

БЕЛОРУССКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

УДК 536.42.621.922.34

ШМАТОВ
Александр Анатольевич

**НАУЧНЫЕ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ТЕРМОХИМИЧЕСКИХ
И ТЕРМОЦИКЛИЧЕСКИХ МЕТОДОВ УПРОЧНЯЮЩЕЙ ОБРАБОТКИ
МЕТАЛЛООБРАБАТЫВАЮЩИХ ИНСТРУМЕНТОВ**

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук по специальностям
05.02.07 – технология и оборудование механической
и физико-технической обработки,
05.16.01 – металловедение и термическая
обработка металлов и сплавов

Минск, 2020

Работа выполнена в Белорусском национальном техническом университете.

Научный консультант **ДЕВОЙНО Олег Георгиевич,**
доктор технических наук, профессор, заведующий ОНИЛ пламенных и лазерных технологий филиала БНТУ «Научно-исследовательский политехнический институт»

Официальные оппоненты: **АЛИФАНОВ Александр Викторович,**
доктор технических наук, профессор кафедры оборудования и автоматизации производства УО «Барановичский государственный университет»;

СВИДУНОВИЧ Николай Александрович,
доктор технических наук, профессор, заслуженный деятель науки республики Беларусь, профессор кафедры материаловедения и проектирования технических систем УО «Белорусский государственный технологический университет»;

БЕЛОЦЕРКОВСКИЙ Марат Артемович,
доктор технических наук, профессор, заведующий лабораторией газотермических методов упрочнения деталей машин ГНУ «Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси»

Оппонирующая организация Учреждение образования «Белорусский государственный аграрный технический университет»

Защита состоится 19 июня 2020 г. в 14⁰⁰ часов на заседании совета по защите диссертаций Д 02.05.03 при Белорусском национальном техническом университете по адресу: 220013, Минск, проспект Независимости, 65, корпус 1, ауд. 202, телефон ученого секретаря (+375 17) 292-24-04.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Белорусского национального технического университета

Автореферат разослан ___ мая 2020 г.

И.о. ученого секретаря совета по защите диссертаций Д 02.05.03 доктор технических наук, профессор



В. А. Данилов

© Шматов А. А., 2020

© Белорусский национальный технический университет, 2020

ВВЕДЕНИЕ

Уровень развития современной техники характеризуется высокой интенсивностью эксплуатации инструментов и широким применением специальных труднообрабатываемых сплавов. Практически на всех белорусских машиностроительных предприятиях в большом количестве используют металлообрабатывающие инструменты (метчики, фрезы, сверла, развертки, резцы, пуансоны, матрицы, алмазно-абразивные круги и др.), но многие из них имеют малый срок службы. По данным Национального статистического комитета Беларусь вынуждена ежегодно покупать за рубежом износостойкие инструменты на сумму 79,4 млн дол. США, причем ее значительная доля (27 %) приходится на твердосплавные и алмазные инструменты, которые по сей день практически не производят в Беларуси. Поэтому остро стоит задача импортозамещения и повышения работоспособности, прежде всего тонких, мелкоразмерных, длинномерных, ударных инструментов, и предназначенных для обработки сложнотермически нагруженных сплавов, а также для работы на станках с ЧПУ.

Для повышения работоспособности инструментов и в Беларуси, и за рубежом в основном развиваются технологии получения износостойких покрытий методами PVD, CVD, напылением, ХТО и др., которые активированы высокоэнергетическими источниками (плазмой, лазером, электронным лучом, др.) с применением вакуумной техники. Но эти технологии не удовлетворяют требованиям быстрого освоения в производстве из-за малой производительности, высокой энергоемкости и большой стоимости процессов. В этой связи актуальной становится задача поиска наиболее производительных, эффективных и недорогих упрочняющих методов. Более того, применяемые инструментальные материалы уже достигли пределов своих свойств, а современные способы обработки не всегда могут одновременно увеличить прочностные и пластичные свойства, делая инструменты менее работоспособными. Чтобы значительно улучшить эти обратные зависимости и иные эксплуатационные свойства инструментов существуют две тенденции их развития: 1) изготовление инструментов из функционально-градиентных и композиционных материалов, а такой способ крайне трудоемкий; 2) применение упрочняющей обработки, позволяющей сформировать в инструментах композиционные и градиентные структуры, но этот вопрос практически не изучен. В этом плане наибольший интерес представляют термохимические и термоциклические методы обработки инструментов, которые, благодаря их простоте, высокой эффективности и технологичности, могут быть легко внедрены на предприятиях при использовании стандартного оборудования и дешевых компонентов. Однако, несмотря на многочисленные исследования, до сих пор отсутствуют системные данные о механизмах улучшения эксплуатационных свойств и формируемых при обработке инструментов структурных композиций, а также рекомендации по созданию новых технологий, что препятствует широкому промышленному внедрению термохимических и термоциклических методов упрочняющей обработки и является важной народнохозяйственной проблемой. Решению этой проблемы путем создания научных и технологических основ термохимических и термоциклических методов упрочнения инструментов посвящена настоящая диссертационная работа.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Связь работы с научными программами (проектами), темами

В основу работы положены результаты исследований, выполненных в рамках НИР: «Разработать технологии низкотемпературной термопленочной и термоциклической обработки режущего инструмента» (по заданию 4.11 Республиканской НТП «Инструмент», 1993–1995); «Разработать и освоить в производстве технологии упрочнения поверхностных слоев изделий из железоуглеродистых и твердых сплавов путем нанесения многокомпонентных карбидных покрытий (по заданию 5.03 ГНТП «Технологии», 1996–1997, № ГР 19973440); «Разработать и освоить производство режущего твердосплавного и ударно-штампового инструмента с повышенными износостойкими свойствами» (по заданию 2.48 ГНТП «Станки и инструмент», 1998–2001, № ГР 19991887); «Разработать и освоить в производстве технологию низкотемпературной химической обработки алмазосодержащих материалов для металлообрабатывающего инструмента с целью повышения износостойкости» (по заданию 2.34 ГНТП «Алмазы», 1999–2001, № ГР 19992981); «Разработка составов и технологии термогидрохимического модифицирования сталей» (по заданию 4.3.05/4 ГПНИ «Функциональные и машиностроительные материалы, наноматериалы», 2011–2012, № ГР 20110699); «Разработка процесса нанесения износостойких покрытий на строительную техоснастку и инструмент в водных наноксидных составах с использованием объемного и поверхностного упрочнения материалов нанокomпонентами методом парожидкой трансформации» (по заданию 2.3.08 ГПНИ «Функциональные и композиционные материалы, наноматериалы», 2011–2013, № ГР 20110370); «Разработка метода термогидрохимической обработки порошков карбида кремния для получения твердосмазочного покрытия и износостойкой керамики» (по заданию 2.5.09 ГПНИ «Функциональные и композиционные материалы, наноматериалы», 2014–2015, № ГР 20150694); «Формирование композиционных структур при упрочнении сплавов в водных нанодисперсных средах на базе экологических материалов» (по заданию 8.2.03 ГПНИ «Многофункциональные материалы и технологии», 2016–2018, № ГР 20160635).

Цель и задачи исследования

Целью работы является разработка научных и технологических основ термохимических и термоциклических методов упрочняющей обработки металлообрабатывающих инструментов, обеспечивающей создание целого комплекса высоких эксплуатационных характеристик в поверхностной зоне и объеме стальных, твердосплавных и алмазных инструментов.

Для достижения указанной цели поставлены следующие задачи:

- на основе системного анализа установить перспективные пути повышения эксплуатационных характеристик различных металлообрабатывающих инструментов с помощью высокоэффективных методов их упрочняющей обработки;
- научно обосновать выбор эффективных методов объемной и поверхностной обработки инструментов тепловым и химическим воздействием с учетом эксплуатационной оценки инструментов, технических требований, предъявляемых к инструментальным материалам и технологиям, возможности использования отечественного сырья и традиционного оборудования;
- изучить кинетику и закономерности формирования структуры покрытий и инструментов в зависимости от химического состава среды и обрабатываемого материала, а также параметров разработанных процессов химико-термической, термогидрохимической и

упрочняющей термоциклической обработки с незавершенными фазовыми превращениями; установить взаимосвязь между структурой и свойствами обработанных инструментальных материалов; определить оптимальные технологические параметры этих процессов;

– провести анализ композиционных и градиентных структур, которые можно сформировать в инструментах методами химико-термической, термогидрохимической и упрочняющей термоциклической обработки с незавершенными фазовыми превращениями; разработать геометрические модели образования композиционных и градиентных структур;

– установить характер и механизмы улучшения свойств инструментальных материалов при многокомпонентной диффузионной карбидизации, термогидрохимической и упрочняющей термоциклической обработке с незавершенными фазовыми превращениями; провести моделирование этих процессов, базируясь на теоретические и экспериментальные данные;

– разработать и внедрить в производство новые технологии поверхностной и объемной обработки стальных, твердосплавных и алмазных инструментов для повышения их работоспособности.

Научная новизна

1. В результате изучения закономерностей формирования многокомпонентных карбидных покрытий, полученных на инструментальных сталях методом ХТО в алюминиотермических средах в системах оксидов Cr-Ti-V, Cr-Ti-Mn, Cr-Ti-Mo, Cr-V-Mo, Cr-V-Mn, Cr-V-Nb, смоделированы процессы двух- и трехкомпонентного диффузионного насыщения стали карбидообразующими элементами и установлены два типа композиционных структур: 1) в инструменте в виде композиции «сверхтвердое покрытие – переходный слой – вязкая матрица»; 2) в покрытии, состоящем из твердых взаимно нерастворимых карбидов Ti и Mn с мягкими включениями Al, который обеспечивает ускоренный рост Ti-Mn покрытий в сравнении с другими карбидными покрытиями. Установлено, что многокомпонентные карбидные покрытия имеют более высокие износостойкие свойства, чем однокомпонентные, благодаря формированию гетерофазных структур с преобладанием в них сверхтвердых карбидов титана и ванадия или образованию взаиморастворимых и сложнолегированных карбидов.

2. Экспериментальные исследования влияния параметров процессов гидрохимической обработки на изменение гранулометрического состава дисперсных керамических порошков в водных насыщающих средах, а также на структуру и свойства полученных покрытий, позволили выявить эффект диспергирования керамических микропорошков в условиях адсорбции на их поверхности ПАВ, циклической смены теплового, химического градиентов и «псевдокавитационного» термогидродинамического воздействия кипящей водной дисперсионной среды, позволивший получать гидрозоли керамических материалов, в которых при проведении гидрохимической обработки инструментальных материалов осаждаются наноструктурированные покрытия. При этом установлено, что максимальное улучшение триботехнических свойств инструментальных сплавов достигается при соблюдении определенного времени гидрохимической обработки: при 50–70 мин – для стали и 10–20 мин – для твердого сплава, обеспечивающего получение покрытий с метастабильной нанокристаллической структурой.

3. В результате изучения кинетики формирования, структуры и свойств покрытий, полученных при термогидрохимической обработке инструментальных сталей, твердых сплавов и алмазосодержащих материалов в оксидосодержащей TiO_2+MoO_3 дисперсионной

среде, установлено, что на стадии гидрохимической обработки образуются твердосмазочные покрытия с нанокристаллической структурой, а после их нагрева свыше 500 °С – с нанокompозитной; при этом формируются два типа композиционных структур, построенных из макро-, микро- и наноэлементов с разными свойствами: 1) в самом инструменте в виде композиции «твердосмазочный слой – переходный высоконапряженный слой – прочная матрица»; 2) в нанокompозитном покрытии, в котором чередуются нано- и микро-размерные зерна, а также установлен двойной эффект улучшения эксплуатационных характеристик инструментов за счет формирования твердосмазочных покрытий и создания в подслое высоких напряжений сжатия, сравнимых с их уровнем при ППД; а полученные покрытия, имеющие нано- и нанокompозитную структуры, превосходят по коэффициенту трения наноструктурированное алмазоподобное PVD покрытие.

4. На основании квантово-химического моделирования и экспериментальных исследований структурно-фазовых превращений инструментальных сталей, подвергнутых упрочняющей термоциклической обработке с незавершенными фазовыми превращениями, установлено, что в инструменте формируются два типа структурных композиций: 1) композиционная структура, в которой чередуются зерна с разной твердостью и степенью легирования по причине незавершенности твердофазных $\alpha \leftrightarrow \gamma$ превращений; 2) градиентная структура, в которой из-за неполного прогрева инструмента от поверхности к сердцевине уменьшаются твердость и хрупкость зерен, что в целом обеспечивает оптимальное сочетание обратно зависимых прочностных и пластичных свойств. При этом установлено, что наибольшее улучшение механических свойств сталей достигается при выполнении термоциклической обработки в пределах: при двух – шести циклах с изотермической выдержкой в каждом цикле, составляющей 50–75 % от времени полного прогрева сталей, обеспечивающих формирование метастабильной, мелкоизмельченной и высоколегированной структуры, дискретной по составу в зернах и градиентной по сечению инструмента.

Положения, выносимые на защиту

1. Системный подход к разработке технологий поверхностной и объемной обработки для повышения работоспособности металлообрабатывающих инструментов, заключающийся в комплексном определении требований, предъявляемых к способам упрочняющей обработки, инструментам, покрытиям и их материалам, в системном анализе механизмов улучшения свойств, оценке критериев конструкционной прочности и возможности совместимости прочностных и пластичных свойств, который позволил предложить перспективный путь повышения эксплуатационных характеристик инструментов за счет формирования в них и покрытиях многоуровневых композиционных и градиентных структур, рационально сочетающих разнородные по составу и свойствам макро- (матрица, слой), микро- и наноэлементы (зерна, субзерна, частицы), тем самым обоснованно разрабатывать высокоэффективные методы химико-термической, термогидрохимической и упрочняющей термоциклической обработки инструментов.

2. Результаты изучения кинетики, термодинамики и химизма процессов формирования многокомпонентных карбидных слоев при химико-термической обработке штамповых сталей, позволившие установить два механизма структурообразования сверхтвердых карбидных покрытий: 1) для покрытий с гетерофазной структурой из взаимно растворимых карбидов Cr, Ti, V, Mo, Nb и 2) для покрытий с композиционной структурой из нерастворимых друг в друге карбидов Ti и Mn с включениями Al, который обеспечивает ускоренный синтез карбидов и трехкратное увеличение толщины Ti-Mn покрытий в сравнении с другими покрытиями, и смоделировать стадии формирования двух- и трехкомпонентных

карбидных слоев на сталях и за счет этого управлять структурой и свойствами многокомпонентных карбидных покрытий.

3. Результаты исследования влияния технологических параметров химико-термической обработки и состава алюминотермических сред в системах оксидов Cr-Ti-V, Cr-Ti-Mn, Cr-Ti-Mo, Cr-V-Mo, Cr-V-Mn, Cr-V-Nb на структурно-фазовое состояние и свойства многокомпонентных карбидных покрытий на штамповых сталях, позволившие установить два типа композиционных структур: 1) в инструменте в виде композиции «сверхтвердое покрытие – переходный слой – вязкая матрица»; 2) в покрытии, состоящем из твердых карбидов с мягкими Al-включениями, и выявить упрочняющий эффект покрытий, созданный за счет формирования в них гетерофазных структур с преобладанием сверхтвердых карбидов титана и ванадия, а также из-за образования взаимно растворимых и сложнoleгированных карбидов, что обеспечило значительное повышение физико-механических и эксплуатационных свойств двух- и трехкомпонентных карбидных покрытий по сравнению с однокомпонентным карбидохромовым покрытием.

4. Результаты экспериментальных исследований гранулометрического состава дисперсных керамических порошков, содержащихся в водных насыщающих средах, и кинетики структурообразования покрытий при изменении параметров процессов гидрохимической обработки, позволившие установить эффект нанодиспергирования керамических микрочастиц в условиях расклинивающего действия ПАВ, циклической смены теплового, химического градиентов и «псевдокавитационного» термогидродинамического воздействия кипящей водной дисперсионной среды, и тем самым обосновать возможность получения гидрозолей керамических материалов, в которых при проведении гидрохимической обработки можно сформировать наноструктурированные покрытия на инструментах.

5. Результаты изучения влияния состава водных дисперсионных сред и температурно-временных параметров термогидрохимической обработки на триботехнические свойства сталей и твердых сплавов, позволившие установить: 1) что полученные покрытия обладают твердосмазочными свойствами; 2) покрытия, осажденные в водных средах с дисперсными оксидами, имеют более низкий коэффициент трения, чем в средах с дисперсными карбидами, нитридами, углеродными материалами; 3) наноструктурированные покрытия, полученные в водной дисперсионной среде, содержащей смесь оксидов титана и молибдена, обладают наименьшим коэффициентом трения и по трибосвойствам превосходят известное наноструктурированное алмазоподобное PVD покрытие, а также определить оптимальные параметры термогидрохимической обработки, обеспечивающие максимальное повышение эксплуатационных свойств металлообрабатывающих инструментов и их материалов.

6. Результаты исследования влияния режимов термогидрохимической обработки на морфологию, структуру, химический состав, напряженное состояние поверхностного слоя и стойкость металлообрабатывающих инструментов из сталей, твердых сплавов и алмазосодержащих материалов, позволившие установить два вида композиционных структур: 1) в инструменте как композицию «твердосмазочное покрытие – переходный слой – матрица»; 2) в покрытии как композицию из нано- и микроразмерных зерен и выявить двойной эффект улучшения свойств инструментов, созданный при термогидрохимической обработке: во-первых, за счет формирования твердосмазочных покрытий и, во-вторых, из-за создания в подслое высоких макронапряжений сжатия, что обеспечило значительное повышение работоспособности инструментов по сравнению с исходным состоянием.

7. Результаты квантово-химического моделирования и экспериментальных исследований влияния режимов упрочняющей термоциклической обработки с незавершенными фазовыми превращениями в циклах на структурно-фазовое состояние и механические свойства быстрорежущих и штамповых сталей, позволившие установить два вида структурных композиций: композиционную структуру сталей, в которой чередуются зерна с разной твердостью и степенью легирования, и градиентную структуру, в которой от поверхности к сердцевине инструмента уменьшаются его твердость и хрупкость, и выявить упрочняющий эффект, созданный при термоциклической обработке с незавершенными фазовыми превращениями за счет формирования метастабильной, мелкоизмельченной, высоколегированной структуры инструментальных сталей с малым содержанием остаточного аустенита и большой долей дисперсных карбидов, а также определить оптимальные параметры упрочняющей термоциклической обработки, обеспечивающие максимальное улучшение эксплуатационных свойств инструментов по сравнению с известной термоциклической обработкой.

Личный вклад соискателя ученой степени

Основные положения, выводы и рекомендации диссертации принадлежат автору и являются итогом многолетней работы. Автором предложены методологические подходы для повышения эксплуатационных характеристик инструментов и принципы создания в них композиционных и градиентных структур. В результате разработаны экономичные и технологичные методы поверхностной и объемной обработки инструментов, максимально повышающие их работоспособность. Проведены систематические исследования структуры и оптимизация свойств инструментальных материалов, подвергнутых химико-термической, термогидрохимической и упрочняющей термоциклической обработке. Автором предложены механизмы формирования структур при обработке инструментальных материалов. Все работы, связанные с обработкой и испытаниями образцов, выполнены автором. Самостоятельно внедрены в производство новые способы повышения работоспособности инструментов.

Закономерности карбидообразования при химико-термической обработке стали изучали совместно с Б. Б. Хиной и С. Д. Башлаком, а по твердому сплаву – с В. Побережным. В сотрудничестве с В. Е. Гусаковым проведено моделирование композиционного структурообразования при термоциклической обработке стали. Структуру и триботехнические свойства материалов, подвергнутых термогидрохимической обработке, исследовали вместе с Г. К. Жавнерко, А. Е. Соломянским, О. О. Смиловенко. Компьютерное проектирование технологий выполнено при участии О. В. Жилинского. Консультации по теме диссертационной работы оказывали П. А. Витязь, В. К. Шелег, О. Г. Девойно.

Апробация диссертации и информация об использовании ее результатов

Основные результаты диссертации представлены и обсуждены на следующих международных научно-технических конференциях (МНТК) и семинарах (МС): на МНТК «Машиностроение и техносфера XXI века» (Севастополь, 2000, 2003, 2008, 2009); МНТК по материалам и технологиям для упрочнения и восстановления изделий машиностроения (Новополоцк, 2001, 2003, 2005, 2007); МНК «Технология» (Братислава, Словакия, 1999, 2005); МНК «Инструмент» (Братислава, Словакия, 1999, 2000, 2002, 2004); МНК «Металл» (Острава, Чехия, 2000); МНК «СО-МА-ТЕСН 2001» (Трнава, Словакия, 2001); МНК «Надежность машин и технических систем» (Минск, 2001); МНК по порошковой металлургии (Минск, 2004, 2011); МС МНТЦ по новым материалам и технологиям (Москва, 2001 и 2006; Париж, Франция, 2002; Лиссабон, Португалия, 2002; Минск, 2005); МНК

«ESDA 2006» (Турин, Италия, 2006); МНТК «НАНО-2008» (Минск, 2008); Белорусско-копейском семинаре (Минск, 2011); МНТК научных работников и преподавателей БНТУ (Минск, 2011–2018), МС по «Green» технологиям (Ганновер, Германия, 2012, 2013), МНТК «ТОР» (Братислава, Словакия, 2016–2018).

На основе проведенных теоретических и экспериментальных исследований автором разработаны новые (запатентованные) технологии с комплектом оборудования для химико-термической, термоциклической и термогидрохимической обработки стальных, твердосплавных и алмазных инструментов. Разработанные технологии и износостойкие инструменты использованы на 12 предприятиях Беларуси и России. Практическая значимость подтверждена актами и справками на общую сумму более 1 млн долларов США в эквиваленте.

Опубликование результатов диссертации

По теме диссертации опубликовано 159 печатных работ, в том числе 4 монографии (3 за рубежом), 42 статьи в рецензируемых научных журналах, 16 статей в научных сборниках (из них 9 – в изданиях из перечня ВАК) общим объемом 1233 с. (56 а.л.), 26 работ в материалах конференций, 25 тезисов докладов на конференциях, 37 авторских свидетельств, 8 патентов на изобретения, 1 положительное решение на выдачу патента.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, общей характеристики работы, основной части шести глав, заключения, списка использованных источников (342 наименования), списка публикаций автора и 4 приложений. Полный объем диссертации составляет 545 страниц. Работа включает 183 страницы текста, 145 рисунков и 50 таблиц. В приложениях объемом в 201 страницу представлены результаты моделирования процесса термоциклической обработки эвтектоидной стали, технологические процессы, методики и акты испытаний, акты внедрения.

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

В первой главе представлены проблемы и перспективы повышения работоспособности металлообрабатывающих инструментов путем поверхностной и объемной обработки. На основании эксплуатационной оценки стальных, твердосплавных и алмазных инструментов для металлообработки установлены две главные причины выхода их из строя: хрупкое разрушение в виде выкрашивания режущей кромки, поломки тонких и ударных инструментов или пластическое разрушение в виде потери формоустойчивости и затупления режущей кромки в условиях адгезионно-усталостного, абразивного, окислительного или диффузионного изнашивания. Сформулированы требования, предъявляемые к инструментам, покрытиям, их материалам и технологиям их упрочняющей обработки. Сравнительный анализ методов, повышающих работоспособность инструментов, показал, что наиболее эффективными и технологичными являются методы термохимического и термоциклического воздействия. По каждому виду воздействия рассмотрены преимущества известных способов, а также механизмы улучшения структуры и свойств инструментов. В результате рекомендованы два поверхностных способа химико-термической и термогидрохимической обработки для получения сверхтвердых и твердосмазочных покрытий, а также один способ термоциклической обработки для объемного упрочнения инструментов.

Вторая глава посвящена системному анализу литературных данных и концептуальному развитию научных основ в области повышения работоспособности инструментов и композиционного структурообразования.

Научно обоснован новый подход к оценке конструкционной прочности (КП). КП рассматривается в более широком материаловедческом аспекте – как сопротивление инструментов внешним воздействиям, приводящим к снижению их работоспособности или разрушению. Согласно предложенной классификации КП включает в себя эксплуатационные критерии жесткости, прочности, трещиностойкости и долговечности. Даны рекомендации по выбору инструментальных материалов для повышения КП с приоритетным использованием тугоплавких сплавов с градиентной, нанокompозитной и других видов композиционных структур.

Существующий антагонизм критериев прочности и трещиностойкости значительно снижает КП. Важной технической задачей на сегодня является усиление эффективности (синергизма) указанных критериев для повышения КП. Анализ работ в области перспектив развития инструментов показал, что инструментальные материалы уже достигли пределов своих свойств, поэтому существенно улучшить обратно зависимые прочностные и пластичные свойства можно двумя путями: либо с помощью композиционных и градиентных материалов для изготовления инструментов, либо с помощью совершенно новых способов обработки инструментов, формирующих эти структурные композиции. В работе впервые предложена классификация (см. рисунок 1), где обобщены сформированные при упрочняющей обработке инструментов структурные композиции, рационально сочетающие разнородные по составу и свойствам макро- (матрица, слой), микро- и наноэлементы (зерна, субзерна, частицы). Отмечено, что при одной и той же обработке могут формироваться несколько видов структурных композиций.

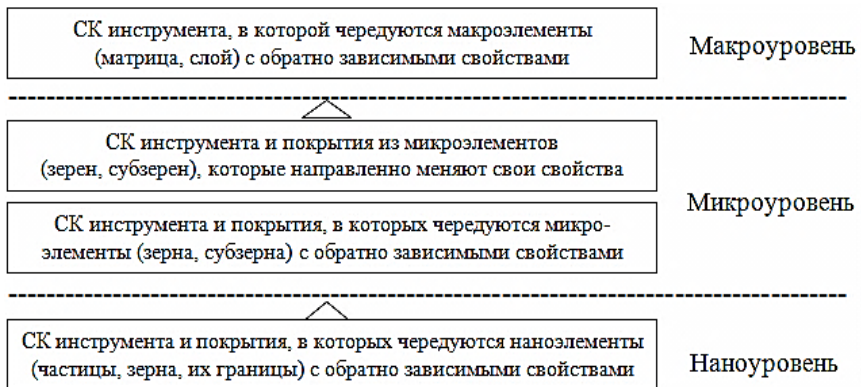


Рисунок 1. – Классификация структурных композиций (СК), сформированных путем упрочняющей обработки металлообрабатывающих инструментов

В настоящей работе сформулированы теоретические основы улучшения свойств инструментов за счет изменения энергетического состояния, структуры, химического состава материалов и внешней среды, в которой их обрабатывают и эксплуатируют.

Впервые систематизированы механизмы и способы улучшения эксплуатационных свойств инструментов на основе теорий метастабильности микроструктур и дислокаций, теорий трения и коррозии (см. рисунок 2).

Согласно теорий Дж. Мартина, Р. Доэрти, С. Т. Конобеевского максимально улучшенными свойствами обладают материалы с метастабильными микроструктурами, которые можно сформировать при создании избыточной свободной энергии в инструментальном материале и окружающей среде, а также на внешней и внутренней поверхности раздела этого материала. Автором выдвинута новая гипотеза о том, что значительного прироста свободной энергии можно достичь при наличии градиентов и ускоренной циклической смене параметров процесса (температуры, химической концентрации, др.), а также в условиях циклических твердофазных и агрегатных превращений.

Согласно дислокационным теориям для повышения КП кристаллических материалов должны выполняться условия синергизма критериев прочности и трещиностойкости. Повышение прочности – это результат действия нескольких механизмов упрочнения: за счет структурных напряжений кристаллической решетки ($\Delta\sigma_H$), созданных искажением решетки силами Пайерлса-Набарро, твердорастворного ($\Delta\sigma_{Т.Р.}$), деформационного ($\Delta\sigma_D$), зернограничного ($\Delta\sigma_3$) или субструктурного ($\Delta\sigma_C$), дисперсионного ($\Delta\sigma_{дисп.}$) упрочнения и упрочнения, полученного от межфазовых деформаций в результате перлитного или мартенситного превращения, вносимого матричными фазами ($\Delta\sigma_{М.Ф.}$). Тогда прирост предела текучести упрочненных сталей и сплавов можно описать уравнением:

$$\sigma_T = \sum \Delta\sigma = \Delta\sigma_H + \Delta\sigma_{Т.Р.} + \Delta\sigma_D + \Delta\sigma_3 \text{ (или } \Delta\sigma_C) + \Delta\sigma_{дисп.} + \sigma_{М.Ф.} \quad (1)$$

Согласно теориям трения и коррозии обобщены механизмы улучшения эксплуатационных свойств и меры защиты инструментов (см. рисунок 2).

На основании обобщенного анализа предложен системный подход к разработке технологий поверхностной и объемной упрочняющей обработки металлообрабатывающих инструментов, заключающийся в комплексном определении требований, предъявляемых к способам упрочняющей обработки, инструментам, покрытиям и их материалам, в оценке критериев конструкционной прочности и взаимосвязи прочностных и пластичных свойств, в системном анализе механизмов и методов улучшения свойств, позволившем предложить перспективный путь повышения эксплуатационных характеристик инструментов за счет формирования в инструментах и их покрытиях многоуровневых композиционных и градиентных структур, обеспечивающих максимальную конструкционную прочность и работоспособность инструментов.

Для оценки возможности композиционного построения структуры в настоящей работе проведено математическое моделирование структурно-фазовых превращений процесса УТЦО стали У8 путем решения нелинейного уравнения Фоккера–Планка при условии нанокластерного образования зернистого цементита Fe_3C на предварительных перед закалкой стадиях циклического неравновесного распада γ -твердого раствора. Для этого с помощью программного комплекса методом квантовой химии впервые проведены расчеты концентрации углерода и цементита в стальной перлитной матрице, а также определены размеры нанокластеров Fe_3C в зависимости от числа циклов термоциклической обработки.

| Механизмы и способы улучшения эксплуатационных свойств инструментов | | | |
|---|---|--|---|
| Согласно энергетическим теориям | Согласно дислокационным теориям | Согласно теориям трения | Согласно теориям коррозии |
| Получение метастабильной структуры в материале | Торможение дислокаций и создание популяционных барьеров для движущихся дислокаций | Снижение сил адгезии в зоне трения и увеличение твердости трущейся поверхности | Создание химически инертной поверхности и матрицы |
| <p>Для повышения конструкционной прочности</p> <p>Избыточная свободная энергия в материале и внешней среде</p> <ul style="list-style-type: none"> • Градиенты температуры, напряжения, давления, концентрации, частоты колебаний и др. • Скоротечность изменения указанных параметров процесса • Циклическая смена указанных параметров, а также многократное повторение твердофазных и других агрегатных превращений Избыточная свободная энергия на поверхности раздела (материала с внешней средой, на границах фаз и зерен материала) • Комплексное насыщение поверхности материала вакансиями, дислокациями, атомами, др. • Создание многофазной и сильно измельченной структуры материала | <p>Для повышения прочности</p> <p>Высокая плотность дислокаций – деформационное (дислокационное) упрочнение</p> <ul style="list-style-type: none"> • Множество барьеров – зернограничное, (субструктурное) и дисперсионное упрочнение • Поля напряжений, созданные искаженным кристаллической решетки – упрочняющие силы Пайерлса–Набарро, твердотвердое упрочнение и упрочнение в результате межфазовых деформаций • Минимальная плотность дислокаций или их отсутствие в решетке (схема Оudinга) <p>Для повышения трещиностойкости</p> <ul style="list-style-type: none"> • Равномерная плотность дислокаций • Регулярное расположение дисперсных частиц, которые огибают движущиеся дислокации • Разветвленные границы зерен, меняющие направление микротрещин • Чередование зон с разной плотностью дислокаций в кристаллической структуре материала | <p>Для повышения износостойкости</p> <p>Низкая адгезия поверхности</p> <ul style="list-style-type: none"> • Увеличение в поверхностных слоях плотности вакансий более 10% (теория Берналпа) • Осаждение на поверхности и введение материалов и др. • Наличие на поверхности и в зоне трения ПАВ (Эффект Ребиндера, Дерямина) • Наличие на поверхности и в зоне трения материалов со сложной структурой и слабыми молекулярными связями (сульфидов, графита, жирных кислот, др.) • Создание квазижидкой пленки при электрохимическом растворении легирующих элементов в сплаве (Эффект Киркендалла) • Высокая твердость поверхности • Формирование оксидной пленки определенного состава и структуры (Эффект Роско) и сверхтвердых покрытий • Упрочнение разными методами | <p>Для повышения коррозионной стойкости</p> <ul style="list-style-type: none"> • Наличие коррозионностойких металлов Сг, Ni в составе инструментальной матрицы и тугоплавких соединений (оксидов, карбидов, нитридов и др) в составе покрытия • Получение однофазной и химически однородной структуры матрицы и покрытий • Введение ингибиторов коррозии в зону трения |

Рисунок 2. – Классификация механизмов и способов улучшения эксплуатационных свойств инструментов

Анализ проведенных расчетов показал, что в результате предварительного термомиклирования стали У8 формируется композиционная структура, состоящая из двух видов зерен: из зерен, в которых концентрация углерода возрастает, и зерен, в которых она уменьшается. Поскольку эта композиционная структура фиксируется при закалке и имеет мартенситную природу, в первом случае твердость и хрупкость мартенситных зерен повышаются, а во втором – эти показатели снижаются. С помощью теории эффективной среды и статистических методов расчета выведены формулы для определения эффективных параметров твердости и ударной вязкости, которые учитывают значения HRC, КС и относительный объем каждого из двух типов зерен с разным содержанием углерода. Сравнительный анализ показал, что расчетная зависимость эффективной твердости и ударной вязкости стали У8 от числа циклов УТЦО носит экстремальный характер, такой как в реальном процессе УТЦО, а разница расчетных и реальных значений твердости и ударной вязкости инструментальной стали У8 составляет от 5 до 30 %.

В третьей главе изложены результаты теоретических и экспериментальных исследований широкой гаммы многокомпонентных карбидных покрытий, полученных на инструментальных сталях У8, 7Х3, Х12 методом ХТО в алюминотермических средах шести насыщающих систем на основе оксидов Cr-Ti-V, Cr-Ti-Mn, Cr-Ti-Mo, Cr-V-Mo, Cr-V-Mn, Cr-V-Nb. Сформулированы основные принципы разработки процессов, предусматривающие создание многокомпонентной и многофазной структуры покрытий при взаимной растворимости в них карбидов.

В главе проведен системный анализ структуры и фазового состава двух- и трехкомпонентных диффузионных карбидных покрытий и изучены закономерности их формирования в зависимости от сочетания и количества насыщающих элементов и температурно-временных условий обработки. Результаты фазового анализа карбидных слоев на стали У8 обобщены в трех насыщающих симплекс-системах на основе оксидов Cr-Ti-V, Cr-Ti-Mn (рисунк 3) и Cr-Mn-V.

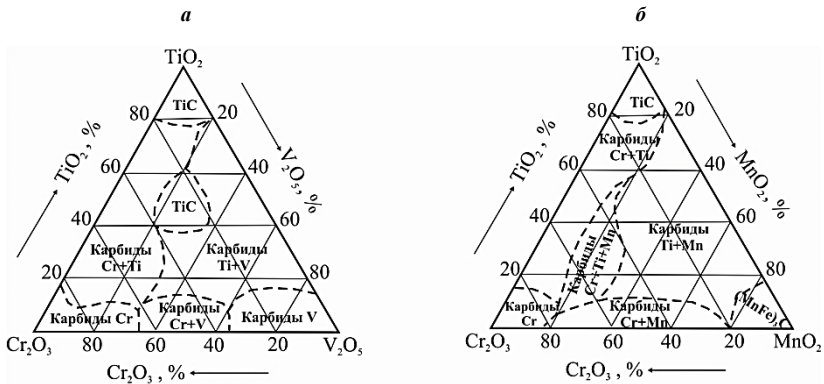
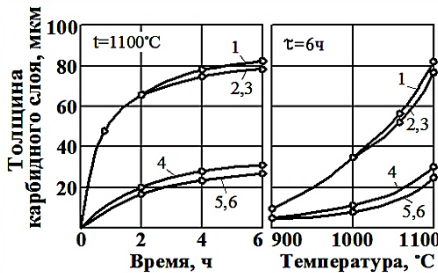


Рисунок 3. – Зависимость фазового состава карбидных покрытий на стали У8 от насыщающего состава в системах оксидов Cr-Ti-V (а), Cr-Ti-Mn (б)

Отмечено, что при диффузионном насыщении стали карбидообразующими элементами формируется карбидное покрытие вместе с зоной твердого раствора и обезуглероженной зоной, что в целом создает композиционную структуру. Толщина многокомпонентных карбидных покрытий в равных условиях обработки зависит от сочетания металлов – диффузанта. Показано, что в формировании этих покрытий участвуют все насыщающие металлы, которые либо образуют самостоятельные фазы, либо легируют другие карбиды. Ti, как наиболее сильный карбидообразователь, преобладает в большинстве многокомпонентных карбидных покрытий; Mn формирует отдельную зону сложных карбидов типа $(Mn, Fe)_3C$. Диффузионные Cr-Ti-V и Cr-Ti-Mn покрытия на стали содержат до 60–100 % сверхтвердых легированных карбидов титана и ванадия, причем в сложнoleгированных карбидах металлов IV–VI групп ПСЭ растворены от 2 до 30 % одного или более насыщающих металлов. Отмечено, что карбидный состав многокомпонентных диффузионных покрытий меняется со временем в изотермических условиях насыщения.

Установлено, что по кинетике (рисунок 4) и механизму формирования все многокомпонентные карбидные покрытия можно разделить: 1) на покрытия с гетерофазной структурой, состоящей из взаиморастворимых карбидов (*d*-металлов IV–VI групп ПСЭ); 2) покрытия, состоящие из слоев взаимно нерастворимых карбидов на базе Ti и Mn (*d*-металлов IV и VII групп ПСЭ) с Al-включениями.



Насыщаемые стали: 1, 4 – сталь У8;
2, 5 – сталь 7Х3; 3, 6 – сталь Х12

Рисунок 4. – Влияние условий ХТО на толщину Ti-Mn (1–3) и Cr-Ti-V (4–6) карбидных покрытий

Аномальный рост покрытий, полученных на сталях в смеси на основе: 25 % TiO_2 + 75 % MnO_2 , обусловлен ускорением диффузии элементов и синтеза карбидов в жидкометаллической фазе на основе Al. Зависимость толщины покрытий от времени процесса близка к параболической, а от температуры – к экспоненциальной.

На основании кинетики изменения карбидного состава покрытий и термодинамических расчетов смоделированы и схематически изображены процессы термокинетического формирования Cr-Ti-V, Cr-V, Ti-V, Ti-Mn карбидных покрытий на стали У8, подобно представленному на рисунке 5. В этих процессах рассмотрены все стадии прохождения процессов в насыщающей среде и на обработанной стальной поверхности с указанием возможных химических реакций. При этом учтены особенности химических процессов при многокомпонентном диффузионном насыщении сталей: взаимодействие хлоридов металлов между собой, взаимодействие карбидных фаз с насыщаемыми металлами и различное зародышеобразование карбидов на стальной поверхности. Методом термодинамического моделирования с использованием программы АСТРА-4 впервые рассчитаны равновесные составы насыщающих алюминотермических сред и газотранспортные механизмы доставки к стальной поверхности атомов карбидообразующих металлов. Результаты этого моделирования показали: 1) что алюминотермически восстановленные смеси могут содержать до 2,6 % Al; 2) состав насыщающей среды меняется со временем из-за взаимодействия различных фаз;

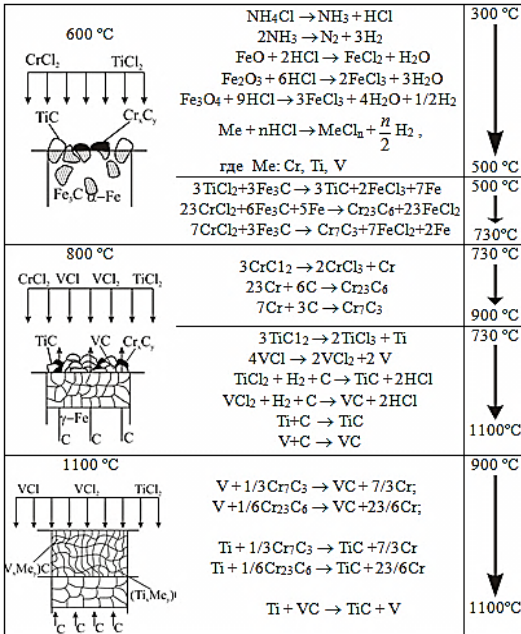


Рисунок 5. – Схема формирования Cr-Ti-V карбидного диффузионного покрытия на стали У8

дости и износостойкости) более 100 типов диффузионных карбидных покрытий на сталях. С увеличением числа насыщающих металлов возрастают микротвердость и абразивная износостойкость покрытий на сталях. Диффузионные слои на основе карбида титана, полученные на сталях в системах Cr-Ti-V, Cr-Ti-Mn, имеют наибольшие значения микротвердости ($H_{200} = 37$ и 40 ГПа) и абразивной стойкости ($K_w = 57$ и 70). Покрытия на основе карбидов ванадия, полученные на сталях в системах Cr-Ti-V, Cr-V-Nb, имеют микротвердость ($H_{200} = 40$ и 35 ГПа) и наилучшую стойкость при сухом трении скольжения ($K_w = 20,4$ и $22,3$).

Проведена оптимизация процессов ХТО сталей У8, 7Х3, Х12 в насыщающих системах оксидов металлов: Cr-Ti-V, Cr-Ti-Mn, Cr-Ti-Mo, Cr-V-Mo, Cr-V-Mn, Cr-V-Nb и разработан пакет симплекс-диаграмм, описывающих влияние насыщающих элементов на фазовый состав и свойства многокомпонентных карбидных покрытий. В результате абразивная износостойкость карбидных покрытий, полученных в насыщающих смесях на основе $25\% \text{Cr}_2\text{O}_3 + 50\% \text{TiO}_2 + 25\% \text{MnO}_2$, $25\% \text{Cr}_2\text{O}_3 + 50\% \text{TiO}_2 + 25\% \text{V}_2\text{O}_5$, $25\% \text{TiO}_2 + 75\% \text{MnO}_2$ повысилась в 11,4–30,7 раз, а стойкость при сухом трении скольжения карбидного покрытия, образованного в порошковой насыщающей смеси на основе $15\% \text{Cr}_2\text{O}_3 + 85\% \text{V}_2\text{O}_5$, увеличилась в 3,8–20,1 раза по сравнению с однокомпонентным карбидохромовым покрытием, причем микротвердость разработанных покрытий на сталях возросла до 20,3–35,0 ГПа.

3) основные механизмы переноса к поверхности атомов карбидообразующих металлов осуществляются через газовую фазу их хлоридов; 4) зарождение и рост новых зерен определяются не всегда термодинамикой, а чаще кинетикой процесса ХТО; 5) последовательность образования фаз может отклоняться от равновесной диаграммы; 6) рост карбидов – значительно более медленный процесс, чем зарождение; 7) лимитирующей стадией формирования покрытий является односторонняя диффузия углерода из основы к поверхности через образующуюся карбидную фазу, при этом рост слоя карбидов происходит на внешней поверхности стали и др.

Проведен сравнительный анализ структурно-фазового состава и свойств (микротвер-

При многокомпонентной диффузионной карбидизации инструментальных сталей методом ХТО установлены два типа композиционных структур (КС): 1) в покрытии в виде композиции из слоев взаимно нерастворимых твердых карбидов с мягкими Al-включениями, построенной из микроэлементов (зерен, частиц) с разными свойствами; эта КС создается при насыщении сталей титаном и марганцем; 2) в инструменте в виде композиции «сверхтвердый карбидный слой – переходный слой – менее хрупкая матрица», построенной из макроэлементов (матрица, слой) с разными свойствами; такая КС присуща всем остальным процессам формирования диффузионных карбидных покрытий (рисунок 6).

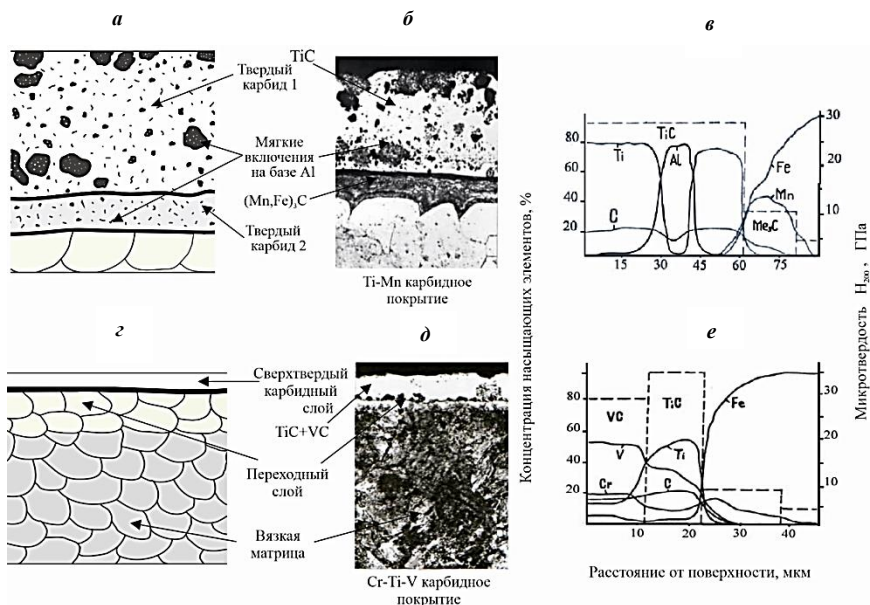


Рисунок 6. – Схематическое изображение композиционных структур (КС), сформированных при диффузионном насыщении стального инструмента карбидообразующими металлами

Экспериментально доказано, что упрочняющий эффект диффузионных многокомпонентных карбидных покрытий создается различными механизмами. Согласно дислокационным теориям, благодаря преобладанию в составе покрытий сверхтвердых карбидов титана и ванадия (IV–V групп ПСЭ), образованию сложноголегированных карбидов, в которых растворены от 2 до 30 % одного и более насыщающих элементов, реализуются механизмы твердорастворного и субструктурного упрочнений. В соответствии с адгезионно-

деформационной и другими теориями трения улучшение износостойкости сталей создается благодаря высокой твердости покрытий, которая согласно закономерностям Н. С. Курнакова экстремально повышается при наличии взаимной растворимости карбидов, входящих в состав полученных покрытий.

Четвертая глава посвящена исследованию процессов поверхностного упрочнения готовых к эксплуатации режущих и штамповых инструментов из сталей Р6М5, Р18 и У8, твердых сплавов ВК6, Т15К6 и алмазосодержащих материалов на металлической и бакелитовой связке методом термогидрохимической обработки (ТГХО), основанной на принципе циклической парожидкостной трансформации с применением систем водных дисперсионных сред на основе тугоплавких соединений (оксидов, карбидов, нитридов) и углеродных материалов. Сформулированы принципы разработки процессов для создания твердосмазочных керамических покрытий с метастабильной, высоко измельченной структурой. Разработанный на этой основе метод ТГХО включает: а) гидрохимическую обработку (ГХО) инструментов в кипящих водных средах с нано- и микродисперсными частицами керамических материалов при температуре 95–100 °С в течение 10–70 мин для осаждения нанопокровтий; б) их последующую термообработку (ТО) с изотермической выдержкой при 150–1050 °С в течение 0,5–1 ч. Научно обоснованы механизмы формирования покрытий и диспергирования микропорошков при ГХО. На основании известных теорий и экспериментальных исследований влияния параметров процессов ГХО на изменение гранулометрического состава дисперсных порошков керамических материалов, содержащихся в водных насыщающих средах, и на кинетику структурообразования полученных покрытий, установлен эффект нанодиспергирования керамических микрочастиц, что можно объяснить суммарным влиянием разных факторов: расклинивающим действием ПАВ при его поверхностной адсорбции (эффект П. А. Ребиндера) и «псевдокавитационным» термогидродинамическим воздействием кипящей водной среды при ускоренной циклической смене термического, химического и других градиентов, создаваемых в дисперсной системе. Тогда степень гидрохимического диспергирования керамических микрочастиц можно описать общим уравнением, учитывающим термическое, химическое и физическое воздействия:

$$r = F(\sigma_s \cdot n \cdot \tau / \Delta P \cdot \Delta C \cdot \Delta T \cdot \Delta f \cdot \Delta x_i), \quad (2)$$

где $F(\dots)$ – функция математической зависимости; r – радиус дисперсной частицы; σ_s – поверхностное натяжение жидкой среды; n – число циклов смены градиента; τ – продолжительность смены градиента; ΔP – градиент давления; ΔC – химический градиент; ΔT – температурный градиент; Δf – градиент частоты колебаний; Δx_i – другие градиенты параметров процесса.

Сравнительный анализ триботехнических свойств (при сухом трении) свыше 60 видов покрытий, полученных при ГХО стали У8 и твердого сплава ВК6, показал: а) что покрытия, осажденные в водных средах с дисперсными оксидами имеют более низкий коэффициент трения, чем в средах с дисперсными карбидами, нитридами, углеродными материалами (графитом, фуллереном, наноалмазом), а также превосходят по триботехническим свойствам известные нанооксидные CVD и PVD покрытия; б) увеличение числа керамических компонентов в водных дисперсионных средах ведет к снижению коэффициента трения полученных покрытий, наименьший из которых получен в водной дисперсионной среде, содержащей смесь оксидов $TiO_2 + MoO_3$.

Изучено влияние параметров ГХО в $\text{TiO}_2 + \text{MoO}_3$, SiO_2 , SiC и FeO – содержащих водных дисперсионных средах на коэффициент трения стали и твердого сплава. Во всех 8-ми случаях триботехнические свойства сплавов значительно повышаются в начальный период ГХО: стали У8 – при 50–70 мин, твердого сплава ВК6 – при 10–20 мин. При дальнейшем увеличении времени обработки сплавов наблюдается ухудшение свойств. Таким образом, впервые установлен эффект экстремального скачкообразного повышения (рисунок 7) триботехнических свойств инструментальных сплавов в зависимости от времени их обработки в условиях циклической парожидкостной трансформации водной дисперсионной среды.

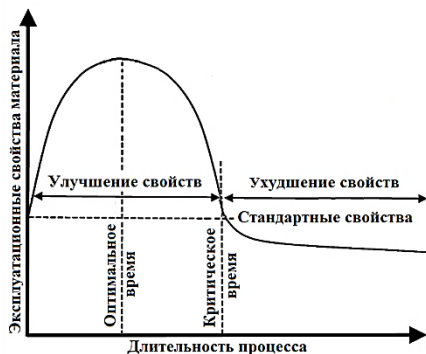
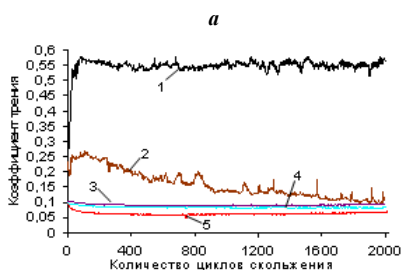
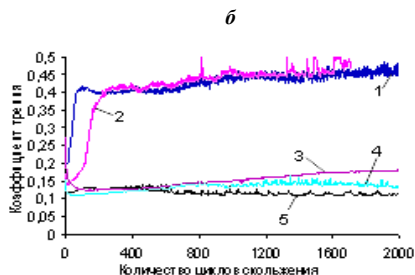


Рисунок 7. – Экстремальный характер изменения свойств материала от времени проведения циклической обработки

С помощью метода синтез-технологий проведено многомерное компьютерное проектирование технологий ТГХО инструментальных сплавов с применением водных дисперсных систем на основе $\text{TiO}_2 + \text{MoO}_3$, SiO_2 , SiC . В результате проведения ТГХО с использованием дисперсных оксидных составов водной среды: 41–43 % $\text{TiO}_2 + 57$ –59 % MoO_3 коэффициент трения без смазывающего материала поверхности стали (рисунок 8, а) снизился с 0,55–0,58 до 0,067 (в 8,2–8,7 раза), а твердого сплава (рисунок 8, б) – с 0,4–0,44 до 0,106 (в 3,8–4,2 раза), по сравнению с исходным состоянием.



1 – без обработки; 2 – алмазное PVD покрытие; 3 – ГХО + ТО (1050 °С); 4 – ГХО без ТО; 5 – ГХО + ТО (190 °С)



1 – без обработки; 2 – Ti-Mo-V карбидное покрытие; 3 – ГХО + ТО (1050 °С); 4 – ГХО без ТО; 5 – ТГХО + ТО (1035 °С)

Рисунок 8. – Изменение коэффициента трения без смазывающего материала поверхностей стали У8 (а) и твердого сплава ВК6 (б) до и после ТГХО

Разработанные покрытия, полученные при ТГХО, обладают твердосмазочными свойствами и хорошо пластифицируются, сохраняют минимальные значения коэффициента

трения в течение всего времени эксплуатации, термически стабильны до 1050 °С и по триботехническим свойствам превосходят известные твердосмазочные и алмазные нанопокрывтия. Отмечено, что при оптимальном режиме ТГХО исходная структура и шероховатость инструментов практически не меняются.

Исследованы процессы изнашивания инструментальных материалов, подвергнутых ТГХО с использованием водной дисперсионной среды, содержащей $\text{TiO}_2 + \text{MoO}_3$. Микроструктурный анализ треков износа показал, что поле разрушения исходной стали в 7–10 раз шире, чем после ТГХО; продукты разрушения до обработки стали – это крупно и мелко раздробленные частицы округлой формы, а после ТГХО – это слои из направленно пластифицированных мелких зерен и отдельные иглы столбчатой структуры. Аналогично при трении пластифицируются покрытия, полученные при ТГХО твердого сплава. Спектральный анализ треков показал, что в зоне трения химический состав стали неоднороден: содержание Fe увеличивается с 14 до 50 %, Mo уменьшается с 58 до 33 %, а Ti не меняется (1,5 %). После эксплуатации термогидрохимически обработанного алмазного инструмента, в отличие от необработанного, обнаружено большое число алмазных зерен с плоскими площадками износа, что говорит об усилении удержания алмазов в связке. Изучение в лабораторных условиях влияния параметров процесса ТГХО на эксплуатационные свойства стальных, твердосплавных и алмазных инструментов показало, что наивысшее увеличение стойкости (в 1,8–2,3 раза), по сравнению с необработанными инструментами достигается при максимальной температуре (95–100 °С) рабочей ванны, оптимальных параметрах ее кислотности (7–9 pH) и времени ГХО (50–70 мин для стального, 10–20 мин для твердосплавного и алмазного инструментов).

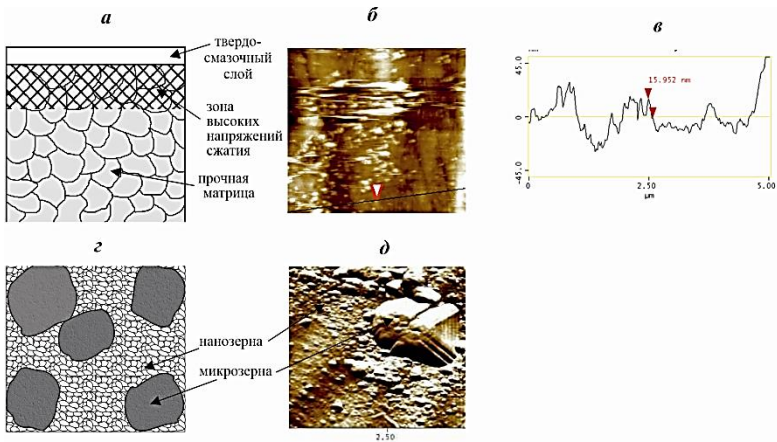
Изучение процессов структурообразования и кинетики роста покрытий при ТГХО в водной дисперсионной среде на основе $\text{TiO}_2 + \text{MoO}_3$ показало, что покрытия, полученные на стали и твердом сплаве, имеют схожие сложнотрещиноватые структуры, состоящие из неоднородных по химическому составу и форме нанокристаллитов на основе молибден- и титансодержащих оксидов. Скорость гидрохимического осаждения покрытий на стали составляет 200–250 нм/ч, а на твердом сплаве – в 4–6 раз быстрее. Эти покрытия имеют столбчатую нанокристаллическую структуру, а после нагрева выше 500 °С в них формируется наноконструктивная столбчатая структура. При ТГХО алмазосодержащего материала с применением оптимальной $\text{TiO}_2 + \text{MoO}_3$ дисперсионной среды на поверхности алмазных зерен и никелевой связки осаждается дискретное по химическому составу покрытие на основе титан- и молибденосодержащих соединений.

Исследования напряженного состояния инструментальной поверхности показали, что после ТГХО в водной дисперсионной среде на базе $\text{TiO}_2 + \text{MoO}_3$ величина макронапряжений сжатия увеличилась в 1,7–3,6 раза, по отношению к исходному состоянию: в стали У8 – с 270 до 470 МПа, в твердом сплаве ВК6 – с 70 до 210 МПа, в никелевой связке алмазосодержащего материала – с 50 до 180 МПа, а в алмазных зернах их уровень достиг нулевых значений. Напряжения 2-го и 3-го рода рентгеновским анализом не выявлены. В результате изучения влияния статической нагрузки при триботехнических испытаниях установлена оптимальная нагрузка (5–7 Н), при которой коэффициент трения покрытия снижается (на 25–35 %) до минимума, что связано со сменой адгезионной составляющей трения на деформационную.

В результате исследований установлен двойной характер улучшения эксплуатационных свойств инструментов при ТГХО: на поверхности осаждаются твердосмазочные покрытия на основе сложнотрещиноватых антифрикционных материалов,

а в подслое формируется зона высоких (180–470 МПа) макронапряжений сжатия, сравнимых с уровнем напряжений, создаваемых методами ППД.

При ТГХО металлообрабатывающих инструментов формируются два типа композиционных структур (КС): 1) в инструменте, в виде композиции «твердосмазочный слой – переходный слой – твердая матрица», состоящей из макроэлементов (матрица, слой) с различными свойствами, такая КС создается при выполнении всех режимов ТГХО; 2) в нанокompозитном покрытии, где чередуются пластичные нано- и твердые микроэлементы (зерна), эта КС образуется только после нагрева гидрохимически осажденных покрытий выше 500 °С (рисунок 9).



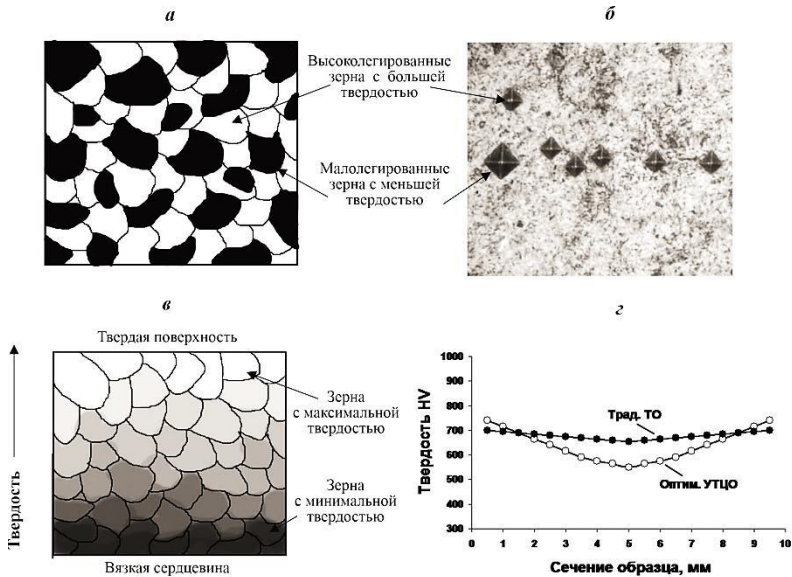
а – КС сплава типа «твердосмазочный слой – переходный слой – прочная матрица»;
б – структура $\text{TiO}_2\text{-MoO}_3$ нанопокpытия; **в** – размер частиц в $\text{TiO}_2\text{-MoO}_3$ нанопокpытии;
в – КС покpытия, в котором оптимально чередуются нано- и микроpазмерные зерна;
д – структура нанокompозитного $\text{TiO}_2\text{-MoO}_3$ покpытия

Рисунок 9. – Схематическое изображение композиционных структур (КС), создаваемых при ТГХО инструмента

При ТГХО инструментальных материалов реализуются различные механизмы улучшения свойств. Именно в сформированных на стали и твердом сплаве полиоксидных покpытиях со сверхмелкими нанозернами размером 16–35 нм достигается значительное увеличение их твердости до 2950–3750 HV, снижение коэффициента трения в 3,4–8,7 раза и повышение стойкости металлообрабатывающих инструментов в 2–2,3 раза по сравнению с исходным состоянием. С точки зрения энергетических теорий Дж. Мартина, Р. Доэрти, С. Т. Конобеевского такое повышение свойств можно объяснить формированием метастабильных структур покpытий с избыточной поверхностной энергией нанозерен. Согласно молекулярно-механической, дислокационно-вакансионной и другим теориям трения повышение износостойкости инструментов создается за счет высокой твердости нанопокpытий, а также из-за низкой прочности адгезионной связи в зоне трения полученных твердосмазочных покpытий, которые пластически деформируются по недислокационному механизму «зернограничного проскальзывания».

В пятой главе представлены результаты исследования процессов объемного упрочнения режущих инструментов из сталей P18, P6M5, P6M5K5 и штампов из стали У8 методом упрочняющей термоциклической обработки (УТЦО) с незавершенными фазовыми превращениями с применением нестандартных температурно-временных режимов на существующем традиционном оборудовании. Сформулированы структурно-энергетические принципы разработки процессов, направленные на создание метастабильной, сильно измельченной и высоколегированной структуры сталей. Разработанный метод УТЦО стальных инструментов основан на незавершенных многократных твердофазных $\alpha \leftrightarrow \gamma$ превращениях в предварительных перед закалкой циклах с большим градиентом температур.

При УТЦО с незавершенными фазовыми превращениями быстрорежущих и штамповых сталей впервые установлены два вида структурных композиций, рационально сочетающих обратно зависимые свойства мезо- и микроэлементов: 1) градиентная структура, в которой от поверхности к сердцевине уменьшаются твердость и хрупкость инструмента; 2) композиционная мозаично-дискретная структура, в которой чередуются зерна (субзерна) с разной твердостью и содержанием легирующих элементов (рисунок 10).



а – композиционная структура стали, где чередуются мало- и высоколегированные зерна; **б** – разброс микротвердости в стали У8 после УТЦО; **в** – градиентная структура стали, где твердость и хрупкость снижаются от поверхности к сердцевине; **г** – распределение твердости HV по сечению образца (10мм) из стали У8

Рисунок 10. – Схематическое изображение структурных композиций, создаваемых при упрочняющей термоциклической обработке (УТЦО) инструмента

Экспериментально доказано, что дискретная структура термоциклически (ТЦ) упрочненной стали У8 состоит из мягкого ($\min H_{10} = 1890$ МПа) малоуглеродистого (α_1) и твердого ($\max H_{10} = 10510$ МПа) высокоуглеродистого (α_2) мартенсита отпуска по сравнению с малым разбросом микротвердости ($H_{10} = 5700\text{--}8050$ МПа) при традиционной термообработке. Аналогично после УТЦО в матрице стали Р18 дискретно меняется твердость ($H_{10} = 8500\text{--}11000$ МПа) и содержание W (7,4–16,5 %) по сравнению с малым разбросом микротвердости ($H_{10} = 8000\text{--}8600$ МПа) и концентрации W (7,0–9,2 %) при традиционной термообработке. Отмечено, что в ТЦ упрочненной стали Р18 формируется еще ячеистая субструктура, где в приграничных зонах концентрируется Cr.

В результате исследования влияния параметров процесса УТЦО на свойства (твердость, прочность, вязкость, износостойкость) сталей Р6М5, Р6М5К5, Р18 и У8 установлен новый характер значительного повышения этих свойств при соблюдении определенной длительности процесса УТЦО, а именно: при выполнении трех–пяти циклов, а также при уменьшении на четверть–половину стандартного времени прогрева стальных образцов до 0,5–0,75 τ в каждом цикле. При дальнейшем увеличении времени прогрева τ в каждом цикле и количества циклов при УТЦО наблюдается ухудшение свойств инструментальных сталей. Таким образом, в двух процессах УТЦО и ПГХО подтверждается ранее выдвинутая гипотеза экстремального повышения свойств сталей в зависимости от длительности циклической обработки (см. рисунок 7). Эффект достигается при выполнении даже двух циклов УТЦО сталей Р6М5, Р18, Р6М5К5, о чем свидетельствует увеличение их ударной вязкости на 6–30 %, предела прочности при изгибе до 11 %, твердости на 1–2 единицы HRC, и стойкости фрез в 2,1–2,5 раза, по сравнению с традиционной термообработкой. Отмечен пик механических свойств сталей при варьировании перед закалкой температуры их термоциклического (ТЦ) охлаждения в пределах 700–770 °С для сталей Р18, Р6М5, Р6М5К5 и 200–350 °С для стали У8. После УТЦО сталей их структурные показатели напрямую влияют на свойства. Так, наименьшему размеру карбидов и наибольшему содержанию W, V, Cr в матрице стали Р18 соответствует максимум эксплуатационных свойств.

С помощью метода синтез-технологий проведено компьютерное проектирование технологий УТЦО инструментальных сталей и предложены режимы их реализации в производстве. Оптимальные режимы УТЦО для сталей Р6М5 и Р18 следующие: число циклов – пять, верхняя температура цикла $T_{\max} = 1220$ и 1270 °С с выдержкой $\tau_{\max} = 99$ и 65 с, нижняя температура цикла $T_{\min} = 749$ и 751 °С с выдержкой $\tau_{\min} = 190$ и 172 с; а для стали У8: четыре цикла, $T_{\max} = 775$ °С с $\tau_{\max} = 9,8$ мин, $T_{\min} = 231$ °С с $\tau_{\min} = 11,9$ мин. В результате, по сравнению с традиционной термообработкой, достигнуто увеличение предела прочности при изгибе стали Р6М5 – до 50 %, стали Р18 – до 66 %, стали У8 – до 2,3 раз и ударной вязкости стали Р6М5 – до 22 %, стали Р18 – до 39 %, стали У8 – до 14,5 раз, при одновременном повышении твердости на 1–2,5 единицы (до 65–67 HRC) для быстрорежущих сталей или сохранения прежней твердости (59–60 HRC) для стали У8. При этом коэффициент трения без смазки стали Р18, подвергнутой пяти–шести циклам УТЦО, на 15–28 % ниже, чем у стандартно термообработанной стали.

Изучено влияние марки стали, режима упрочнения и условий испытаний на рабочие свойства инструментов. Установлено, что ТЦ упрочненные фрезы из отечественных сталей Р6М5, Р6М5К5, Р18 по стойкости превосходят в 1,7–3,5 раза инструменты из стандартно термообработанной стали S 6-5-2 (Германия), а период стойкости сталей после УТЦО возрастает в ряду: Р6М5 → Р6М5К5 → S 6-5-2 → Р18. ТЦ обработанные фрезы из стали Р18

можно эксплуатировать при скоростных режимах ($V = 41,6$ м/мин), увеличивая производительность на 27–58 % без снижения ресурса работы по сравнению со стандартным режимом ($V = 26,4$ м/мин). После УТЦО инструменты могут резать труднообрабатываемые (нержавеющие) стали и сплавы с твердостью 35–48 HRC, что позволяет заменить более хрупкие твердосплавные инструменты на ТЦ упрочненные стальные; причем при увеличении твердости обрабатываемого материала с 20 до 48 HRC показатели стойкости ТЦ обработанных инструментов возрастает от 1,5 до 6,7 раза. Отмечено, что работающие ТЦ упрочненные инструменты чаще изнашиваются, чем хрупко ломаются.

Экспериментально доказано, что эффект упрочнения сталей при УТЦО создается разными механизмами. Благодаря уменьшению размеров зерен и количества остаточного аустенита, образованию бесструктурного мартенсита, измельчению и сфероидизации карбидов, значительному увеличению доли дисперсных карбидов в матрице, высокому легированию дисперсных карбидов и матрицы, а также созданию ячеистой субструктуры реализуются многие дислокационные механизмы упрочнения, и когда рационально сочетаются обратнo зависимые прочностные и пластичные свойства. Согласно адгезионно-деформационной и другим теориям трения упрочнение инструментов создается за счет повышения их поверхностной твердости и снижения сил адгезии в зоне трения. Энергетическая теория упрочнения реализуется при формировании метастабильных структур в условиях проведения быстротечных циклических процессов с неполными твердофазными $\alpha \leftrightarrow \gamma$ превращениями с большим градиентом температур (420–570 °С).

Шестая глава посвящена практическому применению результатов научных исследований (таблицы 1, 2). Разработаны блок-схемы и техпроцессы ХТО для нанесения многокомпонентных карбидных покрытий, УТЦО с незавершенными фазовыми превращениями и ПГХО металлообрабатывающих инструментов с комплектом оборудования. Даны рекомендации по использованию указанных технологий для обработки конкретных видов инструментов.

Инструменты, обработанные разработанными методами, прошли производственные испытания на 44 предприятиях Беларуси, России, Польши, Словакии, Чехии, Китая. Показано (таблица 1), что применение новых технологий, формирующих разные структурные композиции, является перспективным направлением повышения работоспособности металлообрабатывающих инструментов. Отмечено, что нанесение многокомпонентных карбидных покрытий методом ХТО особо эффективно для стальных и твердосплавных инструментов, работающих в условиях коррозионно-механического, абразивного и диффузионного изнашивания, причем показатели стойкости упрочненных инструментов тем выше, чем выше твердость обрабатываемых изделий. После нанесения многокомпонентных диффузионных карбидных покрытий стойкость стальных штампов и техоснастки увеличилась в 2–10 раз, а твердосплавных режущих инструментов в 2–4 раз по сравнению с традиционными. Другая технология ПГХО более универсальна, так как позволяет обрабатывать готовые к эксплуатации режущие и штамповые инструменты, изготовленные из разных материалов. Испытания показали, что период стойкости таких инструментов при черновой обработке выше, чем при чистовой. В результате ПГХО стойкость стальных инструментов увеличилась в 1,4–8 раз, твердосплавных – в 1,3–3,6 раза, алмазных инструментов – в 1,6–3,3 раза по сравнению со стандартными. Третий метод УТЦО с незавершенными фазовыми превращениями применим к стальным режущим и штамповым инструментам и наиболее эффективен для тонких, длинномерных и ударных инструментов, испытывающих большие статические и динамические нагрузки, особенно при прерывистом и черновом резании труднообрабатываемых

сплавов, а также имеющих твердость до 45–48 HRC. Показатели стойкости ТЦ обработанных инструментов повышаются с увеличением твердости обрабатываемых сплавов. Испытания показали, что после УТЦО с незавершенными фазовыми превращениями стойкость пуансонов и матриц повышается до 4,5 раз, а режущих инструментов – в 1,6–5 раз по сравнению с серийными. Отмечено, что при комбинировании двух технологий УТЦО + ТГХО достигается более высокий эффект повышения работоспособности стальных инструментов, чем при использовании одного из этих методов, и тогда стойкость метчиков возрастает в 3–20 раз, а других осевых инструментов в 2–6,3 раза по сравнению со стандартными.

Таблица 1. – Результаты испытаний инструментов, подвергнутых обработке одним методом ХТО, ТГХО, УТЦО и двумя методами УТЦО + ТГХО

| Вид инструмента | Инструментальный материал | Метод обработки | Стойкость K_w | Место испытаний |
|--|--|-------------------------|-----------------|--|
| Фрезы концевые | Стали 19824, P18 P6M5, P9M4K8 | УТЦО, УТЦО + ТГХО | 1,4–5 | <i>SVST(Sk), БелАЗ, АГУ, Экран, Дукс, Энергомаши</i> |
| Фрезы дисковые и грибковые | Стали P6M5, P18, P9M4K8 | УТЦО, ТГХО УТЦО + ТГХО | 2–8 | <i>Мотовело, АГУ, БелАЗ, Энергомаши</i> |
| Резцы | Сталь P6M5 | УТЦО | 1,6–4,5 | <i>АГУ, Экран, БАТЭ</i> |
| Плашки | Сталь P6M5 | ТГХО | 3–4,2 | <i>Экран</i> |
| Метчики | Стали P18, P6M5, SW7m, P9M4K8, P12M3K5Ф2МП | УТЦО + ТГХО, ТГХО, УТЦО | 1,5–20 | <i>Daewoo(Kr), БелАЗ, Салют, ПМЗ, Энергомаши, УМПЮ, Мотовело, Новомет, Аксион, Экран, БАТЭ</i> |
| Долбяки | Сталь P6M5 | ТГХО | 4,5 | <i>ММЗ</i> |
| Ленточные пилы | Сталь S6-5-2 | ТГХО | 2,5–3 | <i>VUHZ (Ch)</i> |
| Сверла | Стали 19824, P18 P6M5, P9M4K8 | ТГХО, УТЦО УТЦО + ТГХО | 1,7–5 | <i>PS (Sk), VUHZ(Ch), БАТЭ, АГУ, Мотовело, Аксион, Энергомаши</i> |
| Развертки | Стали P6M5, P18 | ТГХО, УТЦО | 2–4 | <i>Мотовело, БАТЭ, АГУ</i> |
| Зенкера | Стали P18, P9M4K8 | УТЦО + ТГХО | 1,8–5 | <i>Дукс, Салют, Энергомаши</i> |
| Ножи | Стали 19824, У10 | ТГХО | 1,9–2,2 | <i>Skloplast Trnava(Sk)</i> |
| Пресс-формы | Стали У8, ХВГ | ХТО | 2–6 | <i>МЗШ, ПМ</i> |
| Штампы вырубные, пробивные, высадки и вытяжки | Стали 19732, У8, У10, ДИ-23, Х12 | УТЦО, ТГХО ХТО | 1,8–4,5 | <i>ZVL(Sk), УМПЮ, БелАЗ, КЗТШ Горизонт, Гомсельмаши, Экран</i> |
| Направляющие | Сталь У8 | ХТО | >10 | <i>Гомсельмаши</i> |
| Форсунки | Стали У8, 18ХГТ | ХТО | 2–3 | <i>ВНИИСМИ</i> |
| Режущие пластины для чистового и черного точения | Твердые сплавы T15K6 WSM20, CT35, PC9030 | ХТО, ТГХО | 1,3–4 | <i>БелАЗ, АГУ, КЗТШ, Искра, Вега, Новомет</i> |
| Сверла для стекла | Алмаз. материал | ТГХО | 3,3 | <i>Индмаши</i> |
| Абразивные круги | Алмаз. материал | ТГХО | 1,6–2,7 | <i>БелАЗ, МПЗ, Калибр, Индмаши</i> |

Таблица 2. – Результаты практического использования разработанных технологий и упрочненных с их помощью стальных, твердосплавных и алмазных инструментов

| Наименование разработки | Виды инструментов | Потребители технологий | Экономическая эффективность |
|--|--|-------------------------------|--|
| Технология ХТО для нанесения поликарбидных покрытий на стальной и твердосплавный инструменты | Стальные матрицы, твердосплавные фрезы и резцы | ПО «БелАЗ», г. Жодино | Эконом. эффект в 1997 г. и 2000 г. – 2 млрд руб. (339,0 тыс. \$) |
| Технология термогидрохимической обработки режущих и штамповых инструментов из сталей и твердых сплавов | Стальные метчики, сверла, фрезы, твердосплавные режущие инструменты | АО «БАТЭ», г. Борисов | Эконом. эффект в 1997 г. – 220 млн руб. (37,6 тыс. \$) |
| | | ОАО «Мотовело», г. Минск | Эконом. эффект в 1994–2004 гг. – 57 млн руб. (20,5 тыс. \$) |
| Технология низкотемпературной химической обработки алмазного металлообрабатывающего инструмента | Алмазные шлифовальные круги | ПО «БелАЗ», г. Жодино | Внедрено в 2000 г. |
| | Алмазные круги и сверла с алмазным покрытием | «ОИМ» НАН Беларуси, г. Минск | Внедрено в 2008–2009 гг. |
| Технология термоциклической обработки инструментов из быстрорежущих сталей | Стальные метчики, резцы, сверла, развертки, др. | РУПП «АГУ», г. Борисов | Эконом. эффект в 1989–2009 гг. – 223,1 млн руб. (79,2 тыс. \$) |
| Технология термоциклической обработки штампов из сталей X12, X12M, X12F1 | Стальные пробивные пуансоны и матрицы | ОАО «КЗТШ», г. Жодино | Эконом. эффект в 2000–2007 гг. – 185,5 млн руб. (65,5 тыс. \$) |
| Наименование разработки | Виды инструментов | Потребители инструментов | Экономическая эффективность |
| Технология комбинированной (термоциклической + термогидрохимической) обработки стальных инструментов | Метчики для глухих и сквозных отверстий, сверла, развертки, зенкера, фрезы, плашки, резцы, протяжки, и другие стальные режущие инструменты | ММПП «Салют», г. Москва | Эконом. эффект в 2002–2006 гг. – 300 тыс. руб. РФ (11,1 тыс. \$) |
| | | ОАО «ПМЗ», г. Пермь | Эконом. эффект в 2006–2011 гг. – 4,4 млн руб. РФ (120,9 тыс. \$) |
| | | АО НПО «Энергомаш», г. Москва | Эконом. эффект в 2006–2012 гг. – 3,4 млн руб. РФ (111,0 тыс. \$) |
| | | АО МКБ «Искра», г. Москва | Эконом. эффект в 2013–2018 гг. – 4,6 млн руб. РФ (81,7 тыс. \$) |
| | | ОАО «ДУКС», г. Москва | Эконом. эффект в 2015–2017 гг. – 513 тыс. руб. РФ (9,1 тыс. \$) |
| | Метчики гаечные, ударно-штамповые инструменты | ОАО «УМПО», г. Уфа | Эконом. эффект в 2007–2009 гг. – 5,4 млн руб. РФ (180,2 тыс. \$) |

Разработанные технологии, оборудование и обработанные с их помощью металлообрабатывающие инструменты (рисунок 11), использованы на предприятиях Беларуси и России. Суммарный экономический эффект, полученный от внедрения новых упрочняющих технологий и реализации упрочненной инструментальной продукции, составил более 1 млн долларов США в эквиваленте (таблица 1).



Рисунок 11. – Примеры практического использования разработанных технологий упрочняющей обработки металлообрабатывающих инструментов

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные научные результаты диссертации

1. Предложен системный подход к разработке технологий поверхностной и объемной обработки для повышения работоспособности металлообрабатывающих инструментов, заключающийся в комплексном определении основных требований, предъявляемых к инструментам, покрытиям и их материалам, в системном анализе методов упрочняющей обработки инструментов и механизмов улучшения их свойств, в оценке критериев конструкционной прочности, возможности совместимости ее прочностных и пластичных свойств и рекомендациях по выбору технологий, направленных на достижение максимальной конструкционной прочности. Такой подход

позволяет обоснованно разрабатывать методы химико-термической, термогидрохимической и упрочняющей термоциклической обработки путем формирования в металлообрабатывающих инструментах и покрытиях многоуровневых композиционных и градиентных структур, в которых рационально сочетаются разнородные по составу и свойствам макро- (матрица, слой), микро- и наноэлементы (зерна, субзерна, частицы) [2, 3, 34–36, 38–41, 88, 96, 105].

2. В результате исследований влияния режимов химико-термической обработки для получения сверхтвердых карбидных покрытий на металлообрабатывающих инструментах и состава алюминотермических насыщающих смесей в системах оксидов Cr-Ti-V, Cr-Ti-Mn, Cr-Ti-Mo, Cr-V-Mo, Cr-V-Mn, Cr-V-Nb на структуру, толщину, фазово-химический состав и свойства многокомпонентных карбидных покрытий на штамповых сталях *установлено*, что формируются два типа композиционных структур, построенных из макро- и микроэлементов с различными свойствами: в инструменте в виде композиции «сверхтвердый карбидный слой – переходный слой – вязкая матрица» и в покрытии в виде композиции из слоев взаимно нерастворимых твердых карбидов с мягкими Al-содержащими включениями. Доказано, что упрочняющий эффект поликарбидных покрытий создается благодаря формированию гетерофазных структур с преобладанием в них сверхтвердых карбидов титана и ванадия или образованию взаимно растворимых и сложнелегированных карбидов с искаженной кристаллической решеткой. Выявлены два механизма структурообразования покрытий: с гетерогенной структурой из взаимно растворимых карбидов и с композиционной структурой на базе нерастворимых карбидов. *Установлен* эффект увеличенного роста (в 2,7–3,2 раза по сравнению с другими карбидными слоями) Ti-Mn карбидных покрытий при химико-термической обработке сталей в средах на основе 25 % TiO₂ + 75 % MnO₂, обусловленный ускорением диффузии карбидообразующих элементов и синтеза карбидов в жидкометаллической фазе на базе Al. На основании анализа термодинамики, химизма и кинетики процессов структурообразования многокомпонентных карбидных покрытий при химико-термической обработке инструментальной стали *смоделированы* стадии многокомпонентного карбидообразования с учетом вновь установленных данных: 1) алюминотермически восстановленные смеси содержат до 2,6 % Al; 2) зародышеобразование, рост и фазовый состав карбидов в покрытиях чаще определяется кинетикой процесса ХТО; 3) карбидный состав покрытий не всегда соответствует диаграммам состояния и меняется со временем в изотермических условиях насыщения, др. [1, 4, 7–10, 18–22, 24, 38, 40, 46, 49, 50, 52, 53, 59, 67, 79, 99, 108].

3. На основании изучения влияния состава алюминотермических насыщающих смесей в системах оксидов Cr-Ti-V, Cr-Ti-Mn, Cr-Ti-Mo, Cr-V-Mo, Cr-V-Mn, Cr-V-Nb и режимов химико-термической обработки на свойства многокомпонентных карбидных покрытий на сталях У8, 7Х3, Х12 установлено, что двух- и трехкомпонентные слои превосходят по абразивной износостойкости и микротвердости однокомпонентные; наибольшей микротвердостью и износостойкостью при абразивном изнашивании обладают покрытия на базе карбида титана, а наибольшей стойкостью при сухом трении скольжения – на базе карбидов ванадия. С помощью математического метода симплекс-планирования для химико-термической обработки штамповых сталей выбраны оптимальные составы насыщающих сред на основе: 15 % Cr₂O₃ + 85 % V₂O₅, 25 % Cr₂O₃ + 50 % TiO₂ + 25 % V₂O₅, 25 % TiO₂ + 75 % MnO₂,

25 % Cr₂O₃ + 50 % TiO₂ + 25 % MnO₂, что позволило повысить абразивную износостойкость формируемых многокомпонентных карбидных покрытий в 11–31 раз, а стойкость при сухом трении скольжения – в 4–20 раз по сравнению с однокомпонентным карбидохромовым слоем, а микротвердость разработанных покрытий возросла до 20–35 ГПа [1, 4, 7–9, 46, 49, 50, 52, 77, 108, 112, 114–142, 145, 148].

4. В результате исследований влияния технологических параметров термогидрохимической (гидрохимической и термической) обработки для получения твердо-смазочных покрытий на металлообрабатывающих инструментах и состава водных сред, содержащих дисперсные тугоплавкие керамические материалы, на триботехнические свойства, структуру, морфологию и химический состав покрытий на сталях, твердых сплавах и алмазосодержащих материалах, *установлено*: 1) что полученные покрытия хорошо пластифицируются и обладают твердосмазочными свойствами; 2) покрытия, осажденные в водных средах с дисперсными оксидами имеют лучшие антифрикционные свойства, чем в средах с дисперсными карбидами, нитридами, углеродными материалами (графитом, фуллереном, нано-алмазом); 3) минимальным коэффициентом трения обладают покрытия с гетерогенной наноструктурой, полученные в водной дисперсионной среде, содержащей смесь оксидов TiO₂ + MoO₃, и превосходят по триботехническим свойствам известное наноструктурированное алмазоподобное PVD покрытие. Также *установлено*, что максимальное улучшение эксплуатационных свойств (стойкости, коэффициента трения) инструментов и их материалов достигается в начальный период проведения гидрохимической обработки: при 50–70 мин – для инструментальной стали и 10–20 мин – для твердого сплава в результате формирования метастабильной нанокристаллической оксидосодержащей структуры покрытий, а с увеличением времени обработки свойства сплавов ухудшаются из-за деградации и отслаивания более толстых покрытий. С помощью многомерного компьютерного проектирования технологий выбраны оптимальные режимы термогидрохимической обработки с использованием дисперсных оксидосодержащих составов водной среды: 41–43 % TiO₂ + 57–59 % MoO₃, при выполнении которых коэффициент трения поверхности стали без смазочного материала снизился в 8,2–8,7 раза (с 0,55–0,58 до 0,067), а твердого сплава – в 3,8–4,2 раза (с 0,4–0,44 до 0,106) по сравнению с исходным состоянием. Установлено, что оптимальная термогидрохимическая обработка не оказывает существенного влияния на микрогеометрию поверхности инструментов и обеспечивает сохранение исходного структурно-фазового состояния их сердцевины [2, 3, 5, 6, 11, 12, 16, 17, 23, 25–34, 37, 41–45, 47, 54, 55, 57, 60, 62–64, 68, 69, 73–75, 77, 80–84, 86, 104, 109–111, 113, 147, 153, 156–159].

5. На основании изучения влияния параметров процессов гидрохимической обработки на изменение гранулометрического состава дисперсных порошков керамических материалов, содержащихся в водных насыщающих средах, и на кинетику структурообразования полученных покрытий, *установлен* эффект нанодиспергирования керамических микрочастиц в условиях расклинивающего действия ПАВ, циклической смены теплового, химического градиентов и «псевдокавитационного» термогидродинамического воздействия кипящей водной дисперсионной среды, что дает возможность получать гидрозоли керамических материалов, в которых при проведении гидрохимической обработки металлообрабатывающих инструментов осаждаются наноструктурированные покрытия [3, 41, 85, 87–89, 95–98, 102, 103].

6. На основании изучения кинетики формирования и изменения триботехнических свойств покрытий, полученных при термогидрохимической обработке инструментальных материалов, *установлено*, что на стадии гидрохимической обработки формируются покрытия с нанокристаллической структурой, а после их нагрева выше $500\text{ }^{\circ}\text{C}$ – с нанокомпозитной. При этом скорость гидрохимического осаждения покрытий в водной оксидосодержащей $\text{TiO}_2 + \text{MoO}_3$ дисперсионной среде на твердом сплаве в 4–6 раз выше, чем на стали. *Установлено*, что при изнашивании полученных наноструктурированных покрытий отсутствует этап приработки и в течение всего времени их эксплуатации значения коэффициента трения остаются постоянными; эти покрытия обладают высокой термической стабильностью, поскольку после нагрева до $1050\text{ }^{\circ}\text{C}$ сохраняются их высокие триботехнические свойства [2, 3, 23, 25–30, 41, 57, 60, 90–98, 102–104].

7. На основании исследований влияния режимов термогидрохимической обработки в водной дисперсионной среде, содержащей оксиды $\text{TiO}_2 + \text{MoO}_3$, на структуру, химический состав, напряженное состояние поверхностного слоя сталей, твердых сплавов и алмазосодержащих материалов *установлено*, что в результате обработки достигается двойной эффект улучшения эксплуатационных характеристик инструментов за счет нанесения твердосмазочных покрытий и формирования в подслое высоких (180–470 МПа) макронапряжений сжатия, сравнимых с уровнем напряжений, получаемых методами ПЖД, а также формируются два типа композиционных структур, построенных из макро- или микро- и наноэлементов с разными свойствами: в инструменте в виде композиции «твердосмазочный слой – переходный высоконапряженный слой – матрица» и нанокомпозитном покрытии, в котором чередуются нано- и микроразмерные зерна [2, 3, 25–31, 33–35, 105].

8. В результате экспериментальных исследований структурно-фазового состава и механических свойств быстрорежущих и штамповых сталей в зависимости от режимов термоциклической обработки с незавершенными фазовыми превращениями для объемного упрочнения металлообрабатывающих инструментов, основанной на неполных скоротечно повторяющихся твердофазных $\alpha \leftrightarrow \gamma$ превращениях в предварительных перед закалкой циклах с градиентом температур ($420\text{--}570\text{ }^{\circ}\text{C}$) *установлено*, что в инструменте формируются два типа структурных композиций, рационально сочетающих разные свойства микроэлементов: градиентная структура, в которой от поверхности к сердцевине уменьшаются твердость и хрупкость зерен, и композиционная дискретная структура, в которой чередуются зерна с разной твердостью и степенью легирования. Проведенное с помощью методов квантовой химии *моделирование* процессов структурно-фазовых превращений при упрочняющей термоциклической обработке эвтектоидной стали подтвердило экспериментальные результаты формирования композиционной структуры, состоящей из двух видов зерен с высоким и малым содержанием углерода. Доказано, что эффект упрочнения инструментальных сталей при термоциклической обработке с незавершенными фазовыми превращениями создается благодаря уменьшению размеров зерен и содержания остаточного аустенита, образованию бесструктурного мартенсита, измельчению и сфероидизации вторичных карбидов, значительному увеличению дисперсных карбидов, высокому легированию дисперсных карбидов и матрицы [35, 36, 48, 56, 58, 70–72, 76, 78, 100, 101, 106, 107].

9. На основании изучения влияния технологических параметров упрочняющей термоциклической обработки с неполными фазовыми превращениями на эксплуатационные свойства быстрорежущих и штамповых сталей *установлено*, что наивысшие показатели эксплуатационных свойств (стойкости, твердости, прочности при изгибе, ударной вязкости) сталей достигаются только в начальный период термоциклической обработки: в течение 2–6 циклов при уменьшении времени нагрева и охлаждения в каждом цикле на 25–50 % от времени, необходимого для прохождения полных фазовых превращений, в результате формирования метастабильной мелкоизмельченной и высоколегированной, дискретной по составу структуры с градиентом свойств в зернах и объеме сталей, а с увеличением продолжительности обработки свойства сталей снижаются из-за прохождения разупрочняющих процессов и наследственного восстановления исходной структуры в процессе ее гомогенизации во всем объеме сталей. С помощью компьютерного проектирования технологий выбраны оптимальные режимы упрочняющей термоциклической обработки инструментальных сталей, при которых по сравнению с традиционной термообработкой достигнуто: увеличение предела прочности при изгибе стали Р6М5 – до 50 %, стали Р18 – до 66 %, стали У8 – до 2,3 раза и ударной вязкости стали Р6М5 – до 22 %, стали Р18 – до 39 %, стали У8 – до 14,5 раза при повышении твердости сталей Р6М5, Р18 на 1–2,5 единицы (до 65–67 HRC) и сохранении прежней твердости (59–60 HRC) стали У8. В результате сравнительных испытаний термоциклически обработанные режущие инструменты из быстрорежущих сталей Р6М5, Р6М5К5, Р18 превосходят по стойкости в 1,7–3,5 раза инструменты из стандартно термообработанной немецкой стали S6-5-2. Термоциклически упрочненные инструменты могут резать труднообрабатываемые сплавы с твердостью до 35–48 HRC. Причем фрезы, упрочненные новым способом, можно эксплуатировать при скоростных режимах резания, повышая их производительность до 58 % по сравнению со стандартными [11, 13–15, 35, 36, 51, 56, 58, 61, 65, 66, 74, 76, 78, 143, 144, 146, 149–152, 154, 155].

Рекомендации по практическому использованию результатов

1. Практическая значимость выполненных исследований состоит в разработке научно обоснованных подходов и методов обработки, формирующей в инструментальных материалах композиционные и градиентные структуры с наивысшими показателями прочности, надежности и долговечности. Новые процессы улучшающей обработки созданы на базе 46 изобретений [114–159]. Разработан пакет новых технологий и составов насыщающих сред, в том числе технологические процессы ХТО (АТЮФ.01071.0008, АТЮФ.01071.0009) для нанесения Cr-V, Ti-Mn, Cr-Ti-V, Cr-Ti-Mn, Ti-V-Mo карбидных покрытий на стальные и титановые инструменты, технологические процессы (АТЮФ.01075.0025, ТД 01075.00037) для ТГХО и низкотемпературной химической обработки алмазных инструментов, штампов и режущих инструментов из сталей и твердых сплавов вместе с комплектом техоснастки и оборудования (КД 0790-0001СБ), технологические процессы (АТЮФ.01051.0010, АТЮФ.01051.0011) для УТЦО инструментов из быстрорежущих и штамповых сталей, а также для комбинированной обработки стальных инструментов. Созданы производственные участки для упрочнения инструментов в Минске

и других городах. Новые процессы являются высокоэффективными, требуют минимальных затрат на их внедрение и могут быть освоены на любом предприятии с использованием недорогих материалов и оборудования.

В результате обработки металлообрабатывающих инструментов новыми термомеханическими и термоциклическими методами, по сравнению с традиционными, стойкость режущих стальных инструментов повысилась в 1,4–20 раз, режущих твердосплавных – в 1,3–4 раза, стальных пресс-форм и штампов – в 1,8–6 раз, алмазных режущих и абразивных инструментов – в 1,6–3,3 раза. Разработанные технологии и обработанные с их помощью инструменты использованы на 12 предприятиях Беларуси и России. Суммарный экономический эффект от внедрения научных разработок и реализации упрочненных инструментов составил более 1 млн долларов США в эквиваленте.

2. Кроме того, результаты исследований апробируются в направлениях:

- реализации эффекта создания полезных полей напряжений сжатия в закрытых полостях изделий при циклической паро-(твердо-) жидкостной фазовой трансформации внешней среды с целью повышения работоспособности изделий;
- создания твердосмазочных покрытий методом ТГХО в средах на базе экологичных природно-сырьевых материалов (песка, глины, угля, стекла, др.);
- применения ТГХО для увеличения срока службы тяжело нагруженных деталей нефте- и газодобывающего оборудования, сельскохозяйственной, строительной и карьерной техники, испытывающих коррозионно-механическое и абразивное изнашивание, а также для энергетических и авиационных турбин, автомобильных и тракторных двигателей, инструментов для горячей обработки пластмасс и стекла, работающих в условиях высокотемпературного изнашивания;
- получения методом ТГХО гидрофобных покрытий для защиты от коррозии и обледенения летательных аппаратов, электропроводов, а также создания твердосмазочных покрытий для уменьшения адгезионного схватывания деталей космических аппаратов в условиях невесомости и снижения сопротивления окружающей среды при движении плавающих и летательных средств;
- гидрохимического нанодиспергирования микропорошков из тугоплавких соединений и сырьевых материалов и затем их использования в качестве добавок: нанокремнида кремния для создания износостойкой керамики; нанографита и оксидов металлов – для антифрикционных машинных масел, обладающих эффектом самозалечивания трещин; нанопеска и технического стекла – для упрочнения дорожных покрытий и стройматериалов; наносоставов на базе соединений кальция и оксида цинка – для косметических и медицинских целей и др.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ СОИСКАТЕЛЯ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Монографии

1. Многокомпонентные диффузионные карбидные покрытия на железоуглеродистых сплавах / Л. Г. Ворoshин [и др.]. – Минск : БНТУ, 2007. – 470 с.
2. Shmatov, Alexander. Thermo-hydrochemical treatment for tool materials / Alexander Shmatov, Lubomir Soos, Zdenko Krajny. – Bratislava : Slovak Technical University, 2014. – 115 p.
3. Shmatov, Alexander. Composite structure strengthening tools in an aqueous dispersed media / Alexander Shmatov, Lubomir Soos, Zdenko Krajny. – Bratislava : Slovak Technical University, 2016. – 139 p.
4. Shmatov, Alexander. Forming of diffusion multi-carbide coatings on tool alloys / Alexander Shmatov, Lubomir Soos, Zdenko Krajny. – Bratislava : Slovak Technical University, 2018. – 137 p.

Статьи в рецензируемых научных журналах

5. Shmatov, A. A. Soft, inexpensive coatings prolong tool life / A. A. Shmatov // *Advanced Coatings & Surface Technology*. – 1998. – Vol. 11, No. 1. – P. 5–6.
6. Смиловенко, О. О. Исследование влияния обработки на работоспособность алмазного инструмента / О. О. Смиловенко, Ю. С. Хотейкина, А. А. Шматов // *Вестник Полоц. гос. ун-та. Сер. В.* – 2005. – № 12. – С. 102–106.
7. Шматов, А. А. Оптимизация процессов насыщения стали карбидообразующими элементами в системах на основе Cr-Ti-V и Cr-Ti-Mn / А. А. Шматов // *Вестник Белорус. нац. тех. ун-та. Сер. Машиностроение.* – 2007. – № 6. – С. 35–41.
8. Шматов, А. А. Структура и фазовый состав диффузионных Cr-Ti-Mo карбидных слоев на твердом сплаве / А. А. Шматов, С. В. Побережный // *Вестник Брест. гос. тех. ун-та. Сер. Машиностроение.* – 2007. – № 4. – С. 17–22.
9. Шматов, А. А. Одно-, двух- и трехкомпонентные диффузионные карбидные слои на железоуглеродистых сплавах / А. А. Шматов // *Вестник Полоц. гос. ун-та. Сер. В.* – 2008. – № 8. – С. 14–19.
10. Шматов, А. А. Взаимная растворимость карбидов в многокомпонентных диффузионных слоях, образованных на твердом сплаве / А. А. Шматов, С. В. Побережный // *Вестник Белорус. нац. тех. ун-та. Сер. Машиностроение.* – 2008. – № 4. – С. 43–51.
11. Шматов, А. А. Комбинированное объемно-поверхностное упрочнение стального режущего инструмента / А. А. Шматов // *Вестник Брест. гос. тех. ун-та. Сер. Машиностроение.* – 2008. – № 4. – С. 16–21.
12. Шматов, А. А. Низкотемпературное поверхностное упрочнение алмазного инструмента / А. А. Шматов, О. О. Смиловенко // *Вестник Белорус. нац. тех. ун-та. Сер. Машиностроение.* – 2009. – № 1. – С. 27–32.
13. Проектирование процесса термоциклической обработки стали P6M5 с помощью компьютерных синтез-технологий / А. А. Шматов [и др.]. // *Вестник Полоц. гос. ун-та. Сер. В.* – 2009. – № 8. – С. 19–25.

14. Исследование и компьютерное проектирование процесса улучшающей термоциклической обработки стали У8 / А. А. Шматов [и др.] // Вестник Брест. гос. тех. ун-та. Сер. Машиностроение. – 2009. – № 4. – С. 53–58.

15. Оптимизация и компьютерное проектирование процесса термоциклической обработки быстрорежущей стали P18 / А. А. Шматов [и др.] // Вестник Белорус. нац. тех. ун-та. Сер. Машиностроение. – 2009. – № 6. – С. 20–25.

16. Компьютерное проектирование процесса ТГХО для формирования твердосмазочных покрытий на инструментальной стали У8 / А. А. Шматов [и др.] // Вестник Полоц. гос. ун-та. Сер. В. – 2010. – № 2. – С. 139–146.

17. Исследование и компьютерное проектирование процесса ТГХО твердого сплава ВК6 / А. А. Шматов [и др.] // Вестник Полоц. гос. ун-та. Сер. Промышленность. – 2010. – № 8. – С. 125–133.

18. Шматов, А. А. Формирование диффузионного Cr-Ti-V карбидного покрытия на стали / А. А. Шматов // Вестник Брест. гос. тех. ун-та. Сер. Машиностроение. – 2010. – № 4. – С. 7–13.

19. Шматов, А. А. Формирование диффузионного Ti-Mn карбидного слоя на стали / А. А. Шматов // Вестник Гомел. гос. тех. ун-та им. П.О. Сухого. – 2010. – № 4. – С. 69–80.

20. Шматов, А. А. Моделирование процесса формирования диффузионного Ti-V карбидного покрытия на стали У8 / А. А. Шматов // Вестник Полоц. гос. ун-та. Сер. В. – 2011. – № 3. – С. 95–102.

21. Шматов, А. А. Моделирование процесса формирования Cr-Ti-V карбидного покрытия при химико-термической обработке твердого сплава / А. А. Шматов, С. В. Побережный // Весці Нац. акад. навук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 2011. – № 2. – С. 33–40.

22. Шматов, А. А. Моделирование процесса формирования карбидного слоя при диффузионном хромованадировании стали У8 / А. А. Шматов // Вестник Полоц. гос. ун-та. Сер. В. – 2011. – № 11. – С. 113–122.

23. Шматов, А. А. Термогидрохимическая обработка твердых сплавов в вододисперсных оксидных средах / А. А. Шматов, О. Г. Девойно // Вестник Брест. гос. тех. ун-та. Сер. Машиностроение. – 2011. – № 4. – С. 19–25.

24. Шматов, А. А. Моделирование процесса оптимального формирования карбидного слоя при химико-термической обработке твердого сплава / А. А. Шматов, С. В. Побережный // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2012. – № 2. – С. 32–39.

25. Шматов, А. А. Модифицирование твердого сплава методом ТГХО / А. А. Шматов, О. Г. Девойно, Ю. О. Лисовская // Ползуновский вестник. – 2012. – № 1. – С. 359–364.

26. Шматов, А. А. Модифицирование стали в вододисперсной среде / А. А. Шматов // Вестник Полоц. гос. ун-та. Сер. В. – 2012. – № 3. – С. 82–89.

27. Шматов, А. А. Формирование композиционной структуры при термогидрохимической обработке твердого сплава / А. А. Шматов // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2013. – № 2. – С. 33–40.

28. Шматов, А. А. Формирование композиционной структуры при термогидрохимической обработке стали / А. А. Шматов, Г. К. Жавнерко, Ю. О. Лисовская // Материаловедение. – 2013. – № 1. – С. 43–50.

29. Витязь, П. А. Упрочнение твердого сплава методом термогидрохимической обработки / П. А. Витязь, А. А. Шматов, О. Г. Девойно // Докл. НАН Беларуси. – 2013. – Т. 57, № 1. – С. 113–117.
30. Шматов, А. А. Влияние термогидрохимической обработки на морфологию и шероховатость стальной поверхности / А. А. Шматов, Ю. В. Синькевич // Вестник Полоц. гос. ун-та. Сер. В. – 2013. – № 3. – С. 66–72.
31. Шматов, А. А. Сопrotивляемость изнашиванию стали, упрочненной термогидрохимической обработкой / А. А. Шматов // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2013. – № 7. – С. 28–34.
32. Компьютерное проектирование процесса ТГХО для получения на стали У8 твердосмазочного SiC покрытия / А. А. Шматов [и др.] // Вестник Полоц. гос. ун-та. Сер. В. – 2014. – № 3. – С. 53–61.
33. Шматов, А. А. Упрочняющий эффект термогидрохимической обработки инструментальных материалов / А. А. Шматов // Вестник Полоц. гос. ун-та. Сер. В. – 2014. – № 11. – С. 112–120.
34. Шматов, А. А. Реализация механизмов упрочнения при термогидрохимической обработке инструментальных материалов / А. А. Шматов // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2014. – № 12. – С. 37–48.
35. Витязь, П. А. Упрочнение быстрорежущих и штамповых сталей методом термодиффузионной обработки / П. А. Витязь, А. А. Шматов, О. Г. Девойно // Докл. НАН Беларуси. – 2014. – Т. 58, № 4. – С. 101–105.
36. Шматов, А. А. Характер упрочнения инструментальных сталей при термодиффузионной обработке / А. А. Шматов // Материаловедение. – 2014. – № 12. – С. 20–28.
37. Шматов, А. А. Компьютерное проектирование процесса получения твердосмазочного SiC покрытия на твердом сплаве / А. А. Шматов // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2015. – № 7. – С. 30–37.
38. Шматов, А. А. Композиционные структуры, сформированные при диффузионном насыщении стали несколькими переходными металлами / А. А. Шматов // Ползуновский альманах. – 2015. – № 2. – С. 78–84.
39. Шматов, А. А. Тенденции развития науки в области упрочнения инструментальных материалов / А. А. Шматов, Любомир Шош, Зденко Крайни // Ползуновский альманах. – 2015. – № 2. – С. 5–16.
40. Витязь, П. А. Упрочнение сталей при диффузионном насыщении несколькими карбидообразующими металлами / П. А. Витязь, А. А. Шматов, О. Г. Девойно // Докл. НАН Беларуси. – 2016. – Т. 60, № 6. – С. 117–122.
41. Shmatov, A. A. New technology for hardening ready-made tools in aqueous dispersed media / A. A. Shmatov, L. Soos, Z. Krajny // Acta Metallurgica Slovaca. – 2017. – Vol. 23, No. 1. – P. 87–92.
42. Шматов, А. А. Компьютерное проектирование процесса получения на стали твердосмазочного покрытия на базе речного песка / А. А. Шматов, А. Е. Соломянский, О. М. Колбасенко // Материаловедение. – 2018. – № 4. – С. 41–48.
43. Шматов, А. А. Многомерное проектирование технологии упрочнения твердого сплава в вододисперсном речном песке / А. А. Шматов, А. Е. Соломянский // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2018. – № 9. – С. 418–425.

44. Shmatov, A. A. Computer-aided design of process of fabrication on steel of solid lubricating coating based on bank sand / A. A. Shmatov, A. E. Solomyanskii, O. M. Kolbasenko // *Inorganic Materials: Applied Research*. – 2019. – Vol. 10, No. 1. – P. 81–88.

45. Шматов, А. А. Многомерное проектирование технологии упрочнения твердого сплава в гидрозоле красной глины / А. А. Шматов // *Материаловедение*. – 2019. – № 6. – С. 41–48.

46. Shmatov, A. A. Process for producing diamond-like carbide coatings on hard alloys / A. A. Shmatov, L. Soos, Z. Krajny // *MM Science Journal*. – 2019, No. 2. – P. 2887–2890.

Статьи в рецензируемых научных сборниках

47. Смиловенко, О. О. Поверхностное упрочнение алмазного гальванического инструмента методом низкотемпературной химической обработки / О. О. Смиловенко, А. А. Шматов, В. К. Карагулькин // *Прогрессивные технологии и системы машиностроения: сб. науч. тр. – Донецк, 2003. – Вып. 26. – С. 70–73.*

48. Шматов, А. А. Окончательная термоциклическая термообработка быстрорежущих сталей / А. А. Шматов // *Порошковая металлургия: респ. межвед. сб. науч. тр. – Минск, 2007. – № 30. – С. 309–316.*

49. Шматов, А. А. Многокомпонентное диффузионное насыщение твердых сплавов карбидообразующими элементами / А. А. Шматов, С. В. Побережный // *Порошковая металлургия: респ. межвед. сб. науч. тр. – Минск, 2007. – № 30. – С. 252–257.*

50. Шматов, А. А. Сопrotивляемость изнашиванию диффузионных Cr-Ti-Mo и Cr-V-Nb карбидных слоев на твердом сплаве / А. А. Шматов, С. В. Побережный // *Сварка и родственные технологии: респ. межвед. сб. науч. тр. – Минск, 2007. – № 9. – С. 73–80.*

51. Шматов, А. А. Упрочнение режущего стального инструмента технологически эффективными методами / А. А. Шматов // *Прогрессивные технологии и системы машиностроения: сб. науч. тр. – Донецк, 2008. – Вып. 36. – С. 232–238.*

52. Шматов, А. А. Износостойкие многокомпонентные карбидные покрытия на железоуглеродистых и твердых сплавах / А. А. Шматов, С. В. Побережный // *Прогрессивные технологии и системы машиностроения: сб. науч. тр. – Донецк, 2009. – Вып. 37. – С. 277–285.*

53. Шматов, А. А. Формирование диффузионного поликарбидного покрытия на твердом сплаве / А. А. Шматов, С. В. Побережный // *Порошковая металлургия: респ. межвед. сб. науч. тр. – Минск, 2010. – № 33. – С. 297–305.*

54. Шматов, А. А. Твердосмазочные тугоплавкие покрытия, полученные на сталях методом термогидрохимической обработки / А. А. Шматов, Г. К. Жавнерко // *Порошковая металлургия: респ. межвед. сб. науч. тр. – Минск, 2011. – № 34. – С. 244–253.*

55. Шматов, А. А. Термогидрохимическая обработка инструментальных сталей / А. А. Шматов, О. Г. Девоино, Г. К. Жавнерко // *Машиностроение: респ. межвед. сб. науч. тр. – Минск, 2013. – Вып. 27. – С. 61–66.*

Другие научные публикации

56. Shmatov, A. New heat treatment process of tool steels / A. Shmatov // Теоретические и технологические основы упрочнения и восстановления изделий машиностроения: сб. науч. тр. – Новополоцк, 2001. – С. 693–694.
57. Смиловенко, О. О. Повышение ресурса алмазного инструмента методом низкотемпературной химической обработки / О. О. Смиловенко, А. А. Шматов, Ю. С. Хотейкина // Материалы, технологии и оборудование для упрочнения и восстановления деталей машин: сб. науч. тр. – Новополоцк, 2003 – С. 363–364.
58. Шматов, А. А. Упрочняющая термоциклическая обработка режущего инструмента из быстрорежущих сталей / А. А. Шматов // Машиностроение : респ. межвед. сб. науч. тр. – Минск, 2007. – Вып. 23. – С. 91–95.
59. Шматов, А. А. Многокомпонентные диффузионные карбидные покрытия на чугунах / А. А. Шматов, Ф. О. Федотов // Машиностроение : респ. межвед. сб. науч. тр. – Минск, 2007. – Вып. 23. – С. 108–112.
60. Шматов, А. А. Низкотемпературное термохимическое упрочнение инструмента / А. А. Шматов, О. Г. Девойно // Машиностроение : респ. межвед. сб. науч. тр. – Минск, 2007. – Вып. 23. – С. 112–116.
61. Шматов, А. А. Комбинированное упрочнение режущего инструмента из быстрорежущей стали / А. А. Шматов, О. Г. Девойно // Машиностроение : респ. межвед. сб. науч. тр. – Минск, 2008. – Вып. 24. – С. 103–108.
62. Шматов, А. А. Нанотехнология низкотемпературного термохимического упрочнения готового к эксплуатации инструмента / А. А. Шматов // Нано-структурные материалы: получение, свойства, применение: сб. науч. тр. – Минск, 2009. – С. 221–230.

Материалы конференций

63. Shmatov, A. A. New method for depositing anti-frictional coatings on high speed and hard alloy cutting tools, stamps, diamond and machine parts / A. A. Shmatov // Tools'99: Proceedings of the International Conference, Trenchin, 15 April, 1999 / STU. – Trenchin, Slovakia, 1999. – P. 174–175.
64. Shmatov, A. A. Deposition of wear-resistant film coatings on tools and machine parts / A. A. Shmatov // Technologia'99: Proceedings of the International Conference, Bratislava, 8–9 Sept., 1999 / STU. – Bratislava, Slovakia, 1999. – P. 182–183.
65. Шматов, А. А. Новый способ упрочнения металлических материалов / А. А. Шматов, Ладислав Садецки // Машиностроение и техносфера на рубеже XXI века : сб. тр. VII Междунар. науч.-техн. конф., Севастополь, 1–17 сентября 2000 г. / ДГТУ ; редкол. : А. Н. Михайлов [и др.]. – Донецк, 2000. – С. 159–161.
66. Shmatov, A. A. New method for hardening of tools / A. A. Shmatov // Tools 2000: Proceedings of the International Conference, Trenchin, 12 April, 2000 / STU. – Trenchin, Slovakia, 2000. – P.134–135.
67. Shmatov, A. A. Multicomponent carbide coatings on hard alloys / A. A. Shmatov // Metall 2000: Proceedings of the International Conference, Ostrava, 16–18 May, 2000 / MTU. – Ostrava, Czechia, 2000. – P. 537–538.
68. Шматов, А. А. Упрочнение алмазного гальванического инструмента методом низкотемпературной химической обработки / А. А. Шматов, А. И. Полюян,

О. О. Смиловенко // Надежность машин и технических систем: материалы Междунар. научн.-техн. конф., 16–17 октября 2001 г. / БНТУ ; под ред. О. В. Берестнева. – Минск, 2001. – С. 116–117.

69. Shmatov, Alexander A. Low-temperature thermochemical technology of obtaining film coatings / Alexander A. Shmatov // Bridging science and Industry: Proceedings of the ISTC-Samsung Forum, Moscow, 9–10 October, 2001 / ISTC. – Moscow, 2001. – P. 210–220.

70. Shmatov, A. New thermocyclic treatment of tool steels / A. Shmatov, V. Gorelov, M. Chelagurov // CO-MA-TECH 2001 : Proceedings of the International Conference, Trnava, 7–9 September, 2001 / STU. – Trnava, Slovakia, 2001. – P. 184–185.

71. Shmatov, A. Cost-effective strengthening thermocycling heat treatment technologies for cutting and impact stamp tools / A. Shmatov // New Production Technologies and Materials : Proceedings of the ISTC-EU Workshop, Lisbon, 2–6 December, 2002 / ISTC. – Lisbon, 2002. – P. 73–84.

72. Shmatov, A. Application of new hardening technologies to the production of screw taps with improved properties / A. Shmatov, V Gorelov, M. Chelagurov // Tools 2002 : Proceedings of the International Conference, Bratislava, 11 April, 2002 / STU. – Bratislava, Slovakia, 2002. – P.80–81.

73. Shmatov, A. Cost-effective low-temperature technologies for hardening tools and producing wear resistance materials / A. Shmatov // R&D on Materials in Russia and CIS : Proceedings of the ISTC-EU Workshop, Paris, 10–11 June, 2002 / ISTC. – Paris, 2002. – P. 64–67.

74. Shmatov, A. Application of new hardening technologies to the production of steel fine-sized and heavy-loaded tools with improved properties / A. Shmatov // Tools 2004 : Proceedings of the International Conference, Bratislava, 22–23 April, 2004 / Slovak Technical University. – Bratislava, Slovakia, 2004. – P. 149–152.

75. Smilovenko, O. O. Increase of service ability of the diamond tool by a method of chemical low treatment processing / O. O. Smilovenko, A. A. Shmatov // Tools 2004 : Proceedings of International Conference, Bratislava, 22–23 April, 2004 / Slovak Technical University. – Bratislava, Slovakia, 2004. – P. 153–154.

76. Shmatov, A. A. Strengthening Thermo-cyclic heat treatment process of tool steels / A. A. Shmatov // Technologia 2005 : Proceedings of the International Conference, Bratislava, 19–20 April, 2005 / Slovak Technical University. – Bratislava, Slovakia, 2005. – P. 132–136.

77. Shmatov, Alexander A. Low-temperature and high-temperature thermochemical hardening technologies for hard alloys / Alexander A. Shmatov // ESDA 2006 : Proceedings of the 8th International Conference, Turin, 4–7 July, 2006 / ASME. – Turin, Italy, 2006. – P. 127–132.

78. Shmatov, Alexander A. Strengthening thermo-cycling heat treatment process of high-speed steels / Alexander A. Shmatov // ESDA 2006 : Proceedings of the 8th International Conference, Turin, 4–7 July, 2006 / ASME. – Turin, Italy, 2006. – P. 133–138.

79. Khina, B. B. Thermodynamic modeling of SHS with a reduction-oxidation stage for producing composite powder mixtures for thermochemical treatment of carbon steels / B. B. Khina, A. A. Shmatov // Proceedings of the 6th International Heat and Mass Transfer Forum, Minsk, 19–23 May, 2008 / The National Academy of Sciences of Belarus. – Minsk, 2008. – P. 398–399.

80. Шматов, А. А. Поверхностное упрочнение инструментальных материалов методом термогидрохимической обработки в дисперсных составах / А. А. Шматов // Инженерия поверхности. Новые порошковые композиционные материалы. Сварка: материалы Междунар. Симпозиума, Минск, 23–25 марта 2011 г. / ГНПО ПМ; под общ. ред. А. Ф. Ильющенко. – Минск, 2011. – С. 122–124.

81. Шматов, А. А. Термогидрохимическая обработка инструментальных материалов в наноксидных составах / А. А. Шматов, О. Г. Девойно // Проблемы инженерно-педагогического образования в Республике Беларусь : материалы 5-й Междунар. науч.-практ. конф., Минск, 24–25 ноября 2011 г. / БНТУ ; редкол. : Б. М. Хрусталева [и др.]. – Минск, 2011. – С. 102–106.

82. Шматов, А. А. Упрочнение инструментальных материалов в вододисперсных средах / А. А. Шматов, О. Г. Девойно // Проблемы инженерно-педагогического образования в Республике Беларусь : материалы 7-й Междунар. науч.-практ. конф., Минск, 28–29 ноября 2013 г. / БНТУ ; редкол. : Б. М. Хрусталева [и др.]. – Минск, 2013. – С. 76–80.

83. Шматов, А. А. Термогидрохимическое упрочнение инструментальных материалов / А. А. Шматов // Наука – образованию, производству, экономике : материалы 12-й Междунар. науч.-практ. конф., Минск, 11 мая 2014 г. / БНТУ ; редкол. : Б. М. Хрусталева [и др.]. – Минск, 2014. – С. 228–230.

84. Шматов, А. А. Низкотемпературное термохимическое упрочнение инструментальных материалов / А. А. Шматов, О. Г. Девойно // Современные технологии в образовании : материалы Межд. науч.-практ. конф., Минск, 27–28 ноября 2014 г. / БНТУ ; редкол. : Б. М. Хрусталева [и др.]. – Минск, 2014. – С. 64–68.

85. Шматов, А. А. Тенденции развития науки в области нанодиспергирования материалов / А. А. Шматов, О. М. Колбасенко // Современные технологии в образовании : материалы Межд. науч.-практ. конф., Минск, 26–27 ноября 2015 г. / БНТУ ; редкол. : Б. М. Хрусталева [и др.]. – Минск, 2015. – С. 181–185.

86. Шматов, А. А. Высокоэффективное упрочнение стальных, твердосплавных и алмазных инструментов в вододисперсных средах / А. А. Шматов // Технологии упрочнения, нанесения покрытий и ремонта : материалы 18 Между-нар. науч.-техн. конф., СПб. , 14–15 апреля 2016 г. / Санкт-Петербургский политехнический университет. – СПб. , 2016. – С. 256–259.

87. Колбасенко, О. М. Тенденции развития методов получения материалов на основе карбида кремния / О. М. Колбасенко, А. А. Шматов // Инженерно-педагогическое образование в XXI веке : материалы XII Респ. науч.-практ. конф., Минск, 19–20 мая 2016 г. / БНТУ ; редкол. : С. А. Иващенко [и др.] – Минск, 2016. – Ч. 2. – С. 88–90.

88. Шматов, А. А. Тенденции развития композиционного построения материалов / А. А. Шматов, О. М. Колбасенко // Современные технологии в образовании : материалы Междунар. науч.-практ. конф., Минск, 24–25 ноября 2016 г. / БНТУ ; редкол. : Б. М. Хрусталева [и др.]. – Минск, 2016. – С. 205–207.

Тезисы докладов конференций

89. Шматов, А. А. Разработка экологически чистых низкотемпературных термохимических нанотехнологий для получения тонких пленок с высокими эксплуатаци-

онными свойствами на готовых деталях машин и инструментах / А. А. Шматов // НАНО-2008 : материалы I Междунар. науч.-техн. конф., Минск, 22–25 апреля 2008 г. / НПЦ НАН Беларуси по материаловедению, редкол. : П. А. Витязь (отв. ред.) [и др.]. – Минск, 2008. – С. 726.

90. Protective coatings for silicon and steel surfaces / A. E. Salamianski, [ect.] // Spring Meeting 2010 Symposium : Book of Abstracts, Warsaw, 7–11 June 2010 / E-MRS. – Warsaw, Poland, 2010. – P. 9.

91. Шматов, А. А. Низкотемпературное термохимическое упрочнение инструментальных материалов / А. А. Шматов // Наука – образованию, производству, экономике : материалы 9-й Междунар. конф., Минск, 14 мая 2011 г. / БНТУ ; редкол. : Б. М. Хрусталев [и др.]. – Минск, 2011. – С. 176.

92. Shmatov, A. A. Low-temperature hydro chemical hardening nanotechnology for steels, hard alloys and diamond materials / A. A. Shmatov // Proceedings of the Belarus-Korea science and technology seminar, Minsk, 27 June 2011 / BNTU. – Minsk, 2011. – P. 93–94.

93. Шматов, А. А. Низкотемпературное модифицирование сталей методом термогидрохимической обработки в дисперсных составах / А. А. Шматов // Наука – образованию, производству, экономике: материалы 10 Междунар. конф., Минск, 12 мая 2012 г. / БНТУ ; редкол. : Б. М. Хрусталев [и др.]. – Минск, 2012. – С. 201.

94. Shmatov, A. A. Thermo hydro chemical modification for membranes / A. A. Shmatov // Proceedings of the GreenTec workshop, Hannover, 26 April 2012 / East-West-Science Centre. – Hannover, 2012. – P. 21.

95. Shmatov, A. A. Low-temperature technology dispersing raw materials (sand, clay, chalk) to create high performance materials and coatings / A. A. Shmatov // Proceedings of the Green Materials workshop, Hannover, 9 April 2013 / East-West-Science Centre. – Hannover, 2013. – P. 7.

96. Shmatov, A. A. Science basis of strengthening treatment to create high performance materials with nanostructure, nano-composite and composite structures / A. A. Shmatov // Proceedings of the 2nd Belarus-Korea Forum, Minsk, 19–20 November 2013 / The National Academy of Sciences of Belarus. – Minsk, 2013. – P. 38.

97. Shmatov, A. A. New treatment nanotechnology for hardening steels, ceramics and diamond materials / A. A. Shmatov // Proceedings of the 2nd Belarus-Korea Forum, Minsk, 19–20 November 2013 / The National Academy of Sciences of Belarus. – Minsk, 2013. – P. 39–40.

98. Shmatov, A. A. Low-temperature technology dispersing refractory and raw materials / A. A. Shmatov // Proceedings of the 2nd Belarus-Korea Forum, Minsk, 19–20 November 2013 / Ministry of Science. – Minsk, 2013. – P. 41.

99. Шматов, А. А. Композиционные структуры, сформированные при химико-термической обработке инструментальных сплавов в карбидообразующих средах / А. А. Шматов // Наука – образованию, производству, экономике : материалы 13-й Междунар. конф., Минск, 13 мая 2015 г. / БНТУ ; редкол. : Б. М. Хрусталев [и др.]. – Минск, 2015. – С. 240–241.

100. Шматов, А. А. Композиционное упрочнение инструментальных сталей при УТЦО / А. А. Шматов // Современные технологии в образовании : материалы Междунар. науч.-практ. конф., Минск, 26–27 ноября 2015 г. / БНТУ ; редкол. : Б. М. Хрусталев [и др.]. – Минск, 2015. – С. 44–45.

101. Шматов, А. А. Моделирование процесса композиционного структурообразования при упрочняющей термоциклической обработке стали / А. А. Шматов, В. Е. Гусаков // Наука – образованию, производству, экономике : материалы 14 Межд. конф., Минск, 11 мая 2016 г. : в 4 т. / БНТУ ; редкол. : Б. М. Хрусталеv [и др.]. – Минск, 2016. – Т. 4. – С. 263–264.

102. Шматов, А. А. Термогидрохимическое получение нанодисперсных сред / А. А. Шматов // Наука – образованию, производству, экономике : материалы 14 Междунар. конф., Минск, 11 мая 2016 г. : в 4 т. / БНТУ ; редкол. : Б. М. Хрусталеv [и др.]. – Минск, 2016. – Т. 4. – С. 264–265.

103. Shmatov, A. A. Hydro-chemical technology dispersing refractory and raw materials / A. A. Shmatov // TOP 2016 : Proceedings of the 2nd International Scientific Conference – Papiernicka, Slovakia, 7–9 June 2016 / STU ; editor : Miroslav Horvat. – Bratislava, 2016. – P. 67.

104. Shmatov, A. A. New technology for hardening ready-made tools in aqueous dispersed media / A. A. Shmatov // TOP 2016 : Proceedings of the 2nd International Scientific Conference – Papiernicka, Slovakia, 7–9 June 2016 / STU ; editor : Miroslav Horvat. – Bratislava, 2016. – P. 68.

105. Shmatov, A. A. Scientific basis and mechanisms for strengthening materials / A. A. Shmatov // TOP 2016 : Proceedings of the 22nd International Scientific Conference – Papiernicka, Slovakia, 7–9 June 2016 / STU ; editor : Miroslav Horvat. – Bratislava, 2016. – P. 69.

106. Шматов, А. А. Моделирование эволюции процесса термоциклирования эвтектоидной стали / А. А. Шматов, В. Е. Гусаков // Современные технологии в образовании : материалы Междунар. науч.-практ. конф., Минск, 24–25 ноября 2016 г. / БНТУ ; редкол. : Б. М. Хрусталеv [и др.]. – Минск, 2016. – С. 203–204.

107. Шматов, А. А. Термоциклические твердофазные превращения в сплавах / А. А. Шматов, О. М. Колбасенко // Наука – образованию, производству, экономике : материалы 15 Междунар. конф., Минск, 11 мая 2017 г. : в 4 т. / БНТУ ; редкол. : Б. М. Хрусталеv [и др.]. – Минск, 2017. – Т. 4. – С. 237–238.

108. Shmatov, A. A. Process for producing diamond-like multcarbide coatings on iron-carbon and hard alloys / A. A. Shmatov, L. Soos, Z. Krajny // TOP 2017 : Proceedings of the 23rd International Scientific Conference – Samorin, Slovakia, 20–22 Sept. 2017 / STU ; editor : Miroslav Horvat. – Bratislava, 2017. – P. 72.

109. Шматов, А. А. Компьютерное моделирование термогидрохимической обработки стали в гидрозолье речного песка / А. А. Шматов, О. М. Колбасенко // Современные технологии в образовании : материалы Междунар. науч.-практ. конф., Минск, 23–24 ноября 2017 г. : в 4 т. / БНТУ ; редкол. : С. В. Харитончик [и др.]. – Минск, 2017. – Т. 2. – С. 125–126.

110. Шматов, А. А. Природные наноматериалы на основе глины и глинозема / А. А. Шматов // Наука – образованию, производству, экономике : материалы 16-й Междунар. конф., Минск, 18 мая 2018 г. : в 4 т. / БНТУ ; редкол. : С. В. Харитончик [и др.]. – Минск, 2018. – Т. 4. – С. 229.

111. Шматов, А. А. Экологичные наноуглеродные материалы / А. А. Шматов // Наука – образованию, производству, экономике : материалы 16-й Междунар. конф., Минск, 18 мая 2018 г. : в 4 т. / БНТУ ; редкол. : С. В. Харитончик [и др.]. – Минск, 2018. – Т. 4. – С. 230.

112. Shmatov, A. A. Optimization of suture processes for tool steels using carbide-forming elements in systems based on Cr-Ti-V and Cr-Ti-Mn / A. A. Shmatov, L. Soos, Z. Krajny // TOP 2018 : Proceedings of the 24rd International Scientific Conference – Strbske Pleso, Slovakia, 19–21 September 2018 / STU ; editor : Miroslav Horvat. – Bratislava, 2018. – P. 29.

113. Шматов, А. А. Экологичные наноматериалы на базе кремнезема и кварцевого песка / А. А. Шматов, И. А. Виноградов, А. В. Серко // Современные технологии в образовании : материалы Межд. науч.-практ. конф., Минск, 29–30 ноября 2018 г.: в 4 т. / БНТУ ; редкол. : С.В. Харитончик [и др.] – Минск, 2018. –Т. 1. – С. 95–96.

Авторские свидетельства, патенты

114. Состав для диффузионного хромирования высокоуглеродистой стали: а. с. SU 986963 / Л. Г. Ворошнин, Б. С. Кухарев, А. А. Шматов, Г. Г. Панич. – Оpubл. 07.01.1983.

115. Состав для диффузионного хромирования высокоуглеродистых сталей : а. с. SU 1014305 / Л. Г. Ворошнин, Б. С. Кухарев, А. А. Шматов, Г. Г. Панич. – Оpubл. 21.12.1982.

116. Состав для комплексного насыщения изделий из высокоуглеродистых сталей : а. с. SU 1024526 / Л. Г. Ворошнин, Б. С. Кухарев, А. А. Шматов, И. Н. Хохол. – Оpubл. 23.02.1983.

117. Состав для хромирования высокоуглеродистых сталей : а. с. SU 1030421 / Л. Г. Ворошнин, Б. С. Кухарев, А. А. Шматов, Г. Г. Панич. – Оpubл. 22.03.1983.

118. Состав для комплексного насыщения стальных изделий : а. с. SU 1036798 / Л. Г. Ворошнин, Г. В. Борисенок, С. В. Побережный, А. А. Шматов, Л. А. Васильев, Ю.В. Туров. – Оpubл. 22.04.1983.

119. Состав для комплексного насыщения изделий : а. с. SU 1046328 / Л. Г. Ворошнин, Г. В. Борисенок, А. А. Шматов, С. В. Побережный, В. С. Фиалко, А. П. Пучков, Г. Ф. Протасевич. – Оpubл. 08.06.1983.

120. Состав для комплексного насыщения инструмента из сталей и твердых сплавов : а. с. SU 1069438 / Л. Г. Ворошнин, С. В. Побережный, А. А. Шматов, Г. В. Борисенок, Н. И. Иваницкий, Н. А. Витязь. – Оpubл. 22.09.1984.

121. Состав для комплексного насыщения стальных изделий : а. с. SU 1069439 / Л. Г. Ворошнин, С. В. Побережный, А. А. Шматов, Г. В. Борисенок. – Оpubл. 22.09.1984.

122. Состав для комплексной химико-термической обработки изделий: а.с. SU 1069440 / Л.Г. Ворошнин, С.В. Побережный, А.А. Шматов, Г.В. Борисенок, Н.И. Иваницкий. – Оpubл. 22.09.1984.

123. Состав для марганцирования стальных изделий: а.с. SU 1082862 / Л. Г. Ворошнин, Г.М. Левченко, А.А. Шматов, Б.С. Кухарев, И.Н. Хохол. – Оpubл. 01.12.1983.

124. Состав для комплексной химико-термической обработки металлических изделий : а.с. SU 1094394 / Л. Г. Ворошнин, А. А. Шматов, С. В. Побережный, Г. В. Борисенок, Н. И. Иваницкий. – Оpubл. 22.01.1984.

125. Состав для титаномарганцирования стальных изделий : а. с. SU 1170002 / Л. Г. Ворошнин, А. А. Шматов, О. И. Крот, Л. А. Васильев. – Оpubл. 01.04.1985.

126. Состав для комплексного насыщения стальных деталей : а. с. SU 1195678 СССР / Л. Г. Ворошнин, А. А. Шматов, Л. А. Васильев, О. И. Крот. – Оpubл. 01.08.1985.

127. Способ диффузионного хромирования стальных изделий : а. с. SU 1243394 / Л. Г. Ворошнин, А. А. Шматов, Л. А. Васильев, Н. В. Станкевич. – Оpubл. 08.03.1986.

128. Порошковый состав для комплексного насыщения изделий из твердых сплавов : а. с. SU 1262986 / Г. В. Борисенок, С. В. Побережный, И. Л. Куприянов, А. А. Шматов. – Оpubл. 08.06.1986.

129. Состав для получения комплексных карбидных покрытий на стальных изделиях : а. с. SU 1271128 / Л. Г. Ворошнин, А. А. Шматов, Г. В. Борисенок, С. В. Побережный, А. С. Стеценко. – Оpubл. 15.07.1986.

130. Способ получения комплексных покрытий на стальных и чугуновых изделиях : а. с. SU 1311283 / Л. А. Васильев, Л. Г. Ворошнин, А. А. Шматов, Г. В. Борисенок. – Оpubл. 15.01.1987.

131. Состав для комплексного диффузионного насыщения стальных изделий : а. с. SU 1356524 / Ю. В. Соколов, А. А. Шматов, Г. В. Кочан, В. В. Грушевский. – Оpubл. 01.08.1987.

132. Состав для комплексного диффузионного насыщения стальных изделий : а. с. SU 1356525 / Л. Г. Ворошнин, А. А. Шматов, В. Б. Садыков, Б. Б. Хина. – Оpubл. 01.08.1987.

133. Состав для комплексного насыщения стальных изделий : а. с. SU 1363887 / Ю. В. Соколов, А. А. Шматов, Г. В. Кочан, Г. И. Залужный, М. А. Садох. – Оpubл. 01.09.1987.

134. Состав для получения многокомпонентных карбидных покрытий на твердом сплаве : а. с. SU 1400135 / Л. Г. Ворошнин, А. А. Шматов, Г. В. Борисенок, С. В. Побережный. – Оpubл. 01.02.1988.

135. Состав для комплексного насыщения литейных стальных моделей : а. с. SU 1403656 / Ю. В. Соколов, А. А. Шматов, Г. В. Кочан, Г. И. Залужный, М. А. Садох. – Оpubл. 15.02.1988.

136. Состав для комплексного диффузионного насыщения твердосплавного инструмента : а. с. SU 1420994 / Г. В. Борисенок, С. В. Побережный, А. А. Шматов, Н. И. Иваницкий. – Оpubл. 01.05.1988.

137. Состав для титаномарганцирования изделий из высокоуглеродистых сплавов : а. с. SU 1431359 / А. А. Шматов, Л. Г. Ворошнин, В. К. Карбанович, О. А. Хохлова. – Оpubл. 15.06.1988.

138. Состав для химико-термической обработки твердых сплавов : а. с. SU 1433067 / Л. Г. Ворошнин, А. А. Шматов, С. В. Побережный, Б. Б. Хина. – Оpubл. 22.06.1988.

139. Порошковый состав для диффузионного насыщения твердых сплавов : а. с. SU 1433068 / Г. В. Борисенок, А. А. Шматов, С. В. Побережный, В. А. Кот. – Оpubл. 22.06.1988.

140. Порошковый состав для диффузионного насыщения твердосплавного инструмента : а. с. SU 1436529 / Г. В. Борисенок, С. В. Побережный, В. А. Кот, А. А. Шматов. – Оpubл. 08.07.1988.

141. Способ диффузионного насыщения инструмента из твердого сплава : а. с. SU 1452190 / А. А. Шматов, Л. Г. Ворошнин. – Оpubл. 15.09.1989.

142. Состав для комплексного насыщения стальных изделий : а. с. SU 1477780 / Л. Г. Ворошнин, А. А. Шматов, Б. Б. Хина, О. А. Хохлова. – Оpubл. 08.01.1989.
143. Способ термической обработки режущего инструмента из быстрорежущей стали : а. с. SU 1573878 / А. А. Шматов, Л. Г. Ворошнин. – Оpubл. 22.02.1990.
144. Способ термической обработки инструмента из быстрорежущей стали : а. с. SU 1573879 / А. А. Шматов, Л. Г. Ворошнин, А. И. Пузелев. – Оpubл. 22.02.1990.
145. Состав для комплексного насыщения режущего твердосплавного инструмента : а. с. SU 1617053 / А. А. Шматов, Л. Г. Ворошнин, О. А. Хохлова. – Оpubл. 01.09.1990.
146. Способ термической обработки режущего инструмента из быстрорежущей стали : а. с. SU 1625012 / А. А. Шматов, Л. Г. Ворошнин. – Оpubл. 01.10.1991.
147. Способ упрочнения инструмента : а. с. SU 1785280 / А. А. Шматов, Л. Г. Ворошнин. – Оpubл. 01.09.1992.
148. Состав для комплексного насыщения стальных моделей для напыления : а. с. SU 1832754 / Ю. В. Соколов, А. А. Шматов, Г. В. Кочан, М. А. Садох, В. М. Апарин, В. А. Гернштейн. – Оpubл. 13.10.1992.
149. Способ термической обработки режущего инструмента из быстрорежущей стали : а. с. SU 1837079 / А. А. Шматов, Л. Г. Ворошнин, А. В. Щебров. – Оpubл. 13.10.1993.
150. Способ термического упрочнения режущего инструмента из быстрорежущей стали : а. с. SU 1839020 / А. А. Шматов, Л. Г. Ворошнин, В. А. Качалов. – Оpubл. 1.03.1993.
151. Способ термической обработки режущего инструмента из быстрорежущей стали : пат. RU 2010870 / А. А. Шматов, Л. Г. Ворошнин. – Оpubл. 15.04.1994.
152. Способ термической обработки инструментальных сталей : пат. RU 2017838 / А. А. Шматов, Л. Г. Ворошнин, А. М. Гурьев. – Оpubл. 15.08.1994.
153. Способ упрочнения инструмента из быстрорежущей стали : пат. RU 2023027 / А. А. Шматов, Л. Г. Ворошнин. – Оpubл. 15.11.1994.
154. Способ термической обработки режущего инструмента из быстрорежущей стали : пат. RU 2563382 / А. А. Шматов. – Оpubл. 20.09.2015.
155. Способ термической обработки режущего инструмента из быстрорежущей стали : пат. ВУ 20629 / А. А. Шматов. – Оpubл. 30.12.2016.
156. Способ упрочнения поверхности стального инструмента : пат. RU 2655403 / А. А. Шматов. – Оpubл. 28.05.2018.
157. Способ упрочнения твердого сплава : пат. RU 2655404 / А. А. Шматов. – Оpubл. 28.05.2018.
158. Способ упрочнения алмазных инструментов : пат. RU 2676125 / А. А. Шматов. – Оpubл. 26.12.2018.
159. Способ упрочнения готовых к эксплуатации стальных изделий: положительное решение от 21.05.2019 по заявке ЕА 201800109 / А. А. Шматов. – Заявл. 16.02.2018.

РЭЗІЮМЭ

Шматаў Аляксандр Анатольевіч

Навуковыя і тэхналагічныя асновы тэрмахімічных і тэрмацыклічных метадаў ўмацоўваюцей апрацоўкі металаапрацоўчых інструментаў

Ключавыя словы: ўмацоўваючая апрацоўка, металаапрацоўчыя інструменты, твёрдасмазочныя пакрыцця, структурныя кампазіцыі.

Мэта працы: распрацоўка навуковых і тэхналагічных асноў тэрмахімічных і тэрмацыклічных метадаў ўмацоўваюцей апрацоўкі металаапрацоўчых інструментаў, якая забяспечвае стварэнне цэлага комплексу высокіх эксплуатацыйных характарыстык у павярхоўнай зоне і аб'ёме сталёвых, цвёрдасплаўных і алмазных інструментаў.

Метады даследавання і выкарыстаная апаратура: матэматычныя і кампутарныя метады сімплекс-планавання, сінтэз-тэхналогіі і квантавай хіміі, метады трыботэхнічных і дыяметральных выпрабаванняў, мікраструктурны, рэнтгенаўскі і мікрарэнтгенаспектральны аналізы, атамная сканавальная мікраскапія і іншыя стандартныя метады даследаванняў.

Атрыманыя вынікі і іх навізна: прапанаваны навуковы сістэмны падыход да распрацоўкі тэхналогіі высокаэфектыўнай ўмацоўваюцей апрацоўкі металаапрацоўчых інструментаў і стварэння ў іх шматузроўневых структурных кампазіцый. Вывучан уплыў тэхналагічных рэжымаў і складаў актыўнай асяроддзя на структуру, механічныя, трыботэхнічныя і эксплуатацыйныя ўласцівасці інструментальных матэрыялаў, ўмацаваных тэрмахімічнымі і тэрмацыклічнымі метадамі павярхоўнай і аб'ёмнай апрацоўкі. Знойдзены дэтэрмінаваны па часе эфект паляпшэння эксплуатацыйных уласцівасцяў інструментаў пры цыклічнай змене фазавых ператварэнняў у інструментальных матэрыялах і ў знешнім асяроддзі. У выніку даследаванняў дасягнута: пры хіміка-тэрмічнай апрацоўцы – павелічэнне мікрацвёрдасці шматкампанентных карбідных пакрыццяў да 20–35 ГПа, а зносаўстойлівасці сталей ў 4–31 разы; пры тэрмагідрахімічнай апрацоўцы – зніжэнне каэфіцыента трэння (без змазкі) цвёрдасплаўнай і сталёвай паверхні ў 3,8–8,7 разу; пры ўмацоўваюцей тэрмацыклічнай апрацоўцы з незавершанымі фазавымі ператварэннямі – павышэнне трываласці пры выгіне сталей ў 1,5–2,3 разы, ударнай глейкасці – у 1,2–14,5 раза і цвёрдасці HRC на 1–2 адзінкі. Новыя працэсы ўмацоўваюцей апрацоўкі інструментаў створаны на базе 46 запатэнтаваных вынаходстваў.

Рэкамендацыі па выкарыстанню, вобласць прымянення: распрацаваныя тэхналогіі, абсталяванне і ўмацаваныя з іх дапамогай рэжучыя, штамповыя і абразіўныя інструменты выкарыстаны на 12 прадпрыемствах машынабудавання, аэракасімічнай і энергетычнай прамысловасці Беларусі і Расіі з сумарным эканамічным эфектам больш за 1 млн. дзяляраў ЗША ў эквіваленце.

РЕЗЮМЕ

Шматов Александр Анатольевич

**Научные и технологические основы термохимических
и термоциклических методов упрочняющей обработки
металлообрабатывающих инструментов**

Ключевые слова: упрочняющая обработка, металлообрабатывающие инструменты, твердосмазочные покрытия, структурные композиции.

Цель работы: разработка научных и технологических основ термохимических и термоциклических методов упрочняющей обработки металлообрабатывающих инструментов, обеспечивающей создание целого комплекса высоких эксплуатационных характеристик в поверхностной зоне и объеме стальных, твердосплавных и алмазных инструментов.

Методы исследования и использованная аппаратура: математические и компьютерные методы симплекс-планирования, синтез-технологий и квантовой химии, методы триботехнических и дюрометрических испытаний, микроструктурный, рентгеновский и микрорентгеноспектральный анализы, атомная сканирующая микроскопия и другие стандартные методы исследований.

Полученные результаты и их новизна: предложен научный системный подход к разработке технологий высокоэффективной упрочняющей обработки металлообрабатывающих инструментов и создания в них многоуровневых структурных композиций. Изучено влияние технологических режимов и составов активной среды на структуру, механические, триботехнические и эксплуатационные свойства инструментальных материалов, упрочненных термохимическими и термоциклическими методами поверхностной и объемной обработки. Обнаружен детерминированный по времени эффект улучшения эксплуатационных свойств инструментов при циклической смене фазовых превращений в инструментальных материалах и во внешней среде. Установлены закономерности формирования композиционных и градиентных структур в инструментах и покрытиях, а также механизмы упрочнения и улучшения свойств инструментальных материалов. В результате исследований достигнуто: при химико-термической обработке – увеличение микротвердости многокомпонентных карбидных покрытий до 20–35 ГПа, а износостойкости сталей в 4–31 раза; при термогидрохимической обработке – снижение коэффициента трения (без смазки) твердосплавной и стальной поверхности в 3,8–8,7 раза; при упрочняющей термоциклической обработке с незавершенными фазовыми превращениями – повышение прочности при изгибе сталей в 1,5–2,3 раза, ударной вязкости – в 1,2–14,5 раза и твердости HRC на 1–2 единицы. Новые процессы упрочняющей обработки инструментов созданы на базе 46 запатентованных изобретений.

Рекомендации по использованию, область применения: разработанные технологии, оборудование и упрочненные с их помощью режущие, штамповые и абразивные инструменты использованы на 12 предприятиях машиностроения, аэрокосмической и энергетической промышленности Беларуси и России с суммарным экономическим эффектом более 1 млн долларов США в эквиваленте.

SUMMARY

Shmatov Alexander Anatolyevich

Scientific and technological bases of thermochemical and thermocyclic methods of strengthening treatment for metalworking tools

Keywords: strengthening treatment, metalworking tools, solid lubricant coatings, structural compositions.

The purpose of the work: development of scientific and technological bases of thermochemical and thermocyclic methods of strengthening treatment for metalworking tools, providing the creation of a whole complex of high performance characteristics in the surface zone and the volume of steel, carbide and diamond tools.

Research methods and equipment used: mathematical and computer methods of simplex planning, synthesis technologies and quantum chemistry, tribotechnical and durometric test methods, microstructural, X-ray and X-ray microanalysis, atomic scanning microscopy and other standard research methods.

The results obtained and their novelty: a scientific systematic approach to the development of technologies for highly efficient strengthening processing of metalworking tools and the creation of multilevel structural compositions in them are proposed. The influence of technological regimes and compositions of the active medium on the structure, mechanical, tribotechnical and operational properties of tool materials hardened by thermochemical and thermocyclic methods of surface and volume treatment are studied. A time-determined effect was discovered to improve the operational properties of tools during a cyclic change in phase transformations in tool materials and in the external environment. The regularities of the formation of composite and gradient structures in tools and coatings, as well as the mechanisms of hardening and improving the properties of tool materials, are established. As a result of investigations it was achieved: after thermochemical treatment – an increase in the microhardness of multicomponent carbide coatings up to 20–35 GPa and wear resistance of steels by the factor of 4–31; after thermohydrochemical treatment – a decrease in the coefficient of friction (without lubrication) of carbide and steel surfaces by the factor of 3.8–8.7; after hardening thermocyclic treatment with incomplete phase transformations – an increase in the bending strength of steels by the factor of 1.5–2.3, impact strength by the factor of 1.2–14 and hardness HRC by 1–2 units. New hardening processes for tools are based on 46 patented inventions.

Application recommendations, area of application: the developed technologies, equipment and hardened cutting, stamping and abrasive tools were used at 12 enterprises of mechanical engineering, aerospace and energy industries of Belarus and Russia with a total economic effect of more than 1 million US dollars in equivalent.

Научная работа

ШМАТОВ
Александр Анатольевич

**НАУЧНЫЕ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ТЕРМОХИМИЧЕСКИХ
И ТЕРМОЦИКЛИЧЕСКИХ МЕТОДОВ УПРОЧНЯЮЩЕЙ ОБРАБОТКИ
МЕТАЛЛООБРАБАТЫВАЮЩИХ ИНСТРУМЕНТОВ**

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук по специальностям
05.02.07 – технология и оборудование механической
и физико-технической обработки,
05.16.01 – металловедение и термическая
обработка металлов и сплавов

Подписано в печать 11.05.2020. Формат 60×84¹/₁₆. Бумага офсетная. Цифровая печать.
Усл. печ. л. 2,73. Уч.-изд. л. 2,14. Тираж 130. Заказ 283.

Издатель и полиграфическое исполнение: Белорусский национальный технический университет.
Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя, распространителя
печатных изданий № 1/173 от 12.02.2014. Пр. Независимости, 65. 220013, г. Минск.