

**УТВЕРЖДАЮ**

генеральный директор

АО «ЦНИИ «Буревестник»,

д.т.н., профессор, академик РАН

Г.И. Закаменных

2018 г.

### **Отзыв на автореферат диссертации**

Сидорова Михаила Игоревича «Повышение живучести артиллерийских систем на основе моделирования и управления трибохимическими процессами изнашивания», представленной на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности: 05.02.04 – «Трение и износ в машинах».

Диссертационная работа Сидорова Михаила Игоревича «Повышение живучести артиллерийских систем на основе моделирования и управления трибохимическими процессами изнашивания» посвящена созданию научно-технического задела, теоретическому обоснованию и практической апробации методологии решения задач внутренней баллистики артиллерийских систем, основанной на повышении износостойкости материалов, работающих в высоких потоках энергии.

Актуальность работы состоит в повышении живучести современных перспективных артиллерийских систем, что является одним из основных критериев их развития. Важность работы подтверждается внедрением ее практических результатов – существенно увеличена живучесть стволов артиллерийских систем, о чем свидетельствуют результаты полигонных испытаний. В этой связи диссертационная работа представляет не только большой теоре-

тический, но и практический интерес для специалистов, работающих в области проектирования и испытаний вооружения.

Диссертационная работа содержит результаты расчетных и экспериментальных исследований методов повышения живучести артиллерийских систем на основе моделирования и управления трибохимическими процессами изнашивания.

В работе проведен анализ физической модели разрушения поверхностного слоя канала ствола (артиллерийского, стрелкового оружия), показавший, что в энергетическом отношении этот слой подвержен механическим и тепловым нагрузкам, характеризуемым высокими значениями энергии и интенсивности воздействия с резкой сменой полярности за один выстрел (смена напряжений растяжения и сжатия, реализующихся в узком поверхностном слое).

Автором выполнена апробация методов трибохимической кинетики для построения кинетической характеристики внешнего трения применительно к артиллерийским системам. Разработанные модели трибохимической кинетики, описывающие зависимости коэффициента трения от скорости скольжения, фиксируемые в эксперименте, позволяют использовать эти характеристики трения для расчетных методов внутрибаллистических испытаний и составляют научно-техническую основу для конструкторов артиллерийских стволов. Методы механохимической кинетики могут использоваться для построения кривых распределения накопления повреждений в конструкционных материалах при испытаниях артиллерийских стволов с различными режимами нагружения. Предложенные модели и полученные зависимости с определением остаточного ресурса и показателей износа и разрушений представляют собой научно-техническую основу развития расчетных методов проектирования артиллерийских стволов. Разработанные экспериментальные методы исследования поверхности канала ствола, с целью оценки его энергетического состояния и состояния износа, являются основой развития экспериментальных методов внутрибаллистических испытаний.

Автором экспериментально подтверждено, что кинетический подход, в котором процесс разрушения поверхностного слоя при трении, представляется в виде ассоциации точечных, линейных, поверхностных и объемных дефектов, позволяет строить функции распределения, хорошо согласующиеся с эмпирическими распределениями Вейбулла и Рэля. Расчетные значения кинетических констант позволяют дать интерпретацию развития процесса разрушения по нескольким сценариям накопления повреждений в материале. Анализ кинетических распределений показал, что полученные зависимости могут быть использованы для расчета основных характеристик теории надежности: функций распределения повреждений, функций надежности, интенсивности потока накопления повреждений, ресурса и остаточного ресурса.

Экспериментальная проверка математической модели изменения структуры квазиоднородного конструкционного материала, вследствие зарождения и накопления повреждений и их «расслоения» на фазы показала, что методы термодинамической теории неравновесных фазовых переходов качественно и с высокой достоверностью описывают явление разрушения, относящегося к классу критических.

Автором практически обосновано, что для отображения энергетического состояния поверхностного слоя канала ствола, наиболее адекватной является математическая модель теории неравновесных фазовых переходов, в которой кроме традиционных переменных состояния, используются независимые «градиентные» переменные (термодинамический формализм теории Кана-Хилларда).

В работе предложены математические модели разрушения конструкционного материала, в которых принято, что начальная стадия процесса разрушения – зарождения и накопления повреждений, реализуется в форме «спинодального» распада с формированием «надмолекулярной» структуры, т. е. процесса, имеющего аналогию в теории критической опалесценции Дебая. Начальные стадии процесса накопления повреждений и разрушения в форме «спинодального» распада дают структуры с размытыми «межфазными» грани-

цами. Классические модели механики разрушения, предполагающие наличие трещины в качестве исходного состояния, не позволяют отследить ранние стадиях зарождения и развития процесса разрушения.

Выполненные автором исследования подтвердили, что структуры повреждений материала канала ствола подобны «спинодальным» структурам, формирующимся при кристаллизации сплавов. Обосновано использование этого подобия в качестве характеристики энергетического состояния канала ствола при фиксированном настреле. Предложенная математическая модель процесса разрушения конструкционного материала как неравновесного фазового перехода может применяться для оценки энергетического состояния материала ствола как в поверхностном слое, так и в объеме.

Разработанные математические модели трибохимической кинетики были использованы в качестве составной части программного обеспечения для решения задач внутренней баллистики артиллерийских стволов.

Наиболее важным практическим достижением работы является то, что автором разработаны и предложены:

- технологические методы защиты поверхности материалов деталей от разрушения, основанные на снижении роста и концентрации дефектов в поверхностном слое детали при трении;
- технологии регулирования интенсивности процессов разрушения металла, путем формирования на его поверхности защитного барьера при изготовлении детали и в процессе ее эксплуатации.

Результаты внедрения диссертационной работы (обработка ствола и ведущих устройств снарядов металлоплакирующим противоизносным составом) показали повышение живучести штатных артиллерийских стволов без защитного покрытия более чем в 2 раза.

Основные научные результаты диссертации прошли необходимую апробацию и публикацию. Достоверность полученных результатов подтверждена сравнением полученных теоретических зависимостей с большим количеством экспериментальных данных.

В качестве замечаний необходимо отметить следующее:

1. На современном этапе наибольшую проблему представляет обеспечение живучести артиллерийских систем с дульной энергией до 30 МДж. Это связано с повышением динамичности нагружения в системе «ствол-снаряд» в условиях увеличения давления пороховых газов до 900 МПа, применения высокоэнергетических порохов с температурой горения  $\sim 3500$  К и повышения мгновенной температуры поверхности канала до  $1800$  °С. Результаты натурных испытаний орудий в таких условиях позволяют считать целесообразным дополнение моделей износа и разрушения учетом ударного воздействия ведущих устройств при движении снаряда по непрямолинейному стволу и радиальных осесимметричных колебаний ствола от движущегося фронта давления газов, особенно в дульной части.

2. Рассмотренная в диссертации обработка канала ствола и ведущих устройств снаряда металлоплакирующими составами позволяет повысить живучесть ствола пушки 2А46М вдвое по сравнению с исходным состоянием ствола при применении БПС ЗБМ42. Примерно такой же результат дает защитное хромовое гальваническое покрытие. Однако требуемый уровень живучести в вышеприведенных условиях должен в 2 – 3 раза превышать достигнутый на хромовом защитном покрытии. В мировой артиллерийской практике для орудий среднего калибра это достигается применением вакуумной магнетронной технологии нанесения тугоплавкого многофункционального защитного покрытия. Однако она сложна, трудоемка и требует больших временных затрат. В этой связи, считаем целесообразным рассмотреть возможность применения износостойких составов, имеющих преимущество в простоте нанесения.

Указанные замечания не снижают ценности научных результатов, полученных в ходе выполнения работы, и её практической значимости.

## **Заключение**

Диссертационная работа Сидорова М.И. представляет собой законченную научную работу, выполненную на высоком профессиональном уровне,

соответствует паспорту специальности 05.02.04 – «Трение и износ в машинах» и характеризует её автора как сформировавшегося учёного, способного самостоятельно решать сложные научные задачи. Автореферат диссертации соответствует требованиям Положения о присуждении ученых степеней, а диссертант – Сидоров Михаил Игоревич, заслуживает присуждения ученой степени доктора технических наук по специальности 05.02.04 – «Трение и износ в машинах».

Начальник отдела, к.т.н., доцент

В.В. Чернов

Главный специалист

В.И. Рудый

Подписи удостоверяю

Ученый секретарь, к.х.н., доцент

Д.В. Белов

Чернов Вадим Валентинович, к.т.н., доцент, ~~начальник~~ <sup>начальник</sup> научно-исследовательского отдела, Акционерное общество «Центральный научно-исследовательский институт «Буревестник», 603950, Россия, Нижний Новгород, Сормовское шоссе, 1а. Тел. +7 (831) 241-12-42, e-mail: [mail@burevestnik.com](mailto:mail@burevestnik.com).

Рудый Валерий Иванович, главный специалист научно-исследовательского отдела, Акционерное общество «Центральный научно-исследовательский институт «Буревестник», 603950, Россия, Нижний Новгород, Сормовское шоссе, 1а. Тел. +7 (831) 241-12-42, e-mail: [mail@burevestnik.com](mailto:mail@burevestnik.com).