

ОТЗЫВ

Официального оппонента Медеяева Игоря Алексеевича на диссертационную работу Сидорова Михаила Игоревича **«Повышение живучести артиллерийских систем на основе моделирования и управления трибохимическими процессами изнашивания»**, представленную на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.02.04 – «Трение и износ в машинах».

1. Актуальность темы.

Диссертационная работа Сидорова М.И. посвящена созданию научно-технического задела в области теоретических основ управления процессами трения и изнашивания и разработке перспективных методов полигонных испытаний артиллерийских стволов на живучесть.

Живучесть ствола - параметр ствольной системы, характеризующий сколько выстрелов можно произвести из данного артиллерийского ствола пока начальная (дульная) скорость снаряда не уменьшится на величину 10-15%. Живучесть ствола зависит от интенсивности износа канала артиллерийского ствола, то есть от интенсивности протекающих в системе «пороховой заряд — снаряд — ствол» механических, термодинамических и химических взаимодействий. Для современных артиллерийских орудий признаком достижения стволом предела живучести служит систематическое срезание ведущих поясков снарядов, вызванное изнашиванием и разрушением поверхности ствола. Этим обуславливается резкое ухудшение кучности стрельбы и непрогнозируемый полет снарядов, приводящий к появлению траекторных разрывов и отказам действия снарядов у цели.

В современных условиях конкуренция в разработке и производстве новой техники требует организации максимально быстрого ее проектирования, испытаний и постановки на производство. Это заставляет разработчиков переходить к сокращению объема натурального эксперимента и

испытаний, заменяя его вычислительным. Актуальность такой стратегии обусловлена тем, что основные концепции новой техники хорошо известны конкурирующим сторонам. Эта стратегия диктует необходимость постоянной модернизации методического обеспечения полигонных испытаний. Тенденции к увеличению количества огневых задач артиллерии, использование высокоэнергетичных порохов с повышенным эрозионным воздействием, ужесточение режимов стрельбы и условий эксплуатации артиллерийских установок приводят к необходимости совершенствования методов и средств контроля состояния артиллерийских стволов. Требования к росту мощности заряда, скорости боеприпаса, скорострельности и ряду других характеристик заставляют критически относиться к имеющейся методической базе полигонных испытаний.

Исходя из этого, актуальность темы исследований и ее своевременность не вызывает сомнения.

Значимость результатов диссертации для науки и практики и возможные конкретные пути их использования.

Используемые разработчиками для расчета износа и живучести стволов формулы, являются эмпирическими, суммирующими экспериментальные результаты испытаний образцов вооружения. Это заставляет испытания новых образцов (стволов или снарядов) проводить в более широком масштабе и требует больших материальных и временных затрат. Поэтому в настоящее время остро встала необходимость разработки теоретических основ тех методов, которые ранее базировались на эмпирических зависимостях. Прогресс современной вычислительной техники позволяет решать поставленные задачи, однако для этого требуется определенный научно-технический задел и, прежде всего, в области моделирования и теории процессов изнашивания материалов артиллерийских стволов.

Целью диссертационной работы является создание научно-технического задела, теоретическое обоснование и практическая апробация

методологии решения задач внутренней баллистики артиллерийских систем основанной на повышении износостойкости материалов, работающих в высоких потоках энергии.

Поставленная соискателем учёной степени цель достигалась решением комплекса задач в следующих направлениях:

- анализ современных методов оценки живучести артиллерийских стволов. Постановка задач исследований;

- мониторинг и апробация (валидация по экспериментальным данным) математических моделей трибохимической кинетики внешнего трения и фрикционных автоколебаний;

- мониторинг и апробация (валидация по экспериментальным данным) математических моделей механохимической кинетики накопления повреждений и изнашивания;

- разработка математической термодинамической модели разрушения материалов, как неравновесного фазового перехода, происходящего в системах с большими запасами избыточной энергии и значений градиентов;

- адаптация математической модели разрушения к решению задач оценки энергетического состояния материала ствола (в объеме и поверхностном слое) путем использования программ распознавания образов, позволяющих по сопоставлению экспериментальных и теоретических картин (получаемых в вычислительном эксперименте) давать заключение о структурном состоянии материала ствола и его остаточном ресурсе;

- разработка методик и получение экспериментальных данных по накоплению повреждений в материале ствола (в объеме и в поверхностном слое), служащих исходными данными для валидации математических моделей разрушения в форме неравновесного фазового перехода;

- оценка технологических методов повышения износостойкости и живучести артиллерийских стволов (анализ стратегий использования материалов и антифрикционных противоизносных покрытий);

- разработка комплекса технологических и эксплуатационных мероприятий по управлению процессами, обеспечивающими снижение изнашивания материалов артиллерийских систем.

Научная новизна диссертационного исследования состоит в том, что автором созданы научные основы обеспечения живучести артиллерийских систем на основе решения сопряженных задач повышения износостойкости материалов с использованием:

- разработанных и верифицированных моделей механохимической кинетики накопления повреждений и изнашивания;

- разработанных и верифицированных моделей трибохимической кинетики внешнего трения;

- разработанных и верифицированных моделей теории неравновесных фазовых переходов для оценки энергетического состояния материала ствола и параметров его работоспособности.

Основными положениями работы, выносимыми соискателем ученой степени на защиту, являются:

- результаты верификации моделей, валидации результатов испытаний и полученные зависимости трибохимической кинетики, используемые для решения задач повышения износостойкости материалов артиллерийских систем;

- результаты верификации моделей, валидации результатов испытаний и полученные зависимости процессов механохимической кинетики накопления повреждений и разрушения конструкционных материалов используемые для оценки живучести (ресурса, остаточного ресурса) артиллерийских стволов;

- модели процессов разрушения как неравновесного фазового перехода, используемые для оценки энергетического и структурного состояния конструкционного материала ствола (в поверхностном слое и в объеме);

- технологические мероприятия, обеспечивающие повышение износостойкости материалов и живучести артиллерийских систем.

Степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций, их достоверность и новизна.

Достоверность полученных Сидоровым М.И. результатов обеспечивается качественным и количественным согласием теоретических моделей, результатами верификации математических моделей и валидации результатов на большом объеме экспериментальных данных.

Практическая значимость диссертационной работы состоит в том, что результаты теоретических исследований в форме математических моделей трибохимической кинетики внешнего трения, механохимической кинетики накопления повреждений и разрушения конструкционных материалов, теории неравновесных фазовых переходов в приложении к задачам о разрушении материала ствола (в поверхностном слое и в объеме) являются научно-техническим заделом для развития теоретических основ и моделирования полигонных испытаний артиллерийских стволов. Автором разработаны:

- новые принципы защиты поверхности стальных деталей от разрушения, основанные на снижении концентрации диффузионноактивного водорода в поверхностном слое детали;

- технологии регулирования интенсивности процессов разрушения металла путем формирования на его поверхности защитного барьера при изготовлении детали и в процессе ее эксплуатации;

- используются в промышленности составы смазочных, обкаточных и смазочно-охлаждающих жидкостей, формирующих плакирующий защитный слой на поверхности детали;

- внедрена в промышленности методология регулирования величины износа высоконагруженных узлов технических систем, основанная на контроле содержания в металлах диффузионноактивного водорода и

обеспечения эффективной защиты от наводороживания поверхностных слоев деталей технологиями металлоплакирования.

Наиболее весомым аргументом в пользу важности и завершенности полученных диссертационных результатов, их научной новизны является факт, что они отмечены премией Правительства РФ в области науки и техники за научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы, завершившиеся созданием и широким применением в производстве принципиально новых технологий, техники, оборудования и материалов.

Личное участие автора заключалось в постановке и решении задач трибохимической кинетики внешнего трения, механохимической кинетики накопления повреждений и разрушения конструкционного материала, теории разрушения материала канала артиллерийского ствола в форме неравновесного фазового перехода в приложении к задачам внутренней баллистики и повышению информационной обеспеченности полигонных испытаний артиллерийских стволов на живучесть. Автором теоретически обоснован методический подход, позволяющий значительно повысить информативность полигонных испытаний артиллерийских стволов на живучесть, при одновременном сокращении их объема и являющийся научно-техническим заделом баллистических испытаний. Им обоснованы, разработаны и внедрены технологии повышения износостойкости тяжело нагруженных узлов трения и повышения живучести технических систем современного вооружения и военной техники. Каждое положение, разработанное автором и выносимое на защиту, отличается новизной.

2. Оценка содержания диссертации.

Материалы диссертации обладают логически обоснованной структурой и хорошо проиллюстрированы. Стиль изложения не вызывает затруднений в понимании научной новизны, теоретической и практической значимости работы. В диссертации корректно сформулированы цель и задачи, правильно

определены предмет и объект исследования.

Обоснованность и достоверность полученных в диссертации научных и результатов обеспечивается корректностью постановки научной задачи исследований и принятых допущений, использованием при решении задачи апробированного математического аппарата и подтверждается результатами натурных испытаний.

Полнота, целостность, логическая структура, качество оформления и лаконичность изложения материалов диссертации свидетельствуют о ее завершенности.

Основными результатами диссертационной работы являются:

- созданные физические модели разрушения поверхностного слоя канала ствола (артиллерийского, стрелкового) показали, 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);

- 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-технический задел САПР артиллерийских стволов;

- выполнена апробация методов механохимической кинетики для построения кривых распределения накопления повреждений в конструкционных материалах при испытаниях артиллерийских стволов в различных режимах нагружения. Разработанные модели и полученные зависимости с определением остаточного ресурса и показателей износа и

разрушения представляют собой научно-технический задел развития расчетных методов внутрибаллистических испытаний и САПР артиллерийских стволов;

- выполнены мониторинг и апробация методов обобщенной теории неравновесных фазовых переходов для решения задач повышения информативности полигонных испытаний артиллерийских стволов. Разработаны теоретические основы экспериментальных методов исследования поверхности канала ствола с целью оценки его энергетического состояния и состояния износа. Разработанные модели являются основой научно-технического задела развития экспериментальных методов внутрибаллистических испытаний артиллерийских стволов;

- обосновано результатами верификации разработанных моделей, что методы трибохимической кинетики позволяют описывать сложные режимы трения со схватыванием и заеданием как фрикционные автоколебания. Разработана и верифицирована математическая модель фрикционных автоколебаний, построенная в соответствии с «примером Ван-дер-Поля». Функция, фиксирующая зависимость силы трения от скорости скольжения, задается в форме кинетического уравнения адгезионного схватывания как топохимической кинетики образования и разрушения «мостиков сваривания» на пятнах фрикционного контакта;

- подтверждено исследованиями, 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 Рэлея. Апробация показала, что 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;

- разработана и прошла апробацию в вычислительном эксперименте математическая модель изменения структуры квазиоднородного конструкционного материала вследствие зарождения и накопления повреждений и их «расслоения» на фазы. Апробация показала, что методы термодинамической теории неравновесных фазовых переходов качественно и с высокой достоверностью описывают явление разрушения, относящегося к классу критических;

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

- разработаны 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» границами. Классические модели механики разрушения, в качестве исходного состояния предполагающие наличие трещины, не позволяют отобразить информацию на ранних стадиях зарождения и развития процесса разрушения;

- экспериментально подтверждено, что структуры повреждений материала канала ствола подобны «спинодальным» структурам,

формирующимся при кристаллизации сплавов. Обосновано использование этого подобия в качестве аналогичной характеристики энергетического состояния канала ствола при фиксированном настреле. Разработанная и апробированная математическая модель процесса разрушения конструкционного материала как неравновесного фазового перехода является научно-техническим заданием методики оценки энергетического состояния материала ствола (у поверхности и в объеме);

- разработанные математические модели трибохимической кинетики апробированы в качестве составной части программного обеспечения для решения задач внутренней баллистики артиллерийских стволов. Вычислительный эксперимент, проводимый с помощью программного обеспечения существенно снижает объем натурных полигонных испытаний в рамках решения задач проектирования артиллерийских стволов и зарядов с одновременным повышением информативности получаемых результатов;

- разработаны технологические методы защиты поверхности материалов деталей от разрушения, основанные на снижении роста и концентрации дефектов в поверхностном слое детали при трении. Разработаны технологии регулирования интенсивности процессов разрушения металла путем формирования на его поверхности защитного барьера при изготовлении детали и в процессе ее эксплуатации. Результаты внедрения и полигонных испытаний технологий повышения износостойкости материалов стволов показали повышение живучести и остаточного ресурса стволов до 2,4 раз. Технологии внедрены на предприятиях различных отраслей промышленности.

Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, выводов, списка литературы и 5 приложений. Основное содержание изложено на 321 страницах и включает 288 страниц машинописного текста в т.ч. 113 рисунков, 15 таблиц и список литературы из 340 наименований, и приложения на 147 страницах, включающее 103 рисунка и 30 таблиц.

К замечаниям и недостаткам работы можно отнести следующее:

1. Не приведены технические характеристики использовавшейся при проведении экспериментов контрольно-измерительной аппаратуры, что затрудняет оценку уровня сходимости полученных автором аналитических и экспериментальных результатов исследований.

2. Требуется уточнение при каком соотношении скорости перемещения, энергии и скорости топохимической реакции и энергии на пятнах контакта образуются зародыши, растут и разрушаются ядра схватывания?

3. Не раскрыто в явном виде управление трибохимическими процессами изнашивания. Каким образом это выполняется?

4. Не ясно из изложенного материала: как определить какая часть механической энергии превращается в поверхностную энергию дефектов?

5. Нет пояснения, в чем причина автоколебаний при трении пояска снаряда - ствола. Связано это с положительной разницей между силами трения покоя и скольжения или падающей скоростной зависимости силы трения? В чем причина вибрации ствола?

6. Имеются отдельные редакционные замечания по оформлению и стилистике работы.

В целом эти замечания не снижают научной значимости, теоретической и практической ценности исследования и полученных в нем результатов.

Научная задача диссертационного исследования, состоявшая в создании научно-технического задела в области теоретических основ управления процессами трения и изнашивания и разработке перспективных методов полигонных испытаний артиллерийских стволов на живучесть, решена.

3. Публикации основных результатов диссертации.

Основные положения и наиболее важные научные и практические результаты диссертационной работы прошли широкую апробацию: докладывались и обсуждались на более, чем 10 международных конференциях. Основное содержание работы опубликовано в 78 научных трудах, из них 17 статей, в изданиях, рекомендованных ВАК, 4 публикации в изданиях, включенных в международную реферативную базу Scopus, 2-е монографиях, получено 14 патентов на изобретение и 4 положительных решения на выдачу патента.

4. Соответствие содержания автореферата основным идеям и выводам диссертации. Качество оформления автореферата

Автореферат отражает основное содержание диссертации, стиль изложения способствует пониманию диссертационной работы и позволяет объективно оценить результаты исследования. Материал оформлен в соответствии с установленными требованиями, способствует пониманию степени новизны и практической значимости результатов исследования.

5. Заключение о соответствии диссертации требованиям Положения о присуждении учёных степеней.

1. Диссертация Сидорова М.И. является законченной научно-квалификационной работой, в которой изложены научно обоснованные технические и технологические решения, направленные на повышение живучести артиллерийских систем на основе моделирования и управления трибохимическими процессами изнашивания.

Диссертационная работа удовлетворяет всем требованиям, предъявляемым ВАК РФ, раскрывает содержание работы и соответствует ГОСТ Р 7.0.11-2011 «Диссертация и автореферат диссертации. Структура и правила оформления».

2. Диссертация выполнена на актуальную тему, обладает научной новизной и важной практической значимостью, соответствует паспорту

специальности 05.02.04 – «Трение и износ в машинах» и удовлетворяет требованиям пункта 9 Положения о присуждении ученых степеней, утвержденного Постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. N 842, предъявляемым к докторским диссертациям, в которой на основании выполненных автором исследований разработаны теоретические положения, совокупность которых можно квалифицировать как научное достижение, а ее автор, Сидоров Михаил Игоревич, заслуживает присуждения ему ученой степени доктора технических наук по специальности 05.02.04 – «Трение и износ в машинах».

Официальный оппонент

Профессор кафедры «Материально-технического обеспечения РВСН» Федерального государственного казенного военного образовательного учреждения высшего образования «Военная академия Ракетных войск стратегического назначения имени Петра Великого» Министерства обороны Российской Федерации, доктор технических наук

Меделяев Игорь Алексеевич

«22» октября 2018 г.

143900, Московская область, г. Балашиха, ул. Карбышева, 8
8 (926) -650-68-83; medd_ia@mail.ru

Подпись профессора кафедры «Материально-технического обеспечения РВСН», доктора технических наук Меделяева И.А. подтверждаю.
«22» октября 2018 г.

Начальник отдела кадров
подполковник М. Журкин