

На правах рукописи

Гриценко Борис Петрович

**ДЕФОРМАЦИЯ И РАЗРУШЕНИЕ МОДИФИЦИРОВАННЫХ  
ИОННЫМИ ПУЧКАМИ МАТЕРИАЛОВ ПРИ ТРЕНИИ.**

Специальность 01.04.07 – физика конденсированного состояния

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

доктора технических наук

Томск – 2007

Работа выполнена в Институте физики прочности и материаловедения  
СО РАН и Томском политехническом университете

Научный консультант: заслуженный деятель науки и техники  
Российской Федерации, доктор физико-  
математических наук, профессор  
Лисицын Виктор Михайлович

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук,  
профессор Кривобоков Валерий Павло-  
вич;

доктор технических наук, профессор  
Батаев Анатолий Андреевич;

доктор физико-математических наук,  
доцент Иванов Юрий Федорович

Ведущая организация: Институт машиноведения УрО РАН

Защита диссертации состоится “ 29 ” мая 2007 г. в 15 часов на засе-  
дании диссертационного совета Д 212.269.02 при Томском политехниче-  
ском университете по адресу: 634050, Г. Томск, проспект Ленина 30.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Томского поли-  
технического университета.

Автореферат разослан “ \_\_\_\_ ” \_\_\_\_\_ 2007 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,  
доктор физико-математических наук

Коровкин М.В.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы.** В настоящее время с трением связана одна из острейших проблем машиностроения - износ деталей машин и механизмов. Подавляющее количество машин (85 – 90 %) выходят из строя из-за износа деталей. Ремонт и техническое обслуживание машин в несколько раз превышает их стоимость. Изношенные двигатели внутреннего сгорания значительно сильнее загрязняют атмосферу отработавшими газами, чем новые. Поэтому повышение износостойкости трибологических пар является актуальной задачей физики конденсированного состояния. Существует много вариантов решения проблемы повышения износостойкостей, - таких как применение износостойких материалов, различные конструкционные решения, нанесение покрытий (гальванических, ионно-плазменных и др.), модификация поверхностей материалов путем цементации, борирования, электроискровой обработки, обработки лазерным излучением, ионными и электронными пучками и многие др. Однако остается много нерешенных задач из-за слишком широкого круга существующих трибосистем из-за его постоянного расширения, все возрастающих требований по повышению сроков службы и надежности изделий.

Исследования деформации и разрушения материалов, их прочностных свойств осуществляются, как правило, на модельных и наиболее простых, используемых в промышленности материалах. Важным для практического материаловедения является заключительный этап этих исследований, изучение свойств и поведения материалов непосредственно в изделиях. Значимость заключительного этапа определяется тем, что в реальных изделиях к материалам предъявляются дополнительные требования, которые невозможно учесть при лабораторных испытаниях образцов.

В данной работе представлены результаты систематических исследований закономерностей деформации и разрушения модифицированных ионными пучками материалов при трении и способы их упрочнения. В качестве объектов исследования были выбраны материалы, которые используются в промышленности: стали 65X13, 45, P6M5; армо-железо, титан BT1-0, сплав BT6 в обычном и ультрамелкозернистом состояниях; твердые сплавы T14K8, BK6M, KHT16 и др. Такое разнообразие материалов определяется тем, что ставилась задача поиска общих закономерностей деформации и разрушения при трении, общих принципов формирования с помощью ионных пучков устойчивых к изнашиванию приповерхностных структур.

Актуальность темы диссертационной работы определяется еще и тем, что в 80-е годы достижениями науки в области ускорительной техники была фактически подготовлена основа для развития новых методов модификации поверхности материалов. В первую очередь это касается создания широкоапертурных источников газовых и металлических ионов типа “Титан”, “Диана”, “Радуга”, MEVVA и др., позволяющих имплантировать ионы с энергией 40-250 кэВ, флюенсом  $\sim 10^{17}$  ион/см<sup>2</sup> в мишень площадью  $\sim 300$  см<sup>2</sup>, за разумное время ( $\sim 20$  минут).

Разработка названных выше источников ионов позволила исследователям перейти от решения исключительно научных задач взаимодействия ускоренных ионов с металлами к практическим, а именно: разработке технологий модификации металлов и сплавов с целью повышения их служебных характеристик. Очевидно, что сама возможность повышения служебных характеристик материалов с помощью ионных пучков - это еще не метод и тем более не технология. Для того чтобы использовать ионные пучки на практике, необходимо знать следующее: каким образом столь малые

толщины модифицированных слоев материалов (~100 нм) могут повышать износостойкость материалов в 2-4 и более раз; какую роль при деформации и разрушении материалов играют тонкие приповерхностные слои; каким образом происходит деформация и разрушение материалов при трении. Появилась необходимость развить физические представления о том, какими свойствами должны обладать приповерхностные слои материалов, для того чтобы их износ был минимальным.

Используя ионную имплантацию, можно легировать приповерхностные слои материалов многими элементами периодической системы Д.И. Менделеева и получать в этих слоях различные неравновесные структурно-фазовые состояния. Однако научные основы формирования таких состояний методом ионной имплантации еще только создаются и для их развития необходимы систематические исследования как на модельных объектах, так и на сплавах, которые широко используются в промышленности.

Таким образом, актуальность данной работы определяется необходимостью развития представлений о деформации и разрушении твердых тел при трении и разработки научных основ формирования приповерхностных состояний методом ионной имплантации с целью повышения износостойкости изделий.

**Цель настоящей работы** – установить закономерности деформации и разрушения материалов модифицированных ионными пучками при трении, разработать ионно-пучковые технологии формирования приповерхностных слоев материалов трибологических пар для повышения их эксплуатационных свойств и надежности.

Для достижения поставленной цели в работе решались следующие задачи:

- изучение влияния ионной имплантации на формирование неравно-весных структурно-фазовых состояний и химического состава в припо-верхностных слоях;

- исследование закономерностей и особенностей деформации и раз-рушения материалов при трении;

- выявление структур, образующихся в приповерхностных слоях при трении, и установление их влияния на скорость изнашивания материалов;

- изучение общих закономерностей изнашивания трибологических пар при эксплуатации, выявление роли деформации и акустических коле-баний в их разрушении, разработка способов защиты от разрушающего действия акустических колебаний;

- разработка принципов формирования с помощью ионных пучков приповерхностных слоев материалов трибологических пар с целью повы-шения их функциональных характеристик;

- разработка технологии модифицирования материалов трибологиче-ских пар, - режущего инструмента, деталей машин и механизмов, штам-повой оснастки, - и проведение апробирования разработанных технологий в заводских условиях.

**Научная новизна работы** определяется следующими результатами и положениями, сформулированными на основе анализа систематических исследований деформации и разрушения материалов при трении, изучения структуры, физико-механических, химических и эксплуатационных свойств металлов и твердых сплавов, обработанных ионными пучками.

- На основе изучения кинетических зависимостей изнашивания ис-следуемых материалов показано, что в их разрушении существенную роль играют акустические колебания, генерируемые в самой трибосистеме. Это позволило объяснить ранее не объясненные экспериментальные факты пе-риодичности в расположении мест разрушения поверхностей и дополнить

представления о механизмах разрушения материалов при трении. Показано, что акустические колебания, возникающие при трении, являются дополнительной “эффективной” нагрузкой на трибосистему. Демпфирование акустических колебаний приводит к снижению износа.

- В результате изучения кинетики изнашивания ионно-имплантированных материалов предложено объяснение высокой эффективности защитных свойств тонких, толщиной всего в 100 нм, модифицированных слоев при трении, которое основано на рассеянии и поглощении поверхностных акустических колебаний. Предложенное новое объяснение влияния тонких приповерхностных слоев на изнашивание материалов дополняет физические представления кинетики изнашивания материалов.

- Изучено разрушение твердосплавных резцов при резании на мезоуровне и показано, что оно осуществляется, так же как и разрушение сталей при механических нагрузках, через стадии фрагментации, объединения фрагментов и последующее прорастание магистральной трещины.

- Разработаны физические принципы формирования тонких (~100 нм) слоевых структур ионными пучками с целью повышения износостойкости и коррозионной стойкости, основанные на том, что каждый слой несет свою вполне определенную функцию.

**Научно-практическая значимость и реализация результатов работы.** Совокупность полученных результатов и установленных закономерностей позволяет дополнить представления о природе физических процессов разрушения ионно-модифицированных материалов при трении. Полученные экспериментальные данные позволяют по-новому взглянуть на роль тонких приповерхностных слоев материалов при трении, на их защитные свойства при коррозии. Экспериментальные результаты и их анализ являются основой для разработок ионных технологий упрочнения металлов и сплавов, работающих в условиях трибосопряжения.

1. Установленное существенное влияние акустических колебаний, генерируемых при трении, на разрушение материалов трибосистем позволяет использовать принципиально новые способы повышения износостойкости.

2. Разработаны ионно-лучевые технологии обработки режущего инструмента, деталей машин и механизмов, позволяющие повышать износостойкость изделий в два и более раз, которые прошли апробирование на многих предприятиях России и за рубежом.

3. Разработаны способы защиты от разрушения для твердосплавных резцов, рельсов железнодорожного транспорта, гильз двигателя внутреннего сгорания. На данных примерах показано, каким образом можно защищать изделия от разрушений, которым способствуют акустические колебания, возникающие при трении.

4. Результаты исследований использованы:

при разработке технологических процессов упрочнения твердосплавных чашечных резцов, используемых для переточки колесных пар вагонов для предприятий Томского, Новосибирского и Омского (Московка) вагонных депо;

при разработке технологических процессов упрочнения для изделий Томского завода резиновой обуви (для упрочнения ножей для обрезки облоя, петлителей, пробойников и др.);

при разработке технологических процессов упрочнения мелкоразмерных твердосплавных сверл для Томского радиозавода и Тайваньской фирмы Key ware technology inc;

в лекционных курсах “Лучевые технологии”, “Взаимодействие ионизирующих излучений с веществом”, читаемых студентам электрофизического факультета Томского политехнического университета, в учебных и методических пособиях.



### **Основные положения, выносимые на защиту**

1. Экспериментально обоснованное доказательство важной роли акустических колебаний, возникающих при трении, в деформации и разрушении материалов трибосистем. Необходимость введения при разработке изделий, представляющих собой пары трения, контроля возможности возникновения в них при работе резонансных акустических колебаний. Методы защиты трибосистем от собственных акустических колебаний.

2. Закономерности деформации и разрушения твердосплавных пластин в процессе резания, заключающиеся в последовательных событиях: пластической деформации, фрагментации, образовании микросколов и прорастании магистральной трещины. Генерируемые при резании акустические колебания являются составной частью механизма разрушения твердосплавных инструментов.

3. Результаты исследований формирования приповерхностных структур, деформации и разрушения армко-железа, стали 45, титана ВТ1-0 и сплава ВТ6 при трении, обусловленных ионно-лучевой обработкой. Условия и режимы ионно-лучевой обработки, при которых может изменяться механизм изнашивания с адгезионного на усталостный.

4. Разработанные способы ионно-лучевой обработки режущего инструмента, основанные на многоэлементной ионной имплантации с формированием многослойных структур в приповерхностных областях материалов, повышающие ресурс работы изделий в два и более раз, коррозионную устойчивость в 3 раза.

**Апробация работы.** Основные результаты проведенных исследований докладывались и обсуждались на следующих международных, всероссийских и региональных конференциях, совещаниях, симпозиумах и семинарах: I Всесоюзной конференции “Модификация свойств конструкционных материалов пучками заряженных частиц” (Томск, 1988); II Всесоюз-

ном научно-техническом симпозиуме “Современное электротермическое оборудование для поверхностного упрочнения деталей машин и инструментов” (Саратов, 1990); 8, 9, 10-ой Международной конференции по радиационной физике и химии неорганических материалов (Томск, 1993, 1996, 1999); 1V Всероссийской конференции по модификации свойств конструкционных материалов пучками заряженных частиц (Томск, 1996); Second International Conference MPSL’96, (Sumy, Ukraine, 1996); V International Conference Computer-Aided design of advanced materials and technologies, 1997 CADAMT-97, (Tomsk, 1997); Advanced materials and processes. Fourth Sino-Russian symposium beijing, (China, 1997); X11 International conf. Ion Implantation Technology, (Kyota, Japan, 1998); Sixth International Conference on Plasma Surface Engineering (Garmisch-Partenkirchen, 1998); V Russian-Chinese International Symposium “Advanced Materials and Processes” (Baikalsk, 1999); Региональной научно-практической конференции "Трансиб 99" (Новосибирск, 1999); 1V International Conference on Modification of Surface Layers of Non-Semiconducting Materials (Feodosiya, 2001); Международном технологическом конгрессе “Современные технологии при создании продукции военного и гражданского назначения” (Омск-2001); Международной конференции “Современные проблемы машиностроения и приборостроения” (Томск 2002); Proceedings of X APAM topical seminar and III conference "Materials of Siberia" "Nanoscience and technology" devoted to 10-th anniversary of APAM (Novosibirsk 2003); “Mesomechanics” Fundamentals and Applications" (MESO’2003) and VII International Conference "Computer-Aided Design of Advanced Materials and Technologies" (CADAMT’2003) (Tomsk 2003); Международном научно-практическом симпозиуме Славянтрибо-6: Интегрированное научно-техническое обеспечение качества трибообъектов, их производства и эксплуатации (Санкт-Петербург, 2004); XLIII международной конференции “Актуальные про-

блемы прочности” (Витебск, 2004); Proceedings of 5, 6, 7, 8 -th international conference on modifications of materials with particle beams and plasma flows. (Tomsk 2000, 2002, 2004, 2006).

**Публикации.** Основное содержание диссертации отражено в 36 печатных работах, опубликованных в научных и научно-технических журналах, сборниках и трудах конференций, в том числе коллективная монография, 7 патентов РФ и 2 авторских свидетельства на изобретения, свидетельство на полезную модель.

**Достоверность** полученных экспериментальных результатов, выводов, научных положений и рекомендаций, представленных в работе, обеспечена корректностью постановки задачи, использованием современных методов исследований и аппаратуры, систематическим характером исследований, статистической воспроизводимостью и согласованностью результатов, полученных с использованием разных методов и методик.

**Личный вклад автора в работу.** Результаты исследований, изложенные в диссертации, получены при непосредственном участии автора. Автор формировал цель и задачи работы, выбирал методы исследований, ему принадлежит ведущая роль в решении научных задач, анализе, обобщении и интерпретации результатов. Автором сформулированы основные научные положения и выводы.

**Структура и объем диссертации.** Диссертация состоит из введения, шести глав, заключения, цитируемой литературы и приложения. Работа содержит 297 страниц, включая 111 рисунков, 19 таблиц, список цитируемой литературы из 235 наименований и приложение.

## **СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** обоснована актуальность решаемой проблемы, сформулированы цели и задачи исследования, дано краткое содержание диссертации, основные положения, выносимые на защиту, показана научная

новизна, обоснованы научная и практическая значимость полученных результатов, представлены сведения об объеме диссертации, публикациях, конференциях и семинарах, на которых были доложены основные результаты работы, определен личный вклад автора.

**В первой главе** проведен анализ состояния вопроса по изнашиванию материалов при трении, рассмотрены физические процессы, происходящие при трении, структура и физико-химические свойства приповерхностных слоев материалов испытывающих трибологическое взаимодействие. Рассмотрены основные механизмы разрушения твердых тел при трении и дан их анализ. Отмечено, что акустические колебания могут оказывать существенное влияние на разрушение материалов. Однако, в исследованиях по трению при рассмотрении физических процессов возможность влияния акустических колебаний, генерируемых в процессе трения, на разрушение материалов трибосистем не рассматривалось. В связи с этим изучение этого влияния представляется актуальным как с научной, так и практической точек зрения.

Рассмотрены основные физические процессы, происходящие при взаимодействии ионных пучков с твердым телом, и свойства модифицированных материалов, вопросы влияния обработки ионными пучками на эксплуатационные характеристики металлов и сплавов. Показано, что с помощью ионных пучков можно существенно влиять на трибологические свойства материалов, тем самым управлять их износостойкими свойствами. Отмечено, что при рассмотрении эффекта повышения износостойких свойств материалов после воздействия ионных пучков недостаточно полно обоснован механизм, за счет которого эффективно происходит данное повышение. Указывается, что знания о механизмах повышения износостойкости материалов при воздействии пучков ионов позволят не только полнее понять процесс разрушения материалов при трении, но и эффективно

использовать эти знания для разработки новых технологий упрочнения изделий. На основе представленного анализа сформулированы задачи исследования.

**Во второй главе** обосновывается выбор материалов для исследований. Отмечается, что для изучения общих закономерностей разрушения материалов при трении необходимо проводить исследования с разными материалами, работающими в различных условиях. В связи с этим для исследований были использованы технически чистое железо, различные стали, титан ВТ1-0 и его сплав ВТ6, твердые сплавы. Интересным представляется сравнение трибологических свойств ультрамелкозернистых и обычных материалов, изучение влияния структуры материала на его трибологические свойства. Поэтому ряд материалов, таких как армко-железо, титан ВТ1-0 и сплав ВТ6, исследовался в обычном и ультрамелкозернистом состояниях.

Для проведения экспериментальных работ с демпфированием акустических колебаний, генерируемых при трении, была сконструирована и изготовлена специальная машина трения. Для расширения возможностей по имплантируемым элементам был разработан специальный катодный узел, который позволяет осуществлять имплантацию на ионных источниках типа “Диана” и др. не только ионы металлов, но и полупроводников (получено свидетельство на полезную модель). Это существенно расширило технологические возможности источников данного типа. Для анализа приповерхностных слоев использовались современные методы: электронная просвечивающая микроскопия, вторичная ионная масс-спектрометрия (ВИМС), Оже-спектрометрия, проводились рентгеноструктурные и металлографические исследования. Исследования спектров акустических колебаний, возникающих при трении, были проведены на диагностическом

акустическом стенде Сибирского физико-технического института им. В.Д. Кузнецова при Томском государственном университете.

**Третья глава** посвящена изучению изнашивания ионно-имплантированных материалов при трении. Проведено изучение влияния ионно-лучевой обработки на деформационное поведение приповерхностных слоев при трении и кинетику изнашивания. Исследовано влияние структуры материалов и акустических колебаний на изнашивание материалов. Выдвинуто предположение, что акустические колебания, генерируемые при трении, оказывают существенное влияние на разрушение материалов трибосистем. Экспериментальные исследования по влиянию акустических колебаний на изнашивание представлены на рисунке 1.

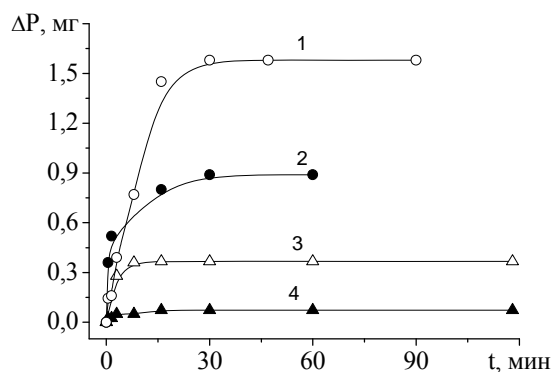


Рис. 1. Кинетические зависимости потери массы образцов стали 45 (1, 2) и армко-железа (3, 4) при испытаниях на трение и износ без демпферов (1, 3) и с использованием демпферов при закреплении их на контртеле и образцах (2, 4). Нагрузка при испытаниях составляла 1 МПа для стали 45 и

3 МПа для армко-железа.

Влияние акустических колебаний на изнашивание показано на всех исследуемых материалах армко-железе в крупнозернистом и ультрамелкозернистом состояниях, стали 45, титане ВТ1-0 и ВТ6 так же в крупнозернистом и ультрамелкозернистом состояниях. В работе установлено, что по своему действию акустические колебания, генерируемые при трении, аналогичны дополнительной эффективной нагрузке. Это хорошо видно из

экспериментальных результатов представленных на рис. 2, когда последовательно убирается гашение акустических колебаний на контртеле и образцах.

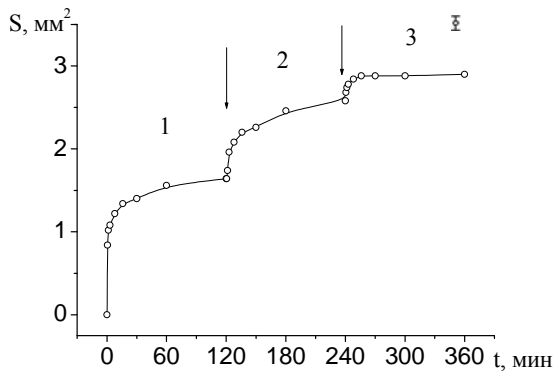


Рис. 2. Кинетическая зависимость площади пятен контактов образцов армко-железа при испытаниях на трение:

- 1 – участок с использованием демпферов на контртеле и образцах;
- 2 – демпферы только на образцах;
- 3 – без использования демпферов.

Исследования влияния ионной имплантации на изнашивание образцов показало высокую ее эффективность. При этом методом ионной имплантации можно эффективно защищать от изнашивания даже титан, обладающий высокими адгезионными свойствами (см. рис. 3).

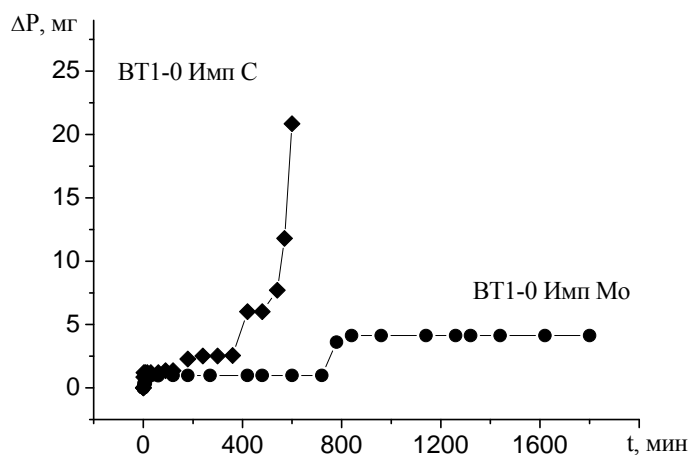


Рис. 3. Кинетические зависимости потери массы образцов титана ВТ1-0 при испытаниях на износ после имплантации углеродом и молибденом.

Установлено, что защита материалов от разрушения путем ионной имплантации и гашением акустических колебаний действуют независимо друг от друга. Из этого следует важный для практического использования

вывод, что два этих способа повышения износостойкости можно использовать одновременно.

Изучены спектральные характеристики генерируемых колебаний при трении (см. табл. 1).

Таблица 1

Расположение максимумов акустических колебаний  
генерируемых при трении в образце стали 45

№, мах	1	2	3	4	5	6	7	8
f, МГц	0,27	0,54	0,81	1,1	1,35	1,6	2,16	2,7
$\lambda$ , мм	18,8	9,4	6,3	4,6	3,8	3,2	2,4	1,9
Кратность	1	2	3	4	5	6	8	10

Показано, что основными акустическими колебаниями, существующими в образце при трении, являются собственные колебания данного образца, максимальная длина волны которых определяется его размерами. На основе экспериментальных результатов и предложенной гипотезы дано объяснение высокой эффективности ионно-лучевой обработки при работе материалов в трибосистемах.

**В четвертой главе** представлены результаты анализа причин разрушения режущего инструмента. Показано, что ряд важных экспериментальных фактов по разрушению режущего инструмента, в частности, периодичный характер расположения мест разрушения, не находит объяснения в рамках существующих представлений. Изучены мезомеханические особенности разрушения твердосплавных резцов, влияние структуры и термомеханической обработки на износостойкость твердого сплава. Показано, что основные закономерности деформации и разрушения твердосплавных пластин, происходящие в процессе резания, заключаются в последовательных событиях: пластической деформации, фрагментации, образовании



микросколов и прорастания магистральной трещины. На рисунке 4 представлена режущая кромка чашечного резца Т14К8 после его работы. Видны мезополосы нормального износа, микроскол и зона с пластической деформацией режущей кромки.

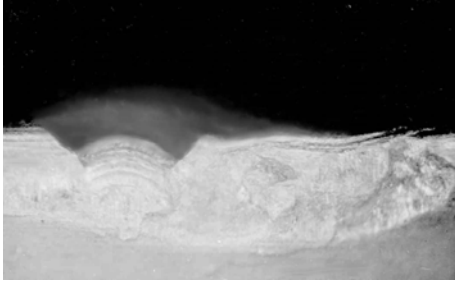


Рис. 4. Разрушенная в процессе работы режущая кромка чашечного резца Т14К8.

Проведены измерения акустических колебаний, возникающих при резании в твердосплавных пластинах.

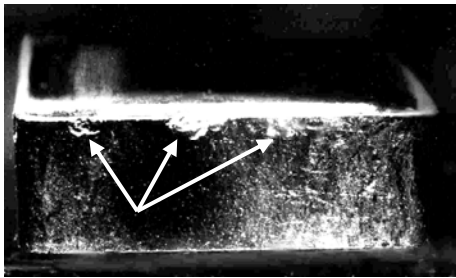


Рис. 5. Проявление периодичности в разрушении резца. Показаны макросколы на боковой, нерабочей поверхности.

Впервые показано, что в процессе резания генерируются акустические колебания, которые приводят к разрушению резцов. На рис. 5 представлена нерабочая грань резца КНТ16, на которой видны разрушения, взаимное расположение которых соответствует длине волны акустических колебаний 8 мм. Измеренная частота колебаний составила 250 кГц. На рисунке видно, что разрушения произошли в тех местах, где резец механически не был нагружен. Места разрушений соответствуют пучностям акустических колебаний. На основе проведенных исследований расширены представления о процессе разрушения твердосплавных резцов при эксплуатации.

**Пятая глава** посвящена изучению влияния специально сформированных ионными пучками приповерхностных слоев малых толщин (~100 нм) на износостойкость различных видов изделий. Одним из основных критериев для выбора изделий, в материалах которых формировались приповерхностные модифицированные слои с помощью ионных пучков, являлось то, что для них другие технологии неприемлемы или малоэффективны. На основе производственных испытаний изделий отечественного и зарубежного производства определены основные закономерности формирования приповерхностных слоев, позволяющие эффективно повышать износостойкость изделий, показана существенная роль приповерхностных слоев малых толщин в разрушении материалов при трении, разработаны способы формирования тонких приповерхностных слоев, позволяющие повышать ресурс работы изделий в два и более раз. Обоснованы положения, основываясь на которых можно создавать материал более устойчивый к износу. Они сводятся к следующему.

**Первое** - свойства материала приповерхностных слоев должны быть отличны от свойств материала в объеме. Данное положение следует из того, что поверхность и объем несут разные функциональные нагрузки и их разрушение происходит по разным причинам. Из этого следует, что материал в приповерхностной области должен быть градиентным по своим свойствам. Причем необходимо обеспечить, по возможности, плавный переход свойств от объема к поверхности, чтобы не возникало локализации напряжений в переходной зоне ни при изменении температуры, ни при механических нагрузках. Исходя из результатов глав 3 и 4, следует, что существенную роль в разрушении материалов играют акустические колебания, которые генерируются в самой же трибосистеме. Создание градиентной структуры в приповерхностном слое способствует рассеянию акусти-

ческие колебания и, соответственно, уменьшает разрушение материалов трибосистем.

**Второе** - структура самого верхнего слоя должна быть мелкозернистой, вплоть до аморфной. Это условие вытекает из следующего. В процессе трения, на первой стадии (стадия приработки), происходит формирование мелкозернистой структуры, и только после завершения ее формирования скорость изнашивания резко уменьшается. Важным является также то, что при нахождении материала в мелкодисперсном состоянии в процессе трения из него не выкрашиваются крупные частицы.

**Третье** - структура и свойства материала должны быть таковыми, чтобы он мог демпфировать возникающие локальные нагрузки и фактически осуществлять смещения типа “сдвиг + поворот” без возникновения трещины. Этот слой должен иметь низкий предел ползучести и по своим свойствам быть подобным “твердой жидкости”, как это реализуется, например, когда трибосистема работает в режиме безызносности.

Основываясь на этих принципах, были разработаны технологии повышения ресурса работы режущего инструмента, деталей машин и механизмов, штамповой оснастки. В таблице 2, в качестве примера, представлены результаты испытаний мелкогабаритных сверл ( $d=0,9$  мм, ВК6М, сверление фольгированного стеклотекстолита для печатных плат) после создания ионными пучками двухслойной структуры.

Таблица 2

Результаты испытаний обработанных ионными пучками мелкогабаритных сверл после переточек по сравнению с исходными.

Количество переточек	0	1	2	3	4	5
Увеличение стойкости (во сколько раз)	3,8	3,2	2,9	2,4	2,2	1,8

На поверхности создавался слой, имеющий большую пластичность и малый коэффициент трения за счет имплантации молибдена невысоких энергий (70 кэВ), а под ним слой более высокой твердости, за счет имплантации легкими ионами углерода с энергией 80 кэВ. Интересным в данном примере является то, что даже после того как сверла несколько раз перетачивали их стойкость оставалась существенно выше, чем исходных (на способ обработки получен патент Российской Федерации).

Технологии, основанные на использовании ионной имплантации, апробированы в области медицины: для повышения коррозионной устойчивости скальпелей (стойкость возросла три раза, получен патент Российской Федерации) и придания поверхностям материалов бактерицидных свойств. Испытания показали, что ионные пучки могут эффективно использоваться и в этой области.

**В шестой главе** представлены результаты по разработке способов защиты материалов от разрушений, возникающих при трении. На примере твердосплавных резцов, блока цилиндров двигателя внутреннего сгорания и рельсов железнодорожного транспорта показано, что разрушение изделий по поверхности при их эксплуатации происходит неравномерно.



Рис. 6. Периодичность в расположении участков с повышенным износом рельсов.

На поверхностях присутствуют периодически расположенные места более интенсивного износа (см. рис. 6).

В случае рельсов железнодорожного транспорта наиболее часто места с повышенным износом встречаются в виде полосок с периодом в  $\sim 13$  и  $\sim 6$  см. В литературе не рассматривается причина возникновения периодического расположения мест с более интенсивным разрушения поверхностей рельсов. Из наших исследований следует, что кроме известных видов разрушения материалов при трении дополнительно накладывается разрушающее действие акустических колебаний генерируемых в самой трибосистеме. Предложены методы защиты изделий от разрушения при трении, основанные на исследованиях, представленных в третьей и четвертой главах, и анализе литературных данных. На методы защиты изделий от разрушений при трении получено 3 патента Российской Федерации. Существенным в предлагаемых решениях является то, что эти методы защиты изделий от разрушения достаточно просто реализовать не только для рассмотренных изделий, но и для многих других.

### **ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ**

В данной работе проведены систематические исследования закономерностей и особенностей деформации и разрушения при трении материалов, модифицированных ионными пучками, изучены механизмы разрушения при трении, разработаны и апробированы системы формирования “тонких” износостойких слоевых структур с помощью ионных пучков. Показано, что повышение износостойкости можно получать с помощью гашения акустических колебаний, генерируемых самой трибосистемой. В совокупности полученные результаты и установленные закономерности позволили развить и дополнить существующие представления о природе физических процессов деформации и разрушения материалов при трении.

Изложенные экспериментальные данные позволяют по-новому взглянуть на роль приповерхностных слоев материалов при трении. Полученные экспериментальные результаты и их анализ являются основой для разработок ионных технологий упрочнения металлов и сплавов, работающих в условиях трибосопряжений.

1. На основе изучения кинетических зависимостей изнашивания исследуемых материалов показано, что в их разрушении существенную роль играют акустические колебания, генерируемые в самой трибосистеме. Это позволяет объяснить ранее не объясненные экспериментальные факты периодичности в расположении мест разрушения поверхностей и вносит новые представления о разрушении материалов при трении.

2. Установлено, что акустические колебания, возникающие при трении, по характеру влияния на изнашивание материалов подобны дополнительной “эффективной” нагрузке на трибосистему. Демпфирование акустических колебаний приводит к снижению этой дополнительной нагрузки и, как следствие, уменьшению износа. Выявленная существенная роль акустических колебаний, генерируемых при трении, в разрушении материалов трибосистем открывает принципиально новые способы повышения износостойкости.

3. Разработаны способы защиты от акустического разрушения для твердосплавных резцов, рельсов железнодорожного транспорта, гильз двигателя внутреннего сгорания. На разработанные способы получены патенты Российской Федерации. На данных примерах показано, каким образом можно защищать изделия от разрушения, происходящего за счет возникающих при трении акустических колебаний.

4. На основе изучения и анализа изнашивания ионно-имплантированных материалов предложено объяснение высокой эффективности защитных свойств “тонких”, толщиной менее 1 мкм, модифици-

рованных слоев при трении. При обработке материалов пучками ионов формируется приповерхностный ионно-модифицированный слой с резко отличающимися от основного материала физико-механическими свойствами. Модифицированный слой влияет на распространение поверхностных акустических волн, которые локализуются в слое толщиной, примерно равной длине волны. Таким образом, есть основания предполагать, что наличие даже такого “тонкого” модифицированного слоя может существенно изменять уровень акустических колебаний, оказывая тем самым влияние на величину износа.

5. Разработаны принципы формирования тонких (~100 нм) слоевых структур ионными пучками с целью повышения износостойкости и коррозионной стойкости, основанные на том, что каждый слой несет свою, вполне определенную, функцию.

6. Исследования разрушения резцов на мезоуровне показали, что в процессе работы в объеме резца происходят изменения механических свойств на глубине до 250-300 мкм. Можно проследить две стадии разрушения: 1) формирование участков фрагментированной мезосубструктуры, внутри которых появляются и распространяются деформационные мезополосы, вплоть до развития микротрещин, не вызывающих разрушения материала; 2) объединение фрагментов, т.е. переход на макроуровень. Когда размеры фрагментов становятся соизмеримы с размерами образца, происходит развитие магистральной трещины, вызывающей скалывание фрагментов или разрушение резца.

7. Показано, что при трении более пластичных материалов, таких как армко-железо, титан, деформация локализуется в тонких слоях ~10 мкм, а в более твердых, таких как сталь 45, твердые сплавы, деформация материала достигает 100 мкм и более. Интенсивная пластическая деформация армко-железа существенно изменяет характер изнашивания. Происходит

адгезионное схватывание материала образца с материалом контртела. В результате этого происходит формирование слоев в виде полос на глубину 30 мкм, а деформация простирается на глубину до 100 мкм. На поверхности трения наблюдаются мощные наплывы, представляющие собой объемы пластически смещенного по поверхности материала. Ионная имплантация не устраняет схватывание, хотя и замедляет этот процесс.

8. Исследование деформации приповерхностных слоев стали 45 при трении показало, что она происходит обычным путем через образование и накопление дислокаций, их объединение, возникновение сетчатых структур и фрагментации. В результате фрагментации создаются мезофрагменты, и затем следует разрушение материала. Однако, деформация при трении имеет ряд своих особенностей. Основной и главной особенностью является высокая степень деформации без нарушения сплошности материала. При этом цементитные пластинки ломаются и перемешиваются с ферритом. В приповерхностном слое после испытаний на трение присутствуют мелкодисперсная фаза и окислы железа. Степень деформации резко неоднородна по поверхности материала.

9. Результаты сравнительных исследований исходных твердосплавных пластин и прошедших термомеханическую обработку (ТМО) показали, что ТМО приводит к изменению структуры твердого сплава и растягивающие напряжения, возникающие при изготовлении твердосплавных пластин, уменьшаются. В результате изменения структуры уменьшаются абсолютные значения и изменения микротвердости в приповерхностных слоях твердого сплава. Из результатов исследований следует, что технология ТМО может быть использована только для случаев, когда допустимый износ резцов мал. Такая обработка резцов может эффективно применяться, например, при чистовом резании.



10. На основе метода ионной имплантации разработаны технологии обработки режущего инструмента, деталей машин и механизмов, повышающих износостойкость изделий в два и более раз, которые прошли апробирование на многих предприятиях России и за рубежом.

#### **Основные публикации по теме диссертационной работы**

1. Попов А.Ю., Рауба А.А., Васильев Е.В., Коньшин Д.В., Гриценко Б.П., Мухамадеева Р.М. Система эксплуатации твердосплавного режущего инструмента. - Петропавловск. 2004. - 218 с.
2. Гриценко Б. П., Круковский К. В., Гирсова Н. В., Кашин О. А. Влияние высокодозной ионной имплантации и акустических колебаний, генерируемых при трении, на износостойкость армко-железа и стали 45. // Трение и износ. – 2005. – Т. 26. - № 6. - С. 593-599.
3. Гриценко Б. П., Кашин О. А. Влияние высокодозной ионной имплантации и акустических колебаний в трибосистеме на деформационное поведение и износостойкость стали 45. // Известия Томского политехнического университета. – 2004. – Т. 307. - № 4. – С. 121-125.
4. Гриценко Б.П., Круковский К.В., Кашин О.А. Деформационное поведение ионно-имплантированных армко-железа и стали 45 при трении и износе в условиях подавления акустических колебаний. // Физическая мезомеханика. – 2004. - Т.7. Спец. выпуск. Часть 1. - С. 415-418.
5. Gritsenko B.P., Krukovsky K.V., Girsova N.V., Kashin O.A. The influence of high-ion implantation on wear mechanisms of Ti and VT6 alloy in coarse-grained and ultrafine grained states. // Известия вузов. Физика. - 2006. – № 8. Приложение. – С. 301-303.
6. Sharkeev Yu. P., Perry A. J., Gritsenko B. P., Fortuna S. V. Modification of metallic materials and hard coatings using vacuum arc metal ion implantation. // Vacuum – 1999. - V. 52. - № 1. - P. 247-254.

7. Легостаева Е.В., Панин С.В., Гриценко Б.П., Шаркеев Ю.П. Исследование процессов пластической деформации на макро-, мезо- и микро-масштабном уровнях при трении и износе стали 45, поверхностно упрочненной ионной имплантацией. // Физическая мезомеханика. – 1999. – Т. 2. – № 5. – С. 79–92.
8. Sharkeev Yu.P., Legostaeva E.V., Panin S.V., Gritsenko V.P. Experimental investigation of friction and wear of Mo ion implanted ferritic-perlitic steel // Surface and Coating Technology. - 2002. - V. 158-159. - P. 674-679.
9. Гирсова Н.В., Гриценко Б.П., Шаркеев Ю.П., Рябчиков А.И., Тайлашев А.С., Фортуна А.С., Козлов Э.В. Структурно-фазовые превращения в сплаве  $N_3Fe$  при высокодозной ионной имплантации. // Известия вузов. Физика. – 1998. - № 11. – С. 15 - 24.
10. Гриценко Б.П. Роль акустических колебаний, генерируемых при трении, в разрушении материалов трибосистем. // Трение и износ. – 2005. – Т. 26, - № 5. - С. 481-488.
11. Беспалов В.В., Гриценко Б.П. Некоторые особенности разрушения твердосплавных резцов. // Трение и износ. – 2000. – Т. 21. - № 5. – С. 511–517.
12. Панин С.В., Шаркеев Ю.П., Гриценко Б.П., Панин В.Е.. Изучение влияния ионно-легированного слоя на развитие пластической деформации поликристаллического алюминия на мезоуровне. // Поверхность. – 1998. - № 6. - С. 56-65.
13. Sharkeev Yu.P., Gritsenko V.P., Fortuna S.V., Perry A.J. Modification of metals and hard coatings using vacuum-arc metal ion implantation. - Ion Implantation Technology-98. J. Matsuo, G. Takaoka and Yamada, eds. Publisher, IEEE, Piscataway. - N.J. - 1999. – P. 873-876.
14. Мейснер Л.Л., Сивоха В.П., Шаркеев Ю.П., Кульков С.Н., Гриценко Б.П. Пластическая деформация и разрушение ионно-

- модифицированного сплава  $Ni_{50}Ti_{40}Zr_{10}$  с эффектом памяти формы на мезо и макроуровнях. // Журнал технической физики. - 2000. - Т. 70. - В. 1. - С. 32-36.
15. Karlov A.V., Kolobov Yu.R., Saguymbaev E.E., Gritsenko B.P. Implantation der Ar – Ionen in Kalziumphosphatschichten // Biomedizinische Technik. – 2000. – В. 45. - № 1.- S. 109-110.
  16. Колобов Ю.Р., Кашин О.А., Шаркеев Ю.П., Гриценко Б.П., Найденкин Е.В. Технологии обработки поверхности изделий технического и медицинского назначения высокоэнергетическими потоками для восстановления их геометрических размеров и увеличения сроков эксплуатации. // Технология машиностроения. – 2006. - № 4. – С. 39-44.
  17. Колобов Ю.Р., Кашин О.А., Веселов Ю.Г., Слосман А.И., Гриценко Б.П., Сагымбаев Е.Е., Гирсова Н.В. Повышение стойкости стального режущего инструмента с использованием методов ионного азотирования и ионной имплантации. // Техника машиностроения. – 2006. - № 3. – С. 34- 39.
  18. Денисов И.П., Кабанова Е.В., Гриценко Б.П., Яковлев В.Ю. Время-разрешенная оптическая спектроскопия кристаллов деформированных одноосным сжатием. // Физика твёрдого тела. – 1992. - Т. 34. - № 7. - С. 1999-2006.
  19. Pogrebnyak A.D., Gritsenko B.P., Pogrebnyak N.A., Ponariadov V.V., Ruzimov Sh.M., Kylyshkanov M.K. Structure and Properties of Al-Ni Coatings Before and After Irradiation by Charged Beam Particles. // Известия вузов. Физика, - 2006. – № 8. Приложение. - С. 446-449
  20. Гриценко Б.П., Беспалов В.В. Ионно-лучевой способ повышения износостойкости материала изделий. / Патент РФ № 2192502, опубл. Бюл. № 31 от 10.11.02.

21. Гриценко Б.П., Шаркеев Ю.П., Вторушин В.В.. Способ ионно-лучевой обработки изделий / Пат. 2152455 Россия. МКИ С23С 14/48. Заявлено 31.12.1997; Оpubл. 10.07.2000, Бюл. № 19. – 8 с.
22. Гриценко Б.П., Рузаев А.Г., Костерина Н.Г., Черный С.А. Способ ионно-лучевой обработки изделий. / Авторское свидетельство № 1777391, от 23.04.90 г. Россия. МКИ С 23 С 14/48.
23. Афанасьев Н.И., Бугаев С.П., Гриценко Б.П. и др. Способ ионно-лучевой обработки мелкогазмерного инструмента. / Авторское свидетельство. № 1716819 Россия МКИ С 23 С 14/48. от 01.11.91. Приоритет от 12. 02. 90 г.
24. Гриценко Б. П., Беспалов В. В. Блок цилиндров двигателя внутреннего сгорания. Патент РФ № 2230920. МКИ С1 7 F02В 77/13. F02F 1/18. Заявлено 07.10.2002. Оpubл. 20.06.04, бюл. № 17. – 6 с.
25. Гриценко Б.П., Беспалов В.В., Рауба А.А., Попов А.Ю., Погребняк А.Д. Рельс для рельсового транспорта. / Пат. 2240394 Россия. МКИ С2 7 Е 01 В 5/02. Заявлено 17.12.2001; Оpubл. 20.11.2004. Бюл. № 32.- 18 с.
26. Гриценко Б.П., Беспалов В.В.. Режущий инструмент. / Пат. 2191662 Россия. МКИ В23В 27/00. Заявлено 20.06.2000; Оpubл. 27.10.2002. Бюл. № 30. – 8 с.
27. Гриценко Б.П., Беспалов В.В. Катодный узел ионного источника. / Свидетельство на полезную модель № 29805. МКИ 7Н 01 J 1/30. Заявлено 09.09.2002; Оpubл. 27.05.2003. Бюл. № 15.
28. Сивоха В.П., Мейснер Л.Л., Гриценко Б.П. Материал на основе никелида титана. / Патент РФ № 2191842. Заявлено 18.08.2000; МКИ С 22 С 19/03. Оpubл. 27.10.02, бюл. № 30. – 6 с.
29. Гриценко Б.П., Колобов Ю.Р., Сагымбаев Е.Е., Кашин О.А. Способ повышения коррозионной стойкости режущего инструмента на основе

- стали. / Патент РФ № 2156831, МКИ С23С 14/48. Заявлено 26.01.1999; Опубл. 27.09.2000, бюл. № 27. – 12 с.
30. Гриценко Б.П., Беспалов В.В. Влияние модификации приповерхностных слоев материалов на износостойкость в трибологических парах. // Proceedings of 6th international conference on modifications of materials with particle beams and plasma flows. Ed. By: G.A. Mesyats, S.D. Korovin, A.I. Ryabchicov. 23-28 September 2002, Tomsk, Russia. - P. 432-434.
  31. Legostaeva E.V., Panin S.V., Gritsenko B.P., Sharkeev Yu.P. Investigation of wear and friction for ion implanted steel. Proceedings of 1st International Congress on Radiation Physics, High Current Electronics, and modification of materials. Tomsk. – 2000. - V. 3. - P. 356-359.
  32. Gritsenko B.P., Bepalov V.V. Formation of Near-Surface Layers of Materials for Tribologic Pairs. Proceedings of 1st International Congress on Radiation Physics, High Current Electronics, and modification of materials. Tomsk. – 2000. - V. 3. - P. 338-340.
  33. Легостаева Е.В., Гриценко Б.П., Панин С.В. Сравнительное исследование характера пластической деформации и износа при трении ионно-имплантированной стали 45 на различных масштабных уровнях. 10-я Международная конференция по радиационной физике и химии неорганических материалов. Томск. – 1999. - С. 230-232.
  34. Sharkeev Yu.P., Gritsenko B.P., Fortuna S.V., Perry A.J. Modification of metals and hard coatings using vacuum-arc metal ion implantation. X11 th International Conference on Ion Implantation Technology. Kyoto, Japan, July 22-26, 1998. Proceedings of the 12th International Conference “Ion Implantation Technology ИТ98”, Kyoto, Japan, July 22-26, 1998. Trans IEEE, to be published.
  35. Gritsenko B.P., Krukovskii K.V. and Kashin O.A. The Influence of the Type of Implanted Ions on the Wear Kinetics  $\alpha$ -Iron and Steel 45. Proceed-

- ings of 7th International Conference on Modifications of Materials with Particle Beams and Plasma Flows. Ed. by: S.D. Korovin, A.I. Ryabchikov. Tomsk, Publishing house of the IAO SB RAS, 2004. - P. 309-311.
36. Гриценко Б.П., Круковский К. В., Гирсова Н.В., Кашин О.А. Влияние высокодозной ионной имплантации на износостойкость армко-железа и стали 45. // Славянтрибо-6. Интегрированное научно-техническое обеспечение качества трибообъектов, их производства и эксплуатации: Материалы международного научно-практического симпозиума. - Рыбинск: РГАТА, 2004. Т.1. С. 135-140.