятора определенной твердости при испытании устанавливалась предельная статическая деформация и эксцентрик с амплитудой колебаний 2мм, затем методом расчета по формуле (4.41) определяли частоту нагружения при которой произойдет температурное разрушение материала.

Ожидаемый интервал температур, при котором произойдет разрушение материала был заранее известен на основании экспериментальных данных для других видов нагружения, в частности сжатия.

Очевидно, что вне зависимости от вида нагружения полиуретан разрушается при одних и тех же величинах нагрева, в частности для полиуретана твердостью 60 ShA примерно 52-54 °С, для 70 ShA примерно 57-59 °С и для 80ShA примерно 62-64 °С.

Разрушение испытуемого виброизолятора происходит в области расчетной частоты нагружения примерно через 30-40 минут после начала испытаний, при этом разрушение начинается в центре полиуретанового массива, которое определяется по вспучиванию материала.

В центре полиуретанового массива виброизолятора материалы деградации представляют собой шарики диаметром примерно 2-3 мм более темного тона, чем

исходный полиуретан. Вероятно, их образованию способствуют силы поверхностного натяжения.

Для получения достоверных сведений о предельной температуре конструкционных полиуретанов твердостью от 60 до 80 ShA испытаниям и последующему доведению до разрушения подвергались по четыре виброизоляторов каждой твердости.

Результаты форсированных по нагрузке испытаний для определения предельной температуры полиуретана при которой происходит разрушение материала представлены в таблице 4.6.

Учитывая высокую стабильность физико-механических свойств полиуретана, когда отклонение контролируемого параметра, измеряемого при входном контроле, от его среднего значения составляет  $\pm 1\%$  для полиуретана твердостью 60 ShA и  $\pm 2\%$  для полиуретана твердостью 80 ShA разброс температур составил в зависимости от твердости от 2 до 3 °C.

Таблица 4.6 - Значения предельных температур для полиуретанов различной твердости

Твердость полиуретана, ShA	Предельная температура, °C
60	53
70	58
80	63

Приведенная таблица составлена на основе обработки экспериментальных данных методами математической статистики с вероятностью, свойственной для технических расчетов. В настоящее время долговечность полиуретановых деталей машин оценивают в подавляющем большинстве случаев по данным натурных или стендовых испытаний. Однако дороговизна и большая длительность натурных испытаний, а также отсутствие надежной корреляции между результатами стендовых испытаний и реальной долговечностью полиуретановых деталей вынуждает к поиску инженерного метода расчета срока их службы.

Долговечность полиуретанового массива амортизатора при динамическом нагружении в сильнейшей степени зависит от повышения температуры вследствие упругого гистерезиса. Поэтому при испытании материала стремятся точнее воспроизвести механический режим нагружения (линейная скорость и величина относительной статической деформации сдвига), который в конечном счете определяет температуру нагрева полиуретанового массива испытуемого виброизолятора.

В простейшем случае гармонического нагружения при асимметричном цикле нагружения, когда коэффициент асимметрии цикла  $R = \frac{\sigma_{min}}{\sigma_{max}}$ , механический режим нагружения исчерпывающе описывается двумя параметрами: величиной относительной статической деформации сдвига  $\gamma$  и линейной скоростью  $V_{ЛД}$  деформирования полиуретанового массива виброизолятора, которая является произведением частоты вынужденных колебаний на амплитуду этих колебаний.

Для экспериментального изучения долговечности использовались виброизоляторы трех твердостей: 60 ShA, 70 ShA и 80 ShA.

Важнейшей задачей усталостных испытаний является экспериментальное определение зависимости между долговечностью (количество часов до разрушения) и режимом нагружения экспериментального виброизолятора, который и определяет в конечном счете температуру нагрева полиуретана.

Таким образом, нам необходимо получить экспериментальную зависимость долговечности виброизолятора от температуры нагрева его полиуретанового массива. Потому как, именно величина температуры нагрева определяет скорость протекающих в полиуретане физико-химических процессов, приводящих к изменению его структуры и механических характеристик, в частности появляется значительная нелинейность в зависимости «сила-деформация».

В связи с определенным рассеянием долговечности, испытание одного виброизолятора на данном уровне нагружения является недостаточным, поэтому на одном уровне испытывается несколько виброизоляторов. Такая

последовательность повторения простых испытаний называется многократным испытанием.

Далее перейдем к описанию методики эксперимента по определению долговечности полиуретанового массива виброизолятора в зависимости от его температуры нагрева.

Было решено построить экспериментальную кривую, подобную кривой Веллера, у которой по оси ординат откладывали величину температуры, при которой произошло разрушение полиуретанового массива амортизатора, а по оси абсцисс количество часов, которое отработал виброизолятор или его долговечность.

Начальной температурой, с которой начиналось построение экспериментальной кривой, принималась предельная температура для полиуретана данной твердости. Как известно, при предельной температуре полиуретановый массив разрушается примерно в течении часа.

Далее расчетным путем для амортизатора определенной твердости определялась примерная амплитуда нагружения, при которой температура полиуретанового массива будет на 3 градуса меньше предельной температуры. В соответствии с расчетами устанавливали эксцентрик, который обеспечивает нагружение с требуемой амплитудой.

При этом для повышения чистоты эксперимента строго соблюдалась рекомендованная для данной твердости полиуретана величина относительной деформации сдвига и частота нагружения 37 Гц, которая соответствует номинальным оборотам двигателя.

При проведении эксперимента строго следили за соблюдением заданной температуры испытания полиуретанового массива виброизолятора.

Точная настройка на требуемую температуру испытания осуществлялась с помощью регулирования частоты нагружения, так как величина эксцентриситета и величина относительной деформации сдвига есть величины фиксированные.

Далее при заданной температуре происходило испытание виброизолятора и фиксировалось время в часах до разрушения виброизолятора, затем температура испытания понижалась еще на три градуса и т. д.

Исходя из опыта статистической обработки результатов циклических усталостных испытаний резин, с целью облегчения испытаний и учитывая высокую стабильность физико-механических свойств полиуретана, для одной температуры нагрева было принято решение испытывать 3 виброизолятора.

Результаты испытаний представляются парой чисел  $T$  и  $N$ , которые обеспечивают более точное значение среднего или медианы. Кроме того, такие испытания дают возможность получить среднюю характеристику рассеяния, которая обычно измеряется средним квадратичным отклонением, а когда количество испытываемых виброизоляторов на каждом уровне нагружения составляет три и более, то можно получить статистическое распределение долговечности.

Значения долговечности при различных значениях температуры для виброизолятора твердостью 70 ShA представлены в таблице 4.7.

Таблица 4.7 - Долговечность виброизолятора в зависимости от температуры полиуретанового массива.

Долговечность виброизолятора, ч	Температура виброизолятора, °С						
	55	52	49	46	43	40	37
1 <sup>й</sup> виброизолятор	61	262	630	1160	1900	2800	4100
2 <sup>й</sup> виброизолятор	63	265	635	1170	1940	2850	4150
3 <sup>й</sup> виброизолятор	64	270	642	1190	1950	2890	4200

Так как усталостные испытания стоят достаточно дорого и требуют много времени, желательно чтобы планирование серии испытаний ориентировалось на получение максимальных сведений при наименьших затратах. С этой целью необходимо применять эффективные статистические методы с полным использованием данных, полученных в результате испытаний.

Помимо экспериментальных данных при построении зависимости долговечности виброизолятора от температуры нагрева полиуретана использовались данные замера фактической температуры виброизолятора при



работе экскаватора. Средняя рабочая температура виброизолятора составляет 38-40 градусов при этом долговечность составляет 4000-4200 часов, и она фиксируется с помощью счетчика моточасов на двигателе экскаватора.

По результатам экспериментов с виброизоляторами различной твердости были построены кривые долговечности виброизоляторов в зависимости от температуры нагрева полиуретанового массива (см. рисунок 4.14).

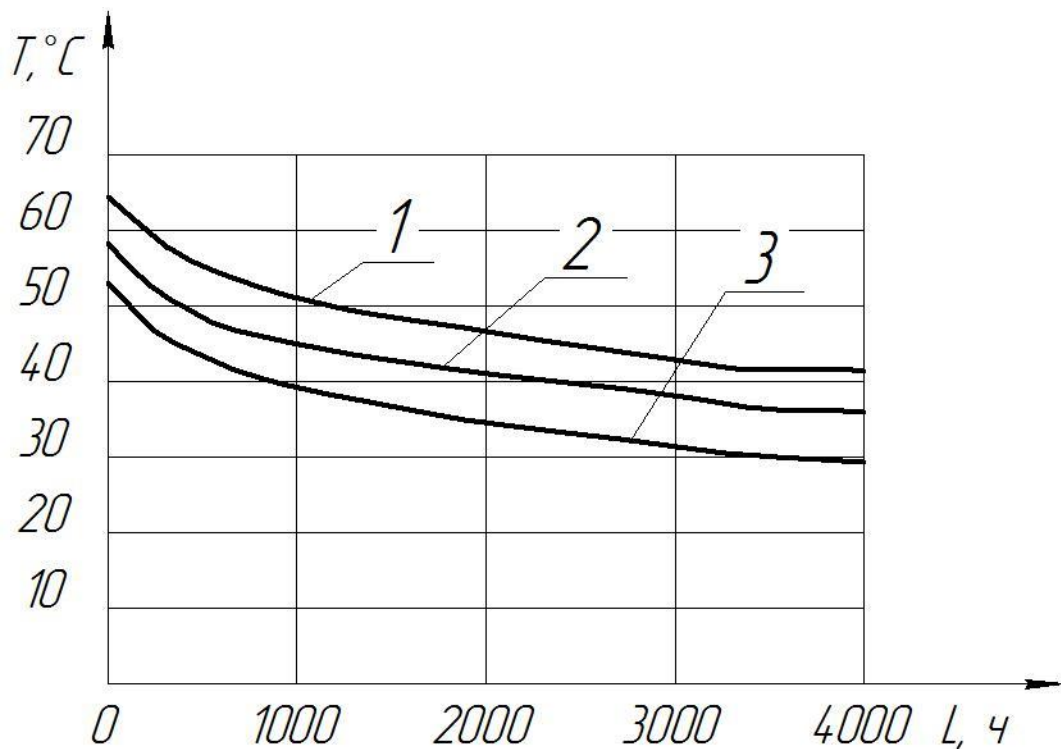


Рисунок 4.14 - Зависимость долговечности виброизолятора от температуры полиуретана: 1 - полиуретан 80 ShA; 2 - полиуретан 70 ShA; 3 - полиуретан 60 ShA

Представленные на рисунке 4.14 экспериментальные кривые хорошо аппроксимируются следующей зависимостью:

$$L = 143 \left[ \frac{63 - T_{\text{пу}}(1,64 - 0,008 \text{ShA})}{5,17} \right]^{2,23}, \quad (4.42)$$

где  $T_{\text{пу}}$  — температура полиуретанового массива.

Экспериментальные кривые ясно показывают увеличение долговечности полиуретанового массива амортизатора при снижении рабочей температуры полиуретана.

После определения рабочей температуры амортизатора по формуле 4.41 можно легко определить расчетным путем, долговечность амортизатора.

#### 4.4 Особенности конструирования полиуретановых деталей машин

Полиуретан, как конструкционный материал, по сравнению с металлами, обладает способностью к большим относительным деформациям (вплоть до 50%) при этом объемная сжимаемость настолько мала, что полиуретан можно рассматривать согласно [54], как практически несжимаемое тело, у которого с погрешностью до 3% можно принять коэффициент Пуассона  $\mu = 0,5$ .

Этому факту было получено экспериментальное подтверждение. Рассмотрим поперечное сечение деформированного цилиндрического образца (см. рисунок 4.15).

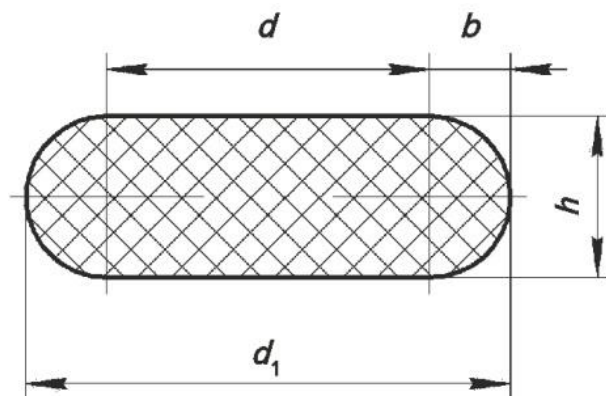


Рисунок 4.15. Сечение деформированного цилиндрического образца

Величины  $b$  и  $h/2$  представляют собой полуоси эллипса, легко вычисляемые из  $d$ ,  $d_1$  и  $h$ . Зная величины полуосей эллипса, ширину и длину контактной

поверхности и предполагая, что торцевые поверхности являются плоскими, легко вычислить площадь поперечного сечения и объем деформированного образца.

Значения объема, вычисленные таким образом при различных деформациях, оказались приблизительно равными первоначальному объему образца, что свидетельствует о несжимаемости полиуретана и незначительном отличии коэффициента Пуансона от значения 0,5.

Вышеизложенное позволяет сформулировать первую особенность конструирования деталей машин из полиуретана.

При конструировании деталей и узлов, в которые полиуретан работает на сжатие, следует предусмотреть в конструкции возможность его расширения. Замкнутый в объеме полиуретановый элемент не сможет проявить при работе свои эластические свойства.

В качестве примера приведем схему правильной и неправильной конструкции, работающей на сжатие (см. рисунок 4.16).

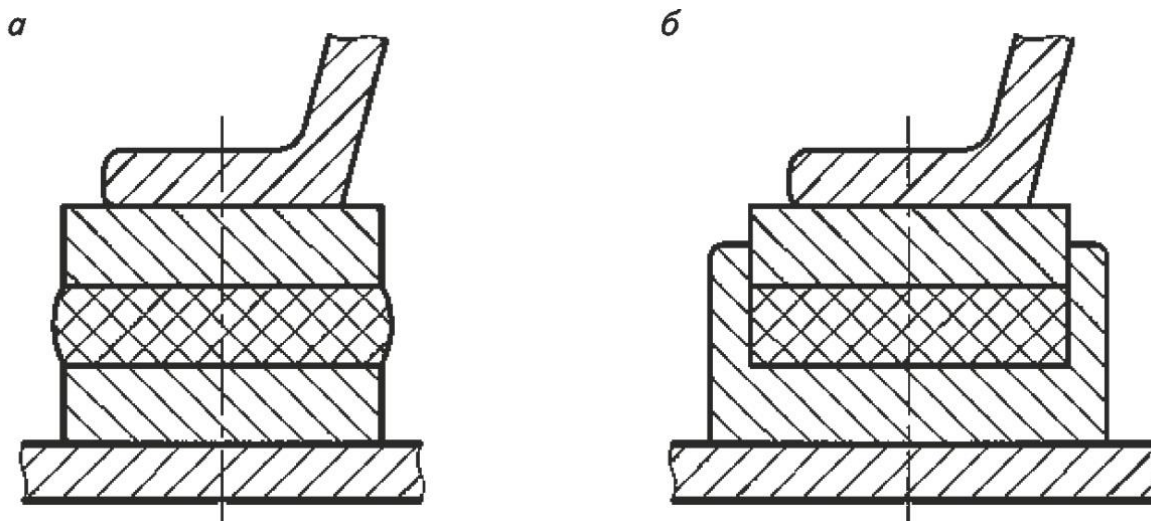


Рисунок 4.16 - Схема правильной (а) и неправильной (б) конструкции изделия, работающего на сжатие

Полиуретан, как несжимаемый материал, под давлением изменяет форму и стремится заполнить полый объем.

Второй особенностью полиуретана, как конструкционного материала, является большое различие в величинах коэффициента объемного расширения полиуретана и металлов.

Исходя из этого можно сформулировать вторую особенность конструирования полиуретановых деталей.

При конструировании эластомерно-металлических деталей машин, особенно полиуретано-металлических шарниров, одним из основных должен быть принцип, согласно которому полиуретановый элемент не должен подвергаться термическим напряжениям при остывании.

Коэффициент объемного расширения полиуретана в 1,5 раза больше, чем у стали. Такое различие в значениях коэффициента расширения полиуретана и стали приводит к появлению термических напряжений в полиуретановом массиве сайлент-блока при его остывании от температуры полимеризации до комнатной температуры.

Конструкцию наиболее распространенного современного сайлент-блока (см рисунок 4.17).

В сайлент-блоке полиуретановый массив находится между концентрично расположенными металлическими втулками и крепится к ним посредством полимеризации.

Для уменьшения возникающих термических напряжений, наружную металлическую втулку сайлент-блока, делают разрезной, состоящей чаще всего из трех частей.

Части наружной разрезной втулки во время полимеризации располагаются в пресс-форме по несколько большему диаметру, выбираемого с учетом усадки полиуретана. После остывания полиуретана между отдельными частями наружной металлической втулки сайлент-блока остаются минимальные зазоры, которые исчезают после установки сайлент-блока в рычаг подвески транспортного средства.

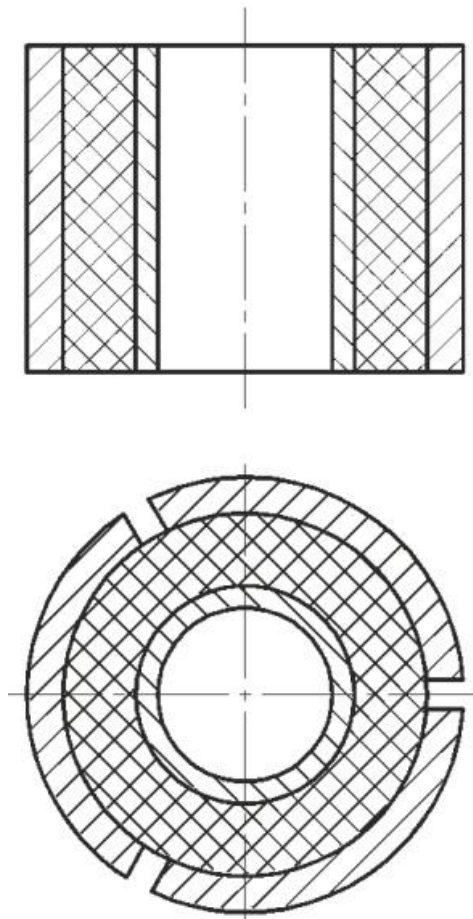


Рисунок 4.17 - Сайлент-блок с разрезной наружной металлической втулкой

Крепление сайлент-блока с разрезной наружной втулкой производится с помощью прессовой посадки, при этом части наружной втулки упираются в друг друга.

Третьею особенностью полиуретана, как конструкционного материала, является возможность появления в полиуретане очагов концентрации напряжений, приводящих к разрушению материала. В связи с этим третью особенность можно сформулировать следующим образом.

При конструировании полиуретановых деталей, работающих в режиме динамического нагружения, следует стремиться к разработке равнонапряженных изделий, то есть таких, у которых напряжения в любых сечениях были бы примерно одинаковы.

Деталь должна конструироваться таким образом, что по возможности избегать резких переходов по толщине, а также других возможных концентраторов напряжений.

Различия в толщине детали могут привести к неоднородной полимеризации полиуретана и концентрации напряжений, ускоряющих ее разрушение.

Для предупреждения появления в полиуретане очагов концентрации напряжений соприкасающаяся с полиуретаном поверхность арматуры не должна иметь острых углов, выступов, отверстий и канавок, являющихся главными концентраторами напряжений.

При этом необходимо следить за тем, чтобы требование выполнялось во всем диапазоне деформации полиуретана, которые очень часто составляют десятки процентов.

Так, например, размеры опорных пластин амортизаторов должны быть настолько больше размеров сечения полиуретана в его свободном состоянии, чтобы под максимальной нагрузкой увеличенный в поперечном сечении полиуретан не выходил за кромки пластин, для исключения контакта сжатой боковой поверхности с другими деталями конструкции.

При возникновении контакта полиуретанового виброизоляционного массива с другими деталями конструкции неизбежно возникают очаги повреждения полиуретановой поверхности, приводящие к последующему разрушению материала.

Начальные повреждения эластомерной поверхности в виде царапин и надрывов, перерастают в трещины, приводящие к разрушению виброизоляционного массива.

Требование, предъявляемое к соотношению геометрических размеров виброизоляционного массива виброизолятора и опорных пластин (см. рисунок 4.18).

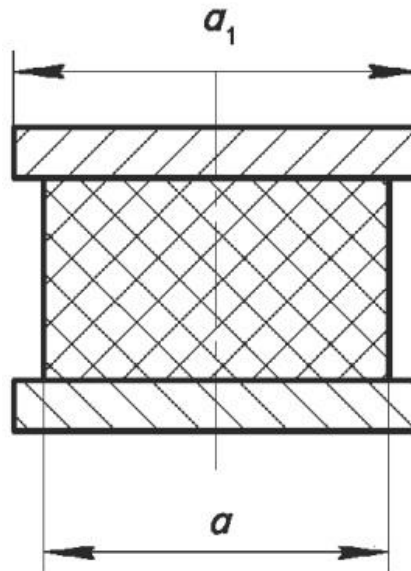


Рисунок 4.18 - Соотношение размеров опорных пластин и полиуретанового массива виброизолятора

Если под максимальной нагрузкой относительная деформация сжатия амортизатора составляет:

$$\varepsilon = \delta/h, \quad (4.43)$$

где  $\delta$  – осадка амортизатора;  $h$  – высота полиуретанового массива в свободном состоянии.

Размер  $a_1$  опорной пластины должен удовлетворять соотношению:

$$a_1 \geq \frac{a}{\sqrt{1-\varepsilon}}, \quad (4.44)$$

где  $a$  – размер полиуретанового массива в свободном состоянии.

Появление концентрации напряжений в полиуретане часто обуславливается большой величиной относительных деформаций, при которых значительно изменяются форма и первоначальные размеры.

Иллюстрацией сказанному может служить простейшие виброизоляторы сжатия (см. рисунок 4.19).

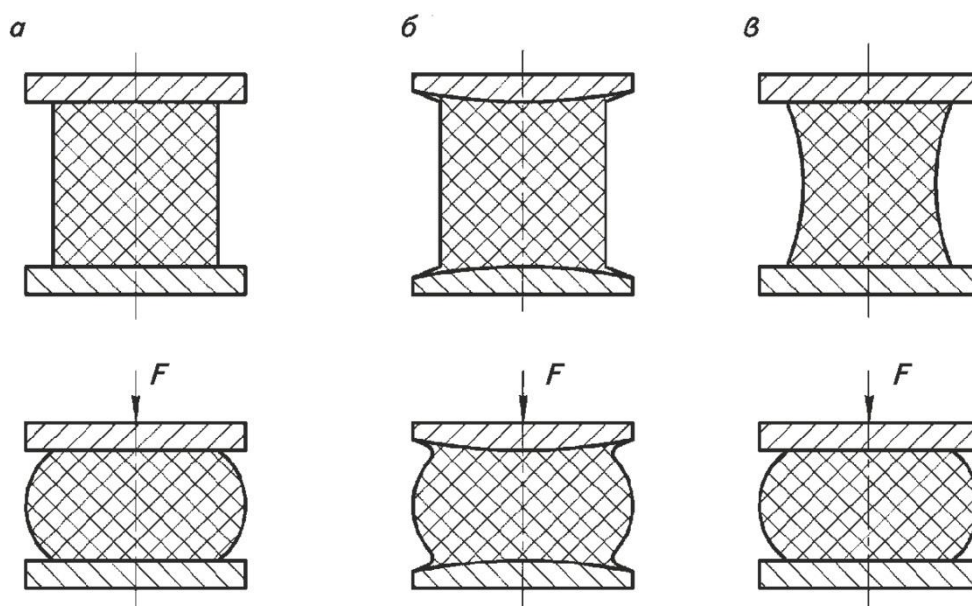


Рисунок 4.19 - Изменение формы боковой поверхности полиуретановых деталей при сжатии

В конструкции показанной на рисунке 4.19, а арматура не вызывает концентрации напряжений, однако в углах полиуретана действуют значительные напряжения изгиба, являющиеся следствием выворачивания боковой поверхности.

Исследованиями установлено, что местные напряжения в углах виброизоляторов сжатия могут быть уменьшены, если опорные пластины выполнить несколько выпуклыми, как это показано на рисунке 4.19, б.

Эффективным мероприятием для снижения концентрации напряжений в виброизоляторах сжатия является придание боковой поверхности полиуретана вогнутой формы (см. рисунок 4.19, в).

Некоторая вогнутость боковой поверхности получается вследствие усадки полиуретана при остывании после полимеризации.

#### 4.5 Выводы по главе 4

1. Определены важнейшие критерии работоспособности деталей машин из полиуретана в условиях статического и динамического нагружения.



2. Получена эмпирическая зависимость для определения модуля упругости полиуретана при сжатии в изделиях произвольной формы, которая позволяет на стадии проектирования определить деформацию эластомерно-металлической детали.

3. Приведены величины допускаемых напряжений сжатия для полиуретанов при различных видах нагружения, на которые необходимо ориентироваться при проектировании эластомерно-металлических деталей.

4. Получено эмпирическое выражение для определения модуля сдвига изделия в зависимости от фактора формы для полиуретанов различной твердости. Приведены допускаемые напряжения сдвига для полиуретанов разной твердости для различных видов нагружения. Представленные выражения необходимы для расчета деформации эластомерно-металлических деталей.

5. По результатам экспериментальных замеров деформативности полиуретановых роликов получено выражение для определения коэффициента динамического ужесточения для полиуретанов различной твердости в зависимости от скорости нагружения. Представленное выражение позволяет на стадии проектирования определять сопротивление качению колес с упругим ободом с высокой точностью.

6. Представлены значения предельной температуры, относительной деформации и максимальной скорости нагружения для основных конструкционных полиуретанов, работающих в условиях динамического нагружения, которые позволяют избежать разрушения упругого обода при работе колес с эластомерным покрытием.

7. Получена эмпирическая зависимость для определения долговечности полиуретанового амортизатора как функция пяти переменных: величины относительного сдвига, частоты нагружения, амплитуды колебаний, твердости полиуретана и коэффициента формы полиуретанового массива.

8. Сформулированы особенности конструирования полиуретановых деталей машин с учетом специфических свойств материала, таких как:

- практическая несжимаемость материала и как следствие, возможность его расширения при деформации;
- значительное различие коэффициентов объемного расширения у полиуретана и стали и соответствующая необходимость учета усадки полиуретана после полимеризации;
- склонность к появлению в деталях из полиуретана очагов концентрации напряжений и как следствие необходимость разработки равнонапряженных изделий.

## **Глава 5 Экспериментальное определение коэффициента трения качения массивной полиуретановой шины в контакте с жестким основанием**

### **5.1 Классификация и основные конструктивные параметры массивных шин**

Колеса со сплошным упругим ободом применяют в промышленных транспортных средствах для механизации погрузо-разгрузочных работ в тех случаях, когда требуется большая грузоподъемность при малых габаритах и очень опасны проколы пневматических шин.

Основная область применения - это погрузчики - штабелеры внутризаводского и складского транспорта. Транспорт этого типа должен обладать высокой маневренностью и хорошей устойчивостью при небольших габаритах [1, 10].

Массивная шина должна поглощать толчки и удары, которые возникают во время движения из-за неровностей полов производственных помещений, обеспечивать надежное сцепление колеса с дорожным покрытием, а также передавать тяговые и тормозные усилия.

Большинство машин напольного транспорта имеет привод от аккумуляторных батарей, поэтому очень важной характеристикой является сопротивление качению, которое у массивных шин меньше, чем у пневматических. Это приводит к меньшему расходу мощности на преодоление сопротивления качению и удлиняет рабочий период до перезарядки батарей.

Современная массивная шина – это упругий элемент резинометаллического колеса, который представляет собой сплошной резиновый массив, укрепленный на ободе колеса.

По способу крепления к колесу шины подразделяют на бандажные, дисковые и безбандажные.

У бандажных шин резиновый массив крепится к металлическому кольцу – бандажу, который запрессовывают на колесо с гарантированным натягом. По способу крепления резинового массива к бандажу различают шины эбонитового и клеевого крепления. В первом случае массив крепится посредством прослойки эбонита к бандажу, у которого по наружному диаметру выполнены проточки в форме винтовой линии (см. рисунок 5.1, а) или ласточкина хвоста (см. рисунок 5.1, б). Это один из самых старых (известен с 1853 г.), наиболее простых и достаточно надежных способов крепления резины с металлом.

Формы проточек для крепления резины к металлическому ободу (см. рисунок 5.1).

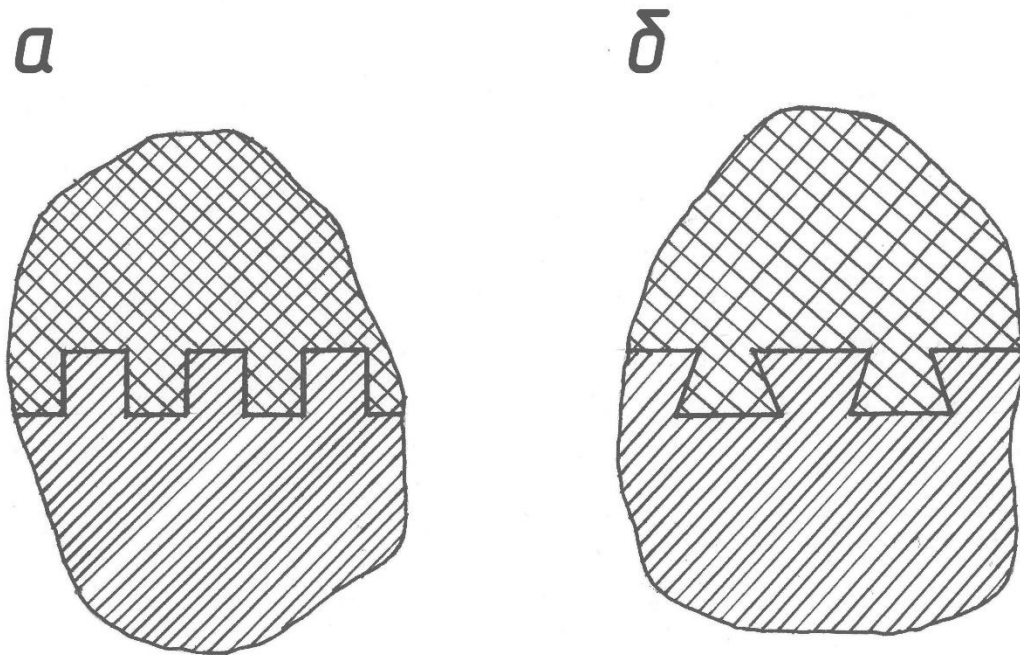


Рисунок 5.1 - Форма проточек обода для крепления массивной шины

Недостатком эбонитового крепления является размягчение при температуре выше  $60^{\circ}\text{C}$  и растрескивание при низких температурах. Это объясняется тем, что температурный коэффициент линейного расширения у эбонита в 3 ... 5 раз больше, чем у металла.

Клеевое крепление используется на гладких поверхностях бандажа или обода колеса.

К клеям, применяемым для крепления резины к металлам, предъявляют следующие требования:

- Высокая прочность крепления после склеивания;
- Универсальность, т. е. возможность склеивания разных резин с различными металлами;
- Высокая клеящая способность и хорошая схватываемость;
- Малая токсичность и огневзрывоопасность;
- Продолжительная сохранность при перевозках и хранении;
- Способность клеевого соединения не вызывать коррозии на поверхности металлов как в процессе обрешивания, так и при эксплуатации;
- Стойкость клеевого соединения к старению любого вида;
- Сохранение эластичности клеевого соединения после крепления резины к металлу;
- Способность клеевого соединения воспринимать ударную нагрузку без разрушения;
- Низкая стоимость клея и малый расход на изготовление одного изделия.

Массивные шины с клеевым креплением резины к бандажам и ободам более выносливы в тяжелых динамических и температурных условиях, хорошо переносят ударные нагрузки и вибрации. Наибольшее распространение получили клеи на основе изоцианатов [42]. В производстве массивных шин применяют в основном клей «Лейконат».

Способ крепления резины к металлу при помощи клеев по сравнению с креплением через латунную или эбонитовую прослойки проще, дешевле и позволяет механизировать производство.

Прочность крепления на границе клей-металл обуславливается химическим взаимодействием изоцианатных групп с оксидными и гидроксидными группами на поверхности металла и прочностью образующихся связей. Прочность крепления с резиной определяется взаимодействием изоцианатных групп с молекулами каучука, а также диффузией изоцианата в слой каучука с дальнейшей полимеризацией в нем.

Шины дискового типа устанавливают непосредственно на ось транспортного средства. По способу крепления резинового массива к ободу колеса различают шины эбонитового и клеевого крепления.

Безбандажные шины укрепляются на колесах механическим способом – запрессовкой с натягом или зажимом разъемными ободами. Преимущество массивных безбандажных шин перед бандажными (дисковыми) состоит в том, что из технологического процесса исключаются такие операции, как изготовление металлоарматуры, ее транспортировка на шинный завод и подготовка металлоарматуры под обрезаживание.

Безбандажные шины подразделяют на армированные, неармированные, с цилиндрической и конической посадочной частью. Шины с конической посадочной частью делятся на симметричные и несимметричные. Массивные шины с конической посадочной частью более экономичны, чем шины с цилиндрической посадочной частью, так как не нуждаются в применении специального оборудования (гидропрессы) и приспособлений при монтаже на колеса.

Каждая массивная шина имеет обозначение, характеризующее ее габаритные размеры.

Шины дискового типа и безбандажные обозначаются двумя числами: первое число – наружный диаметр шины, второе – ширина по ободу или основанию массива.

Шины бандажного типа обозначают тремя числами: первое число – наружный диаметр шины, второе – ширина по ободу, третье – номинальный внутренний (посадочный) диаметр бандажа.

Основные конструктивные параметры массивных шин (см. рисунок 5.2).

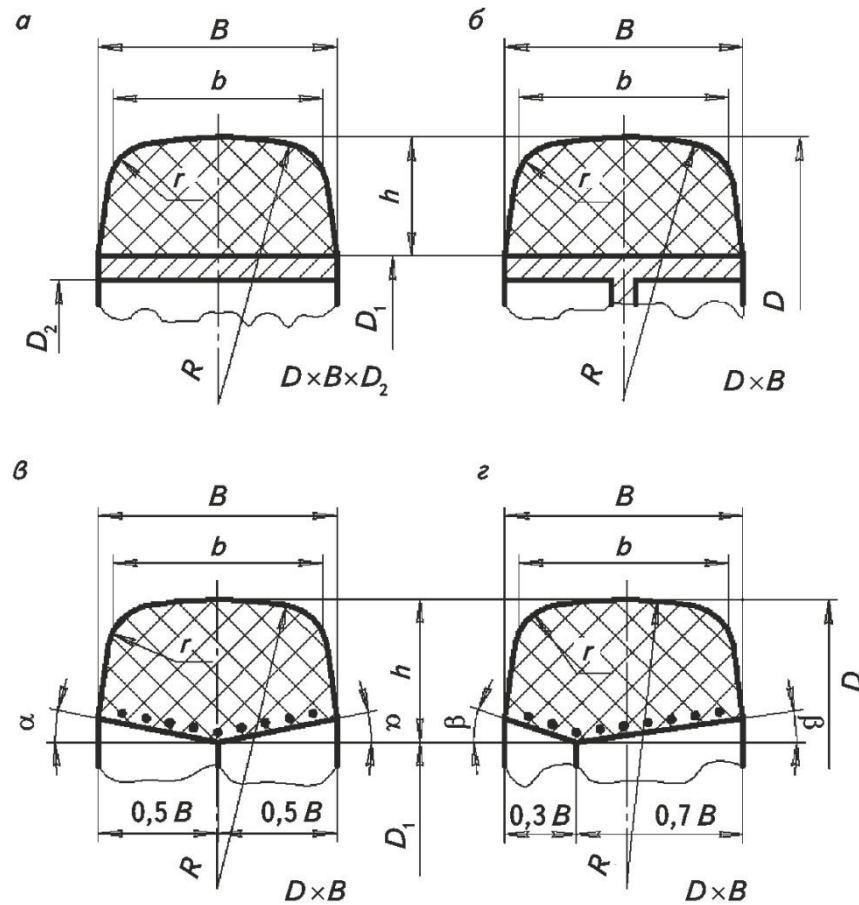


Рисунок 5.2 - Конструктивные элементы массивной шины: *а* – бандажная; *б* – дисковая и безбандажная с цилиндрической посадочной частью; *в* – безбандажная с конической симметричной посадочной частью; *г* – безбандажная с конической несимметричной посадочной частью

Наиболее важным конструктивным параметром массивной шины является толщина массива  $h$ , которая определяет нагруженность и работоспособность шины.

В настоящее время наиболее распространен трапецевидный профиль с углом наклона боковой поверхности к основанию в пределах  $8 \dots 15^\circ$ . При таком угле наклона боковых поверхностей профиль массива шины при максимальном нагружении деформируется настолько, что боковины шин не выходят за пределы ширины бандажа, вследствие чего исключается их касание в случае спаренной установки шин.

Для безбандажных шин с симметричной конической посадочной частью угол  $\alpha$  при ширине шины до 125 мм рекомендуется  $15^\circ$ , а при ширине шины свыше 125 мм –  $8^\circ$ . Для безбандажных шин с несимметричной конической посадочной частью угол  $\alpha = 15^\circ$ , угол  $\beta = 8^\circ$  при ширине шины до 125 мм, а при ширине шины свыше 125 мм угол  $\alpha = 15^\circ$ , угол  $\beta = 6^\circ$ .

Столь широкое распространение массивных шин вызывает необходимость освещения вопросов, связанных с их конструированием, изготовлением и эксплуатацией.

Исторически первые массивные шины появились в 1845 году в Англии. Конструкция первых массивных шин (см. рисунок 5.3).

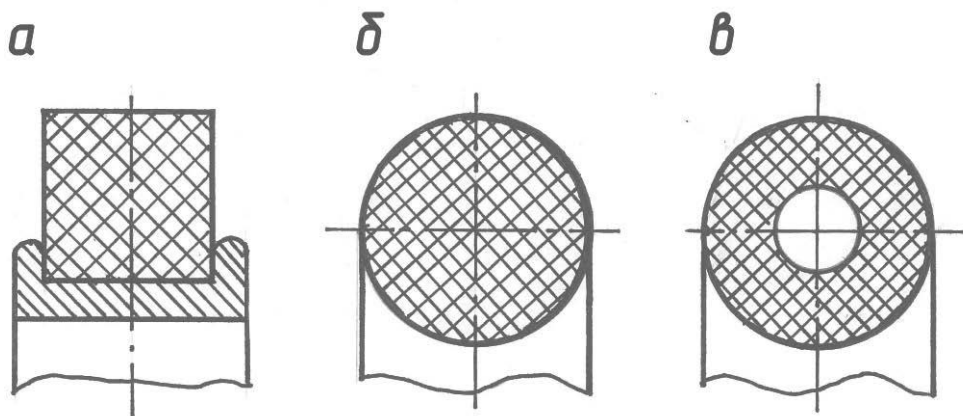


Рисунок 5.3 - Конструкции первых массивных шин

По своей конструкции и способу крепления на ободе колеса они были чрезвычайно простыми и представляли собой сплошное резиновое кольцо прямоугольного сечения (см. рисунок 5.3, а).

Шина не прикреплялась к ободу колеса, а будучи несколько меньшего диаметра, чем обод, держалась на нем благодаря натяжению. Такие шины были созданы фирмой «Charles Mackintosh and Co.» и применялись для конных экипажей.

Длительное время первые шины были липкими, так как делались из невулканизированного каучука и быстро размягчались при езде. Несмотря на это



применение шин быстро развивалось. В 1856 году Кольс Фуллер запатентовал в Англии массивную шину из холщевых, хлопчатобумажных и других волокнистых материалов. Шины делали также из кожи, бумаги и дерева.

В 1867 году в Англии впервые появился велосипед, однако езда на нем не доставляла удовольствия, пока на нем не стали применять массивные шины, которые вклеивали в углубление обода (см. рисунок 5.3, б).

В 1884 году была изобретена специальная шина «эластик» («подушечная» - cushion), представлявшая собой ту же шину, но с полостью внутри (см. рисунок 5.3, в). В первых шинах «эластик», применявшихся на велосипедах и легковых экипажах, возникали сравнительно небольшие напряжения. Тем не менее постоянные изгибы вызывали появление разрывов в их боковых стенках, для устранения которых полостям придавали самые разнообразные формы.

Для устранения этого недостатка, полость внутри шины стали располагать ближе к основанию шины и часто оставлять полости открытыми в сторону обода (бандажа).

Одновременно в Англии была предпринята попытка применить массивную шину на первых грузовых автомобилях, однако при больших нагрузках оказалось практически невозможным удержать шину на ободе колеса, несмотря на использование различного рода укрепляющих приспособлений.

Первая практически пригодная массивная шина была запатентована в 1881 году и усовершенствована в 1883 году Кармонтом. В ней был удачно выбран профиль обода, в который запрессовывалась резиновая массивная шина.

С изобретением двигателя внутреннего сгорания (около 1900 года) были созданы необходимые условия для производства автомобилей и тихоходных грузовых машин. Требования, предъявляемые к шинам, в корне изменились. Нагрузка на колеса удвоилась, скорости утроились, соответственно возросла сила ударов, действующих на шину.

В первой четверти 20-го века различные фирмы выпускали так называемые «секционные» или «блочные» шины. В Англии эти шины были известны под названием «клинчер-грид» (Clincher-Grid) или «элефант-трейд» (Elephant-Tread).

В этих шинах использовалась возможность замены отдельных частей – секций или блоков при преждевременном износе или разрушении некоторых участков беговой поверхности.

Основные элементы конструкции массивной шины фирмы «Commerz» (см. рисунок 5.4).

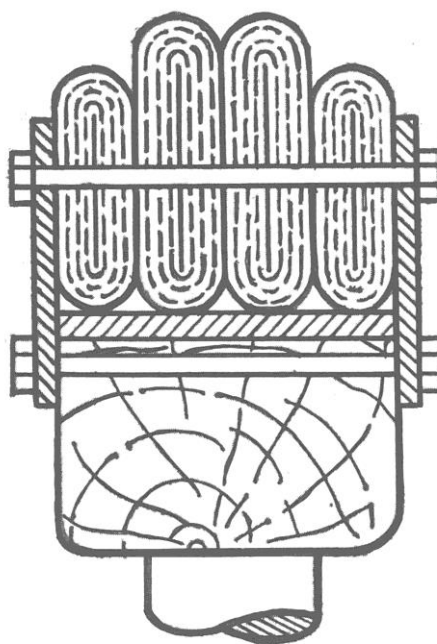


Рисунок 5.4. Конструкция блочной массивной шины фирмы «Commerz»

Большим спросом пользовались массивные шины фирмы «North British Rubber Co.» (см. рисунок 5.5).

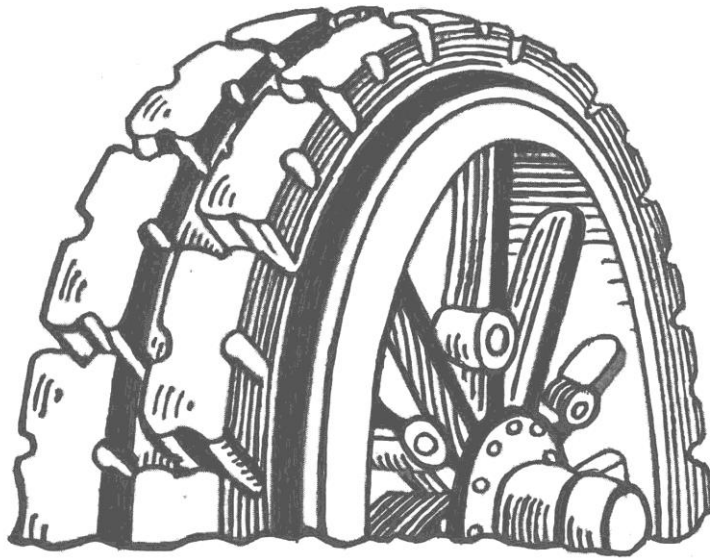


Рисунок 5.5 - Конструкция секционной массивной шины фирмы «North British Rubber Co.»

Однако шины этого типа не оправдали себя впоследствии при больших нагрузках и скоростях, поскольку секции (блоки) изнашивались неравномерно, расшатывались и преждевременно разрушались.

С дальнейшим развитием безрельсового транспорта имевшиеся типы массивных шин перестали отвечать возрастающим требованиям. Кроме того, очень быстро развивалось производство пневматических шин. В результате усиленных поисков к началу 30-х годов 20-го века массивные шины приобрели оптимальную форму.

Новый толчок развитие массивных шин получило в связи с применением их в качестве амортизирующего элемента в опорных и поддерживающих катках гусеничных машин.

Массивные шины не применяются в автомобильном, мотоциклетном и велосипедном транспорте (их полностью вытеснили пневматические шины), однако они остаются основным типом шин для напольного колесного безрельсового транспорта, занятого на перевозках различных грузов на небольшие расстояния с малыми скоростями. К этому транспорту относятся авто- и

электропогрузчики, штабелеры-погрузчики, самоходные прицепные и ручные тележки.

Производство массивных шин осуществляется на специализированных предприятиях, оснащенных всем необходимым оборудованием. Массивные шины являются объектом государственной стандартизации.

Ежегодно международная ассоциация «The Tire and Rim Association, Inc.» публикует рекомендации по размерам и нагрузкам на массивные шины. Крупнейшими мировыми производителями массивных шин являются «В. Ф. Goodrich», «Goodyear» (США), «Dunlop», «Avon» (Великобритания), «Continental» (Германия), «Pirelli» (Италия), «Bridgestone» (Япония). Эти фирмы производят основной объем массивных шин для различных областей применения в промышленности и транспорте.

Ряд фирм, таких как «TENTE» (Германия), «Hutchinson» (Франция), «HUFARollen» (Германия), «Keeber Engineering», «Bassick» (США), «Revvo» (Великобритания), «Feralco» (Франция), специализируются на изготовлении различных типов обрешиненных колес и роликов для промышленных и бытовых целей.

Начиная с середины прошлого века, в передовых промышленно развитых странах резина во многих технических приложениях стала вытесняться полиуретанами, имеющими важные конструктивные, технологические и эксплуатационные преимущества, хотя полиуретаны в 1,5...3 раза дороже резин.

Установлено, что при одинаковых габаритах и небольших скоростях движения (до 10 км/ч), массивные шины из полиуретана выдерживают нагрузки в 2 – 3 раза большие, чем резиновые [42]. При этом срок службы в 2 – 3 раза больше, чем у резиновых, сопротивление качению (следовательно, и расход энергии) полиуретановых шин меньше, чем у резиновых.

Этот факт объясняется тем, что при одинаковой твердости, например, 85 ShA статический модуль упругости полиуретана при сжатии  $E_{cm0} = 21$  МПа, а модуль упругости резины  $E_{cm0} = 9$  МПа [41]. Благодаря этому появилась возможность либо

уменьшить размеры шин из полиуретана по сравнению с резиновыми при равных нагрузках, либо при равных размерах значительно увеличить нагрузку на них.

Применение шины меньшего диаметра снижает центр тяжести машины, увеличивает ее устойчивость, создает возможность совершать повороты малого радиуса, что очень важно при работе внутри помещений.

Массивные шины надежны в эксплуатации, так как порезы, трещины, незначительные вырывы и сколы массива, внедрение в полиуретан посторонних предметов не вызывают потери работоспособности и не приводят к авариям.

Наконец, массивные шины намного дешевле пневматических, проще в изготовлении и не требуют особого ухода при эксплуатации.

Основными показателями эксплуатационных качеств массивных шин являются долговечность и надежность.

На современном этапе развития конструкции шины ее долговечность определяется износом обода при качении с проскальзыванием и скольжением при буксовании, движении «юзом» и макропроскальзывании рулевого колеса при повороте.

Надежность массивных шин определяется сцеплением – силой трения между шиной и опорной поверхностью.

## **5.2 Сопротивление качению массивных полиуретановых шин**

Рассмотрим равномерное прямолинейное качение массивной шины по твердой горизонтальной поверхности и установим причины затраты энергии при перекатывании колеса.

Качение колеса может происходить под действием силы трения, приложенной к ободу (случай экспериментального стенда) либо под действием силы, приложенной к оси. В перечисленных выше случаях колесо называется ведомым.

Когда вращение колеса происходит под действием приложенного к нему вращающего момента колесо называется ведущим.

При качении колеса происходит циклическое нагружение и разгрузка материала. Для упругих тел этот процесс является обратимым. Однако абсолютно упругих тел в природе не существует. Большинство материалов обладает свойствами релаксации (уменьшение напряжений во времени при постоянной деформации) и ползучести (изменение деформаций во времени при постоянном напряжении).

Это означает, что соотношения, определяющие поведение материала при деформировании, должны включать не только напряжения и деформации, но и их производные по времени, то есть скорость деформирования. К материалам, обладающим такими свойствами, относятся вязкоупругие материалы, в частности, полиуретан.

При качении тел из вязкоупругих материалов площадка контакта распределена не симметрично относительно оси симметрии.

При качении колеса внутреннее трение в материале (гистерезис) согласно [11, 16, 91] препятствует нарастанию деформации в передней зоне поверхности контакта колеса с опорной поверхностью и уменьшению деформации в задней зоне.

В результате эпюра нормальных реакций опорной поверхности, симметричная в случае неподвижного колеса, при качении изменяется, увеличиваясь спереди и уменьшаясь сзади (см. рисунок 5.6).

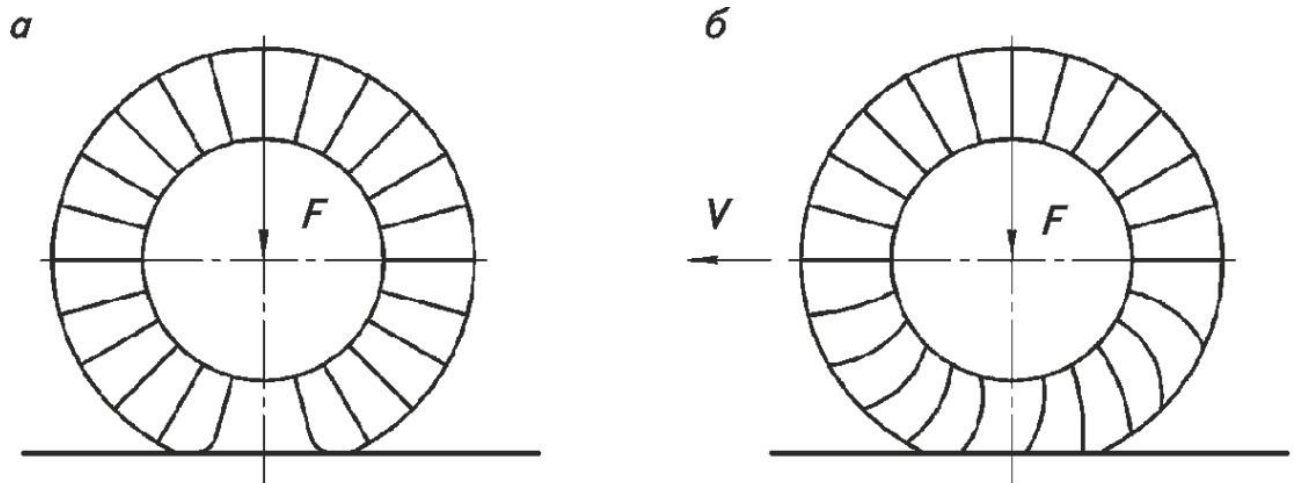


Рисунок 5.6 - Схема радиальной и наружной деформации шины: *a* – неподвижное колесо; *б* – при качении колеса

Весь процесс перекаtywания шины нагруженной вертикальной нагрузкой может рассматривать как процесс многократной деформации отдельных участков шины.

Соответствующая работа, связанная с деформацией упругого полиуретанового обода, и обуславливает в основном сопротивление качению колеса.

Характеристика упругости шины при ее радиальном нагружении и последующем разгрузении, устанавливающая зависимость между нагрузкой  $F$  и вызываемой ею радиальной деформацией шины  $\delta$  (см. рисунок 5.7).

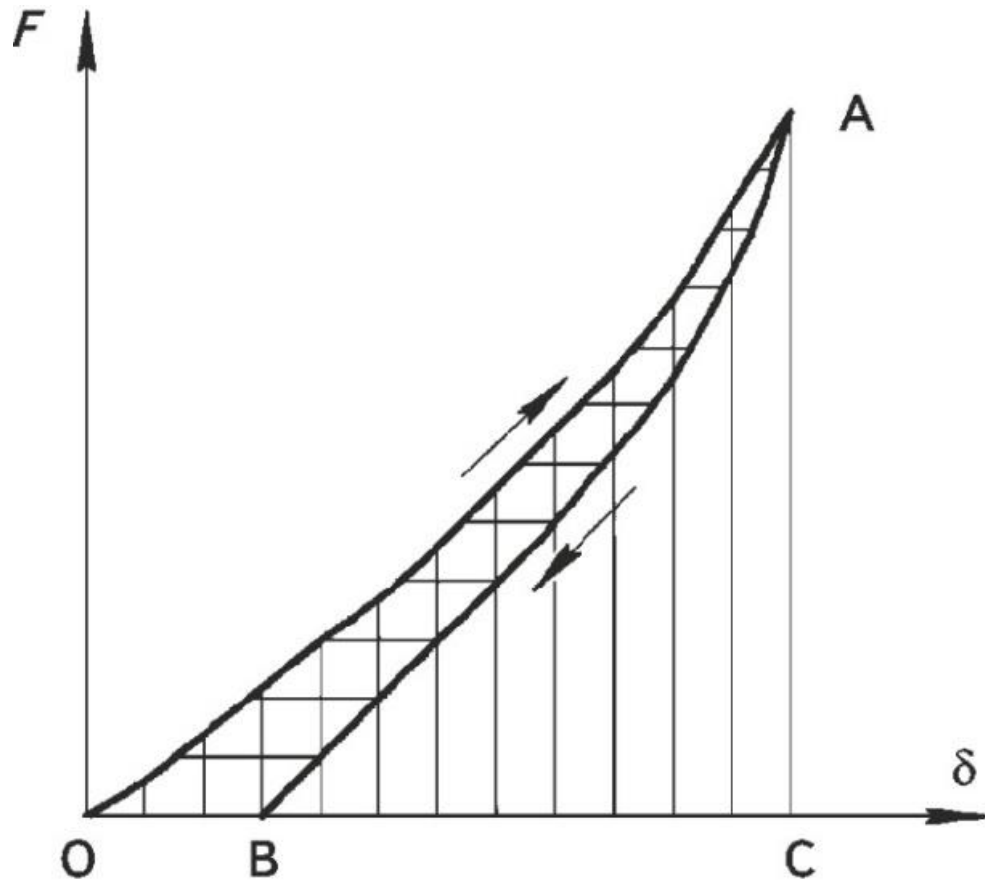


Рисунок 5.7 - Характеристика радиальной упругости

Работа, затраченная на деформацию шины, определится площадью OAC; работа, возвращенная шиной при снятии нагрузки, соответственно определится площадью BAC. Очевидно, разность указанных площадей или площадь петли гистерезиса OAB будет представлять, в соответствующем масштабе, ту долю работы, которая связана с необратимыми потерями энергии при деформации шины, т.е. с гистерезисом. Именно эта площадь определяет, количество энергии поглощенной материалом, и в дальнейшем будет передано в окружающее пространство в виде теплоты.

Необходимо отметить, что основная доля этой работы идет на нагрев материала, а меньшая на перегруппировку макромолекул. Определенная таким путем работа будет соответствовать однократной вертикальной деформации шины.

Помимо потерь на внутреннее трение существуют согласно [44, 52] потери на проскальзывание обода, которое происходит на краях площадки контакта



массивной шины с твердой поверхностью, потери на нарушение молекулярных связей между шиной и опорной поверхностью (так называемое явление прилипания) и потери на преодоление сопротивления воздуха.

Потери на прилипание свойственны для работы массивной шины в контакте с наливными полами из полиуретана.

Из перечисленных трех дополнительных причин наиболее значительными являются потери на износ обода при качении с проскальзыванием. Однако ввиду их незначительности в дальнейшем они рассматриваться не будут.

Схему сил, моментов и реакций, действующих на полиуретановый ролик при контакте с беговым барабаном экспериментальной установки, нагруженной вертикальной силой  $F$  (см. рисунок 5.8).

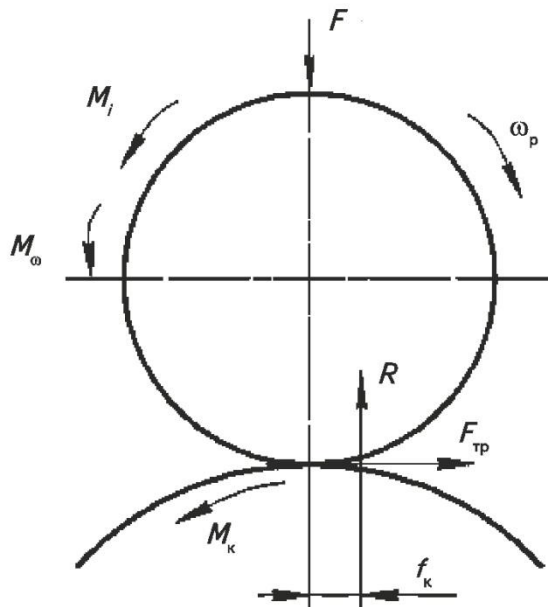


Рисунок 5.8 - Схема сил, моментов и реакций, действующих на ролик при его вращении в контакте с беговым барабаном

Полиуретановый ролик вращается под действием силы трения  $F_{тр}$  между роликом и барабаном. К беговому барабану от электродвигателя передается

крутящий момент  $M_k$ , который расходуется на преодоление момента сопротивления качению полиуретанового ролика.

Равнодействующая реакций  $R$  в контакте ролика с барабаном, перпендикулярная к направлению движения и равная вертикальной нагрузке  $F$ , при качении сдвигается вперед на некоторое расстояние  $f_k$ , называемое коэффициентом трения качения (трение второго рода).

Реакция  $R$  создает относительно центра колеса момент сопротивления качению:

$$M_k = R \cdot f_k . \quad (5.1)$$

Инерционный момент ролика равен:

$$M_i = J_p \frac{d\omega_p}{dt} , \quad (5.2)$$

где  $J_p$  – момент инерции ролика по отношению к его оси;  $\frac{d\omega_p}{dt}$  – угловое ускорение вращения ролика.

Кроме перечисленных сил и моментов, на ролик действует момент  $M_\omega$  сопротивления вращению колеса со стороны воздуха. В результате, используя рисунок 5.8, получим из условия равновесия системы:

$$R = F$$

$$M_k = R \cdot f_k + M_i + M_\omega . \quad (5.3)$$

Момент  $M_\omega$  ввиду его незначительности рассматривать, как было принято выше, не будем. Кроме того, приняв движение колеса установившимся  $\frac{d\omega_p}{dt} = 0$ , инерционный момент  $M_i = 0$ .

Окончательно получим:  $R = F$ ,  $M_k = R \cdot f_k$ . Крутящий момент  $M_k$ , подводимый от барабана к испытываемому полиуретановому ролику, определим по следующей формуле:

$$M_k = \frac{P_{эл} \cdot 10^3 \cdot \eta_{уст}}{\omega_{вых} \cdot i_{рем}} \quad (5.4)$$

В тоже время момент сопротивления качению:

$$M_k = R \cdot f_k = F \cdot f_k . \quad (5.5)$$

Приравняв (5.4) и (5.5), получим формулу для расчета  $f_k$ :

$$f_k = \frac{P_{эл} \cdot 10^3 \cdot \eta_{уст}}{F \cdot \omega_{вых} \cdot i_{рем}}, \quad (5.6)$$

где  $P_{эл}$  - потребляемая мощность электродвигателя;  $\eta_{уст}$  - к.п.д. экспериментальной установки,  $\eta_{уст} = 0,95$ ;  $F$  - нагрузка на ролик;  $\omega_{вых}$  - выходная угловая скорость мотор – редуктора,  $\omega_{вых} = 4,18 \text{ с}^{-1}$ ;  $i_{рем}$  - передаточное отношение ременной передачи.

Таким образом, по формуле (5.6) мы можем определить коэффициент трения качения  $f_k$ , в зависимости от нагрузки  $F$  для различных скоростей качения и полиуретанов различной твердости (75 ShA, 85 ShA, 95 ShA).

При статическом нагружении ролика, его радиальную деформацию  $\delta$  мы измеряем при помощи стрелочного индикатора с ценой деления 0,01 мм.

Индикатор установлен в кронштейне, закрепленном на рычаге нагружения, и измеряет радиальную деформацию относительно корпуса установки. Характер взаимодействия экспериментального полиуретанового ролика с беговым барабаном и плоской твердой поверхностью (см. рисунок 5.9).

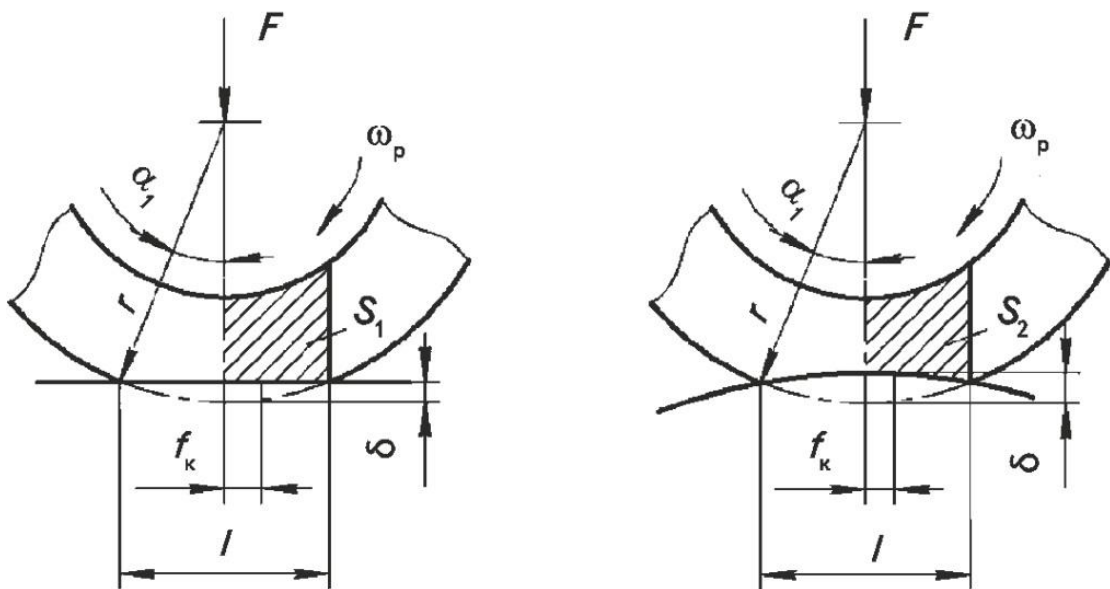


Рисунок 5.9 - Деформация полиуретанового ролика: а – в контакте с плоской твердой поверхностью; б - в контакте с беговым барабаном

Благодаря большой жесткости и высокой точности изготовления экспериментальная установка позволяет во время вращения ролика измерять его фактическую радиальную деформацию  $\delta$  с точностью до 0,01 мм, при этом радиальное биение ролика составляет 0,01 мм.

После приложения нагрузки и фиксации радиальной деформации включалось вращение бегового барабана и обнаруживалось уменьшение радиальной деформации (ролик при качении поднимался).

Это явление объясняется тем, что при динамическом нагружении происходит увеличение модуля упругости полиуретана при сжатии.

В качестве характеристики полиуретана, работающего в режиме динамического нагружения можно использовать коэффициент динамического ужесточения – отношение динамического модуля упругости к статическому.

Для резин, учитывая наиболее вероятные условия нагружения при эксплуатации, коэффициент динамического ужесточения учитывает соотношение модулей сдвига [18].

В зависимости от типа каучука, твердости резины и скорости нагружения  $K_{ду}$  согласно [7, 17] изменяется от 1,2 до 1,5. В то же время по данным [39] величина коэффициента динамического ужесточения находится в пределах 1,5 для резины твердостью 30 ShA до 2,5 твердостью 75 ShA.

Далее, по результатам замера статической и динамической деформации ролика расчетным путем были получены значения коэффициента динамического ужесточения в зависимости от скорости нагружения, для полиуретанов различной твердости (см. рисунок 5.10).

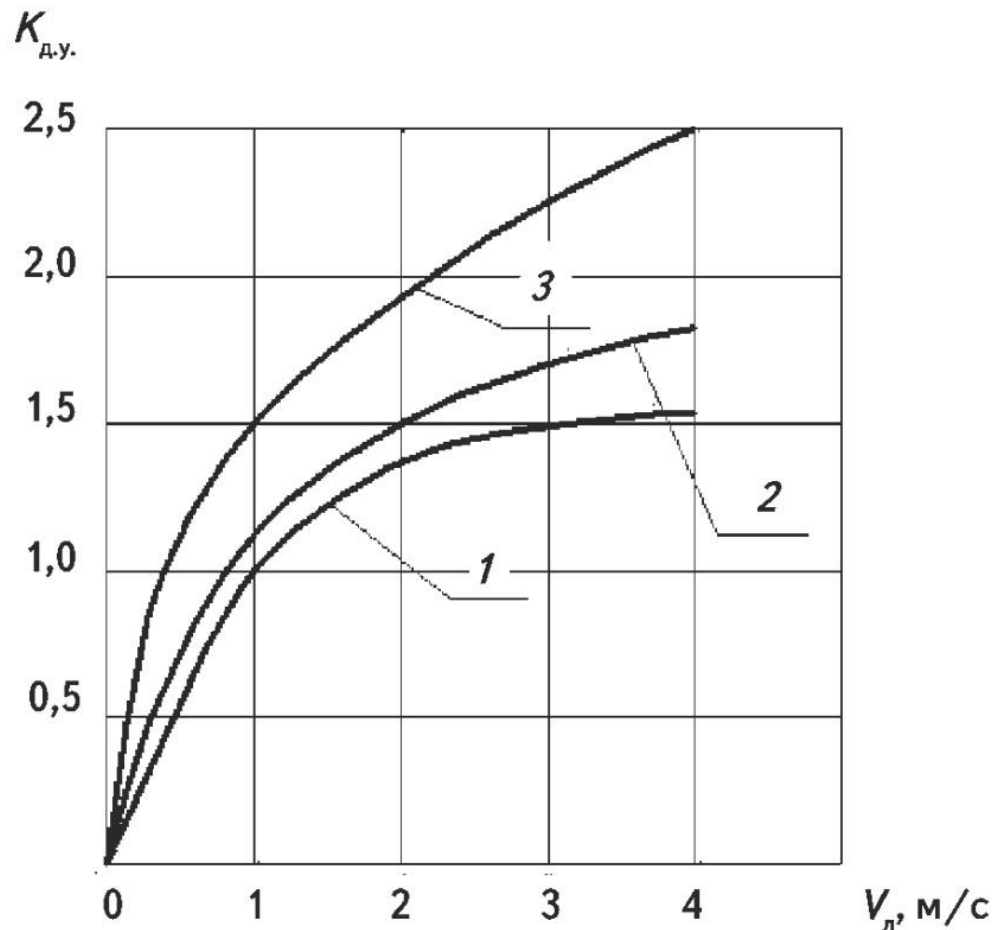


Рисунок 5.10 - Зависимость коэффициента динамического ужесточения от скорости нагружения для полиуретанов различной твердости: 1 - полиуретан 95 ShA; 2 - полиуретан 85 ShA; 3 - полиуретан 75 ShA

Представленные на рисунке 5.10 зависимости хорошо аппроксимируются следующей формулой:

$$K_{д.у.} = 1 + \frac{V_{л}^{1,28-0,0054ShA}}{20-0,19ShA}, \quad (5.7)$$

где  $V_{л}$  - линейная скорость;  $ShA$  – твердость полиуретана по Шору.

С увеличением скорости деформации динамический модуль упругости растет по степенной зависимости.

С увеличением твердости полиуретана показатель степени уменьшается и составляет для полиуретана твердостью 75 ShA - 0,87 (кривая 3 – рисунок 5.10), для твердости 85 ShA – 0,82 (кривая 2 - рисунок 5.10) и для полиуретана твердостью 95 ShA соответственно 0,77 (кривая 1 – рисунок 5.10).

Подобные качественно зависимости увеличения динамического модуля упругости для полимеров от скорости деформирования представлены в работах [16, 35].

С увеличением твердости полиуретана коэффициент динамического ужесточения линейно увеличивается.

Это очевидно связано с необходимостью деформирования макромолекул полиуретана, у которого число поперечных «сшивок» макромолекул растет с ростом твердости полимера.

Благодаря точному замеру потребляемой мощности с помощью микроамперметра, включенного последовательно в электрическую цепь экспериментальной установки, была получена зависимость коэффициента трения качения от нагрузки.

Зависимость, коэффициента трения качения опытного ролика, от приложенной нагрузки, по беговому барабану экспериментальной установки (см. рисунок 5.11).

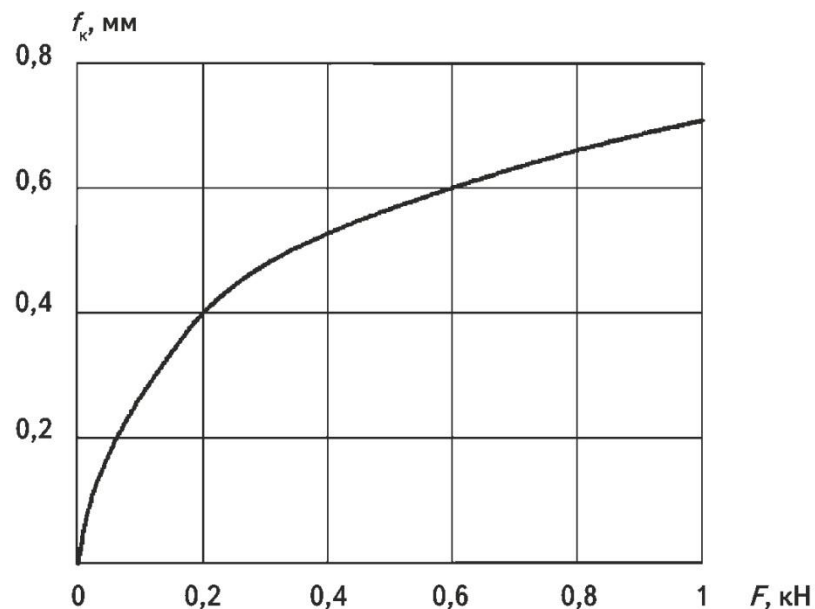


Рисунок 5.11 - Зависимость коэффициента трения экспериментального ролика по беговому барабану от нагрузки

Вид зависимости, представленной на рисунке 5.11, совпадает с зависимостью радиальной деформации ролика от нагрузки. По результатам расчетов коэффициент трения качения составляет примерно 6 % от длины  $l$  площадки контакта.

Выражение для коэффициента трения качения получено для случая контактирования экспериментального ролика с беговым барабаном (рисунок 5.9, б).

Учитывая тот факт, что сопротивление качению обусловлено в основном необходимостью деформирования упругого слоя полиуретана, и сравнивая эти объемы для случая контактирования экспериментального ролика с беговым барабаном и плоской твердой поверхностью, можно сделать вывод: при небольших относительных деформациях полиуретанового обода  $\varepsilon = \delta / h = 8 \dots 10$  % объемы полиуретанового обода  $V_1 = S_1 b$  и  $V_2 = S_2 b$  (рисунок 5.9) непосредственно участвующие в деформировании при качении ролика различаются на 4...6 %.

Приведенные различия находятся в пределах технической погрешности, поэтому для случая контакта полиуретанового обода массивной шины с плоской твердой поверхностью во всем диапазоне рабочих нагрузок усредненно можно принять коэффициент трения качения равным 6 % от длины контакта колеса с плоскостью.

Полиуретановый обод имеет коэффициент трения качения примерно в 1,5 раза меньше, чем резиновый обод такой же твердости. Это объясняется меньшей длиной площадки контакта колеса с бетонным полом.

Ведущие западные производители массивных шин изготавливали резиновый обод составным из двух слоев: внутренний с малым внутренним сопротивлением деформированию для уменьшения сопротивления качению, и наружный (беговой) – износостойкий для уменьшения износа упругого обода колеса.

Согласно рисунку 5.9, а угол контакта колеса с дорогой:  $\alpha_1 = \arccos(1 - \frac{\delta}{r})$ , длина площадки контакта:  $l = \sin \alpha_1 2r$  и коэффициент трения качения:

$$f_k = 0,06l = 0,12\sqrt{d}^3 \sqrt{\frac{Fh}{2E_{дин}b\sqrt{d}}}, \quad (5.8)$$

где  $F$  – нагрузка на колесо;  $h$  – толщина обода;  $E_{дин}$  – динамический модуль упругости;  $b$  – ширина колеса;  $d$  – диаметр колеса.

Приведем пример расчета коэффициента трения качения для опорного колеса погрузчика-штабелера со следующими исходными конструкционными данными.

Размеры колеса: наружный диаметр  $d = 300$  мм, рабочая ширина  $b = 160$  мм, толщина обода  $h = 35$  мм. Материал обода – полиуретан твердостью 85 *ShA*. Начальный статический модуль упругости при сжатии  $E_{cm_0} = 21$  МПа.

Параметры нагружения: скорость передвижения  $V_{л} = 6$  км/час = 1,67 м/с, нагрузка на колесо  $F = 10\,000$  Н.

Принимая во внимание динамический характер нагружения, который характерен для большинства колес с упругим ободом, определим температуру нагрева обода:

$$T_{\pi} = \frac{T_g + 6,9V_{л}^{1,65} + 95 \sqrt[3]{\left(\frac{F}{2E_{дин}bd\sqrt{\frac{h}{d}}}\right)^2}}{1,67 - 0,007 \text{ ShA}} = 42^{\circ}\text{C},$$

где  $T_g$  – температура окружающего воздуха,  $T_g = 20^{\circ}\text{C}$ .

Определим  $K_{д.у.}$  и  $K_{м.р.}$

$$K_{д.у.} = 1 + \frac{V^{1,28-0,0054\text{ShA}}}{20-0,19 \text{ ShA}} = 1,39.$$

$$K_{м.р.} = 1 - 0,0033T_{\pi} = 0,86$$

$$E_{дин} = E_{cm_0} \cdot K_{д.у.} \cdot K_{м.р.} = 21 \cdot 1,39 \cdot 0,86 = 25,1 \text{ МПа.}$$

Коэффициент трения качения:

$$f_k = 0,06l = 0,12\sqrt{d}^3 \sqrt{\frac{Fh}{2E_{дин}b\sqrt{d}}} = 2,8 \text{ мм}$$

В заключении необходимо отметить, что фактический коэффициент трения качения массивной шины меньше расчетного примерно на 8...10 %.



Разница обусловлена тем, что расчет нагрева полиуретанового обода производится для случая постоянного динамического нагружения массивной шины, а в реальности погрузчики- штабелеры согласно [10] работают с остановками. Шина в течении работы не успевает, вследствие низкой теплопроводности разогреться до расчетной температуры.

Исходя из опыта экспериментальных исследований и эксплуатации различных деталей вращения с упругим ободом из полиуретана необходимо отметить что, нагрев до расчетной температуры происходит в течение 5...8 минут, в зависимости от скорости нагружения, т.к. именно она оказывает большее влияние на нагрев полиуретана, в отличии от величины относительной деформации упругого обода. Далее наступает стабилизация температуры полиуретанового обода, вследствие установившегося теплового баланса.

### **5.3 Гистерезисный нагрев упругого полиуретанового обода и основные виды отказов колес**

Исходя из производственной практики изготовления и опыта эксплуатации массивных шин с полиуретановым ободом согласно [36] необходимо выделить 5 основных видов отказов колес. К ним относятся:

- Отслаивание упругого обода;
- Дефекты механической обработки;
- Вырывы рабочей поверхности.
- Внутреннее расслоение обода;
- Износ поверхности качения обода.

В зависимости от интенсивности эксплуатации, скорости передвижения, состояния поверхности дорожного покрытия и условий окружающей среды различают согласно [10] легкий, средний и тяжелый режимы эксплуатации массивных шин.

Для легкого режима, в котором работают колеса, устанавливаемые на некоторых видах производственного, торгового, медицинского, пищевого, выставочного передвижного оборудования и т.д. характерны редкие перемещения при постоянной температуре с низкой скоростью до 3 км/ч.

При этом движение происходит по ровному покрытию, без толчков и ударов с использованием номинальной грузоподъемности от 50 до 100 %.

Для среднего режима свойственны более частые перемещения при постоянной или меняющейся температуре со скоростью до 5 км/ч как по ровным, так и по неровным покрытиям с подъемами до 10%.

При этом возникают умеренные толчки и удары, и вследствие этого кратковременная перегрузка составляет до 150 %. В этом режиме работают шины, устанавливаемые на ручных или прицепных тележках, погрузчиках - штабелерах, кранах для перемещения грузов в цехах или складах на небольшие расстояния (30...50 м) с использованием номинальной грузоподъемности от 50 до 100 %.

Для тяжелого режима характерны перемещения со скоростью до 16 км/ч, при меняющейся температуре окружающей среды по покрытиям любого типа, на которых возможны различные неровности (щебень, металлическая стружка, подъемы более 10 % и т.д.) вызывающие значительные толчки и удары с кратковременной перегрузкой до 300 %.

В тяжелом режиме работают шины, смонтированные на авто- и электропогрузчиках, тягачах, штабелерах, у которых номинальная грузоподъемность используется на 100 %.

Тяжелый режим работы свойственен также для технологического и транспортного оборудования, работающего в постоянном режиме с номинальной грузоподъемностью.

Отслаивание упругого обода колеса чаще всего происходит при движении машины с креном, при движении в поворотах, особенно на большой скорости.

Отслаивание обода происходит из-за недостаточно высокой адгезии, в той зоне где, действуют максимальные касательные напряжения (см. рисунок 5.12).

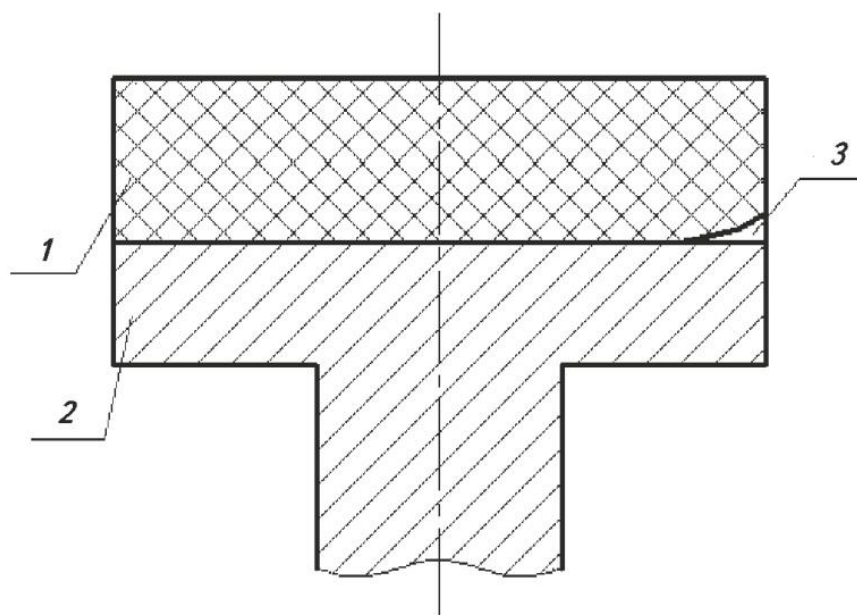


Рисунок 5.12 - Отслаивание упругого обода колеса: 1 – упругий обод; 2 – металлический центр; 3 – зона отслаивания по слою адгезива

Если технология изготовления колеса строго соблюдена, прочность адгезии превышает прочность упругого обода. При испытании качественных образцов «на отдир» разрушение происходит по толщине эластомера, а не по слою адгезива.

Часть дефектов изделий удастся выявить при внешнем осмотре перед сборкой узла, другая часть – «пузыри», не сплошь покрытые адгезивом участки поверхности и т.п., остается скрытой, но может быть выявлена в первые часы сдаточных испытаний. Местное отслаивание заканчивается сходом всего обода с центра.

Дефекты механической обработки полиуретанового обода колеса появляются при обточке или шлифовке и сопровождаются местными вырывами или прижогами (оплавлениями).

Слой, в котором остаются микронадрывы, не обнаруженные при осмотре, при последующей эксплуатации колеса практически не подвергается усталостному изнашиванию.

Однако, поскольку твердость упругого слоя выбирают высокой, 80...90 ShA, вероятность появления надрывов, более характерных для мягких полиуретанов, незначительна.

Прижоги на твердой поверхности исключают подбором способа и режима обработки, а также характеристик инструмента и смазочно-охлаждающей жидкости.

Вырывы рабочей поверхности обода и его торцев происходят вследствие циклического нагружения, при котором происходит уплотнение и охрупчивание полиуретана. Материал обода согласно [18], подвержен также старению под воздействием внешней среды (влаги, кислорода, озона, окислы азота, ультрафиолет, нефтепродукты и т.п.).

Перегрузка или периодический перекоп колеса во время движения может привести к местным вырывам, расположенным преимущественно вблизи торцев. Предотвращение вырывов требует ограничения нагрузки на материал, повышения точности монтажа и ужесточения правил эксплуатации.

Внутреннее расслоение обода обусловлено особенностями молекулярного строения полиуретана, обладающего ярко выраженными релаксационными свойствами. Поглощаемая в течение каждого цикла деформации энергия, вызывает нагрев полиуретанового обода и примыкающей металлической арматуры.

Количество теплоты, выделяемой единицей объема полиуретана за один цикл, пропорционально работе деформации и выражается площадью гистерезисной петли.

Нагрев полиуретанового обода от циклического нагружения является согласно [51] результатом «конкуренции» между гистерезисным теплообразованием и потерями тепла в окружающую среду. Образовавшаяся теплота от полиуретанового обода передается металлической арматуре, примыкающим к ним металлическим частям машины и рассеивается в окружающую среду.

Повышение температуры нагрева будет, очевидно, происходить до тех пор, пока не наступит тепловой баланс между количеством теплоты, выделяемой в

полиуретане за каждый цикл деформации, и количеством теплоты, рассеиваемой в течение этого же цикла.

Теплообразование в ободе зависит от ряда факторов, и прежде всего от скорости и величины относительной деформации, размеров обода и физико-механических характеристик материала.

Очевидно, что основное тепло образуется в массивной шине благодаря гистерезису.

Также необходимо отметить, что некоторое количество тепла образуется за счет проскальзывания упругого обода при его качении по опорной поверхности.

Однако ввиду того, что, во-первых, количество образующегося тепла за счет этого явления незначительно и, во-вторых, тепло образуется между поверхностью массивной шины, обладающей плохой теплопроводностью и опорной поверхностью, у которой теплопроводность значительно выше и, как следствие все тепло, образующееся при проскальзывании, поглощается опорной поверхностью.

В ходе эксперимента было установлено, что в начале испытаний температура упругого полиуретанового обода есть некоторая функция времени, т.е.  $T = f(\tau)$ . Затем достигнув некоторого максимума для данного режима нагружения, температура упругого обода становится стабильной или обод разрушается, если температура превышает предельную.

В общем случае можно считать, что тепло, которое образуется при работе в упругом полиуретановом ободе, расходуется на повышение температуры самого обода и на теплообмен с окружающей средой.

При установившемся тепловом процессе, т.е. когда  $T = Const$ , все тепло, образующееся в упругом ободе, отводится в окружающую среду.

На основании вышесказанного можно составить уравнение теплового баланса в следующем виде:

$$Q \cdot d\tau = C \cdot m \cdot dT + \alpha S(T - t) d\tau, \quad (5.9)$$

где  $Q$  – количество тепла;  $\tau$  – время;  $C$  – теплоемкость;  $m$  – масса полиуретанового обода;  $\alpha$  – коэффициент теплообмена;  $S$  – площадь поверхности упругого обода;  $T$  – температура упругого обода;  $t$  – температура окружающей среды.

Поделив обе части уравнения (5.9) на  $Q$  и  $d\tau$ , получим:

$$1 = \frac{C \cdot m}{Q} \cdot \frac{dT}{d\tau} + \frac{\alpha \cdot S \cdot T}{Q} - \frac{\alpha \cdot S \cdot t}{Q},$$

После некоторых преобразований получим:

$$\frac{\alpha \cdot S \cdot t}{C \cdot m} + \frac{Q}{C \cdot m} = \frac{dT}{d\tau} + \frac{\alpha \cdot S \cdot T}{C \cdot m},$$

Введем два обозначения:

$$q = \frac{\alpha \cdot S \cdot t}{C \cdot m} + \frac{Q}{C \cdot m} = \frac{\alpha \cdot S \cdot t + Q}{C \cdot m},$$

$$p = \frac{\alpha \cdot S}{C \cdot m},$$

И получим:  $q = \frac{dT}{d\tau} + pT$ .

Теперь нужно решить дифференциальное уравнение следующего вида:

$$y' + py = q \quad (5.10)$$

Решим вначале уравнение вида:

$$y' + py = 0;$$

$$\frac{dy}{y} = -pdx$$

$$\ln y = -px + C_1$$

$$\ln C_2 = C_1$$

Получим:

$$y = C_2 \cdot e^{-px} \quad (5.11)$$

Для того чтобы решить уравнение вида  $y' + py = q$ , будем считать, что  $C_2$  переменна. Тогда после дифференцирования уравнения (5.11) получим:

$$\frac{dy}{dx} = \frac{dC_2}{dx} e^{-px} - pC_2 e^{-px} \quad (5.12)$$

После подстановки выражений (4.11) и (4.12) в уравнение (4.9) получим:

$$\frac{dC_2}{dx} e^{-px} = q;$$

$$dC_2 = q e^{px} dx;$$

$$\text{тогда } C_2 = \frac{q}{p} e^{px} + C_3 \quad (5.13)$$

Подставив уравнение (4.13) в уравнение (4.11), получим:

$$y = \left( \frac{q}{p} e^{px} + C_3 \right) e^{-px}, \text{ или иначе: } y = C_3 e^{-px} + \frac{q}{p}.$$

Заменяя  $y$ ,  $x$ ,  $p$  и  $q$  через их значения получим:

$$T = C_3 \cdot e^{-\frac{\alpha \cdot S}{c \cdot m} \tau} + \frac{\alpha \cdot S \cdot t + Q}{\alpha \cdot S},$$

При  $\tau = 0, T = 0, C_3 = -\frac{\alpha \cdot S \cdot t + Q}{\alpha \cdot S}$ ;

$$T = -\frac{\alpha St + Q}{\alpha S} e^{-\frac{\alpha S \tau}{cm}} + \frac{\alpha St + Q}{\alpha S}.$$

$$T = \frac{(\alpha St + Q) \cdot \left( e^{\frac{\alpha S}{cm}} - 1 \right)}{\alpha S e^{\frac{\alpha S \tau}{cm}}}$$

или

$$T = \left( t + \frac{Q}{\alpha S} \right) \left( 1 - e^{-\frac{\alpha S \tau}{cm}} \right) \quad (5.14)$$

Полученный характер изменения во времени температуры упругого полиуретанового обода находит полное подтверждение при испытаниях.

Две зависимости изменения температуры полиуретанового упругого обода во времени: экспериментальная и расчетная по формуле 5.14 (см. рисунок 5.13).

Экспериментальный замер температуры обода производится с помощью термопары с интервалом измерения 1 минута. Для замеров использовались ролики диаметром 46 мм, шириной 20 мм, толщиной упругого обода 6 мм и твердостью 85 ShA, относительная деформация обода при этом составила 10% и линейная скорость нагружения 1м/с.

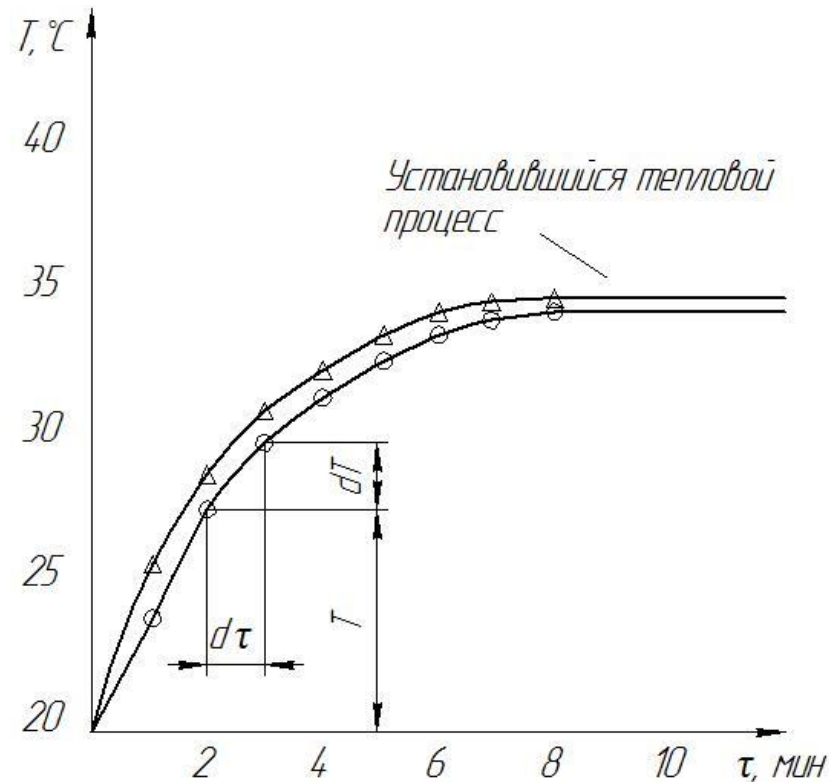


Рисунок 5.13 - Изменение температуры упруго обода во времени: 0 – расчетное значение;  $\Delta$  – экспериментальное значение

Полученное выражение для определения температуры нагрева упругого обода целесообразно несколько изменить, введя коэффициент интенсивности теплообмена  $\beta$  и коэффициент формы упругого обода  $\mu$ .

Под коэффициентом интенсивности теплообмена будем понимать следующее выражение:

$$\beta = \frac{\alpha}{c \cdot \gamma},$$

где  $\gamma$  – удельный вес полиуретана.

Под коэффициентом формы будем понимать выражение:

$$\mu = \frac{S}{V},$$

где  $V$  – объем упругого обода.

После введения этих двух коэффициентов в выражение для определения температуры упругого обода получим:



$$T = \frac{(\beta C \gamma S t + Q)(e^{\beta \mu \tau} - 1)}{\beta C \gamma S e^{\beta \mu \tau}}$$

или

$$T = \left( t + \frac{Q}{\beta C \gamma S} \right) \left( 1 - \frac{1}{e^{\beta \mu \tau}} \right),$$

С увеличением  $\tau$  член  $\frac{1}{e^{\beta \mu \tau}}$  стремится к нулю.

Поэтому можно считать, что температура упругого обода будет определяться по следующему выражению:

$$T = t + \frac{Q}{\beta C \gamma S}$$

или

$$T = t + \frac{Q}{\alpha S}$$

Приведенные экспериментальные замеры температуры упругого полиуретанового обода с различными коэффициентами формы обода показали хорошее совпадение экспериментальных данных и расчетных значений, при этом разница расчетных значений и экспериментальных замеров составляет не более 3...5%.

Для деталей вращения с упругим полиуретановым ободом, имеющим определенные геометрические соотношения, выработанные практикой, и определенные рабочие деформации и скорости, опытным путем получено выражение (4.32) для определения температуры нагрева полиуретанового массива.

Повышение температуры нагрева ускоряет протекающие в полиуретане физико-химические процессы и приводит к изменениям его механических характеристик, в частности появляется значительная нелинейность в зависимости «сила-деформация».

Эффекты от структурных изменений материала известны как эффекты Патрикеева-Муллинза [78] и вызваны тиксотропией, то есть разрушением и рекомбинацией структуры эластомера. Согласно Бюхе [82] размягчение эластомера является результатом разрыва сильно растянутых цепей макромолекул.

Помимо этого, теплообразование способствует снижению долговечности обода, так как с повышением температуры нагрева возрастает скорость химических процессов, обуславливающих разрушение полиуретана.

В последнее время согласно [73] разрушение полимеров интерпретируется как кинетический процесс, активированный температурой и внешней механической нагрузкой.

Такой кинетический или так называемый флуктуационный подход означает, что разрушение рассматривается как непрерывно развивающийся во времени процесс накопления повреждений, который существенно зависит от условий нагружения, температуры и внешней среды.

Для полимерных материалов, процесс разрушения согласно [35] можно условно разделить на три фазы.

В первой фазе происходит деформация валентных углов и связей под действием внешних напряжений, которая понижает энергию диссоциации межатомных связей в скелете полимерной цепочки и тем самым увеличивает вероятность разрыва химических связей тепловыми флуктуациями;

Вторая фаза характеризуется разрывом макромолекул полимера под действием термических флуктуаций и внешней силы и образованием свободных радикалов и химически стабильных продуктов микроразрушения.

В третьей фазе, происходит зарождение, накопление, развитие микротрещин и их слияние, приводящие в конечном итоге к макроразрушению материала.

При форсированных по нагрузке стендовых испытаниях полиуретановых роликов были получены отказы, связанные с внутренним расслоением упругого обода.

О разрушении структуры полиуретана свидетельствуют внешние продукты деградации материала, вытесняемые из трещин, когда ее ветви выходят на периферии обода.

Разрушение обода распространяется в тангенциальном направлении по разрыхленному слою, при этом продукты деструкции полиуретана представляют

собой шарики диаметром 2...3 мм более темного тона, нежели исходный материал (см. рисунок 5.14).

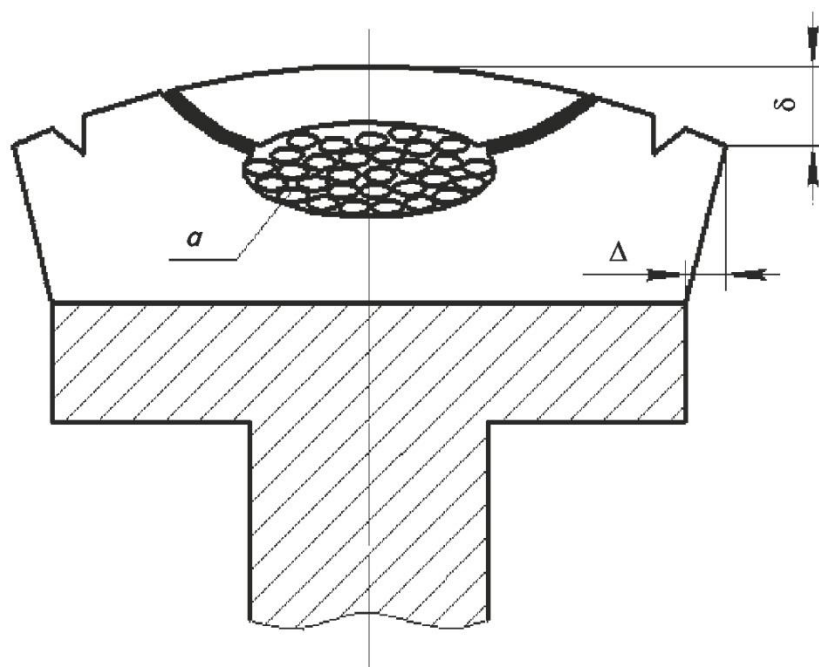


Рисунок 5.14 - Внутреннее расслоение обода: а – зона разрушения;  $\delta$  – диаметральный увеличение размера;  $\Delta$  – торцевое выпучивание

Очаг разрушения материала возникает в зоне действия максимальных напряжений.

Для определения напряжений, действующих в ободке колеса, был проведен уточненный расчет напряженно – деформированного состояния с использованием численных методов теории упругости.

Для решения поставленной задачи наиболее эффективным оказался метод конечных элементов (МКЭ) в пространственной постановке [16].

Из результатов расчетов следует, что в средней части обода действуют наибольшие касательные напряжения в сочетании с существенными нормальными напряжениями и именно в этом месте развивается наиболее высокая внутренняя температура, которая начиная с определенной величины приводит к деструкции эластомера.

Для подтверждения полученных результатов проводился экспериментальный замер температуры внутри обода.

Для этих целей осуществлялся прокол обода и в полученное отверстие помещалась термопара для замера температуры. Разница температур внутри обода и на его поверхности составляет 2...3 °С.

Для предотвращения внутреннего расслоения полиуретанового обода массивной шины или других деталей вращения с упругим ободом из полиуретана (ролики ступеней эскалатора, технологические ролики и т.д), работающих в безостановочном режиме в течении нескольких часов необходимо определить максимальную скорость движения, после превышения которой наступает деструкция материала обода.

С учетом предельно допускаемых температур и относительных деформаций для полиуретанов различной твердости приведенных в таблице 2.3 из уравнения (4.33) получим выражение для определения предельной скорости перемещения:

$$V_{Lim} = \left[ \frac{T_{lim}(1,67 - 0,007ShA) - T_B - 0,95 \frac{\varepsilon_{lim}}{[K_\varepsilon]}}{[K_T]} \right]^{0,61} \frac{1}{6,9}, \quad (5.15)$$

где  $T_{lim}$  - предельно допускаемая температура;  $\varepsilon_{lim}$  - предельно допускаемая относительная деформация;  $[K_T]$  - допускаемый коэффициент запаса по температуре;  $[K_\varepsilon]$  – допускаемый коэффициент запаса по деформации.

Принимая во внимание высокую стабильность физико-механических свойств полиуретана и высокую достоверность методики расчета значение  $K_T$  и  $K_\varepsilon$  принимаем равным 1,3

При правильной эксплуатации износ поверхности качения обода согласно [52], протекает со сравнительно низкой интенсивностью и к внезапным отказам не приводит.

Парадоксально, но изнашиваются сопряженные с колесом стальные направляющие и в частности поворотные стенки эскалаторов метрополитена. Износ происходит под действием абразивных частиц, внедряющихся в поверхность качения обода, износостойкость полиуретана согласно [39] почти в 10 раз больше, чем у стали.

Изнашивание полиуретанового обода происходит в основном по усталостному механизму в результате действия повторных сжимающих и растягивающих напряжений на краях площадки контакта колеса с опорной поверхностью. Поверхность изнашивания не имеет какого либо, определенного рисунка. Выступы и впадины чередуются беспорядочно.

Интенсивность изнашивания обода массивных шин в основном обусловлена возможностью проскальзывания упругого обода по краям площадки контакта с опорной поверхностью и определяется по формуле (6.24)

Для подтверждения этой модели изнашивания были проведены сравнительные испытания резиновых и полиуретановых роликов в одинаковых условиях нагружения, твердостью 85 ShA.

Длина площадки контакта у резиновых роликов на 30...35% больше, чем у полиуретановых, так как модуль упругости при сжатии у полиуретанов в 2,3 раза больше, чем у резины.

Интенсивность изнашивания резиновых роликов примерно на те же 30...35% больше при качении с проскальзыванием в контакте с беговым барабаном, покрытым нормализованной наждачной бумагой, имитирующей шероховатость цементобетонного покрытия пола.

#### **5.4 Выводы по главе 5**

1. Получены эмпирические зависимости для определения коэффициента сопротивления качению массивных полиуретановых шин различной твердости по твердой шероховатой поверхности, имитирующей цементно-бетонное покрытие пола производственных помещений, которые позволяют определить момент сопротивления качению в зависимости от нагрузки, приходящейся на шину.

2. По результатам большого количества испытаний полиуретановых роликов получена зависимость для определения температуры нагрева полиуретана, в зависимости от скорости нагружения и величины относительной деформации для

целого класса деталей машин, которая позволяет предотвратить перегрев упругого обода при качении.

3. Экспериментально воспроизведены и пояснены наиболее опасные виды отказов массивных шин:

- внутреннее расслоение упругого обода в результате гистерезисного нагрева и термической деструкции;

- износ рабочей поверхности полиуретанового обода при качении с проскальзыванием.

4. Получено выражение для определения предельной скорости нагружения полиуретановых колес, которое необходимо учитывать при проектировании колес с упругим ободом.

## Глава 6. Исследование трения и износа полиуретана в контакте с различными поверхностями

### 6.1 Экспериментальное определение коэффициента трения скольжения полиуретана по абразивной поверхности

Широкое распространение деталей вращения с упругим ободом из полиуретана вызывает необходимость освещения вопросов, связанных с их расчетом, конструированием, изготовлением и эксплуатацией.

Упругий обод служит для поглощения толчков и ударов, которые возникают во время движения, а также упругий обод с помощью силы трения обеспечивает надежное сцепление вращающейся детали с контактирующей поверхностью. В качестве контактирующей поверхности чаще всего выступает бетонный пол торгового, складского или производственного помещения.

Для имитации шероховатости напольного цементно-бетонного покрытия на барабан экспериментальной установки наклеивали шлифовальную шкурку зернистостью Р800 ГОСТ 13344-79. Наклеивание производили с использованием косого стыка, в целях уменьшения радиального биения исследуемого образца во время испытания.

Перед испытаниями проводим стабилизацию шлифовальной шкурки с помощью полиуретанового притира, при которой удаляются наиболее острые, выступающие частицы абразива. Сила трения во фрикционном контакте полиуретанового образца и барабана экспериментальной установки определяли по следующей формуле:

$$F_{\text{тр}} = \frac{P_{\text{эл}} \cdot \eta \cdot 10^3}{\omega_{\text{вых}} \cdot i_{\text{рем}} \cdot r_{\text{бар}}}, \quad (6.1)$$

где  $P_{\text{эл}}$  - мощность, потребляемая электродвигателем;  $\eta$  – КПД установки,  $\eta = 0,95$ ;  $\omega_{\text{вых}}$  – угловая скорость выходного вала мотор-редуктора  $\omega_{\text{вых}} = 4,18 \text{ с}^{-1}$ ;  $i_{\text{рем}}$  – передаточное число ременной передачи,  $V_{\text{л}} = 0,4 \text{ м/с}$ ,  $i_{\text{рем}} = 1,52$ ;  $V_{\text{л}} = 0,6 \text{ м/с}$ ,

$i_{рем} = 1,91$ ;  $V_l = 0,8$  м/с,  $i_{рем} = 2,59$ ;  $V_l = 1$  м/с,  $i_{рем} = 3,26$ ;  $r_{бар}$  – радиус испытательного барабана,  $r_{бар} = 0,073$  м.

Для асинхронных электродвигателей согласно [12], фактическая мощность, развиваемая электродвигателем равна разности мощности под нагрузкой и мощности на холостом ходу.

После соответствующих подстановок получим простое выражение для определения силы трения:

$$F_{тр} = (P_{эл} - P_{хх}) \cdot N \cdot n \cdot k, \text{ Н}, \quad (6.2)$$

где  $P_{эл}$  – показания ваттметра при испытании образца;  $P_{хх}$  – показания ваттметра на холостом ходу;  $N$  – тарировочный коэффициент ваттметра,  $N = 5$ ;  $n$  – количество фаз электродвигателя,  $n = 3$ ;  $k$  – кинематический коэффициент установки.

Окончательно выражение для определения силы трения при различных линейных скоростях примет вид:

$$\begin{aligned} F_{тр\ 0,4} &= (P_{эл} - 10,0) \cdot 29,5, \text{ Н}, \\ F_{тр\ 0,6} &= (P_{эл} - 10,5) \cdot 23,5, \text{ Н}, \\ F_{тр\ 0,8} &= (P_{эл} - 11,0) \cdot 17,3, \text{ Н}, \\ F_{тр\ 1,0} &= (P_{эл} - 11,5) \cdot 13,8, \text{ Н}, \end{aligned} \quad (6.3)$$

где  $P_{эл}$  – показания ваттметра при испытании образца.

Величину коэффициента трения скольжения будем определять по следующей формуле:

$$f_{ск} = \frac{F_{тр}}{F}, \quad (6.4)$$

где  $F_{тр}$  – сила трения во фрикционном контакте образца и барабана;  $F$  – нормальная нагрузка, приложенная к образцу.

Сила трения во фрикционном контакте полиуретанового образца с нормализованной абразивной поверхностью и как следствие коэффициент трения скольжения во время проведения испытания имеет три характерные величины (см. рисунок 6.1).



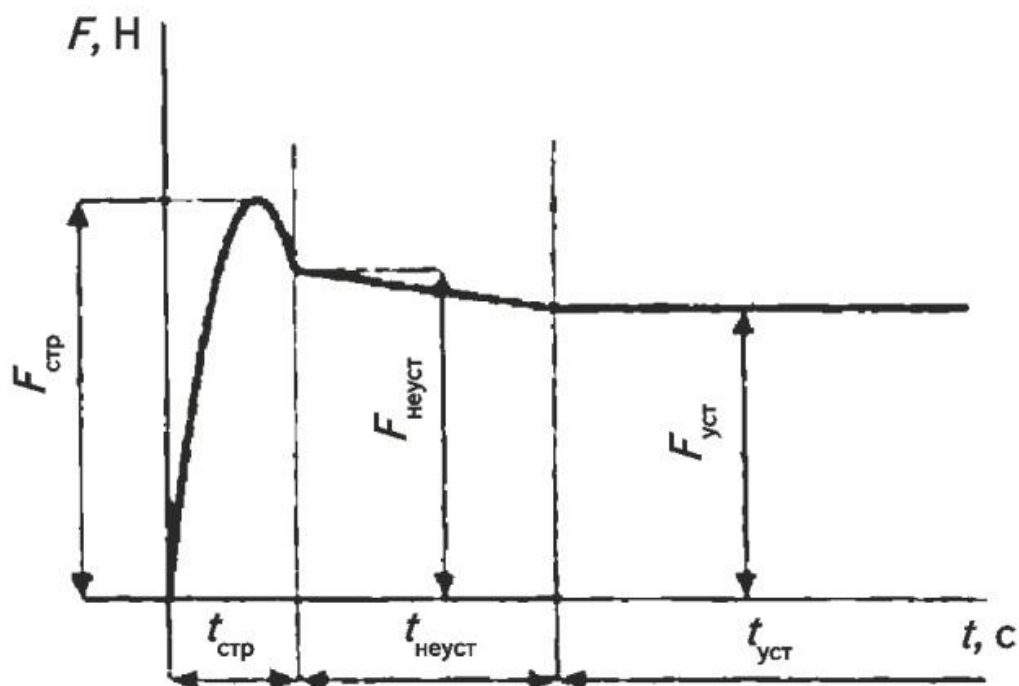


Рисунок 6.1 - Зависимость силы трения от времени испытания

$F_{стр}$  – сила трения в момент страгивания абразивного барабана относительно неподвижного полиуретанового образца. Время  $t_{стр}$ , соответствующее продолжительности действия  $F_{стр}$  крайне незначительно, и соответствует долям секунды.

$F_{неуст}$  - сила трения, соответствующая времени приработки, в течение которого происходит разогрев поверхностного слоя полиуретана, и как следствие снижение твердости и уменьшение силы трения.

Продолжительность  $t_{неуст}$  от 2 до 10 минут в зависимости от скорости скольжения, нагрузки и твердости образца. В течение этого времени происходит снижение силы трения на 10 – 15 % и выход на режим установившегося изнашивания, который удастся зафиксировать благодаря точным показаниям амперметра в электрической цепи установки.

Аналогичные зависимости для резины были получены Г.М. Бартевым и А.И. Елькиным [2]. Опыты показывают, что при определении начального трения очень важно учитывать время предварительного контакта, оно должно быть не

менее 2 минут. По прошествии этого времени можно включать электродвигатель и производить замер  $F_{сmp}$ .

Во время предварительного контакта, вследствие релаксационных процессов, происходит увеличение площади фактического контакта образца и абразивной поверхности барабана.

Анализируя зависимость силы трения от времени испытания, в соответствии с рисунком 6.1 приходим к следующим выводам:

1.  $F_{сmp}$  соответствует коэффициенту трения покоя  $f_0$ .
2.  $F_{неуст}$  соответствует коэффициенту трения скольжения  $f_{ск}$ .
3. Режим установившегося изнашивания не является рабочим для полиуретанов.

Исключение составляют твердые полиуретаны (95 ShA...98 ShA), которые используются в качестве конструкционного материала для уплотнений и подшипников скольжения.

Полиуретаны могут работать в режиме трения скольжения непродолжительное время (доли секунды) при буксовании, движении «юзом» и макропроскальзывании рулевого колеса при повороте.

В качестве материала для образцов трения, использовался полиуретан торговой марки «Дуотан» твердостью 65 ShA, 80 ShA, 85 ShA, 90 ShA, 95 ShA.

Коэффициент трения покоя  $f_0$  полиуретанов лежит в пределах от 1,15 для 65 ShA до 0,55 для ShA 95. Высокое значение коэффициента трения для мягких полиуретанов (65 ShA) объясняется большой фактической площадью контакта полиуретанового образца с абразивной поверхностью [28, 62].

По результатам испытаний можно сделать следующие выводы:

1. Коэффициент трения покоя  $f_0$  прямо пропорционален твердости полиуретана и определяется глубиной внедрения абразивной поверхности в полиуретан.
2. Отклонение мягкого полиуретана (твердость 65 ShA и ниже) от пропорциональности объясняется его низким модулем упругости. Учитывая двойственную молекулярно-механическую природу трения механическая составляющая, обусловленная объемной деформацией поверхностного слоя полиуретана падает с уменьшением модуля упругости.

3. Коэффициент трения скольжения  $f_{ск}$  на 10...20 % ниже, чем коэффициент трения покоя  $f_0$ . Это различие объясняется невозможностью быстрого внедрения абразива в полиуретан при движении.

Результаты испытания по определению  $f_0$  и  $f_{ск}$  представлены в таблице 6.1.

Таблица 6.1 - Коэффициенты трения по нормализованной абразивной поверхности

Твердость полиуретана ShA	Коэффициент трения по нормализованной абразивной поверхности P800	
	покоя $f_0$	скольжения $f_{ск}$ ( $V_l = 0,4$ м/с)
65	1,15	1,05
80	1,00	0,78
85	0,85	0,68
90	0,70	0,58
95	0,55	0,48

Подобное соотношение коэффициентов трения покоя и скольжения для саженаполненных резин было получено Резниковским М.М. [41].

Коэффициент трения скольжения определяли опытным путем, помещая полиуретановый образец на шарнирноподвижную плоскость из материала контртела, находящуюся в горизонтальном положении. Затем увеличивали угол наклона этой плоскости до тех пор, пока образец не начинал движение.

После начала движения образца мы фиксировали угол наклона плоскости и определяли коэффициент трения скольжения  $f_{ск}$ , равный тангенсу угла наклона поверхности скольжения относительно горизонтальной плоскости, при которой образец полиуретана начинает движение.

В качестве материала контртела использовали дерево, сталь 20 и нормализованную абразивную поверхность P800 ГОСТ 13344-79.

Результаты испытаний представлены в таблице 6.2.

Таблица 6.2 - Коэффициент трения скольжения  $f_{ск}$  в момент страгивания без нагрузки

Твердость полиуретана ShA	Материалы контртела		
	Дерево	Сталь 20	Нормализованная абразивная поверхность P800
65	0,75	0,65	0,9
80	0,65	0,55	0,6
85	0,52	0,44	0,5
90	0,38	0,32	0,4
95	0,25	0,20	0,3

Зависимость коэффициента трения скольжения от давления во фрикционном контакте для полиуретанов твердостью 65 ... 95 ShA по нормализованной абразивной шкурке P800 ГОСТ 13344-79, которая имитирует шероховатость напольного цементно-бетонного покрытия (см. рисунок 6.2).

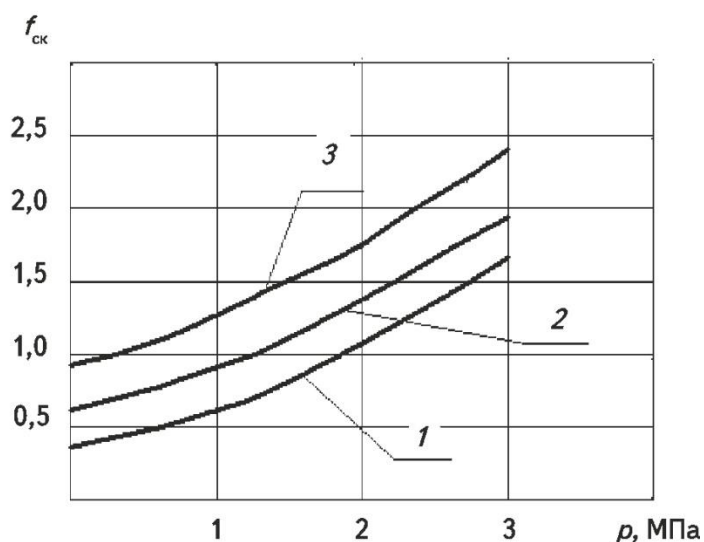


Рисунок 6.2 - Зависимость коэффициент трения скольжения от давления для полиуретанов различной твердости при скорости  $V_{л} = 0,4$  м/с: 1 – 95 ShA; 2 – 85 ShA; 3 – 65 ShA

Анализируя представленные зависимости, необходимо отметить увеличение коэффициента трения скольжения с ростом давления во фрикционном контакте, вследствие насыщения контакта полиуретана и абразивной поверхности.

В нашем случае исследование касается трех переменных и целью серии испытаний является установление зависимости в заранее намеченных пределах изменения переменных.

В этом случае можно использовать при обработке экспериментальных данных факториальный анализ и вывести отдельное влияние каждой переменной на результат эксперимента. Этот вопрос не разбирается здесь подробно, но для детального ознакомления с ним можно рекомендовать книгу Фишера [71].

Далее была проведена серия экспериментов с различными линейными скоростями во фрикционном контакте и была получена эмпирическая зависимость для определения коэффициента трения скольжения как функции трех переменных (давления, скорости скольжения и твердости):

$$f_{ск} = 0,3 + 0,34 p^{1,25} + 0,02 (95 - ShA) + 0,12 V_{ск}, \quad (6.5)$$

где  $p$  – нормальное давление во фрикционном контакте;  $ShA$  – твердость полиуретана в единицах по Шору;  $V_{ск}$  – линейная скорость скольжения во фрикционном контакте.

Как известно, высокоэластичные полимеры подвергаются в зоне контакта упругой деформации и с ростом давления увеличивается число контактирующих молекул или площадь фактического контакта.

В области малых давлений  $p/E \ll 1$ , для поверхностей с широким распределением параметров шероховатости, зависимость площади фактического контакта от нормальной нагрузки близка к линейной.

С повышением давления, неровности поверхности быстро сглаживаются, и закон изменения площади фактического контакта и, как следствие величина коэффициента трения скольжения пропорциональна показательной зависимостью  $f_{ск} \sim p^{1,25}$ .

Важное значение имеет экспериментально доказанный факт, что насыщение площади фактического контакта  $S_{факт}$  не происходит, т.е. при  $p \rightarrow \infty$   $S_{факт} < S_H$ ,

где  $S_H$  – номинальная площадь контактирования.

На недостижимость полноты контакта с ростом давления указывал Толстой С.А. [43] и Чичинадзе А.В. [49], которые объясняли это наличием микропор, пузырьков воздуха и продуктов износа во фрикционном контакте.

Коэффициент трения скольжения увеличивается линейно с ростом скорости скольжения. Это объясняется вязкоупругими свойствами полиуретана.

С увеличением скорости деформирования полиуретан не успевает релаксировать, становится более жестким и как следствие растет механическая составляющая силы трения.

Анализируя зависимость (6.5) необходимо отметить, что более всего коэффициент трения скольжения зависит от величины давления во фрикционном контакте.

Второй по значению фактор – это твердость полиуретана. У мягких полиуретанов (60 ...65 ShA) значительно возрастает молекулярная составляющая силы трения, они хорошо липнут к контактирующей поверхности.

Коэффициент трения скольжения у массивной полиуретановой шины твердостью 85 ShA при номинальной нагрузке в контакте с бетонным полом составляет примерно  $f_{ск} \approx 1,5$ . Подобные значения для резины в контакте с абразивом приведены в работах [35, 86].

Необходимо отметить, что в следствии изнашивания и загрязнения бетонного пола и наличие продуктов износа и грязи на ободке массивной шины фактически коэффициент трения скольжения на 15...20% ниже расчетного.

## **6.2 Износостойкость полиуретана и предельные значения критерия мощности в контакте с различными поверхностями в режиме скольжения**

Полиуретаны по своим физико-химическим свойствам очень сходны с резинами, поэтому при определении износостойкости полиуретановых образцов

будем использовать, согласно ГОСТ 426-77, коэффициент истираемости  $\alpha$  размерностью  $\text{см}^3/\text{кВт}\cdot\text{ч}$ :

$$\alpha = \frac{\Delta V}{A} = \frac{S_H h}{P_{эл} t}, \quad (6.6)$$

где  $S_H$  - номинальная площадь трения образца;  $h$  - толщина истертого слоя;  $P_{эл}$  - мощность электродвигателя, реализуемая на истирание образца;  $t$  - время испытания.

Данный коэффициент характеризует энергетическую интенсивность износа, т.е. какую работу необходимо совершить, чтобы удалить определенный объем испытуемого материала за 5 минут испытания при скорости скольжения  $V_{ск} = 0,3$  м/с и нормальной нагрузке  $P = 0,03$  МПа.

Количественно изнашивание согласно [60, 65, 95], оценивается линейной интенсивностью износа:

$$I_h = \frac{h}{L}, \quad (6.7)$$

где  $h$  – толщина истертого слоя;  $L$  – путь трения.

Для проведения экспериментальных исследований по определению износостойкости использовался полиуретан торговой марки «Дуотан» твердостью 65...95 ShA.

В качестве истирающей абразивной поверхности используем шлифовальную шкурку по ГОСТ 344-85 марки П244А КМ-1.

Если выясняется тот факт, что по результатам экспериментальных замеров при проведении испытаний истирающая способность шлифовальной шкурки падает на 20% относительного среднего значения, тогда шлифовальную шкурку заменяли на новую.

Износ поверхности полиуретанового образца под действием сил трения, при проведении экспериментального исследования, происходит неравномерно по площади контактирования.

Геометрия поверхности изнашивания опытного образца изменяется под действием сил трения во фрикционном контакте полиуретана с абразивной поверхностью (см. рисунок 6.3).

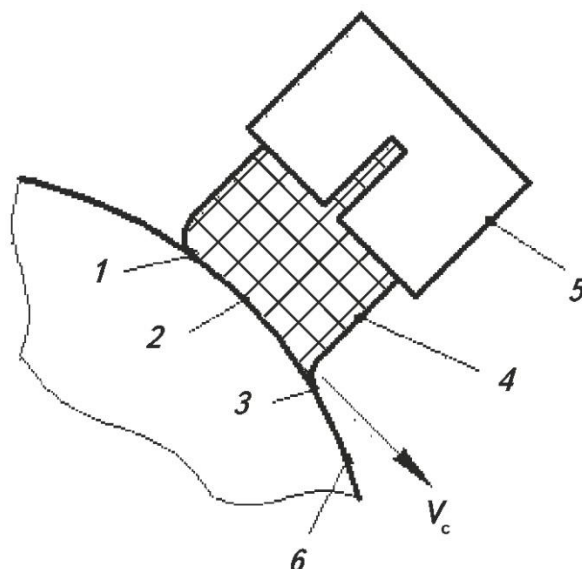


Рисунок 6.3. Износ поверхности полиуретанового образца: 1 – входная кромка, 2 – место замера износа, 3 – выходная кромка, 4 – образец, 5 – цанга, 6 – абразивная поверхность

Входная кромка полиуретанового образца, точка 1, испытывающая стесненную деформацию в направлении вектора скорости скольжения  $V_c$  изнашивается наиболее существенно. Напротив, износ свободно деформируемой выходной кромки, точка 3, минимален. Учитывая картину износа испытуемого образца замер износа осуществляется в точке 2.

Принимая во внимание тот факт, что износ происходит по криволинейной поверхности замер износа осуществляется микрометром со сферической ножкой.

За результат испытания согласно ГОСТ 420-77 принимаем среднее значение для трех образцов при одинаковых условиях нагружения, при условии, что они отличаются от среднего не более чем на 10 %.

Для понимания особенностей истирания полиуретана в различных условиях целесообразно рассмотреть наиболее характерные виды износа, соответствующие некоторым идеализированным режимам.



Простейшим видом износа, имеющим большое значение при трении твердых тел, является абразивный износ, который реализуется при трении полиуретана по шлифовальной шкурке при определении износостойкости полиуретана.

Условия реализации абразивного износа в общем случае сводятся к тому, что истирающая абразивная поверхность должна быть достаточно тверда и обладать острыми режущими гранями. Истираемый полиуретан также должен быть относительно жестким.

Внешним проявлением абразивного износа является наличие продольных полос пропахивания на поверхности полимера. Данный механизм изнашивания свойственен полиуретанам твердостью 95 ShA, при этом частица изнашивания представляет собой продольные полоски длиной 3...7 мм и поперечным сечением 0,1...0,3 мм, свернутые произвольным образом.

Для полиуретана твердостью 90 ShA характерна смешанная картина изнашивания, которая включает в себя продольные полосы пропахивания и поперечные скатки.

Для полиуретанов твердостью 60...85 ShA при абразивном износе характерна иная картина изнашивания. В основу механизма изнашивания положена модель, в которой полимер деформируется при скольжении единичного твердого тела. Зона наибольших напряжений возникает за выступом твердого тела.

В зависимости от свойств материала и сил трения при одном или нескольких проходах появляются надрывы поверхностного слоя. На поверхности полимера образуются поперечные полосы, так называемый «рисунок Шалломаха» [86].

При этом частица изнашивания, представляют собой скатки диаметром 0,5...1 мм и длиной 5...10 мм. Меньшие размеры свойственны для более твердых полиуретанов.

Вид поверхности изнашивания полиуретановых образцов различной твердости (см. рисунок 6.4).

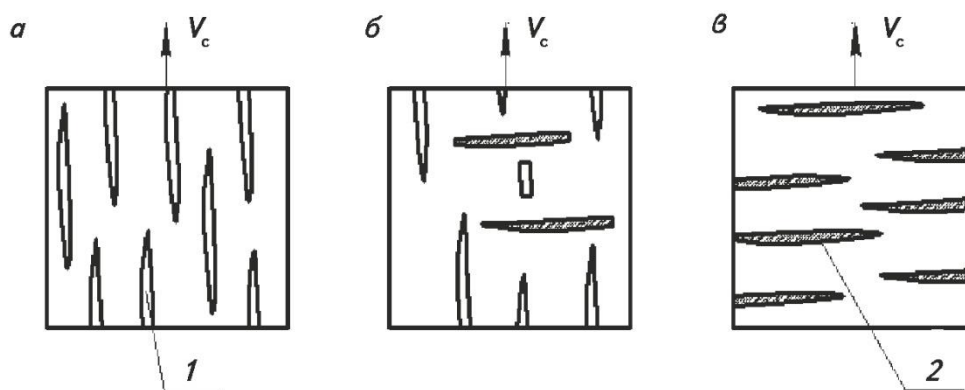


Рисунок 6.4 - Повреждение поверхности изнашивания полиуретановых образцов различной твердости (прорисовка): а – 95 ShA; б – 90 ShA; в – 85 ShA; г – канавка; д – скатка

По результатам испытаний были получены значения истираемости  $\alpha$  и линейной интенсивности износа  $I_h$  при скорости скольжения  $V_{ск} = 0,3$  м/с и нормальной нагрузке  $P = 0,03$  МПа.

Значения истираемости и линейной интенсивности износа представлены в таблице 6.3.

Таблица 6.3 - Истираемость  $\alpha$  и линейной интенсивности износа  $I_h$

Твердость полиуретана, ShA	Истираемость $\alpha$ , $\frac{м^3}{кВт \cdot ч}$	Линейная интенсивность износа $L_h$ ( $V_{ск}=0,3$ м/с, $P = 0,03$ МПа)
65	$2,3 \cdot 10^{-4}$	$4 \cdot 10^{-5}$
80	$2,9 \cdot 10^{-4}$	$2,3 \cdot 10^{-5}$
85	$3,2 \cdot 10^{-4}$	$2,4 \cdot 10^{-5}$
90	$3,4 \cdot 10^{-4}$	$2,0 \cdot 10^{-5}$
95	$3,7 \cdot 10^{-4}$	$1,6 \cdot 10^{-5}$

В качестве коэффициента, характеризующего износостойкость, часто используют коэффициент сопротивления истиранию  $\beta = 1 / \alpha$ , имеющий

физический смысл работы трения, необходимой для истирания единицы объема испытуемого полиуретана по данной абразивной поверхности.

Из результатов испытания на износостойкость полиуретанов различной твердости следует отметить, что коэффициент сопротивления истиранию  $\beta$  в 1,5 раза больше для полиуретана твердостью 65 ShA, чем у полиуретана твердостью 95 ShA.

Этот факт можно объяснить двойственностью природы трения [49]. Силу трения в первом приближении можно представить, как сумму механической и молекулярной составляющих.

Механическая составляющая обусловлена объемной деформацией и отрывом частиц полиуретана с поверхностного слоя, в который внедряются острые выступы абразивной поверхности. Очевидно, что абразив глубже внедряется в мягкую поверхность, растет площадь фактического контакта и как следствие растет работа на деформирование и разрушение поверхностного слоя.

Молекулярная составляющая силы трения обусловлена налипанием полиуретана на абразив. У мягких полиуретанов налипание значительно больше, чем у твердых.

В процессе испытания полиуретановых образцов с помощью термопары производился замер температуры поверхностного слоя.

Для полиуретана твердостью 65 ShA температура составила 48<sup>0</sup>С, 80 ShA - 34<sup>0</sup>С, 85 ShA - 32<sup>0</sup>С, твердостью 90 ShA - 30<sup>0</sup>С, и для 95 ShA соответственно 28<sup>0</sup>С, при температуре окружающего воздуха 20<sup>0</sup>С.

Вполне очевидно, что у мягкого полиуретана твердостью 65 ShA, разогретого до 48<sup>0</sup>С молекулярная составляющая больше, чем у твердого полиуретана 95 ShA с температурой во фрикционном контакте 28<sup>0</sup>С.

Истираемость  $\alpha$  полиуретанов различной твердости (см. рисунок 6.5).

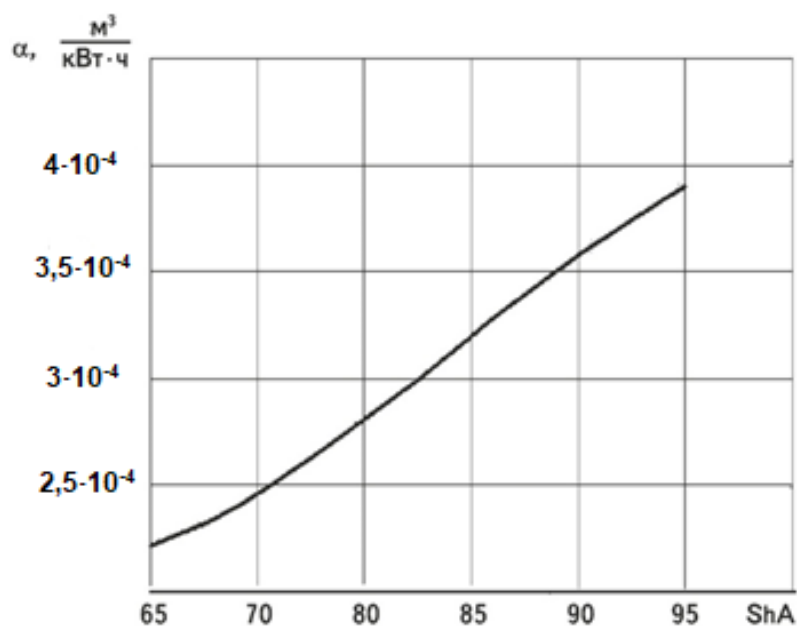


Рисунок 6.5 - Зависимость истираемости полиуретанов от твердости

Получаемая по результатам испытаний зависимость истираемости  $\alpha$  от твердости полиуретана согласно ГОСТ 421-77 хорошо аппроксимируется показательной зависимостью следующего вида:

$$\alpha = 1,04 \text{ ShA}^{1,29}, \quad (6.8)$$

где ShA – твердость полиуретана по Шору.

Истираемость имеет следующую размерность  $\frac{м^3}{кВт \cdot ч}$ .

По результатам испытания на изнашивание при стандартных условиях нагружения согласно ГОСТ 421-77 получены значения линейной интенсивности износа  $I_h$ . Для полиуретана 65 ShA  $I_h = 4,0 \cdot 10^{-5}$ , а для 95 ShA  $I_h = 1,6 \cdot 10^{-5}$ , что в 2,5 раза меньше. Это объясняется различными механизмами изнашивания.

У мягких полиуретанов более интенсивный характер изнашивания в виде скаток, у твердых это пропахивание полиуретана вдоль вектора скорости.

Ввиду малости нагрузки  $P = 0,03$  МПа заглупление абразива в полиуретан незначительно и как следствие – небольшой износ. Однако, следует помнить, что большему износу мягкого полиуретана соответствует и большая работа трения, которая характеризуется как коэффициент сопротивления истиранию  $\beta = I / \alpha$ .

В инженерной практике при оценке износостойкости часто используется критерий мощности, равный произведению нормального давления  $p$  на скорость скольжения  $V$ . При больших значениях  $pV$ , происходит интенсивное тепловыделение во фрикционном контакте, которое снижает сопротивление полимера разрушению.

У полиуретана твердостью 65 ShA наиболее насыщенный контакт с абразивной поверхностью и как следствие наиболее сильный разогрев поверхностного слоя. Температура увеличивается от 48<sup>0</sup>С для скорости 0,3 м/с до 67<sup>0</sup>С при скорости скольжения 1 м/с. При данной температуре частицы износа представляют собой скатки длиной 10...15 мм и диаметром 1...1,5 мм.

Необходимо также отметить, что при данной температуре происходит деструкция материала. Частицы износа меняют цвет со светло-бежевого на коричневый, и это изменение сопровождается появлением запаха, характерного для горения полимеров.

По результатам испытаний на износостойкость были получены предельные значения критерия мощности  $[pV]$  для полиуретанов различной твердости по абразивной поверхности П244А КМ-1, которые представлены в таблице 6.4.

Таблица 6.4 - Предельные значения критерия мощности  $[pV]$  по абразивной поверхности

Твердость полиуретана, ShA	Предельное значение критерия мощности $[pV]$ , $\frac{МПа \cdot м}{с}$	Температура поверхностного слоя, <sup>0</sup> С при $V_{д} = 1$ м/с ,
65	0,24	67
80	0,32	53
85	0,40	46
90	0,50	43
95	0,60	40

Истираемый полиуретановый образец увеличивает свой диаметральный размер на 10...20 % и на выходной кромке образца появляется характерный шлейф. Данный режим нагружения относится к критическому и безусловно не является рабочим.

Приведенные предельные критерии мощности [ pV ] получены экспериментальным путем при трении образца полиуретана по абразивной поверхности.

В инженерной практике используются полиуретаны твердостью 90...98 ShA, работающие постоянно в режиме скольжения. Это уплотнения и подшипники скольжения, применяемые в химической промышленности, где полиуретаны используются ввиду их высокой химической стойкости [65].

Для уплотнений и подшипников скольжения при работе в качестве контртела выступает шлифованная стальная поверхность.

Для проведения экспериментальных исследований была удалена шлифовальная шкурка с рабочего (шлифованного) барабана и дополнительно изготовлены образцы полиуретана твердостью 98 ShA.

По результатам испытаний на износостойкость были получены предельные значения критерия мощности [ pV ] по стальной шлифованной поверхности, которые представлены в таблице 6.5.

Таблица 6.5 - Предельные значения критерия мощности [pV] по стальной шлифованной поверхности

Твердость полиуретана, ShA	Предельное значение критерия мощности [pV], $\frac{МПа \cdot м}{с}$	Температура поверхностного слоя, °С
90	0,65	50
95	0,85	47
98	0,95	43

В дальнейшем проведем испытания для получения зависимости линейной интенсивности износа  $I_h$  для режимов, которые характерны для контакта полиуретановой массивной шины погрузчика-штабелера с бетонным полом.

На основании испытаний полиуретановых образцов в режиме скольжения по абразивной поверхности, имитирующей цементно-бетонный пол, были получены зависимости линейной интенсивности износа  $L_h$  при скорости скольжения  $V_{ск} = 1$  м/с для полиуретанов твердостью 65 ShA, 80 ShA, 95 ShA от нормальной нагрузки  $p$  (см. рисунок 6.6).

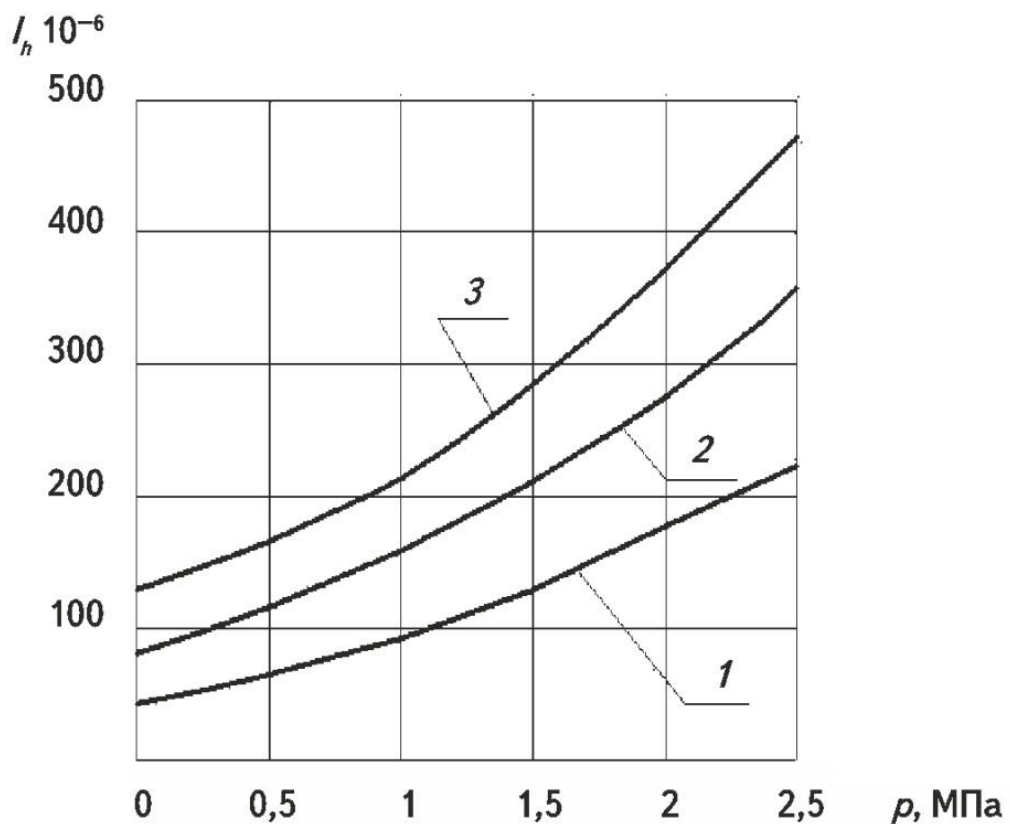


Рисунок 6.6 - Зависимость линейной интенсивности износа от нормальной нагрузки при  $V_{ск} = 1$  м/с: 1 – 95 ShA; 2 – 80 ShA; 3 – 65 ShA

Далее был проведен ряд экспериментов с различными линейными скоростями и была получена аппроксимирующая зависимость линейной интенсивности износа  $I_h$  от нормального давления  $p$  и скорости скольжения  $V_{ск}$  для полиуретанов различной твердости:

$$I_h = [10 + 40 p^{1,55} + 60(V_{ск} - 0,2)] \cdot \left(1 + \frac{95 - ShA}{26}\right) \cdot 10^{-6}, \quad (6.9)$$

где  $p$  – нормальное давление;  $V_{ск}$  – скорость скольжения;  $ShA$  – твердость полиуретана по Шору.

Соответственно толщина истертого слоя  $h$  равна:

$$h = I_h \cdot L, \quad (6.10)$$

где  $I_h$  – линейная интенсивность износа;  $L$  – путь трения.

Интенсивность изнашивания от нормального давления имеет показательную зависимость, т.к. с увеличением давления контактирующие поверхности сближаются, и фактическая площадь контакта увеличивается.

С увеличением скорости скольжения интенсивность изнашивания возрастает линейно. Увеличение изнашивания связано с разогревом поверхностного слоя и уменьшением прочности полиуретана.

С уменьшением твердости полиуретана интенсивность изнашивания увеличивается, так как меняется механизм изнашивания. У более мягких полиуретанов механизм изнашивания в виде скаток более интенсивный, нежели у твердых полиуретанов.

### 6.3 Износ массивных полиуретановых шин при качении с проскальзыванием

Для понимания механизма изнашивания упругого полиуретанового обода массивной шины рассмотрим деформацию шины при качении по бетонному основанию [61].

Кроме того, рассмотрим вопросы, связанные с поверхностным трением и определим условия, при которых возможно проскальзывание шины по опорной поверхности.

С целью определения пути перемещения отдельных точек упругого обода рассмотрим схему деформированного колеса, опирающегося на плоскость (см. рисунок 6.7).



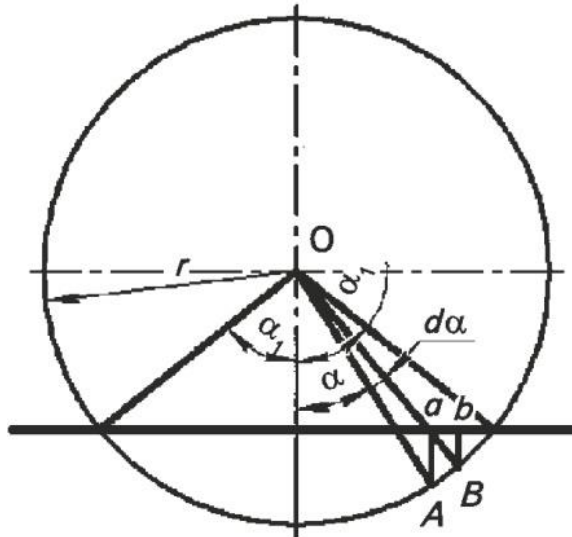


Рисунок 6.7 - Схема механизма проскальзывания при качении деформируемого колеса по плоскости

Угол  $\alpha_1$  соответствующий, половине дуги соприкосновения шины с дорогой, будем называть углом контакта.

Проведем из центра  $O$  радиус  $OA$  под некоторым углом  $\alpha$  к вертикальному диаметру и дадим затем углу  $\alpha$  малое приращение  $d\alpha$ . Очевидно что, после деформации, обусловленной вертикальной нагрузкой  $F$ , элементарно малая дуга  $AB$  шины должна уложиться на элементарно малом отрезке  $ab$ . Длина дуги  $AB = r d\alpha$ , а длина отрезка  $ab = r d\alpha \cos \alpha$ , поэтому элементарно малый путь скольжения  $dS$  будет равен:

$$dS = r d\alpha - r d\alpha \cos \alpha = r(1 - \cos \alpha) d\alpha \quad (6.11)$$

Интегрируя это выражение от  $0$  до  $\alpha$ , получаем выражение для конечного пути скольжения точки опорной площадки при повороте в процессе его перекатывания на угол  $\alpha$ :

$$S_\alpha = \int_0^\alpha r(1 - \cos \alpha) d\alpha = r(\alpha - \sin \alpha) \quad (6.12)$$

Разложим  $\sin \alpha$  в ряд:

$$\sin \alpha = \alpha - \frac{\alpha^3}{3!} + \frac{\alpha^5}{5!} - \frac{\alpha^7}{7!} + \dots \quad (6.13)$$

Ограничившись ввиду сравнительной малости угла  $\alpha$  первыми двумя членами разложения, подставив значение  $\sin \alpha$  в уравнение (6.12), получим:

$$S_\alpha \approx \frac{r\alpha^3}{6} \quad (6.14)$$

Путь скольжения произвольной точки массивной шины при перекачивании колеса на угол от  $-\alpha_1$  до  $+\alpha_1$  найдем, интегрируя то же выражение в пределе от  $-\alpha_1$  до  $+\alpha_1$  :

$$S = \int_{-\alpha_1}^{+\alpha_1} r(1 - \cos \alpha) d\alpha = 2r(\alpha_1 - \sin \alpha_1) \approx \frac{r\alpha_1^3}{3} \quad (6.15)$$

Отношение элементарно малого пути скольжения к соответствующей ему длине дуги АВ дает величину относительного скольжения:

$$l_s = \frac{r(1 - \cos \alpha) d\alpha}{rd\alpha} = 1 - \cos \alpha \quad (6.16)$$

Из данного выражения очевидно следует, что при  $\alpha = 0$  относительное скольжение также равно нулю. По мере увеличения угла  $\alpha$  относительное скольжение  $l_s$  растет и в предельном случае при  $\alpha = 90^\circ$   $l_s = 1$ .

Далее необходимо разобрать условия, при которых возможно проскальзывание шины по опорной поверхности. Вполне очевидно, что проскальзывание в известной мере уменьшается в результате упругой деформации элементов шины, соприкасающихся с дорогой.

Проскальзывания не будет, если сила трения шины с дорогой больше той силы, которая требуется для тангенциальной деформации шины на величину проскальзывания.

Принимая во внимание закон распределения давления на поверхности соприкосновения шины с дорогой можно сделать вывод, что проскальзывание возможно по краям площадки контакта.

Плоскость соприкосновения шины с дорогой представляет собой прямоугольник со сторонами  $b$  и  $l$  (см. рисунок 6.8).

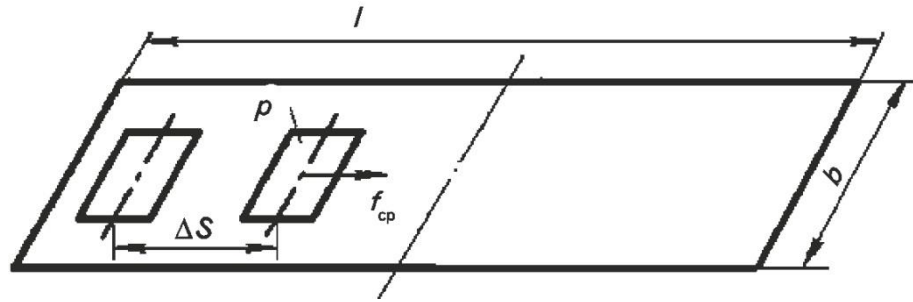


Рисунок 6.8 - Плоскость соприкосновения массивной шины с дорогой

Вследствие деформации шины выделенный элемент поверхности стремится переместиться на величину  $\Delta S$ .

Перемещение возможно, если сила сцепления выделенного элемента и опорной поверхности меньше, чем то тангенциальное усилие, которое требуется для тангенциальной деформации выделенного элемента шины на величину возможного перемещения  $\Delta S$  (см. рисунок 6.9.)

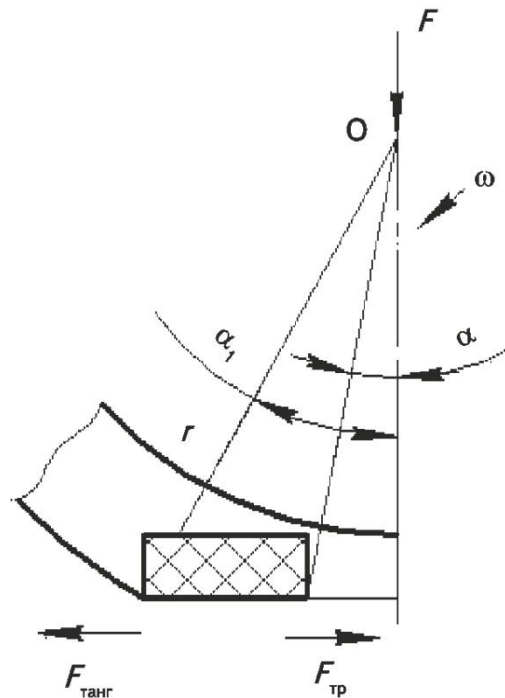


Рисунок 6.9 - Возможность проскальзывания упругого обода на краях площадки контакта

Ввиду малого перемещения, можно принять в первом приближении, что между величиной тангенциальной деформации и действующей тангенциальной силой  $F_{\text{танг}}$  существует прямая зависимость:

$$F_{\text{танг}} = C_T S, \quad (6.17)$$

где  $C_T$  – коэффициент упругости шины в тангенциальном направлении;  $S$  – перемещение.

Сила сцепления между шиной и опорной поверхностью равна произведению  $P f_{\text{ск}}$ .

Таким образом, проскальзывание возможно, если:

$$f_{\text{ск}} P \leq C_T S \quad (6.18)$$

Подставляя вместо  $P$  и  $S$  их величины, в зависимости от угла  $\alpha$  (см. выражение (7.3) для  $P$  и выражение (6.12) для  $S$ , получаем:

$$c r f_{\text{ск}} (\cos \alpha - \cos \alpha_1) \leq c_T r (\alpha - \sin \alpha) \quad (6.19)$$

Предельное значение угла  $\alpha_1$ , при котором проскальзывание не происходит вследствие упругой тангенциальной деформации шины, находим из условия равенства правой и левой частей выражения (6.18):

$$f_{\text{ск}} (\cos \alpha - \cos \alpha_1) = \frac{c_T}{c} (\alpha - \sin \alpha) \quad (6.20)$$

Решение ведем графически, находя точки пересечения кривых:

$$f(F_{\text{мп}}) = f_c (\cos \alpha - \cos \alpha_1) \quad (6.21)$$

$$f(F_{\text{танг}}) = \frac{c_T}{c} (\alpha - \sin \alpha) \quad (6.22)$$

При этом: для  $f_{\text{ск}}$  принимаем значение 1,5; для отношения  $c_T/c$  принимаем значение 0,3, которое в первом приближении является отношением модуля упругости при сдвиге к модулю упругости при сжатии.

Угол контакта  $\alpha_1$  для массивных полиуретановых шин, работающих в номинальном режиме, равен  $12^\circ$ . Графическое решение задачи о проскальзывании шины в контакте с бетонным основанием (см. рисунок 6.10).

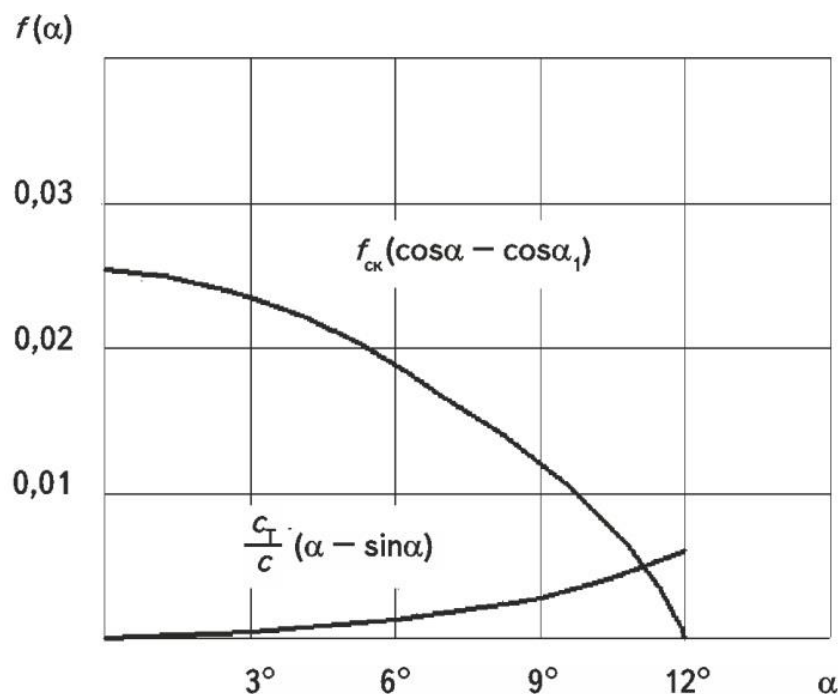


Рисунок 6.10 - Графическое решение условия проскальзывания шины по опорной поверхности

Из рисунка 6.10 следует что, область проскальзывания элементов поверхности шины по дороге ограничена углом приблизительно  $1,5^\circ$ . При увеличении угла контакта  $\alpha_1$  область проскальзывания увеличивается, что, безусловно, приводит к росту интенсивности изнашивания.

Для количественной оценки истираемости эластомерных материалов, таких как резина и полиуретан используется метод определения сопротивления истиранию при качении с проскальзыванием по ГОСТ 1225 -89.

Сущность метода заключается в истирании кольцевого резинового образца диаметром 50 мм, вращающегося относительно покрытого шлифовальной шкуркой поверхности барабана диаметром 200 мм, с проскальзыванием и одновременным перемещением образца вдоль образующей барабана. Испытания проводят в

течении 3 минут, затем взвешивают образец с точностью  $\pm 0,001$  г и расчетом определяют величину износа.

Для экспериментального определения величины износа были изготовлены три партии полиуретановых роликов твердостью 75 ShA, 85 ShA и 95 ShA. Ролики имели наружный диаметр 46 мм, ширину 20 мм и толщину полиуретанового обода 6 мм. Данные размеры соответствуют приобретенным практикой пропорциям обода:

- относительная толщина  $h/D = 0,08 \dots 0,14$  (при меньшей толщине уменьшается демпфирующая способность полиуретанового обода, повышается уровень шума генерируемого колесом при его качении и возрастает вероятность отслаивания обода от центра);

- относительная ширина  $b/D = 0,2 \dots 0,5$  (при большей ширине обода вероятность неравномерного распределения линейной нагрузки в связи с перекосом колеса).

Количественно изнашивание для несовпадающих контактирующих поверхностей оценивают по изменению линейного размера, отнесенного к числу циклов нагружения. Цикловая интенсивность изнашивания:

$$I_N = \frac{\Delta}{N}, \quad (6.23)$$

где  $\Delta$  - толщина истертого слоя;  $N$  - число контактных взаимодействий колеса с основанием.

Число нагружений испытуемого ролика:

$$N = \frac{360 \cdot V_n \cdot t}{\pi \cdot D}, \quad (6.24)$$

где  $V_n$  - линейная скорость;  $t$  - время;  $D$  - диаметр ролика.

В качестве базы испытаний принимаем 1 миллион нагружений, что соответствует примерно 40 часам испытаний при  $V_n = 1$  м/с и пробегу 144 км.

Исходя из предложенной модели изнашивания, очевидно предложить, что интенсивность изнашивания будет функцией трех переменных: давление в контакте шины с основанием, линейной скорости и твердости полиуретана.

По результатам испытаний была получена эмпирическая зависимость цикловой интенсивности изнашивания полиуретанового обода от условий нагружения:

$$I_N = \frac{0,1p_m^{1,31}(0,25V_l+0,7)}{0,24+0,01ShA} \cdot 10^{-6}, \quad (6.25)$$

где  $p_m$  - среднее давление в контакте шины с дорогой;  $V_l$  - линейная скорость в контакте;  $ShA$  – твердость полиуретана в единицах по Шору.

Вид полученной зависимости характерен согласно [36] для данного вида взаимодействия контактирующих поверхностей.

Поверхность изнашивания при малых и средних давлениях и скоростях при рассмотрении через увеличительное стекло представляет собой типичную картину усталостного изнашивания. При высоких давлениях и скоростях поверхность изнашивания становится более грубой.

Анализируя полученную зависимость, нужно отметить, что при возрастании давления  $p_m$  в контакте, увеличивается зона возможного проскальзывания полиуретанового обода, и как следствие происходит рост изнашивания.

С ростом скорости  $V_l$  полиуретан становится жестче, падает способность к деформированию и как следствие возрастает возможность разрушения поверхностного слоя.

#### 6.4 Основные виды износа полиуретана

Для понимания особенностей истирания полиуретана в различных условиях целесообразно рассмотреть наиболее характерные виды износа, соответствующие некоторым идеализированным предельным режимам. Поскольку при трении полиуретана по абразивной поверхности интенсивность истирания наиболее существенно согласно [49] зависит от геометрии истирающей поверхности, в дальнейшем при классификации основных видов износа характер истирающей поверхности будем рассматривать как важнейший фактор, определяющий условия реализации того или иного вида износа.

Согласно [37] выделяют три различных механизма изнашивания эластомеров при контакте с твердым основанием:

1. Абразивный износ под воздействием острых вершин шероховатостей основания.
2. Усталостный износ под воздействием скругленных вершин шероховатостей основания.
3. Скатывание и отрыв роликотипных частиц с поверхности эластомера в контакте с относительно гладким основанием.

Условия реализации абразивного износа в общем сводятся к тому, что истирающая абразивная поверхность должна быть тверда и обладать острыми режущими гранями. Истираемый полиуретан также должен быть относительно жестким.

Механизм абразивного изнашивания является одноактным. Внешним проявлением абразивного износа является наличие продольных полос пропахивания на поверхности полимера. Характер взаимодействия полиуретана и абразивной поверхности (см. рисунок 6.11).

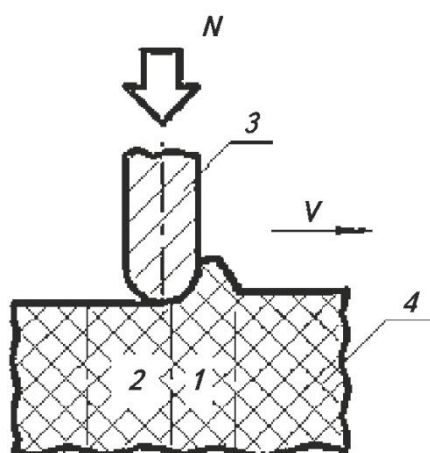


Рисунок 6.11 - Механизм образования продольных полос пропахивания для полиуретанов твердостью 90...95 ShA: 1 – зона сжатия; 2 – зона растяжения; 3 – абразив; 4 –полиуретан; N – нормальная сила; V – скорость контртела

При абразивном изнашивании шин силы молекулярного и механического сцепления растягивают поверхность эластомера в направлении движения острого



выступа до тех пор, пока сила трения не превысит упругую восстанавливающую силу, после чего смещенный слой материала отрывается от массива и процесс повторяется.

Абразивное изнашивание протекает достаточно интенсивно. В частности, оно характерно для высоко нагруженных колес, контактирующих с шероховатым основанием – бетоном, асфальтом.

Данный механизм изнашивания свойственен полиуретанам твердостью 95 ShA, при этом частицы изнашивания представляют собой продольные полосы, свернутые произвольным образом.

Для полиуретана твердостью 90 ShA характерна согласно [37] смешанная картина изнашивания, которая включает в себя продольные полосы пропахивания и поперечные скатки. В зависимости от свойств материала и силы трения при одном или нескольких проходах проявляются надрывы поверхностного слоя. На поверхности полимера образуются поперечные полосы, так называемый «рисунок Шалломаха» [86].

Механизм разрушения и образования поперечных скаток для полиуретана твердостью 90 ShA (см. рисунок 6.12).

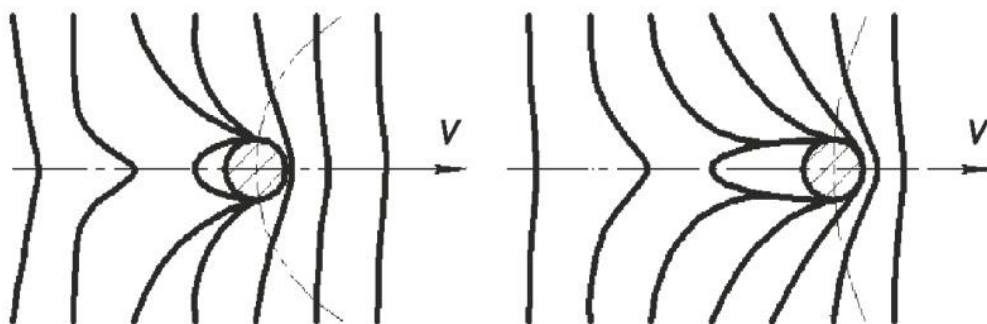


Рисунок 6.12 - Механизм образования поперечных скаток.

Кривые, показанные на рисунке, первоначально представляли собой прямые линии, нанесенные на равном расстоянии на поверхность полимера под прямым углом к направлению движения. Искажение этих линий указывает на то, что напряжение распределено вокруг скользящего выступа неравномерно. Хотя

концентрация напряжений максимальна непосредственно перед выступом, разрывов эластомера здесь нет вследствие того, что сила трения прижимает полимер к поверхности выступа.

Раздир полимера происходит в момент отрыва его от выступа, при этом направление раздира, показанное пунктиром, перпендикулярно направлению максимального напряжения. После того, как выступ прошел, эластомер релаксирует и часть поверхности полимера вблизи раздира поворачивая почти на  $90^{\circ}$ , образует поперечные полосы.

Благодаря силе трения в зоне образовавшегося раздира, полиуретан сворачивается в скатку, и через несколько проходов образовавшееся скатка отделяется от основного материала.

При наличии закругленных вершин выступов абразивной поверхности разрушение полиуретана происходит по усталостному механизму в результате действия повторных сжимающих, растягивающих и сдвиговых напряжений на его поверхности.

Характер взаимодействия и разрушения полимера и скругленных вершин абразивной поверхности (см. рисунок 6.13).

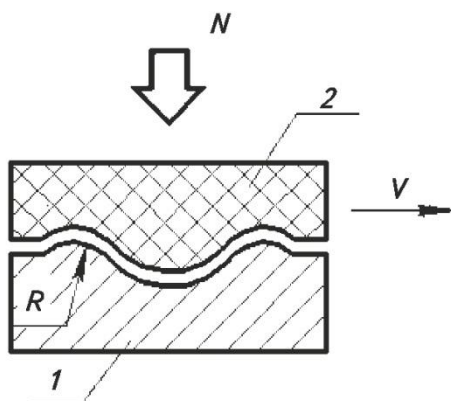


Рисунок 6.13 - Схематическое изображение деформации поверхности полиуретана под действием скругленных вершин абразивной поверхности:  
1 – абразив; 2 – полиуретан;  $N$  – нормальная сила;  $V$  – скорость контртела

Этот вид износа не приводит к образованию на изношенной поверхности царапин. Поверхность в процессе истирания становится шероховатой, однако выступы и впадины на ней располагаются беспорядочно, не образуя какого-либо определенного рисунка [41, 49].

По мнению Резниковского М.М. [41] в реально работающих узлах трения преобладает износ, связанный с усталостным разрушением поверхностного слоя, при этом интенсивность усталостного изнашивания на несколько порядков меньше абразивного изнашивания.

В последнее время при изучении особенностей истирания полимеров в условиях трения его по относительно гладким поверхностям, в частности по наливным полимерным полам складских и производственных помещений, удалось выделить новый, специфический для высокоэластичных материалов вид фрикционного износа, получивший название истирания посредством скатывания.

Истирание посредством скатывания реализуется при высоком значении коэффициента трения между полимером и истирающей поверхностью, в частности оно характерно для износа полиуретанового обода массивных шин погрузчиков и штабелеров.

Этот вид износа упругого полиуретанового обода сопровождается характерным свистом, который генерируется частицами упругого обода при проскальзывании его по наливному полимерному полу. Необходимо отметить, что тональность звука для погрузчика штабелера с нагрузкой и без нагрузки отличаются значительно.

Для понимания механизма данного вида изнашивания необходимо рассмотреть взаимодействие некоторого выступа на поверхности полимера с поверхностью контртела, прижатого к выступу нормальной силой  $N$  и перемещающегося параллельно поверхности полимера со скоростью  $V$ .

Схема взаимодействия выступа полимера и поверхности контртела (см. рисунок 6.14).

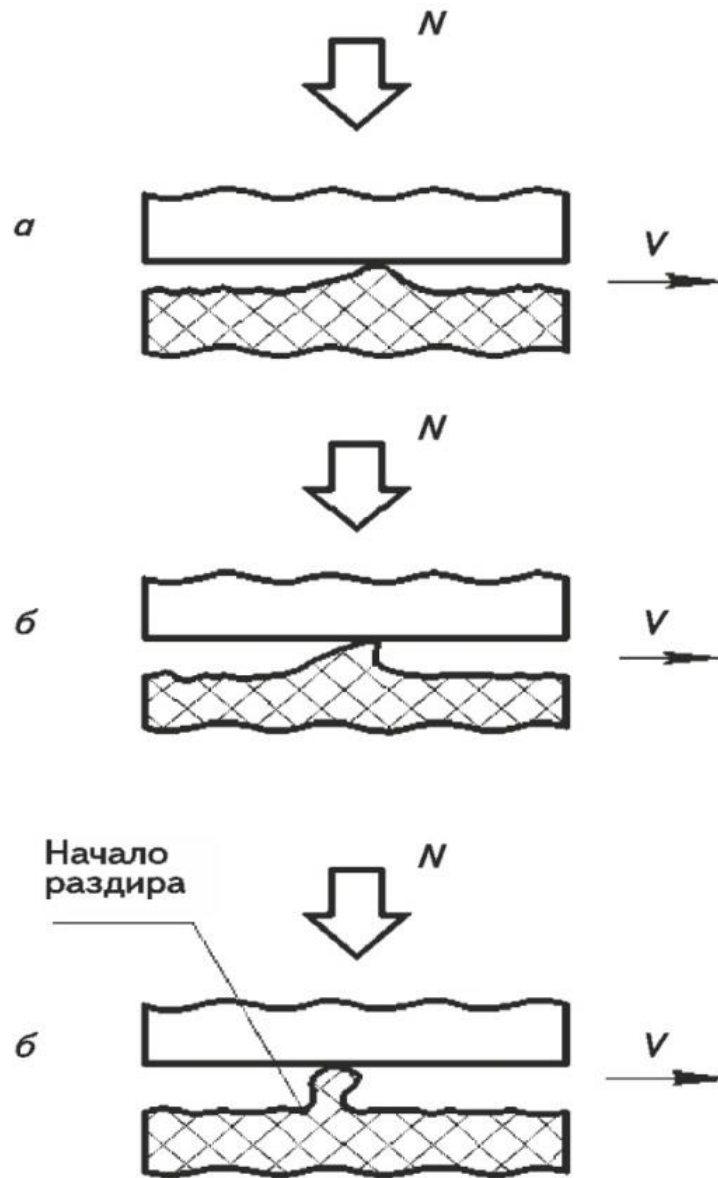


Рисунок 6.14 - Схема истирания полимера посредством скатывания:  $N$  – нормальная сила;  $V$  - скорость контртела

Если трение между выступом полимера и истирающей поверхностью достаточно велико, то на первой стадии движение контртела вызовет сложную деформацию выступа.

Наиболее вероятный характер разрушения можно представить исходя из того, что при сложнапряженном состоянии полимера разрушение начнется с возникновения трещины там, где поверхностные слои материала находятся в состоянии наибольшего растяжения. Если трещина возникла, дальнейший ее рост

происходит под действием небольшого усилия. Рост трещин может приводить к немедленному отделению частей полимера от его поверхностного слоя.

Немедленный отрыв, однако маловероятен. Гораздо вероятнее постепенное раздираание полимера, при котором тонкий слой будет сворачиваться в скатку. При таком механизме изнашивания дальнейшее движение будет происходить в условиях трения качения, сопровождаемого непрерывным раздираанием полимера и сворачиванием отделяющегося лоскута в скатку.

Разрыв лоскута приводит к отделению скатки и тем самым завершается рассмотренный элементарный акт фрикционного износа. Очевидно, что такой характер истирания более вероятен для полимеров с малым сопротивлением раздиру.

При эксплуатации массивных шин с полиуретановым ободом имеет место комбинация описанных выше трех механизмов износа, и порой бывает трудно выделить вклад каждого из них.

Два вида износа, абразивный и посредством «скатывания» являются высокоинтенсивными видами износа. Если они реализуются, то изделия оказываются крайне недолговечными.

## **6.5 Выводы по главе 6**

1. Определены экспериментальным путем, коэффициенты трения скольжения и покоя полиуретана по различным поверхностям. Приведена эмпирическая зависимость для определения коэффициента трения полиуретана по нормализованной абразивной поверхности, имитирующей шероховатость цементобетонного покрытия производственных полов, в зависимости от давления во фрикционном контакте и скорости скольжения для полиуретанов различной твердости, которая необходима при расчете силы трения массивной шины в контакте с твердым покрытием пола.

2. Представлены зависимости для определения интенсивности изнашивания полиуретанов в режиме скольжения в зависимости от условий нагружения для

различных контртел, а также предельные значения критерия мощности при трении полиуретановых образцов различной твердости в режиме скольжения в контакте с нормализованной абразивной поверхностью и стальной шлифованной поверхностью.

3. Разработана модель контактирования массивной шины при качении по бетонному основанию. Определены условия проскальзывания полиуретанового массива по краям площадки контактирования, при котором происходит изнашивание рабочей поверхности полиуретанового обода массивной шины. По результатам большого количества испытаний получена эмпирическая зависимость для определения цикловой интенсивности изнашивания полиуретанового обода массивной шины как функции трех переменных: давления в контакте шины с основанием, линейной скорости нагружения и твердости полиуретана, которая позволяет рассчитать долговечность массивной шины на этапе проентирования.

4. Приведены и пояснены основные виды износа полиуретана во фрикционном контакте с различными поверхностями для полиуретанов различной твердости.

## **Глава 7 Инженерная методика расчета колес с упругим ободом из полиуретана, работающего в режиме динамического нагружения**

### **7.1 Надежность работы массивных полиуретановых шин в контакте с цементно-бетонным покрытием пола производственного помещения**

Надежность работы полиуретановой массивной шины определяется величиной силы трения между упругим полиуретановым ободом и бетонным покрытием пола [53].

С помощью силы трения осуществляется передача тягового и тормозного усилия во время движения, а также обеспечивается устойчивое состояние погрузчика-штабелера в статическом положении, когда происходит подъем и перемещение груза.

Учитывая тот факт, что  $F_{тр} = f_{ск} \cdot F$  и зависимость коэффициента трения скольжения от величины нормального давления, необходимо решить задачу о распределении давления на площадке контакта массивной шины с бетонным полом.

Расчетная схема колеса со сплошным упругим ободом из полиуретана, закрепленном на металлическом центре посредством тонкого слоя адгезива см. рисунок 7.1).

Аналитическое решение задачи с распределением давления по поверхности соприкосновения шины с дорогой и радиальной деформации шины в зависимости от величины нагрузки можно сделать, приняв ряд допущений.

При выводе расчетных зависимостей будем исходить из следующих допущений: в пределах испытываемых шиной деформаций полиуретан практически подчиняется закону Гука (упругие деформации обода в пределах 12% относительной деформации); учитывается только радиальная деформация, поперечным расширением шины пренебрегаем.

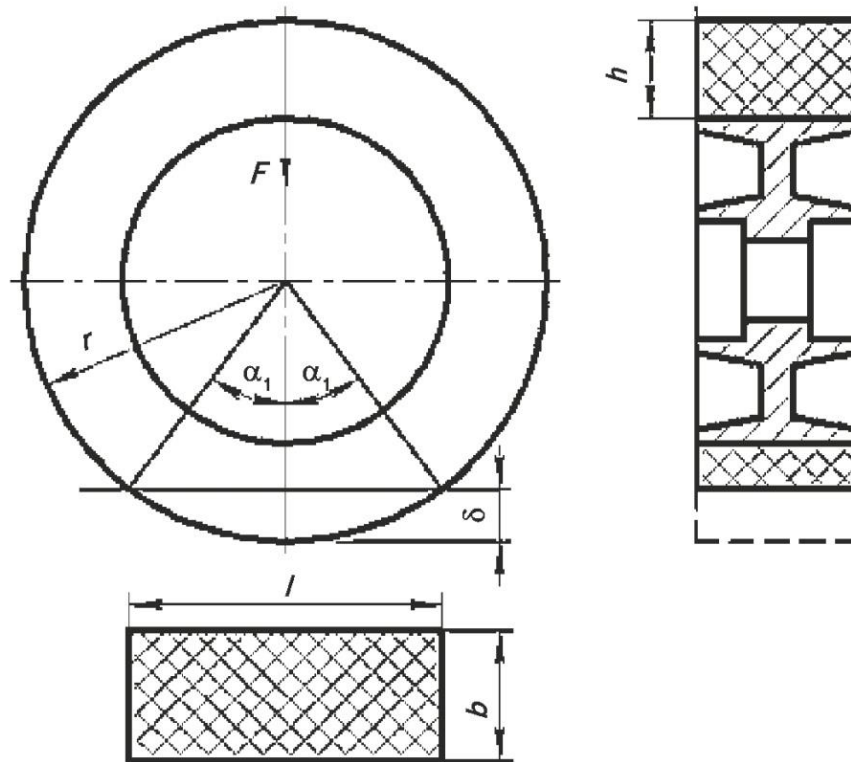


Рисунок 7.1 - Расчетная схема колеса с упругим ободом

Деформированный участок шины, представляющий собой прямоугольник, площадь которого  $S = bl$ , будем рассматривать как совокупность отдельных упругих элементов.

Давление на опорную сопряженную поверхность каждого такого элемента согласно [10] пропорционально величине деформации шины в радиальном направлении:

$$p = cy, \quad (7.1)$$

где  $c$  - коэффициент жесткости;  $y$  - радиальная деформация.

Очевидно, что максимальное давление на опорную поверхность будет находится по центру колеса. По мере удаления от центра давление в контакте будет уменьшаться до нуля на краю площадки контакта.

Величину радиальной деформации шины  $y$  для произвольного угла  $\alpha$ , ограниченного пределами  $-\alpha_1 + \alpha_1$  (см. рисунок 7.2) можно определить следующим образом.



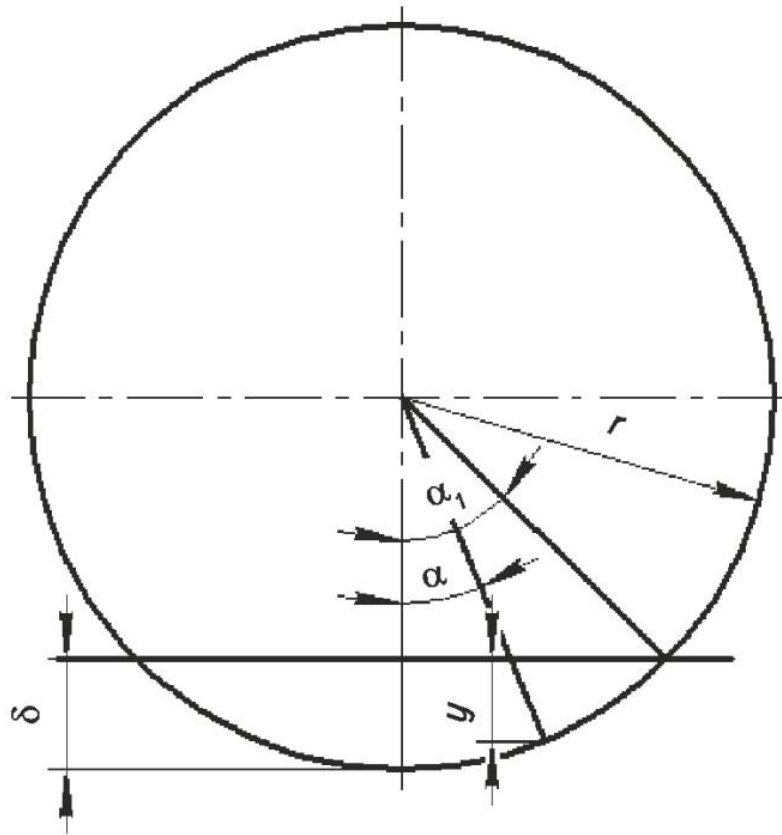


Рисунок 7.2 - Определение радиальной деформации в произвольной точке

$$y = \left( r - \frac{r-\delta}{\cos \alpha} \right) \cos \alpha = \left( r - \frac{r \cos \alpha_1}{\cos \alpha} \right) \cos \alpha = r(\cos \alpha - \cos \alpha_1). \quad (7.2)$$

В соответствии с этим давление на опорную поверхность будет равно:

$$p = cr(\cos \alpha - \cos \alpha_1), \quad (7.3)$$

при  $\alpha = \alpha_1$   $p = 0$ ; при  $\alpha = 0$   $p = p_{max} = c \delta$ .

Для определения величины радиальной жесткости (зависимость, связывающая нагрузку и радиальную осадку шины)  $c$ , введем понятие о среднем давлении  $p_m$  во фрикционном контакте упругого полиуретанового обода с опорной поверхностью.

Эпюра давления массивной полиуретановой шины в контакте с опорной поверхностью (см. рисунок 7.3).

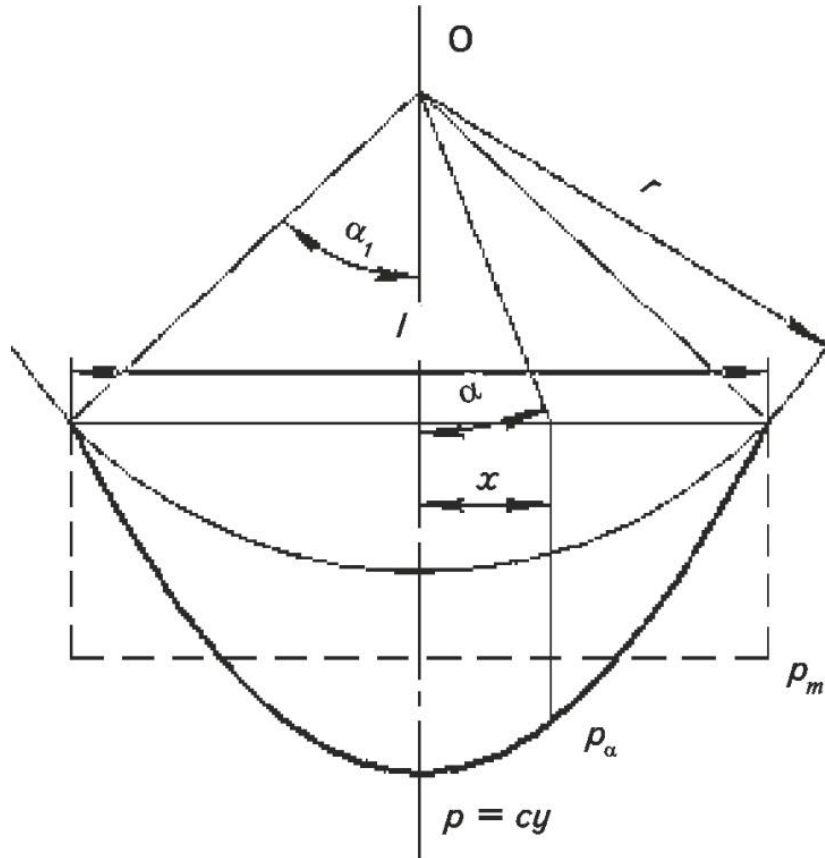


Рисунок 7.3 - Распределение давления в контакте массивной шины с опорной поверхностью

Определим площадь этой эпюры и найдем среднее давление как высоту равновеликого прямоугольника, построенного на том же основании  $l$ ,

$$p_m = \frac{\int_{-\frac{l}{2}}^{+\frac{l}{2}} cr(\cos \alpha - \cos \alpha_1) d\alpha}{l}.$$

Как следует из рисунка 7.3  $x = r \sin \alpha$ ,  $dx = r \cos \alpha d\alpha$ ,  $l = 2r \sin \alpha_1$ .

После подстановки получим:

$$p_m = \frac{cr \int_{-\alpha_1}^{+\alpha_1} (\cos^2 \alpha - \cos \alpha_1 \cos \alpha) d\alpha}{2 \sin \alpha_1} = \frac{cr \left( \alpha_1 - \frac{1}{2} \sin 2\alpha_1 \right)}{2 \sin \alpha_1}, \quad (7.4)$$

Угол  $\alpha$  выражен в радианах.

Нагрузка  $F$ , приложенная к массивной полиуретановой шине в контакте с жестким основанием, может быть выражена через величину среднего давления во фрикционном контакте:

$$F = p_m S = \frac{cr(\alpha_1 - \frac{1}{2} \sin 2\alpha_1)}{2 \sin \alpha_1} bl = cr^2 b \left( \alpha_1 - \frac{1}{2} \sin 2\alpha_1 \right), \quad (7.5)$$

Зная соотношения между  $F$  и  $\alpha_1$ , из выражения (7.5) можно определить величину  $c$ .

Решая совместно уравнения (7.5) и (7.3) и исключая величину  $c$ , находим выражение для определения давления:

$$p = \frac{F(\cos \alpha - \cos \alpha_1)}{rb(\alpha_1 - \frac{1}{2} \sin 2\alpha_1)}, \quad (7.6)$$

Для получения зависимости максимальной деформации  $\delta$  от нагрузки  $F$ , установим связь между  $\alpha_1$  и  $\delta$ :

$$\begin{aligned} \cos \alpha_1 &= \frac{r-\delta}{r}; \quad \alpha_1 = \arccos \frac{r-\delta}{r}, \\ \frac{1}{2} \sin 2\alpha_1 &= \sin \alpha_1 \cos \alpha_1 = \frac{\sqrt{r^2(r-\delta)^2} r - \delta}{r} \frac{r - \delta}{r}, \end{aligned}$$

Подставляя, эти величины в уравнение (6.5), получаем:

$$F = cb \left[ r^2 \arccos \frac{r-\delta}{r} - \sqrt{2r\delta - \delta^2} (r - \delta) \right], \quad (7.7)$$

Зная размеры колес и величину деформации  $\delta$  от заданной нагрузки  $F$  из выражения (7.7) можно определить радиальную жесткость шины:

$$c = \frac{F}{b \left[ r^2 \arccos \frac{r-\delta}{r} - \sqrt{2r\delta - \delta^2} (r - \delta) \right]}, \quad (7.8)$$

Приведенные выражения можно упростить, воспользовавшись отношением максимального давления на опорную поверхность среднему давлению.

Учитывая, что:

$$p_m = \frac{cr(\alpha_1 - \frac{1}{2} \sin 2\alpha_1)}{2 \sin \alpha_1} \quad \text{и} \quad p_{max} = c\delta = cr(1 - \cos \alpha_1), \quad \text{получим:}$$

$$\frac{p_{max}}{p_m} = \frac{(1 - \cos \alpha_1) 2 \sin \alpha_1}{\alpha_1 - \frac{1}{2} \sin 2\alpha_1} = 2 \frac{2 \sin \alpha_1 - \sin 2\alpha_1}{2\alpha_1 - \sin 2\alpha_1}, \quad (7.9)$$

Если представленное соотношение  $\frac{p_{max}}{p_m}$  выразить графически в зависимости от угла  $\alpha_1$  (который фактически определяет размер площадки контакта), то получим кривую (см. рисунок 7.4).

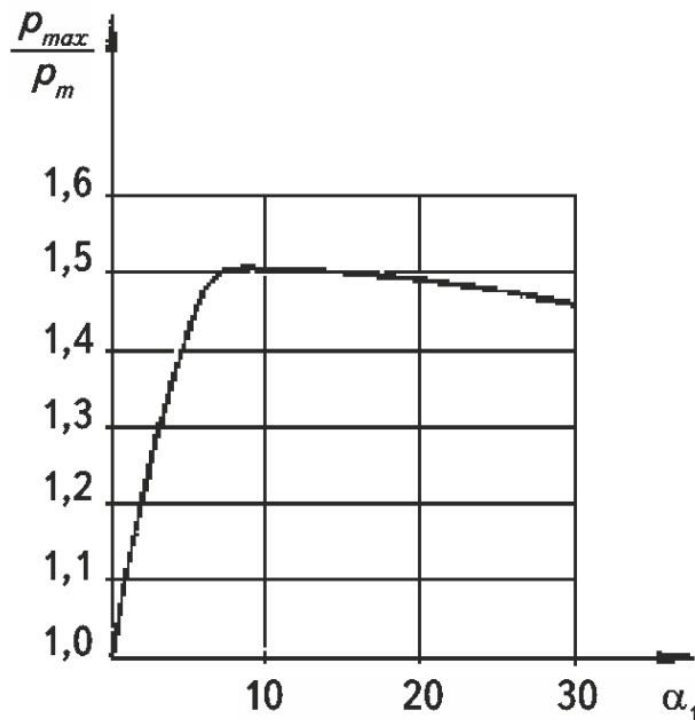


Рисунок 7.4 - Зависимость соотношения  $\frac{p_{max}}{p_m}$  от угла  $\alpha_1$

Анализ кривой позволяет установить, что в пределах практически встречающихся углов  $\alpha_1=8...12^\circ$  отношение  $\frac{p_{max}}{p_m}$  почти не меняется и в среднем может быть принято равным 1,5, т.е.  $p_m \approx \frac{p_{max}}{1,5}$ .

С учетом полученного соотношения выразим нагрузку  $F$  через максимальное давление на опорной поверхности:

$$F = P_m bl = \frac{p_{max}}{1,5} b 2\sqrt{r^2 - (r - \delta)^2} \approx 1,33c\delta b \sqrt{2r\delta - \delta^2}. \quad (7.10)$$

Величина  $\delta^2$  при номинальном нагружении массивной шины весьма мала по сравнению с величиной  $2r\delta$ , составляет не более 1,5 % и ее значением мы можем пренебречь. После соответствующих преобразований получим окончательно выражение, связывающее нагрузку, приложенную к массивной шине и ее деформацию:

$$F \approx 1,9 cb\sqrt{r} \delta^{3/2}. \quad (7.11)$$

Из выражения (7.11) получим формулу для определения радиальной жесткости массивной шины:

$$c \approx \frac{0,53F}{b\sqrt{r} \delta^2}, \quad (7.12)$$

Результаты вычисления по выражению хорошо согласуются с результатами экспериментальных замеров радиальной деформации полиуретановых роликов с использованием фальшь-площадки, имитирующей опорную поверхность.

По результатам большого количества замеров радиальной деформации полиуретановых экспериментальных роликов различной геометрии и твердости было получено эмпирическое выражение по определению осадки:

$$\delta = \sqrt[3]{\left(\frac{Fh}{E_{ocm}b\sqrt{4d}}\right)^2}, \quad (7.13)$$

где  $F$  - нагрузка на колесо;  $h$  - толщина обода;  $E_{ocm}$  - начальный статический модуль упругости при сжатии;  $b$  - ширина колеса;  $d$  - диаметр колеса.

Радиальную жесткость массивной шины определим по формуле:

$$c = \frac{F}{\delta} = \frac{F}{\sqrt[3]{\left(\frac{Fh}{E_{ocm}b\sqrt{4d}}\right)^2}}. \quad (7.14)$$

Экспериментальные замеры опытных полиуретановых роликов показывают, что радиальная жесткость массивных шин не является величиной постоянной и растет с осадкой ролика по экспоненциальной зависимости с показателем степени 2/3.

Угол контакта шины с дорогой согласно рисунку 7.2:

$$\alpha_1 = \arccos\left(1 - \frac{\delta}{r}\right). \quad (7.15)$$

Длина площадки контакта:

$$l = 2r \sin\alpha_1. \quad (7.16)$$

Как отмечалось ранее, площадь контактирования  $S = b \cdot l$  или в развернутом виде:

$$S = b \cdot 2\sqrt{d}^3 \sqrt{\frac{Fh}{2E_{дин}b\sqrt{d}}}. \quad (7.17)$$

Среднее давление в контакте шины с дорогой:

$$p_m = \frac{F}{S} = \frac{F}{b \cdot l}. \quad (7.18)$$

Коэффициент трения скольжения между полиуретановым эластомером упругого обода и опорной поверхностью определим по формуле:

$$f_{ск} = 0,3 + 0,34p^{1,25} + 0,02(95 - ShA) + 0,12V_{ск}, \quad (7.19)$$

Учитывая тот факт, что расчет силы трения производим в состоянии квазистатики  $V_{ск}$  принимаем равным нулю. Выражение для определения силы трения между массивной полиуретановой шиной и бетонным полом окончательно выглядит следующим образом:

$$F_{mp} = F \cdot \left\{ 0,3 + 0,34 \left[ \frac{F}{2b\sqrt{d}^3 \sqrt{\frac{Fh}{2E_{ст0}b\sqrt{d}}}} \right]^{1,25} + 0,02(95 - ShA) \right\}, \quad (7.20)$$

где  $F$  – нагрузка на колесо;  $b$  – ширина колеса;  $d$  – диаметр колеса;  $h$  – толщина обода;  $E_{ст0}$  – начальный статический модуль упругости полиуретана при сжатии;  $ShA$  – твердость полиуретана в единицах по Шору.

В заключение необходимо отметить, что представленная зависимость для определения силы трения между упругим полиуретановым ободом массивной шины и бетонным полом имеет большое практическое значение и широко используется для расчетов.

Величина коэффициента трения скольжения, полученная экспериментально, несколько превосходит фактическую величину. Это объясняется износом и загрязнением бетонного пола торговых комплексов, продовольственных складов и других помещений, где в основном используются массивные полиуретановые шины.

Для учета этого явления были проведены экспериментальные замеры силы трения в контакте полиуретанового образца с загрязненной нормализованной наждачной бумагой, имитирующей шероховатость бетонных полов. Экспериментальные замеры показали снижение фактической силы трения на 20...25 % от расчетной.

## **7.2 Определение долговечности массивных полиуретановых шин в зависимости от условий нагружения**

В настоящее время долговечность полиуретановых деталей оценивают в подавляющем большинстве случаев по данным натурных или стендовых испытаний. Однако дороговизна и длительность натурных испытаний, а также отсутствие надежной корреляции между результатами стендовых испытаний и реальной долговечностью полиуретановых деталей вынуждает к поиску инженерного метода расчета срока их службы.

Проблема долговечности массивных шин на сегодняшний день изучается по трем относительно независимым направлениям:

1. Феноменологическое изучение усталостной прочности и разработка методов сравнительных испытаний материалов с целью определения продолжительности их работы в изделиях.
2. Физико-химическое исследование молекулярного механизма утомления.
3. Изыскание эффективных методов повышения усталостной прочности и износостойкости материалов.

Наибольшее практическое значение согласно [36] имеют исследования в третьем направлении, которые могут быть плодотворными, только если они основываются на достаточно надежных представлениях о механизме утомления.

Долговечность полиуретановых деталей машин, которая выражается в часах, в основном определяется условиями нагружения. В зависимости от условий работы полиуретановые детали можно разбить на две группы: детали, испытывающие статические нагрузки и редкие динамические и детали, испытывающие постоянные динамические нагрузки.

Долговечность деталей 1-й группы в основном определяют процессы старения полиуретана и вопросы культуры эксплуатации полиуретановых деталей. Главным проявлением эффекта старения является образование на несопрягаемых

поверхностях полиуретановых деталей сетки волосяных трещин. В частности, для массивных шин несопрягаемыми поверхностями являются торцы упругого обода.

В настоящее время установлено, что в атмосферных условиях вызывается озон, который диффундирует к поверхности Земли из стратосферы, где озон образуется из кислорода под действием ультрафиолетовых лучей.

Озон неустойчив, распадается на солнечном свете и абсорбируется различными телами, в частности эластомерными материалами.

Волосяные трещины на окисленных торцевых поверхностях массивных шин вследствие деформации упругого обода подвергаются растрескиванию и растут по мере эксплуатации.

Долговечность деталей 1-й группы достаточно высока и составляет 2...3 года, если ранее не происходит нарушение целостности упругого обода из-за порезов и вырывов.

Следует указать, что до сих пор не имеется вполне удовлетворительного метода защиты полиуретана от действия озона, и влияния озонного растрескивания на усталостную выносливость полиуретановых деталей.

Долговечность деталей 2-й группы определяется динамической усталостью или утомлением полиуретана под действием постоянных динамических нагрузок. Усталость в широком смысле слова означает изменение свойств материала или его структуры, происходящее при определенном внешнем нагружении за конечный промежуток времени.

В настоящее время процесс разрушения полиуретана согласно [35] рассматривается как кинетический термофлуктуационный процесс постепенного накопления нарушений, который развивается в теле с момента первоначального приложения нагрузки до его разрушения.

Элементарными актами процесса разрушения, согласно этим представлениям, являются термофлуктуационные разрывы межатомных связей (химических и межмолекулярных), активируемые приложенным напряжением.



Исходя из подобной кинетической концепции, разрушение и прочностные свойства полиуретана следует характеризовать не каким-либо критическим напряжением, а некоторой скоростью накопления разрывов межатомных связей.

Очевидно, что скорость изменения прочности полиуретана в процессе утомления циклической нагрузкой одного вида следует принимать постоянной. Поэтому в последнее время изучение прочностных свойств полиуретана при динамическом нагружении сводится к рассмотрению температурно-силовых зависимостей долговечности.

Долговечность массивных полиуретановых шин при динамическом нагружении в сильнейшей степени зависит от повышения температуры вследствие упругого гистерезиса. Поэтому при испытании материала необходимо как можно точнее воспроизвести механический режим нагружения (линейная скорость и величина относительной деформации), который в конечном счете определяет температуру полиуретанового обода.

В простейшем случае гармонического нагружения при асимметричном цикле нагружения, когда коэффициент асимметрии цикла  $R = \frac{\sigma_{min}}{\sigma_{max}} = 0$  механический режим нагружения исчерпывающе описывается двумя параметрами: величиной относительной деформации  $\varepsilon$  и линейной скоростью  $V$  экспериментального ролика в контакте с беговым барабаном.

Методика экспериментального исследования долговечности полиуретановых роликов заключалась в следующем.

При проведении экспериментального исследования нагружение полиуретановых роликов производилось в заранее намеченных пределах относительной деформации упругого обода, которые примерно соответствуют рабочему диапазону нагружения. В частности, для полиуретана твердостью 75 ShA эти пределы составляют от 10 до 20, для 85 ShA от 8 до 18 и для 95 ShA от 5 до 15 процентов. Нагружение производилось с интервалом 2 процента.

Для каждого режима нагружения (величина относительной деформации обода и линейная скорость в точке контакта) фиксировалось время до разрушения

полиуретанового обода ролика и затем результаты испытаний обрабатывались методами математической статистики.

Для экспериментального изучения долговечности использовались ролики диаметром 46 мм, шириной 20 мм, толщиной упругого обода 8 мм трех твердостей: 75 ShA, 85 ShA и 95 ShA.

Важнейшей задачей усталостных испытаний является экспериментальное определение зависимости между выносливостью (количество циклов нагружения до разрушения) и режимом нагружения экспериментального ролика. В связи с определенным рассеянием долговечности (количество часов до разрушения), испытание одного ролика на данном уровне нагружения является недостаточным, поэтому на одном уровне испытывается несколько роликов. Такая последовательность повторения простых испытаний называется многократным испытанием.

Результаты испытаний представляются парой чисел  $\varepsilon$ ,  $N$ , которые обеспечивают более точное значение среднего или медианы, кроме того, такие испытания дают возможность получить среднюю характеристику рассеяния, которая обычно измеряется средним квадратичным отклонением, а когда количество испытываемых роликов на каждом уровне нагружения достаточно велико, то можно получить статистическое распределение долговечности.

Так как усталостные испытания стоят достаточно дорого и требуют много времени, желательно чтобы планирование серии испытаний ориентировалось на получение максимальных сведений при наименьших затратах. С этой целью необходимо применять эффективные статистические методы с полным использованием данных, полученных в результате испытаний.

Исходя из опыта статистической обработки результатов циклических усталостных испытаний резин, было принято решение для одного уровня деформации испытывать 3 ролика.

Полученные в результате испытаний экспериментальные значения числа циклов нагружения до разрушения роликов наносили на логарифмически нормальную вероятностную бумагу. По оси абсцисс в логарифмическом масштабе

откладывали в возрастающем порядке долговечность роликов при циклическом нагружении. Ординаты точек подсчитывали по формуле, предложенной Вейбуллом [5], а также для сравнения по формуле, предложенной Хальдом [71].

В результате сравнения приходим к выводу, что для оценки вероятности разрушения при построении функций распределения логарифмов долговечностей следует рекомендовать формулу Вейбулла, обуславливающую меньшую систематическую ошибку по сравнению с формулой Хальда.

В теории вероятности для описания функции распределения (наработки до отказа) чаще всего используют нормальное, логарифмически нормальное, Вейбулла и экспоненциальное теоретическое распределение случайной величины.

Для аппроксимации результатов усталостных испытаний и определения вероятности отказа, вызванного процессом деструкции полиуретана, наиболее подходящим является распределение Вейбулла.

В частности, оно широко используется для описания распределения наработки до отказа подшипников качения, происходящего в результате усталостного выкрашивания контактирующих поверхностей.

По результатам испытаний была получена зависимость между числом циклов нагружения до разрушения  $N$  и относительной деформацией упругого обода  $\varepsilon$ :

$$N \varepsilon^m = C, \quad (7.21)$$

где  $C$  – величина постоянная для полиуретана данной твердости и определенной линейной скорости в контакте массивной шины с опорной поверхностью.

$$m = 0,02 \text{ ShA}^{1,26} \quad (7.22)$$

где  $\text{ShA}$  – твердость полиуретана в единицах по Шору.

Выражение (7.21) подобно качественно выражению для определения выносливости резин, полученному Резниковским М. М. [41].

Зависимость выносливости полиуретанов различной твердости от относительной деформации  $\varepsilon$  для линейной скорости  $V_{\text{л}} = 1$  м/с в системе координат  $\lg \varepsilon - \lg N$  (см. рисунок 7.5).

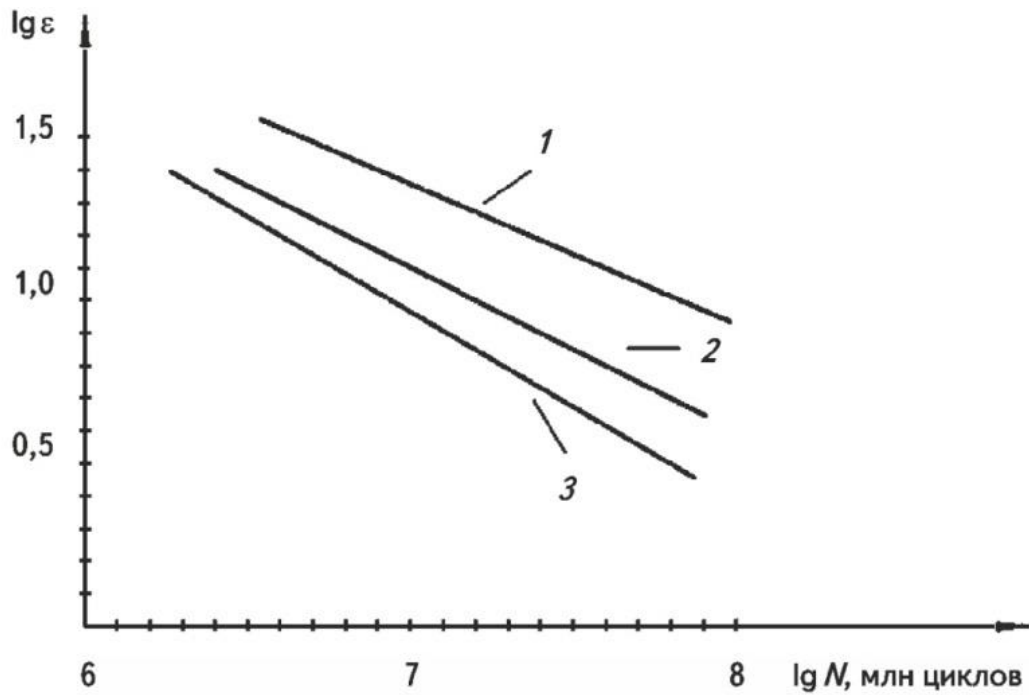


Рисунок 7.5 - Зависимость выносливости полиуретанов различной твердости от величины относительной деформации при линейной скорости  $V_{л} = 1$  м/с:

1 - 75 ShA; 2 - 85 ShA; 3 - 95 ShA

Величина с правой части выражения (7.21) в зависимости от твердости и скорости нагружения выглядит следующим образом:

$$C = \frac{10(345 - 2,05ShA)}{1 + 0,12V_{л}^{0,78}}, \quad (7.23)$$

где ShA – твердость полиуретана в единицах по Шору;  $V_{л}$  – линейная скорость.

Анализируя большой объем экспериментальных данных, следует отметить падение выносливости материала с увеличением скорости нагружения во фрикционном контакте.

Это обусловлено ростом температуры полиуретанового массива и как следствие ростом скорости разрушения материала, которая и определяет в конечном итоге долговечность полиуретана.

Зависимость выносливости полиуретана различной твердости от скорости нагружения (см. рисунок 7.6).

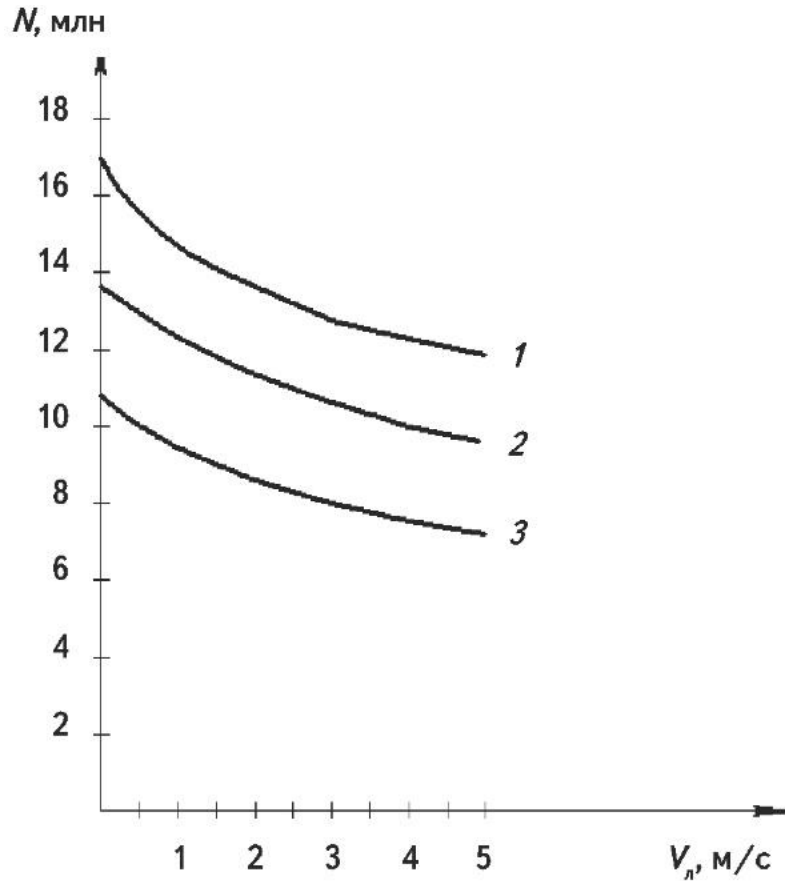


Рисунок 7.6 - Зависимость выносливости массивной шины от скорости нагружения: 1 - 75 ShA; 2 - 85 ShA; 3 - 95 ShA

В развернутом виде зависимость (7.21) будет выглядеть следующим образом:

$$N \varepsilon^{0,02} \text{ShA}^{1,26} = \frac{10(345 - 2,05 \text{ShA})}{1 + 0,12 V_{л}^{0,78}}. \quad (7.24)$$

Откуда выносливость  $N$ :

$$N = \frac{10(345 - 2,05 \text{ShA})}{[1 + 0,12 V_{л}^{0,78}] \varepsilon^{0,02} \text{ShA}^{1,26}} 10^6, \quad (7.25)$$

где  $\varepsilon = 100 \sqrt[3]{\left(\frac{F}{2E_{дин} b d \sqrt{\frac{h}{d}}}\right)^2}$ ;  $V_{л}$  – линейная скорость.

Число нагружений массивной шины за 1 час работы равно:

$$N_{\text{час}} = 3600 \frac{1000 V_{л}}{\pi d} = \frac{3,6 \cdot 10^6 V_{л}}{\pi d}. \quad (7.26)$$

Долговечность или срок службы массивной шины в часах определим по формуле:

$$L = \frac{N}{N_{\text{час}}} = \frac{10(345-2,05ShA)\pi d 10^6}{3,6 \cdot 10^6 (1+0,12V_d^{0,78}) \varepsilon^{0,02} ShA^{1,26}} = \frac{2,78(345-2,05ShA)\pi d}{(1+0,12V_d^{0,78}) \varepsilon^{0,02} ShA^{1,26}}, \quad (7.27)$$

где  $\varepsilon = 100 \sqrt[3]{\left(\frac{F}{2E_{изд} b d \sqrt{\frac{h}{d}}}\right)^2}$ ;  $F$  - нагрузка на колесо;  $E_{изд}$  - динамический модуль

упругости изделия при сжатии;  $b$  - ширина обода;  $d$  - диаметр колеса;  $h$  - толщина обода;  $ShA$  - твердость полиуретана в единицах по Shore.

Следует отметить, что полученные выражения для определения долговечности колес с упругим ободом из полиуретана в зависимости от величины относительной деформации и линейной скорости нагружения справедлива для режима постоянного динамического нагружения, потому что при постоянном режиме работы происходит нагрев полиуретанового обода, который и определяет скорость деструкции материала.

На сегодняшний день основным критерием, определяющим долговечность массивной шины, является износ обода при качении с проскальзыванием. Предельно допустимый износ составляет 20...25 % толщины упругого обода. По достижении величины предельно установленного износа производится замена массивной шины на новую. Средняя долговечность массивных шин основных мировых производителей составляет примерно 2500...3000 часов.

В том случае, если массивная шина испытывает нагружение с длительными перерывами, процесс разрушения по своему характеру будет приближаться к старению, который свойственен для деталей 1-й группы.

### 7.3 Методика проектировочного и проверочного расчета массивных шин

Методика расчета массивных шин со сплошным упругим ободом из полиуретана требует учета большого комплекса теоретических и экспериментальных параметров.

В предложенной методике расчета не оценивается прочность соединения полиуретанового обода с металлическим (стальным, чугунным или силуминовым) центром колеса.

Современные адгезивы позволили снять остроту этой проблемы при условии соблюдения технологии подготовки сопрягаемых поверхностей, а также нанесения адгезива. В этой же связи вышли из употребления механические способы обеспечения надежности соединения обода с центром – замки, макрорельеф и т.п., что встречается в конструкциях обрешиненных колес.

Отечественная методика расчета колес с полиуретановым ободом до сегодняшнего дня не была разработана. Предыдущее поколение массивных шин с упругим ободом из резины проектировалось исходя из среднего давления на площадке контакта  $p_m = 1,2$  МПа.

В зарубежной практике выбор колес производится с использованием таблицы типоразмеров, а также с использованием номограммы Ассоциации британских производителей шин.

В качестве основного критерия при проектировании массивных шин с упругим ободом из полиуретана возьмем величину относительной деформации упругого обода:

$$\varepsilon = \frac{\delta}{h} = \sqrt[3]{\left(\frac{F}{2lE_{\text{шин}}d\sqrt{\frac{h}{d}}}\right)^2}. \quad (7.28)$$

Известно, что деформация эластомеров сопровождается повышением температуры в связи с высокими потерями на внутреннее трение (гистерезис). Тем самым выполнение условия  $\varepsilon \leq [\varepsilon]$  предотвращает деструкцию полиуретанового обода.

Допускаемая деформация, которой соответствует область обратимых высокоэластических деформаций  $\varepsilon$ , может быть представлена в следующем виде:

$$[\varepsilon] = \varepsilon_{lim} k_{\varepsilon} / [S_{\varepsilon}], \quad (7.29)$$

где  $\varepsilon_{lim}$  - предельно допускаемая деформация при сжатии;  $[S_{\varepsilon}]$  - коэффициент запаса по деформации;  $k_{\varepsilon}$  - коэффициент деформативности, учитывающий конструктивно-эксплуатационные условия работы обода представлен в таблице 7.1.

Таблица 7.1 - Коэффициент деформативности  $k_{\varepsilon}$ , учитывающий конструктивно-эксплуатационные условия работы

Напольные погрузчики-штабелеры			Опорные колеса технологического и транспортного оборудования	
Опорное колесо	Ведущее и рулевое колесо	Ведущее и одновременно рулевое колесо	Режимы работы	
			С остановками	Постоянный
1	0,85	0,7	1	0,9

Учитывая высокую достоверность методики расчета, точные сведения о нагрузках и высокую стабильность физико-механических свойств полиуретана, рекомендуется  $[S_{\varepsilon}] \geq 1,2 \dots 1,4$ . При легком режиме  $[S_{\varepsilon}] = 1,2$ , при тяжелом  $[S_{\varepsilon}] = 1,4$ .

В проектировочном расчете будем использовать выработанные практикой пропорции обода, в частности относительная толщина  $h/d$  изменяется от 0,08 до 0,14. Статистические параметры отечественных массивных шин с упругим ободом из резины представлены в таблице 7.2.

Таблица 7.2 - Относительная толщина обода  $h/d$  в зависимости от диаметра колеса

Диаметры	200...300	300...400	400...500	500...800
$h/d$	0,14	0,12	0,10	0,08



С учетом выше изложенного последовательность проектировочного расчета будет выглядеть следующим образом:

1. Исходя из конструкции машины принимаем диаметр массивной шины.
2. Выбираем полиуретан определенной твердости и определяем величину допускаемой деформации по формуле (7.29) учитывая особенности работы колеса (см. таблицу 7.1) и величину предельной деформации полиуретана (см. таблицу 2.3).
3. Определяем динамический модуль упругости  $E_{дин}$  массивной шины с учетом режима нагружения по формуле (4.30).

$$E_{дин} = E_{ст 0} \cdot k_{т.р.} \cdot k_{д.у.}$$

4. Определяем отношение  $h/d$  массивной шины в соответствии с диаметром по табл. 7.2
5. Определяем ширину массивной шины по формуле:

$$b = \frac{F}{\sqrt{\varepsilon^3} 2 E_{дин} d \sqrt{\frac{h}{d}}} . \quad (7.30)$$

6. Определяем толщину обода массивной шины по формуле:

$$h = (h/d) \cdot d . \quad (7.31)$$

Последовательность проектировочного расчета массивной шины рассмотрим на конкретном примере.

Исходные данные: Погрузчик. Скорость перемещения  $V_n = 6 \text{ км/ч} \approx 1,67 \text{ м/с}$ . Нагрузка на ось рулевого колеса  $F = 20000 \text{ Н}$ . Режим работы – легкий.

Цель расчета: определить диаметр  $d$ , ширину  $b$  и толщину обода  $h$ .

1. Назначаем наружный диаметр массивной шины исходя из конструкционных размеров погрузчика  $d = 240 \text{ мм}$ .
2. В качестве материала упругого обода выбираем полиуретан твердостью 85 *ShA* и по таблице 2.3 определяем предельную деформацию  $\varepsilon_{lim} = 0,12$ . По таблице 7.1 определяем коэффициент деформативности  $k_\varepsilon = 0,85$ . Коэффициент запаса по деформации при легком режиме принимаем  $[S_\varepsilon] = 1,2$  и определяем допускаемую деформацию по формуле (7.29).

$$[\varepsilon] = \frac{\varepsilon_{lim} k_{\varepsilon}}{[S_{\varepsilon}]} = 0,15 \cdot \frac{0,85}{1,2} = 0,085 \text{ (8.5 \%)}.$$

3. Модуль упругости  $E_{дин}$  массивной шины, который определяет ее деформативность в движении, определим по формуле (4.30)

$$E_{дин} = E_{cm0} \cdot k_{m.p.} \cdot k_{\partial.y.},$$

где  $E_{cm0}$  - начальный статический модуль упругости при сжатии, определенный с помощью образцов – свидетелей для полиуретана твердостью 85 *ShA* равен 21 МПа.

Коэффициент температурного размягчения определим по следующей формуле:

$$k_{m.p.} = 1 - 0,033 T_n, \quad (7.32)$$

где  $T_n = \frac{T_B + 6,9 V_n^{1,65} + 95[\varepsilon]}{1,67 - 0,007 ShA}$ ;  $T_e$  – температура воздуха,  $T_e = 20^{\circ}C$ ;  $V_{Л} = 1,67$  м/с,  $[\varepsilon] = 8,5 \%$ ,  $T_n = 42^{\circ}C$ .

Тогда  $k_{m.p.} = 1 - 0,0033 \cdot 42 = 0,86$ .

Коэффициент динамического ужесточения  $k_{\partial.y.} = 1 + \frac{V^{1,28 - 0,0039 ShA}}{20 - 19 ShA} = 1,39$ .

Динамический модуль упругости массивной шины  $E_{дин} = E_{cm0} \cdot k_{m.p.} \cdot k_{\partial.y.} = 21 \cdot 0,86 \cdot 1,39 = 25,1$  МПа.

4. По таблице 7.2 для  $d = 240$  мм принимаем  $\frac{h}{d} = 0,14$ .

5. Определяем ширину массивной шины по формуле (7.30)

$$b = \frac{F}{\sqrt{\varepsilon^3} 2 E_{дин} d \sqrt{\frac{h}{d}}} = 148 \text{ мм}$$

Принимаем ширину массивной шины  $b = 150$  мм.

6. Определяем толщину обода массивной шины по формуле (7.31)

$$h = \left(\frac{h}{d}\right) \cdot d = 0,14 \cdot 240 = 33,6 \text{ мм.}$$

Принимаем  $h = 35$  мм.

Проверочный тепловой расчет массивной шины будем проводить в следующей последовательности:

1. Определяем температуру полиуретанового обода исходя из условий нагружения по формуле (4.32)

2. Определяем коэффициент запаса по температуре

$$K_m = \frac{T_{lim}}{T_n}, \quad (7.33)$$

где  $T_{lim}$  – предельно допустимая температура, °С по таблице 2.3;  $T_n$  - температура полиуретанового обода, определенная по формуле (4.32) и сравниваем его с рекомендованным предельным коэффициентом запаса по температуре  $[K_m] = 1,3$

Проведем тепловой проверочный расчет массивной полиуретановой шины, спроектированной нами ранее, исходя из величины относительной деформации обода:

1. Определяем температуру полиуретанового обода по формуле (4.32)

$$T_{\Pi} = \frac{T_B + 6,9 V_n^{1,65} + 95[\varepsilon]}{1,67 - 0,007 ShA} = \frac{20 + 16 + 9}{1,07} = 42.$$

2. Определяем коэффициент запаса по температуре

$$K_m = \frac{T_{lim}}{T_n} = \frac{65}{42} = 1,5 > [K_m] = 1,3.$$

Рассчитанные коэффициенты запаса по температуре подтверждают работоспособность спроектированной массивной шины и обоснованность назначения размеров шины исходя из величины относительной деформации обода.

Далее проведем проверочный расчет полиуретанового обода колеса на изнашивание, и исходя из величины допустимого износа определим срок службы колеса в часах.

Расчет на изнашивание будем производить в следующей последовательности:

1. Определим величину среднего давления в контакте колеса с бетонным полом по следующей формуле:

$$P_m = \frac{F}{2b\sqrt{d}^3 \sqrt{\frac{Fh}{2E_{дин}b\sqrt{d}}}}. \quad (7.34)$$

2. По формуле (6.25) определим интенсивность изнашивания полиуретанового обода при качении с проскальзыванием по бетонному полу:

$$I_N = \frac{0,12 p_m^{1,31} (0,25V_{II}+0,7)}{0,24+0,01ShA} 10^{-6} .$$

3. Учитывая опыт эксплуатации массивных шин, принимаем величину предельно допускаемого износа:  $[\Delta] = 0,25 h$ , мм.

4. Срок службы колеса или долговечность составит:

$$L = \frac{[\Delta]\pi d}{3,6 \cdot 10^6 I_N V_n} .$$

Проведем проверочный расчет спроектированной массивной шины на изнашивание:

1. Среднее давление в контакте шины с полом:

$$p_m = \frac{F}{2b\sqrt{d}^3 \sqrt{\frac{Fh}{2E_{дин}b\sqrt{d}}}} = 2,4 \text{ МПа}$$

2. Интенсивность изнашивания полиуретанового обода:

$$I_N = \frac{0,12 p_m^{1,31} (0,25V_{II}+0,7)}{0,24+0,01ShA} 10^{-6} = \frac{0,12 \cdot 2,4^{1,31} (0,25 \cdot 1,67 + 0,7)}{0,24+0,01 \cdot 85} 10^{-6} = 0,42 \cdot 10^{-6}, \text{ мм.}$$

3. Определим величину предельно допускаемого износа:

$$[\Delta] = 0,25 h = 0,25 \cdot 35 = 8,75 \text{ мм.}$$

4. Долговечность массивной шины составит:

$$L = \frac{[\Delta]\pi d}{3,6 \cdot 10^6 I_N V_n} = \frac{8,75 \cdot 3,14 \cdot 240}{3,6 \cdot 10^6 \cdot 0,42 \cdot 10^{-6} \cdot 1,67} = 2750 \text{ часов.}$$

В заключении необходимо отметить что, долговечность данной шины, определяемая условиями нагружения составляет примерно 4200 часов. Как отмечалось ранее, на сегодняшний день долговечность массивной шины определяется износостойкостью упругого обода при качении с проскальзыванием.

Ведущие мировые производители массивных шин ведут активный поиск модификатора, способного повысить износостойкость полиуретана. Трудность этой задачи состоит в необходимости избежать заметного снижения механических свойств новой композиции, что часто отмечается при введении в полиуретан модификаторов.

Основным фактором способным привести к увеличению износостойкости является образование непрерывной цепочно-сетчатой структуры наполнителя в полимерной матрице. Повышение износостойкости при оптимальном содержании модификатора, может быть объяснено, как повышением коэффициентов теплопроводности и теплопередачи полученной композиции, так и снижением коэффициента трения скольжения.

#### **7.4 Выводы по главе 7**

1. Отмечено, что надежность работы полиуретановой массивной шины определяется величиной силы трения между упругим ободом и бетонным покрытием пола.

2. Представлено аналитическое решение задачи о распределении давления на площадке контакта массивной шины с бетонным основанием, а также приведено выражение для определения радиальной жесткости массивной шины.

3. Показано, что результаты вычисления хорошо согласуются с результатами экспериментальных замеров радиальной деформации полиуретановых роликов с использованием фальш-площадки, имитирующей опорную поверхность.

4. Представлены три относительно независимых направления, по которым изучается проблема долговечности массивных шин. Это:

- феноменологическое изучение усталостной прочности и разработка методов сравнительных испытаний материалов с целью определения продолжительности их работы в изделиях;
- физико-химическое исследование молекулярного механизма утомления;
- изыскание эффективных методов повышения усталостной прочности и износостойкости материалов.

5. По результатам большого количества испытаний была получена эмпирическая зависимость по определению долговечности массивных полиуретановых шин различной твердости в зависимости от скорости нагружения и величины относительной деформации обода.

6. Впервые в отечественной практике предложена методика проектировочного расчета массивных полиуретановых шин исходя из величины относительной деформации упругого обода с учетом особенностей физико-механических свойств полиуретана и особенностей условий работы массивных шин.

7. В качестве основных критериев при проведении проверочного расчета массивной полиуретановой шины нами выбраны:

- тепловой расчет массивной шины при котором определяется температура нагрева обода, определяется коэффициент запаса по температуре и по результатам сравнения полученного коэффициента запаса и допускаемого, принимается решение о работоспособности спроектированной массивной шины;
- расчет на изнашивание упругого полиуретанового обода исходя из условий нагружения и определение долговечности массивной шины исходя из величины допускаемого износа упругого обода.

## Заключение

В диссертации решена важная для отечественного машиностроения научно-техническая проблема перехода с традиционного эластомерного материала резины, на более совершенный – полиуретан. Основные результаты и итоги выполненных исследований состоят в следующем:

1. Анализ физико-механических свойств новых для отечественной промышленности типов полиуретанов подтвердил их высокие технологические и потребительские качества и перспективность для разработки типовых эластомерно-металлических деталей.

2. Экспериментально подтверждено, что отработанная технология свободного литья одно- и двухкомпонентных полиуретанов горячей полимеризации, гарантирует достижение высоких и стабильных механических характеристик материала.

3. Выбраны и внедрены в производство рациональные методы и режимы черновой и чистовой механической обработки эластомерно-металлических деталей: точение специальными резцами, игольчатое фрезерование и шлифование абразивными кругами, шлифование и полирование абразивными лентами.

4. Показана необходимость использования различных технологических приемов обработки эластомерно-металлических деталей при различной твердости двух групп полиуретанов: сравнительно мягких ( $<40...65$  ShA) или твердых ( $>90$  ShA).

5. По результатам анализа механизма возникновения упругих и релаксационных колебаний в процессе финишной обработки выработаны конструктивные и технологические рекомендации, обеспечивающие повышение качества шлифуемой поверхности полиуретана. К ним относятся выбор жесткости арматуры, толщины упругого слоя, а также окружной скорости, осевой и радиальной подачи инструмента. Предложенные рекомендации служат для

снижения шероховатости шлифуемой полиуретановой поверхности, соблюдения точности геометрической формы и минимизации показателей радиального боя шлифованной полиуретановой поверхности.

6. Определены важнейшие критерии работоспособности деталей машин из полиуретана в условиях статического и динамического нагружения, получена эмпирическая зависимость для определения модуля упругости полиуретана при сжатии в изделиях произвольной формы, а также приведены величины допускаемых напряжений сжатия для полиуретанов при различных видах нагружения. Представленные зависимости позволяют точно определить деформацию эластомерно-металлических деталей при проектировании, что очень важно для повышения точности расчетов.

7. Получено эмпирическое выражение для определения модуля сдвига изделия в зависимости от фактора формы для полиуретанов различной твердости, а также приведены допускаемые напряжения сдвига для полиуретанов при различных видах нагружения. Представленные зависимости особенно ценны для расчета деформации амортизаторов малой жесткости, виброизоляционный массив которых работает на сдвиг.

8. Впервые в отечественной инженерной практике для целого класса деталей машин по результатам экспериментальных замеров деформативности полиуретановых роликов получено выражение для определения коэффициента динамического ужесточения для полиуретанов различной твердости в зависимости от скорости нагружения, а также представлены значения предельной температуры, относительной деформации и максимальной скорости нагружения для основных конструктивных полиуретанов работающих в условиях динамического нагружения. Приведенные зависимости, позволяют на стадии проектирования определить режим предельного нагружения и не допустить разрушения упругого обода при работе.

9. Сформулированы особенности конструирования полиуретановых деталей машин с учетом специфических свойств материала, таких как:



- практическая несжимаемость материала и как следствие, возможность его расширения при деформации;

- значительное различие коэффициентов объемного расширения у полиуретана и стали и соответствующая необходимость учета усадки полиуретана после полимеризации;

- склонность к появлению в деталях из полиуретана очагов концентрации напряжений и как следствие разработка таких изделий, у которых напряжения в любых сечениях были бы примерно одинаковы.

10. Получены эмпирические зависимости, для определения коэффициента сопротивления качению массивных полиуретановых шин различной твердости по твердой шероховатой поверхности, имитирующей цементно-бетонное покрытие производственных помещений, позволяющие определить момент сопротивления качению колеса с упругим эластомерным покрытием.

11. По результатам большого количества испытаний полиуретановых роликов получена зависимость для определения температуры нагрева полиуретана, в зависимости от скорости нагружения и величины относительной деформации, для целого класса деталей машин, а также получено выражение для определения предельной скорости нагружения полиуретановых колес, работающих в режиме постоянного динамического нагружения.

12. Экспериментально воспроизведены и пояснены наиболее опасные виды отказов, определяющих работоспособность массивных шин:

- внутреннее расслоение упругого обода в результате гистерезисного нагрева и термической деструкции;

- износ рабочей поверхности полиуретанового обода при качении с проскальзыванием.

13. Определены экспериментальным путем, коэффициенты трения скольжения и покоя полиуретана по различным поверхностям и приведен анализ полученных результатов, а также приведена эмпирическая зависимость для определения коэффициента трения полиуретана по нормализованной абразивной поверхности, имитирующей шероховатость цементно-бетонного покрытия

производственных полов, в зависимости от давления во фрикционном контакте и скорости скольжения для полиуретанов различной твердости. Приведенные зависимости необходимы для расчета силы трения между бетонным полом и массивной шиной, которая является важнейшим параметром, определяющим устойчивость штабелера-погрузчика при подъеме груза.

14. Представлены зависимости для определения интенсивности изнашивания полиуретанов в режиме скольжения в зависимости от условий нагружения, для различных контртел, а также предельные значения критерия мощности при трении полиуретановых образцов различной твердости в режиме скольжения в контакте с нормализованной абразивной поверхностью и стальной шлифованной поверхностью. Полученные зависимости имеют важное значение при расчете подшипников скольжения, изготовленных из полиуретана высокой твердости.

15. Разработана модель контактирования массивной шины при качении по бетонному основанию. Определены условия проскальзывания полиуретанового массива по краям площадки контактирования, при котором происходит изнашивание рабочей поверхности полиуретанового обода массивной шины.

16. По результатам большого количества испытаний получена эмпирическая зависимость, для определения цикловой интенсивности изнашивания полиуретанового обода массивной шины как функции трех переменных: давления в контакте шины с основанием, линейной скорости нагружения и твердости полиуретана. Полученная зависимость позволяет на этапе проектирования определить величину предельно допустимого износа и как следствие долговечность проектируемой шины.

17. Приведены и пояснены три основных вида износа полиуретана во фрикционном контакте с различными поверхностями для полиуретанов различной твердости, а также представлен вид поверхности изнашивания для полиуретанов различной твердости. Установлено, что определяющим долговечность массивной шины и других колес с упругим ободом является усталостный износ.

18. Представлено аналитическое решение задачи о распределении давления на площадке контакта массивной шины с бетонным основанием и приведено

выражение для определения радиальной жесткости массивной шины. Показано, что результаты вычисления хорошо согласуются с результатами экспериментальных замеров радиальной деформации полиуретановых роликов с использованием фальш-площадки, имитирующей опорную поверхность.

19. По результатам большого количества испытаний была получена эмпирическая зависимость по определению долговечности массивных полиуретановых шин различной твердости в зависимости от скорости нагружения и величины относительной деформации обода. На основании приведенной зависимости, можно на этапе проектировочного расчета, исходя из условий нагружения, определить долговечность проектируемой массивной шины.

20. Впервые в отечественной практике предложена методика проектировочного расчета массивных полиуретановых шин исходя из величины относительной деформации упругого обода с учетом особенностей физико-механических свойств полиуретана и особенностей условий работы массивных шин.

21. В качестве основных критериев при проведении проверочного расчета массивной полиуретановой шины нами выбраны:

- тепловой расчет массивной шины при котором определяется температура нагрева обода, определяется коэффициент запаса по температуре и по результатам сравнения полученного коэффициента запаса и допускаемого, принимается решение о работоспособности спроектированной массивной шины;

- расчет на изнашивание упругого полиуретанового обода исходя из условий нагружения и определение долговечности массивной шины исходя из величины допускаемого износа упругого обода.

Таким образом, на основе современных научных достижений и методов проектирования деталей машин, получены научные знания о технологии изготовления эластомерно-металлических деталей, разработаны методики проектировочного и проверочного расчета для различных групп деталей машин с полиуретановым массивом.

Внедрение нового эластомерного материала позволило увеличить долговечность эластомерно-металлических деталей примерно на 30 %.

Дальнейшим развитием данного научного направления является углубленное изучение новых виброизоляционных эластомерных материалов и создание методик проектирования виброизоляторов нового поколения.

### Список литературы

1. Алепин, Е. А. Механизация погрузочно-разгрузочных работ средствами напольного электротранспорта / Е. А. Алепин. - Калининград: Книжное издательство, 1974. - 152 с. – Текст: непосредственный.

2. Бартенев, Г. М. Прочность и механизм разрушения полимеров / Г. М. Бартенев. - М.: Химия, 1984. - 279 с. - Текст: непосредственный.

3. Безъязычный, В. В. Основы технологии машиностроения / В. В. Безъязычный. - М.: Машиностроение, 2013. - 568 с. - Текст: непосредственный.

4. Бурцев, В. М. Технология машиностроения / М.: МГТУ им. Баумана, 2011. - 478 с. - Текст: непосредственный.

5. Вейбулл, В. Усталостные испытания и анализ их результатов / В. Вейбулл. - М.: Машиностроение, 1964. - 269 с. - Текст: непосредственный.

6. Вейц, В. Л. Управление параметрами зоны и траектории локальной метастабильности в обрабатываемом материале / В. Л. Вейц, Д. В. Васильков, В. В. Максаров. - Текст: непосредственный // Машиностроение и автоматизация производства. - 1999. - № 4. - С. 16 – 20.

7. Гарцман, В. И. Об определении коэффициента динамического ужесточения резин / В. И. Гарцман, И. А. Николаева. - Текст: непосредственный. // Механика полимеров. - 1982. - № 3. - С. 42 – 43.

8. Горелик, Б. М. Статистическая обработка результатов циклических усталостных испытаний резин / Б. М. Горелик, М. Н. Хотимский. - Текст: непосредственный // Механика полимеров. - 1969. - № 6. - С. 26 – 29.

9. Горохов, В. А. Основы технологии машиностроения и формализованный синтез технологических процессов / В. А. Горохов. - Ст. Оскол: ТНТ, 2012. - 1072 с. - Текст: непосредственный.

10. Гриневич, Г. П. Вилочные погрузчики / Г. П. Гриневич, И. И. Мачульский, Е. А. Алепин. - М.: Машиностроение, 1974. - 216 с. - Текст: непосредственный.

11. Гуськов, В.В. Многоцелевые гусеничные и колесные машины / В. В. Гуськов. - М.: НИЦ ИНФРА-М, 2012. - 543 с. - Текст: непосредственный.
12. Дементьев, Ю. Н. Электропривод типовых производственных механизмов / Ю. Н. Дементьев. - М.: Издательство Юрайт, 2019. - 403 с. - Текст: непосредственный.
13. Державец, Ю. А. Предотвращение автоколебаний при финишной обработке металло-эластомерных деталей / Ю. А. Державец, С. Н. Яковлев. - Текст: непосредственный // Проблемы машиноведения и машиностроения. - 2000. - № 7. - С. 27 – 32.
14. Ермолаев, В. В. Разработка технологических процессов и изготовления деталей машин / В. В. Ермолаев. - М.: Академия, 2015. - 356 с. - Текст: непосредственный.
15. Зазыкин, А. В. Разработка технологии восстановительного ремонта массивных шин для дорожно-строительной техники / А. В. Зазыкин, С. В. Репин [и др.]. - Текст: непосредственный. // Вестник гражданских инженеров. - 2018. - № 5 (70). - С. 160 - 167.
16. Зангеев, Б. И. Напряженно-деформированное состояние массивных шин: дис. ... канд. техн. наук: 02.05.02. / Зангеев Борис Иванович. - М. 1993. – 168 с.
17. Зоделава, Г. К. К вопросу влияния скорости деформации на механические характеристики пластических масс / Г. К. Зоделава [и др.]. - Текст: непосредственный. // Механика полимеров. - 1965. - № 2. - С. 76 – 81.
18. Зуев, Ю. С. Перспективные пути улучшения рабочих свойств эластичных материалов / Ю. С. Зуев. - Текст: непосредственный. // Каучук и резина. - 1997. - № 8. - С. 16 – 21.
19. Иванов, И. С. Технология машиностроения производства типовых деталей машин / И. С. Иванов. - М.: ИНФРА-М, 2014. - 258 с. - Текст: непосредственный.
20. Кислицин, А. М. Долговечность автомобильных шин в различных режимах движения / А. М. Кислицин. - Н. Новгород: Волго-Вятское книжное издательство, 1992. – 223 с. - Текст: непосредственный.

21. Кобаяши А. Обработка пластмасс резанием / А. Кобаяши. - М.: Машиностроение, 1974. – 204 с. - Текст: непосредственный.
22. Крыжановский, В. К. Пластмассовые детали технических устройств (выбор материала, конструирование, расчет) / В. К. Крыжановский, В. В. Бурлов. - СПб.: Научные основы и технологии, 2014. – 456 с. - Текст: непосредственный.
23. Лавендел, Э. Э. Расчет резинотехнических изделий / Э. Э. Лавендел. - М.: Машиностроение, 1976. – 232 с. - Текст: непосредственный.
24. Любартович, С. А. Реакционное формование полиуретанов / С. А. Любартович, Ю. Л. Морозов, О. Б. Третьяков. - М.: Химия, 1990. – 288 с. - Текст: непосредственный.
25. Мазурин, В. Л. Выбор критерия работоспособности полиуретанового амортизатора, работающего при динамическом нагружении / В. Л. Мазурин, А. В. Приемышев, С. Н. Яковлев. - Текст: непосредственный. // Вестник КузГТУ. - 2015. - № 3. - С. 61 - 67.
26. Мазурин, В. Л. Экспериментальная отработка режимов шлифования полиуретана высокопористыми абразивными кругами / В. Л. Мазурин, А. В. Приемышев, С. Н. Яковлев. - Текст: непосредственный. // Технология машиностроения. - 2016. - № 3. - С. 61 - 67.
27. Мазурин, В. Л. Об остаточной деформации конструкционных полиуретанов, работающих в режиме динамического нагружения / В. Л. Мазурин, А. В. Приемышев, С. Н. Яковлев. - Текст: непосредственный. // Вестник КузГТУ. - 2017. - № 2. - С. 109 - 114.
28. Мазурин, В. Л. Экспериментальное определение долговечности полиуретанового манжетного уплотнения / В. Л. Мазурин, С. Н. Яковлев. - Текст: непосредственный. // Вестник машиностроения. - 2019. - № 4. - С. 85 - 90.
29. Муллинз Л. Структура и механические свойства наполненных резин / Л. Муллинз - Текст: непосредственный. // Каучук и резина. - 1968. - № 7. - С. 18 – 24.
30. Новиков, В. Ю. Технология машиностроения / В. Ю. Новиков. - М.: Академия, - 2012. - 312 с. - Текст: непосредственный.

31. Олдырев, П. П. Определение усталостной долговечности пластмасс по температуре саморазогрева / П. П. Олдырев - Текст: непосредственный. // Механика полимеров. - 1967. - № 7. - С. 111 - 117.

32. Подколызина, Л. В. Экспериментальное определение модуля внутреннего трения полиуретановых эластомеров при знакопеременном изгибе с вращением / Л. В. Подколызина, А. А. Черныш, С. Н. Яковлев - Текст: непосредственный. // Вопросы материаловедения. - 2019. - № 2 (98). - С. 71 - 78.

33. Попов, В. Л. Механика контактного взаимодействия и физика трения / В. Л. Попов - М.: Физматлит, - 2013. – 485 с.- Текст: непосредственный.

34. Потураев, В. Н. Резиновые детали машин / В. Н. Потураев - М.: Машиностроение, - 1966. – 304 с. - Текст: непосредственный.

35. Потураев, В. Н., Термомеханика эластомерных элементов конструкций при циклическом нагружении / В. Н. Потураев, В. И. Дырда - Киев: Наукова думка, - 1987. – 288 с. - Текст: непосредственный.

36. Портнов С.В., Экспериментальное определение долговечности массивной полиуретановой шины / С. В. Портнов, Л. В. Подколызина, С. Н. Яковлев - Текст: непосредственный. // Трение и смазка в машинах и механизмах. - 2015. - № 7. - С. 44 - 47.

37. Портнов, С.В. Основные виды износа современных конструкционных полиуретанов / С. В. Портнов, Л. В. Подколызина, С. Н. Яковлев - Текст: непосредственный. // Сборка в машиностроении, приборостроении. - 2016. - № 12. - С. 40 - 44.

38. Райт П. Полиуретановые эластомеры / П. Райт - М.: Химия, - 1973. – 304 с. - Текст: непосредственный.

39. Ратнер, С. Б. Саморазогрев пластмасс при циклическом деформировании / С. Б. Ратнер, С. И. Коробов - Текст: непосредственный. // Механика полимеров. - 1965. - № 5. - С. 93 - 100.

40. Регель, В. Р. Разрушение и усталость полимеров / В.Р. Регель [и др.] - Текст: непосредственный. // Механика полимеров. - 1972. - № 2. - С. 597 – 611.



41. Резниковский, М. М. Механические испытания каучука и резины / М. М. Резниковский, А. И. Лукомская - М.: Химия, - 1968. – 489 с. - Текст: непосредственный.
42. Савосин, В.С. Массивные шины (конструкция, изготовление, эксплуатация) / В. С. Савосин, М. Л. Бограчев - М.: Химия, - 1981. – 112 с. - Текст: непосредственный.
43. Толстой, Д. М. Площадь фактического контакта при трении высокополимеров / Д. М. Толстой - Текст: непосредственный. // Доклады АН СССР. - 1953. - № 12. - С. 90 – 94.
44. Третьяков, О. Б. Трение и износ шин / О. Б. Третьяков, В. А. Гудков, В. Н. Тарновский - М.: Химия, - 1992. – 205 с. - Текст: непосредственный.
45. Черныш, А. А. Экспериментальное исследование динамического модуля полиуретановых эластомеров при знакопеременном изгибе с вращением / А. А. Черныш, С. Н. Яковлев - Текст: непосредственный. // Вестник КузГТУ. - 2018. - № 4. - С. 38 - 44.
46. Черныш, А. А. Экспериментальное исследование деформативности виброизоляционных полиуретановых эластомеров, применяемых в строительстве / А. А. Черныш, С. Н. Яковлев - Текст: непосредственный. // Вестник гражданских инженеров. - 2018. - № 4 (69). - С. 126 - 131.
47. Черныш, А. А. Экспериментальное исследование деформативности полиуретановых эластомеров, применяемых в судовых амортизаторах / А. А. Черныш, С. Н. Яковлев - Текст: непосредственный. // Вестник ГУМРФ имени адмирала С.О. Макарова. - 2019. - № 3(55). - С. 534 - 542.
48. Черныш, А. А. Экспериментальное исследование виброизоляционных свойств современных конструкционных полиуретанов / А. А. Черныш, С. Н. Яковлев - Текст: непосредственный. // Вопросы материаловедения. - 2019. - № 1 (97). - С. 120 - 127.
49. Чичинадзе, А. В. Трение, износ и смазка / А. В. Чичинадзе - М.: Машиностроение, - 2003. – 576 с.- Текст: непосредственный.

50. Яковлев, С. Н. Автоколебания упругого полиуретанового покрытия при полировании / С. Н. Яковлев - Текст: непосредственный. // Вестник машиностроения. - 2014. - № 2. - С. 61 - 63.

51. Яковлев, С. Н. Долговечность массивных полиуретановых шин / С. Н. Яковлев - Текст: непосредственный. // Вестник КузГТУ. - 2013. - № 4. - С. 84 - 87.

52. Яковлев, С. Н. Износ массивных полиуретановых шин при качении с проскальзыванием / С. Н. Яковлев - Текст: непосредственный. // Вопросы материаловедения. - 2014. - № 1. - С. 109 - 115.

53. Яковлев, С. Н. Надежность массивных полиуретановых шин / С. Н. Яковлев - Текст: непосредственный. // Трение и смазка в машинах и механизмах. - 2013. - № 9. - С. 7 - 11.

54. Яковлев, С. Н. О некоторых физических свойствах конструкционных полиуретанов / С. Н. Яковлев - Текст: непосредственный. // Известия СПбГТИ(ТУ). - 2013. - № 2(46). - С. 78 - 80.

55. Яковлев, С. Н. Основные современные конструкционные полиуретаны / С. Н. Яковлев - Текст: непосредственный. // Материаловедение. - 2013. - № 12. - С. 30 - 32.

56. Яковлев, С. Н. Предварительная, чистовая и финишная обработка полиуретанового покрытия деталей вращения / С. Н. Яковлев - Текст: непосредственный. // Вестник ИжГТУ. - 2013. - № 3. - С. 7 - 10.

57. Яковлев, С. Н. Расчет полиуретановых деталей, работающих на сжатие при статической нагрузке / С. Н. Яковлев - Текст: непосредственный. // Научно-технические ведомости СПбГПУ. - 2014. - № 1. - С. 137 - 142.

58. Яковлев, С. Н. Температура нагрева и внутреннее расслоение полиуретанового обода массивной шины / С. Н. Яковлев - Текст: непосредственный. // Вестник КузГТУ. - 2013. - № 6. - С. 98 - 102.

59. Яковлев, С. Н. Технология отливки деталей машин из полиуретана / С. Н. Яковлев - Текст: непосредственный. // Технология машиностроения. - 2013. - № 10. - С. 12 - 14.

60. Яковлев, С. Н. Экспериментальное определение интенсивности изнашивания полиуретана при скольжении по абразивной поверхности / С. Н. Яковлев - Текст: непосредственный. // Вопросы материаловедения. - 2013. - № 3. - С.55 - 63.

61. Яковлев, С. Н. Экспериментальное определение коэффициента трения качения массивных полиуретановых шин / С. Н. Яковлев - Текст: непосредственный. // Научно-технические ведомости СПбГПУ. - 2013. - № 3. - С. 223 - 229.

62. Яковлев, С. Н. Экспериментальное определение коэффициента трения скольжения полиуретана по абразивной поверхности / С. Н. Яковлев - Текст: непосредственный. // Вопросы материаловедения. - 2015. - № 2. - С.123 - 132.

63. Яковлев, С. Н. Коэффициент динамического ужесточения конструкционных полиуретанов / С. Н. Яковлев - Текст: непосредственный. // Вестник машиностроения. - 2016. - № 1. - С. 3 - 5.

64. Яковлев, С. Н. Экспериментальное определение предельной температуры конструкционных полиуретанов, работающих в условиях динамического нагружения / С. Н. Яковлев - Текст: непосредственный. // Вестник машиностроения. - 2017. - № 5. - С. 66 - 70.

65. Яковлев, С. Н. Экспериментальное определение износостойкости подшипников скольжения из полиуретана / С. Н. Яковлев - Текст: непосредственный. // Вестник машиностроения. - 2017. - № 7. - С. 55 - 59.

66. Яковлев, С. Н. Экспериментальное определение температуры во фрикционном контакте манжетного уплотнения и вала / С. Н. Яковлев - Текст: непосредственный. // Вестник машиностроения. - 2018. - № 12. - С. 43 - 47.

67. Яковлев, С. Н. Экспериментальное определение статической и силовой характеристики модернизированного пневмопривода / С.Н. Яковлев [и др.] - Текст: непосредственный. // СТИН. - 2020. - № 9. - С. 9 - 13.

68. Яковлев, С. Н. Проектирование и основы технологии деталей машин из полиуретана / С. Н. Яковлев - СПб.: Реноме, - 2013. - 176 с. - Текст: непосредственный.

69. Bakhtiyarov, S. I. Rheological studies of functional polyurethane composite: Part 1. Rheology of polyurethane composite, its compounds with and without solid additives (aluminum flakes) / S. I. Bakhtiyarov, J. S. Oxley. – Текст: непосредственный // Journal of Elastomers and Plastics. - 2018. - № 3. - P. 222 - 240.

70. Cai - Hong Lei. Thermoplastic vulcanizates based on compatibilized and silicone rubber blend / Cai - Hong Lei - Текст: непосредственный // Journal of Elastomers and Plastics. - 2012. - № 4. - P. 563 - 574.

71. Fisher, R. A. Statistical Methods for Research Workers (12 th Ed.) Edinburgh & London / R. A. Fisher. - Текст: непосредственный // Oliver and Boyd. - 1954. - №32. - P. 356 - 371.

72. Franssen, O. Die Erfolgsgeschichte der Siliconelastomere. Siliconelastomere/ O. Franssen, H. Bayerl. - Текст: непосредственный // Gummi. Fasern. Kunststoffe. - 2012. - № 7. - P. 462 - 470.

73. Hizera, K. Thermal properties of polyurethane elastomers from Soybean oil – based polyol with a different isocyanate index / K. Hizera, J. Ryszkowcka. - Текст: непосредственный // Journal of Elastomers and Plastics. - 2018. - № 2. - P. 157 - 174.

74. Janusz Datta. Influence of Glycols on the Glycolysis Process and the Structure and Properties of Polyurethane Elastomers / Janusz Datta. - Текст: непосредственный // Journal of Elastomers and Plastics. - 2011. - № 3. - P. 529 - 541.

75. Janusz Datta. Synthesis and Investigation of Glycolysates and Obtained Polyurethane Elastomers / Janusz Datta. - Текст: непосредственный // Journal of Elastomers and Plastics. - 2010. - № 2. - P. 117 - 127.

76. Jasin Kanbar. Development of multifunctional polyurethane Elastomers composites containing fullerene: Mechanical, damping, thermal and flammability Behaviors / Jasin Kanbar, Umit Tayfun. - Текст: непосредственный // Journal of Elastomers and Plastics. - 2019. - № 3. - P. 262 - 279.

77. Jong – Chan Chung. Control of the water compatibility and shape recovery of polyurethane using the graft polymerization of poly (ethylene glycol) methyl ether acrylate / Jong – Chan Chung, Ha Youn Kim, Jae Won Choi, Byoung Chul Chun. - Текст: непосредственный // Journal of Elastomers and Plastics. - 2020. - № 5. - P. 453 - 468.

78. Kahraman, H., Haberstroh E. Einfluss von aktiven Fullstoffen in Elastomeren auf den anisotropen Mullins-Effekt. Anisotroper Mullins-Effekt / H. Kahraman, E. Haberstroh. - Текст: непосредственный // Gummi. Fasern. Kunststoffe. - 2014. - № 5. - P. 296 - 298.

79. Kamila Mizera. Thermal properties of polyurethane Elastomers from Soybean oil-based polyol with a different isocyanate index / Kamila Mizera, Joanna Ruszkowska. - Текст: непосредственный // Journal of Elastomers and Plastics. - 2019. - № 2 . - P. 157 - 174.

80. Manuel Valero F. Polyurethane adhesive system from castor oil modified by a transesterification reaction / F. Manuel Valero. - Текст: непосредственный // Journal of Elastomers and Plastics. - 2012. - № 4. - P. 433 - 442.

81. Necmi Dusunceli. The effect of polyurethane and carnauba wax on the mechanical and physicochemical properties of acrylonitrile butadiene nitrile rubber coating working gloves / Necmi Dusunceli, Larehan Akyuz, Necmettin Sahin, Hatice Duru. - Текст: непосредственный // Journal of Elastomers and Plastics. - 2019. - № 1. - P. 36 - 51.

82. Neise, E. Optische Deformationsanalyse von Fahrzeugreifen. Dynamische Reifenanalyse / E. Neise, C. Zepp. - Текст: непосредственный // Gummi. Fasern. Kunststoffe. - 2013. - № 1. - P. 23 - 30.

83. Osswald, K. Aspekte der Alterung elastomerer Werkstoffe / K. Osswald, S. Reincke. - Текст: непосредственный // Gummi. Fasern. Kunststoffe. - 2017. - № 8. - P. 498 - 506.

84. Oxley, J.S. Rheological studies of functional polyurethane composite with solid additives: Part 2. Rheology of polyurethane composite with solid additives (calcium iodate particles and aluminum flakes) / J. S. Oxley, J. L. Smith. - Текст: непосредственный // Journal of Elastomers and Plastics. - 2018. - № 4. - P. 312 - 324.

85. Schafer, K. Investigation of the specific adhesion between polyurethane foams and thermoplastics to suited material selection in light weight structures / K. Schafer, S. Anders. - Текст: непосредственный // Journal of Elastomers and Plastics. - 2018. - № 8. - P. 720 - 736.

86. Schallmach, A. Rubber Chemistry and Technology / A. Schallmach - Текст: непосредственный // Engineer. - 1959. - №1. - P. 23 - 41.

87. Sheng Li. Effect of Elastomer on Flame Retardancy, Thermal Degradation, and Mechanical Properties of Intumescent Flame-Retardant Polyethylene / Sheng Li. - Текст: непосредственный // Journal of Elastomers and Plastics. - 2011. - №3. - P. 257 – 273.

88. Solota, S. Harteproofung an Hochleistungsprodukten aus Kunststoffen und Elastomeren / S. Solota. - Текст: непосредственный // Gummi. Fasern. Kunststoffe. - 2016. - № 7. - P. 26 - 31.

89. Stefan Oprea. Physical properties and the ability to disperse into different polar solvents of the new polyurethane-cellulose composites / Stefan Oprea, Violeta Otilia Potolinca, Veronica Oprea. - Текст: непосредственный // Journal of Elastomers and Plastics. - 2020. - № 6. - P. 548 - 572.

90. Yakovlev, S. N. Self-Oscillation of an Elastic Polyurethane Coating in Polishing/ S. N. Yakovlev. - Текст: непосредственный // Russian Engineering Research. - 2014. - № 5. - P. 295 - 298.

91. Yakovlev, S. N. Dynamic Hardening of Structural Polyurethanes / S. N. Yakovlev. - Текст: непосредственный // Russian Engineering Research. - 2016. - № 4. - P. 255 - 257.

92. Yakovlev, S. N. Vibroisolating properties of polyurethane elastomeric materials, used in construction / S. N. Yakovlev, V. L. Mazurin. - Текст: непосредственный // Magazine of Civil Engineering. - 2017. - № 6(74). - P. 53 - 60.

93. Yakovlev, S.N. An Experimental Study of the Wear of the Radial Shaft Seals of Rotary / S. N. Yakovlev. - Текст: непосредственный // Journal of Machinery Manufacture and Reliability. - 2019. - № 2. - P. 179 - 183.

94. Yakovlev, S. N. Contact Temperature of a Cuft and a Rotating Shaft / S. N. Yakovlev. - Текст: непосредственный // Russian Engineering Research. - 2019. - № 4. - P. 279 - 282.

95. Yakovlev, S. N. Experimental Studies on the Friction Parameters of Polyurethane Elastomers Used for Gup-Type Sealing / S. N. Yakovlev. - Текст:

непосредственный // Journal of Machinery Manufacture and Reliability. - 2020. - № 12. - P. 1083 - 1087.

96. Yulianna F. Titova. Calculation of the frequency of own ascillations of polyurethane chock absorbers used in shipbuilding / Yulianna F. Titova., Stanislav N. Yakovlev. - Текст: непосредственный // Marine intellectual technologies. - 2020. - № 4. - P. 152 - 157.

97. Yakovlev, S. N. Characteristics of a Modernized Membrane Pneumatic Drive / S. N. Yakovlev, A. Y. Kolesnikova, O. V. Kochneva, [ и др.]. – Текст: непосредственный // Russian Engineering Research. - 2021. - № 2 (41). - P. 153 - 156.

98. Yakovlev, S. N. Heating of Polyurethane Shock Absorber in Cyclic Loading / - Текст: непосредственный // Russian Engineering Research. - 2021. - № 3 (41). - P. 194 - 197.

99. Yakovlev, S. N. Static Characteristics of a Membrane Pneumatic Actuator / S. N. Yakovlev, Yu. F. Titova, A. L. Melkonyan. – Текст: непосредственный // Russian Engineering Research. - 2022. - № 4 (42). - P. 391 - 394.

# Приложение 1. Акты внедрения результатов диссертационной работы



Группа компаний «ОМП»

199155, Санкт-Петербург, ул. Уральская, д. 21, литер Н.

ИНН 7801589207 ОГРН 1127847624222

тел: (812) 389-41-81 сайт: [www.o-m-p.ru](http://www.o-m-p.ru)

«УТВЕРЖДАЮ»

Генеральный директор

ООО «ОМП»

С.А. Степанов



23.01.2018г.

## АКТ

**внедрения результатов диссертационной работы к.т.н., доцента  
Яковлева С.Н., представленной на соискание ученой степени доктора  
технических наук**

Методика проектировочного и проверочного расчетов массивных шин с упругим полиуретановым ободом, приведенная в диссертационной работе «Выбор критериев работоспособности деталей машин из полиуретана» постоянно используется в производственной практике ООО «ОМП» при изготовлении транспортных платформ и сварочных роликовых вращателей, в частности для ООО «Ростоввагонпром» в соответствии с договором №236/15 от 20.08.15 и АО «Адмиралтейские верфи» в соответствии с договором №178/16 от 03.03.16.

Рекомендации, данные Яковлевым С. Н. в своей диссертационной работе использовались при:

- проектировании массивных полиуретановых шин;
- отработке температурно-временных параметров изготовления массивных шин;



**Группа компаний "ОМП"**

199155, Санкт-Петербург, ул. Уральская, д. 21, литер Н.

ИНН 7801589207 ОГРН 1127847624222

тел: (812) 389-41-81 сайт: [www.o-m-p.ru](http://www.o-m-p.ru)

- определении радиальной осадки;
- опытным определении коэффициента трения качения массивной шины в контакте с жестким основанием;

Использование научных результатов, полученных в ходе диссертационного исследования позволило:

- спроектировать массивные полиуретановые шины оптимальной конструкции, при этом экономия эластомерного материала составила до 20 %;
- снизить на 25 % коэффициент трения качения полиуретановых массивных шин по сравнению с резиновыми;
- повысить грузоподъемность массивной полиуретановой шины по сравнению с резиновой на 60 % при сохранении габаритных размеров.

По результатам испытаний отмечено хорошее совпадение расчетных данных и экспериментальных замеров. Расхождение в расчетах и экспериментальных замерах составляет не более 6...8 %.

Главный конструктор ООО «ОМП»



А.В. Прохоренко



**П О Л И    О Б Щ Е С Т В О    «Поли С.П.Б.»**

С О Г Р А Н И Ч Е Н Н О Й    О Т В Е Т С Т В Е Н Н О С Т Ь Ю

НАУЧНО-ПРОИЗВОДСТВЕННАЯ ФИРМА



« УТВЕРЖДАЮ »

Генеральный директор

ООО «Поли С.П.Б.»

А.И.Турков



**АКТ**

**внедрения результатов диссертационной работы к.т.н., доцента  
Яковлева С.Н., представленной на соискание ученой степени доктора  
технических наук**

Методика проектировочного и проверочного расчетов амортизаторов, работающих на сжатие и сдвиг в условиях динамического нагружения, представленная в диссертационной работе Яковлева С. Н. «Выбор критерия работоспособности деталей машин из полиуретана» постоянно используется в производственной практике ООО «Поли С.П.Б.» при проектировании и изготовлении амортизаторов, в частности для ОАО «Калужский завод путевых машин и гидроприводов» в соответствии с договором № 9 от 11.09.2009г. и дальнейшей его пролангацией.

В соответствии с договором ООО «Поли С.П.Б.» изготовило и испытало с последующим внедрением в серийное производство виброизоляторов буксового подвешивания для путевых машин.

По результатам испытаний отмечено хорошее совпадение расчетных данных и экспериментальных замеров осадки виброизоляторов. Расхождение в расчетах и экспериментальных замерах составило не более 5 %.

Использование научных результатов, полученных в ходе диссертационного исследования Яковлева С.Н. позволило:

- создать отечественный виброизолятор для нужд завода;
- производить конкурентноспособную продукцию названному заводу.

По результатам испытаний принято решение о запуске спроектированных виброизоляторов в серийное производство.

Начальник производства ООО «Поли С.П.Б.»



Н.Д.Воронин