

*На правах рукописи*



ОСКОЛКОВА ТАТЬЯНА НИКОЛАЕВНА

**Развитие теоретических и технологических основ  
повышения износостойкости карбидовольфрамowych  
твердых сплавов с использованием поверхностного  
упрочнения концентрированными потоками энергии и  
объемной термической обработки**

Специальность: 05.16.01 – Металловедение и термическая обработка металлов и  
сплавов

Автореферат диссертации на соискание учёной степени  
доктора технических наук

Новокузнецк, 2018

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном  
образовательном учреждении высшего образования  
«Сибирский государственный индустриальный университет»

Научный консультант: доктор физико-математических наук, профессор  
Глезер Александр Маркович

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор, профессор ка-  
федры физического металловедения ФГБОУ ВО  
«Липецкий государственный технический универси-  
тет» Шкатов Валерий Викторович

доктор технических наук, ученый секретарь Самар-  
ского филиала ФГБУН «Физический институт им.  
П.Н. Лебедева РАН» Ярьсько Сергей Игоревич

доктор технических наук, главный научный сотруд-  
ник ФГБУН «Институт физики прочности и матери-  
аловедения Сибирского отделения РАН» Прибыт-  
ков Геннадий Андреевич

Ведущая организация: ФГБОУ ВО «Оренбургский государственный универ-  
ситет»

Защита состоится «25» декабря 2018 г. в 10<sup>00</sup> в ауд. 1П на заседании дис-  
сертационного совета Д 212.252.01 при ФГБОУ ВО «Сибирский государственный  
индустриальный университет» по адресу: 654007, г. Новокузнецк, Кемеров-  
ская область, ул. Кирова, д.42, СибГИУ.

Факс: (3843)46-57-92

Е- mail: ds21225201@sibsiu.ru

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке и  
на сайте ФГБОУ ВО «Сибирский государственный индустриальный универси-  
тет» [www.sibsiu.ru](http://www.sibsiu.ru)

Автореферат разослан «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2018 г.

Учёный секретарь  
диссертационного совета Д 212.252.01,  
д.т.н., профессор



О.И. Нохрина

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы исследования.** Развитие машиностроения, горнодобывающей и деревообрабатывающей промышленности в нашей стране связано с применением спечённых карбидовольфрамовых твёрдых сплавов, которые широко используют в качестве инструментальных материалов. В 2000 г. в мире, исключая Китай, выпущено 30 000 т твёрдых сплавов, из них более 12000 т – субмикронных (с величиной зерна 1,2 мкм). В настоящее время в мире насчитывается более 230 фирм, производящих твёрдые сплавы, из них около 30 крупных с объёмом производства более 100 т.

Сплавы WC–Co – наиболее прочные из известных спечённых твёрдых сплавов, но не всегда удовлетворяют требованиям по эксплуатационной стойкости. В общей массе амортизированного инструмента износ и поломки твёрдосплавных элементов составляет 80 – 90 %, поэтому одним из перспективных направлений совершенствования твёрдых сплавов является повышение износостойкости при сохранении вязкости. Именно сочетание таких свойств обеспечивает долговечность любого инструмента, воспринимающего нагрузки высокой интенсивности при механической обработке, штамповке, бурении горных пород и т.д.

В этой связи повышение износостойкости карбидовольфрамовых твёрдых сплавов посредством создания многокомпонентных покрытий с использованием концентрированных потоков энергии, которые рассматриваются в данной работе, является актуальной научно-практической задачей. Формирование износостойких поверхностных слоёв твёрдых сплавов группы ВК будет способствовать повышению эксплуатационных характеристик различного инструмента, производительности труда, экономии дефицитного сырья – вольфрама и кобальта.

Работа выполнена в соответствии с перечнем критических технологий Российской Федерации от 2011 г. «Технологии получения и обработки функциональных наноматериалов» и приоритетным направлениям развития науки, технологий и техники Российской Федерации от 2011 г. «Индустрия наносистем», основными задачами Государственной программы «Развитие науки и технологий» на 2013 – 2020 годы. Разработки проводились в соответствии с Федеральной целевой программой «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России на 2009-2013 годы» («Обоснование выбора оптимальных режимов легирования, модифицирования стали и сплавов с использованием нанотехнологий и термомеханического упрочнения проката с целью формирования наноструктурного состояния поверхности для повышения механических свойств») П 332 от 28.07.2009, ГК № 01200906185; гранта в рамках проектной части государственного задания Минобрнауки России № 11.1531.2014/К («Развитие теории и совершенствование процессов сварки и упрочнения сталей и твёрдых сплавов на основе формирования наноструктурных сварных швов и покрытий с заданными физико-механическими свойствами для повышения надёжности и долговечности инструментов, деталей, узлов и механизмов»); гранта ФГБОУ ВПО «Сибирский государственный индустриальный

университет» («Термическая обработка металлов и сплавов») от 01.04.2008, № 4.24/8.

### **Степень разработанности темы исследования**

Большой резерв повышения износостойкости и эксплуатационной стойкости твёрдосплавных изделий заключается в применении поверхностных методов упрочнения с использованием различных покрытий, обработки поверхности импульсным лазерным лучом, модифицирования поверхности твёрдого сплава мощными ионными пучками и т.д. Значительный объем результатов теоретических и экспериментальных исследований при данных обработках получен и в наибольшей степени описан в трудах отечественных (И.С. Яреско, А.С. Верещака, В.П. Табаков, К.Н. Полещенко, С.И. Богодухов, Г.Е. Ремнёв, В.А. Тарбоков, С.Ф. Гнюсов, А.Н. Иванов и т.д.) и зарубежных специалистов (L. Shourong, Y. Katsuhito, G. Kulander). Проведенный анализ состояния проблемы повышения эксплуатационных свойств карбидовольфрамовых твёрдых сплавов позволяют заключить, что недостаточно изученным остаётся вопрос о закономерностях изменения структуры и свойств поверхностных слоёв твёрдых сплавов группы ВК при импульсном плазменном воздействии. Получение новых представлений и установление этих закономерностей позволит прогнозировать механические свойства твёрдых сплавов.

**Цель работы:** Повышение износостойкости карбидовольфрамовых твердых сплавов для бурового, горно-режущего, штампового и металлорежущего инструментов на основе технологий поверхностного упрочнения концентрированными потоками энергии и объемной термической обработки.

Для достижения цели работы были сформулированы следующие **задачи**:

1. Развитие теоретических основ повышения износостойкости карбидовольфрамовых твердых сплавов для бурового, горно-режущего, штампового и металлорежущего инструментов на основе технологий объемного и поверхностного упрочнения посредством термической обработки в водополимерных средах и воздействия на поверхность концентрированных потоков энергии.

2. Установление закономерностей изменения структуры и свойств твёрдого сплава ВК10КС при термической обработке в полимерных средах ПК-М, Бреокс Термо А, Термовит М.

3. Научное обоснование закономерностей и механизма структурообразования сверхтвёрдых ионно-плазменных TiN+ZrN покрытий на карбидовольфрамовых твёрдых сплавах и их влияние на механические свойства.

4. Установление механизма формирования структуры и фазового состава поверхностного слоя, полученного способом электроэрозионного упрочнения легированием (ЭЭУЛ) в твёрдосплавных пластинах, состоящих из сплава ВК10КС (основа) и ВК6-ОМ (поверхностный слой).

5. Исследование структурно-фазового состояния и свойств поверхностных слоёв на сплаве ВК10КС, сформированных в неравновесных условиях однокомпонентного (с применением проводников из углерода, алюминия, титана) и многокомпонентного (с дополнительным введением карбида кремния и бора) электровзрывного легирования (ЭВЛ) при различных режимах энергетического воздействия.

6. Совершенствование технологического процесса объемной термической обработки карбидовольфрамовых твердых сплавов на основе применения водополимерных закалочных сред.

7. Разработка на основе обобщения результатов теоретических и экспериментальных исследований технологий поверхностного упрочнения карбидовольфрамовых твердых сплавов для бурового, горно-режущего, штампового и металлорежущего инструментов с применением концентрированных потоков энергии.

8. Внедрение результатов теоретических и экспериментальных исследований в практику производства бурового, горно-режущего, металлорежущего и штампового инструмента с целью повышения его эксплуатационной стойкости и износостойкости, а также в учебный процесс при подготовке аспирантов по направлению подготовки 22.06.01 – Технологии материалов.

### **Научная новизна**

1. Дано научное обоснование механизма и закономерностей структурообразования сверхтвёрдых ионно-плазменных TiN+ZrN покрытий на карбидовольфрамовых твёрдых сплавах ВК10КС и ВК8. Установлено, что дополнительное легирование цирконием ионно-плазменного покрытия TiN приводит к повышению нанотвёрдости на 23 %, модуля Юнга на 67 %, снижению коэффициента трения по сравнению с исходным (спечённым) состоянием твёрдого сплава в 5,9 раз.

2. Установлен механизм формирования структуры и фазового состава двухслойных твёрдосплавных пластин (поверхностный слой ВК6-ОМ + основа ВК10КС), полученных способом ЭЭУЛ. Научно обосновано, что повышение износостойкости твёрдосплавных пластин связано с образованием на их поверхности карбидов дивольфрама  $W_2C$ , характеризующихся более высокой твёрдостью и износостойкостью, по сравнению с монокарбидами вольфрама WC.

3. Создана новая номограмма для разработки режимов электроэрозионного упрочнения легированием карбидовольфрамовых твёрдых сплавов с регламентированными параметрами поверхностного слоя.

4. Получены новые научные данные о структурно-фазовых состояниях и свойствах поверхностных слоёв на сплаве ВК10КС, сформированных в неравновесных условиях одно- и многокомпонентного электровзрывного легирования при различных режимах энергетического воздействия. Установлено, что наибольший эффект упрочнения поверхности твёрдого сплава наблюдается при использовании высокоэнергетического ( $6,0 \text{ ГВт/м}^2$ ) режима обработки при всех взрывааемых проводниках и связан с измельчением структурных составляющих в поверхностных слоях и формированием высокотвёрдых фаз, состоящих из элементов основного материала и взрывааемых проводников –  $W_2C$ , TiC,  $Al_2O_3$ , SiC,  $Ti_2B$ . Максимальный эффект упрочнения поверхности твёрдого сплава наблюдается при однокомпонентном ЭВЛ титаном, а при многокомпонентном – титаном с бором.

5. На основе математического моделирования исследованы теплофизические процессы в твёрдосплавных пластинах при ЭВЛ. Получены новые ко-

личественные данные о влиянии параметров энергетического воздействия на тепловое состояние твердосплавных пластин, градиенты изменения температуры. Доказано, что формирование упрочненного поверхностного слоя происходит в неравновесных условиях, определяющих его свойства и фазовый состав.

6. Установлены закономерности формирования структуры твёрдого сплава ВК10КС при термической обработке в водополимерных средах ПК-М, Бреокс Термо А, Термовит М, обусловленные частичным растворением карбидов вольфрама WC и уменьшением их размеров, дополнительным растворением вольфрама и углерода в кобальтовой связующей с ГЦК решёткой и ее стабилизацией.

### **Теоретическая и практическая значимость работы**

На основе полученных результатов теоретических и экспериментальных исследований разработан комплекс технологических решений для упрочнения карбидовольфрамовых твёрдых сплавов, обеспечивающих повышение поверхностной твёрдости до  $20000 \div 38500$  МПа, предела прочности на изгиб на 10 %, снижение коэффициента трения в  $2 \div 6$  раз. Полученные результаты предназначены для практического применения при разработке упрочняющих технологий бурового, горно-режущего, штампового инструмента, а также инструмента для механической обработки специальных сталей и цветных сплавов, в частности:

1. Разработана технология закалки карбидовольфрамового твёрдого сплава ВК10КС в водополимерных средах ПК-М, Бреокс Термо А, Термовит М, позволяющая повысить срок службы бурового, горно-режущего и штампового инструмента, оснащённого данным сплавом (способ закалки твёрдого сплава патент РФ 229426; способ закалки твёрдого сплава на основе карбида вольфрама патент РФ 2355513; способ закалки твёрдого сплава патент РФ 2356693; способ закалки твёрдого сплава на основе карбида вольфрама патент РФ 2392342).

2. Получено сверхтвёрдое ионно-плазменное TiN+ZrN покрытие на карбидовольфрамовых твёрдых сплавах ВК10КС и ВК8 с нанотвёрдостью  $38000 \div 38500$  МПа и повышенной износостойкостью с коэффициентом трения  $\mu = 0,07$ , в 5,9 раз меньшим по сравнению с исходным состоянием.

3. На основе применения способа ЭЭУЛ разработана технология и произведена опытная партия твердосплавных пластин, состоящих из сплава ВК10КС (основа) и ВК6-ОМ (поверхностный слой) (способ получения изделия из многослойного твёрдого сплава на основе карбида вольфрама (патент РФ 2401720).

4. Разработана новая технология упрочнения поверхности карбидовольфрамового твёрдого сплава ВК10КС при однокомпонентном ЭВЛ углеродом, алюминием и титаном в высокоэнергетическом режиме, при которой поверхностная твёрдость возрастает в  $2 \div 2,5$  раза (способ поверхностного упрочнения вольфрамокобальтового твёрдосплавного инструмента (патент РФ 2398046); способ поверхностной обработки вольфрамокобальтового твёрдосплавного инструмента (патент РФ 2405061).

5. Разработана новая технология упрочнения поверхности карбидовольфрамового твёрдого сплава ВК10КС при многокомпонентном ЭВЛ углеродом,

алюминием и титаном совместно с порошками карбида кремния, бора, позволяющая снизить коэффициент трения в  $2 \div 4$  раза (способ упрочнения поверхности вольфрамокобальтового твёрдосплавного инструмента (патент РФ 2413792); способ упрочнения поверхности твёрдосплавного инструмента на основе карбида вольфрама (патент РФ 2430194).

6. Результаты исследований внедрены на ООО «Технокомплекс-НК» (г. Новокузнецк), ФГУП «НПЦ газотурбостроения «Салют» – филиал «Омское моторостроительное объединение им. П.И. Баранова», ООО «Механообработка» (г. Прокопьевск).

7. Результаты диссертационной работы используются в учебном процессе в Сибирском государственном индустриальном университете при подготовке аспирантов по направлению подготовки 22.06.01 – Технологии материалов.

Внедрение результатов работы в производство подтверждается соответствующими актами и справками о внедрении.

**Методология и методы исследования.** Экспериментальные исследования проводились с использованием оптической металлографии (микроскопы OLIMPUS – GX 50), растровой электронной микроскопии (микроскопы «Philips XL-30», «Philips SEM 515», оснащённый микроанализатором EDAX Genesis), электронной микроскопии (сканирующий электронный микроскоп EVO 50 XVP фирмы Carl Zeiss, просвечивающий электронный микроскоп марки Tescan 20 G2 TWIN фирмы FEI (Нидерланды) с ускоряющим напряжением 200 кВ), рентгенографии (рентгеновского дифрактометра ДРОН 2,0 с железным  $K_{\alpha}$ -излучением), метода оценки нанотвёрдости (прибор «Nano Hardness Tester» фирмы CSEM), метода оценки микротвёрдости (прибор ПМТ-3), метода оценки износостойкости (высокотемпературный трибометр «PC-Operated High Temperature Tribometer» фирмы CSEM), метода оценки шероховатости (установка «Micro Measure 3D station» фирмы CSEM), метода оценки адгезионных свойств ионно-плазменного TiN + ZrN покрытия (установка Micro Scratch Tester), метода оценки предела прочности при поперечном изгибе по ГОСТ 20019–74 (электромеханическая универсальная система Instron 3369), метода оценки твёрдости (твердомер Wolpert Group марки Model 600 MRD). Исследование теплового состояния твёрдосплавных пластин при ЭВЛ проводилось с применением детерминированной математической модели.

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

1. Результаты критического анализа, выявленные приоритетные направления создания новых и совершенствования существующих технологических процессов поверхностной и объемной термоупрочняющей обработки карбидовольфрамовых твёрдых сплавов, применяемых для производства штампового, металлорежущего, бурового и горно-режущего инструментов.

2. Результаты экспериментальных исследований структуры и свойств закалённого в водополимерных растворах ПК-М, Бреокс Термо А, Термовит М карбидовольфрамового твёрдого сплава ВК10КС.

3. Закономерности структурообразования ионно-плазменных TiN+ZrN покрытий на карбидовольфрамовых твёрдых сплавах ВК10КС и ВК8. Результаты

исследований влияния циркония в составе ионно-плазменных  $TiN+ZrN$  покрытий на их свойства.

4. Механизма формирования структуры и фазового состава поверхностного слоя из сплава ВК6-ОМ, полученного способом электроэрозионного упрочнения легированием в твёрдосплавных пластинах, состоящих из сплава ВК10КС.

5. Результаты математического моделирования и выявленные закономерности теплофизических процессов, происходящих в твёрдосплавных пластинах при ЭВЛ.

6. Результаты исследования структурно-фазового состояния и свойств поверхностных слоёв на сплаве ВК10КС, сформированных в неравновесных условиях одно- и многокомпонентного ЭВЛ при различных режимах низко- и высокоэнергетического воздействия.

7. Технологии упрочнения карбидовольфрамового твёрдого сплава ВК10КС: на основе применения способа ЭЭУЛ; при однокомпонентном ЭВЛ титаном; при многокомпонентном ЭВЛ титаном с бором.

8. Результаты промышленных испытаний штампового, металлорежущего, бурового и горно-режущего инструментов, оснащенных карбидовольфрамовыми твердыми сплавами после применения разработанных упрочняющих технологий.

#### **Соответствие диссертации паспорту научной специальности**

Диссертационная работа по своим целям, задачам, содержанию, методам исследования и научной новизне соответствует паспорту научной специальности 05.16.01 – «Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов» по п. 2 «Теоретические и экспериментальные исследования фазовых и структурных превращений в металлах и сплавах, происходящих при различных внешних воздействиях, п. 3 «Теоретические и экспериментальные исследования влияния структуры (типа, количества и характера распределения дефектов кристаллического строения) на физические, химические, механические, технологические и эксплуатационные свойства металлов и сплавов», п. 4 «Теоретические и экспериментальные исследования термических, термоупругих, термопластических, термохимических, термомагнитных, радиационных, акустических и других воздействий изменения структурного состояния и свойств металлов и сплавов», п. 6 «Разработка новых и совершенствование существующих технологических процессов объемной и поверхностной термической, химико-термической, термомеханической и других видов обработок, связанных с термическим воздействием, а также специализированного оборудования».

**Личный вклад автора заключается** в постановке задач и проведении теоретических и экспериментальных исследований; обработке полученных результатов, анализе, обобщении, научном обосновании, формулировании выводов и рекомендаций, написании статей, материалов докладов, патентов, разработке и внедрении в производство результатов исследований.

**Степень достоверности и апробация результатов.** Достоверность и обоснованность полученных результатов, выводов и рекомендаций подтверждается большим объемом экспериментальных данных, полученным с исполь-



зованием современных методов исследования в области металловедения; сопоставимостью экспериментальных данных с данными других исследователей; эффективностью предложенных технологических решений, подтвержденных результатами промышленных испытаний и внедрением в производство.

Основные положения диссертационной работы доложены и обсуждены на следующих конференциях: XXIX Российской школы (Екатеринбург, 2009); 7 и 8 Международные конференции «Исследование, разработка и применение высоких технологий в промышленности» (С-Петербург, 2009); XVI Всероссийской научно-технической конференции «Современные промышленные технологии» (Нижний Новгород, 2009); 1 Международной научной конференции «Размерные эффекты в наноструктурах и проблемы нанотехнологий» (Тамбов, 2009); 5-ой Евразийской научно-практической конференции «Прочность неоднородных структур» ПРОСТ 2010 (Москва, 2010); Международной научно-практической конференции «Инновационные технологии в машино- и приборостроении» (Омск, 2010); Международной научной конференции «Актуальные вопросы современной техники и технологии» (Липецк, 2010); Международной научно-практической конференции «Фундаментальные проблемы и современные технологии в машиностроении» (Москва, 2010); V и VI Международной научно-практических конференциях «Прогрессивные технологии в современном машиностроении» (Пенза, 2009, 2010); VI Международной конференции «Фазовые превращения и прочность кристаллов» (Черноголовка, 2010); Всероссийских научно-практических конференциях «Металлургия: технологии, управление, инновации, качество» (Новокузнецк, 2009, 2010, 2014); Международной научно-практической конференции «Новые технологии, инновации, изобретения» (Иркутск, 2010); Международной научной конференции «Технические науки и современное производство» (Париж, 2010); Международной научно-практической конференции «Техника и технологии: пути инновационного развития» (Курск, 2011); 51-й Международной конференции «Актуальные проблемы прочности» (Харьков, 2011); Международной научной конференции «Современные наукоемкие технологии» (Доминиканская Республика, 2011); Международной научной конференции «Фундаментальные исследования» (Хорватия, 2011); Международной научной конференции «Новые технологии, инновации, изобретения» (Анталья, 2011); Международной научно-технической конференции «Инновационные технологии металлургического производства» (Днепропетровск, 2012); (всего 26 научных конференций, в том числе 20 Международных конференций и 5 Всероссийских конференций).

**Публикации.** По материалам диссертации опубликовано 82 печатных работ, в том числе 3 монографии, 9 патентов РФ, 70 статей в журналах и сборниках статей, 25 из которых опубликованы в журналах, рекомендованных ВАК для опубликования результатов докторских диссертаций, 9 – в иностранных журналах, индексируемых в базе данных Scopus и Web of Science.

**Структура и объём работы.** Диссертация состоит из введения, семи глав, выводов, приложений и изложена на 313 страницах машинописного текста, содержит 110 рисунков, 15 таблиц, список литературы из 330 наименований.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность темы диссертационной работы, отражена степень ее разработанности, методология и методы исследования, степень достоверности и апробация результатов; сформулированы: цель и задачи исследования, научная новизна, теоретическая и практическая значимость работы; изложены положения, выносимые на защиту.

**В первом разделе «Современное состояние научной проблемы упрочнения карбидовольфрамовых твёрдых сплавов»** Анализ состояния проблемы повышения эксплуатационных свойств карбидовольфрамовых твёрдых сплавов свидетельствует об интенсивной работе учёных, многих фирм-изготовителей в направлении повышения твёрдости, износостойкости.

На основании систематизации литературных данных и анализа специальной технической литературы установлено, что основными наносимыми покрытиями у нас в стране и за рубежом является карбид титана, карбонитрид титана, нитрид титана и карбид титана + оксид алюминия  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ , обладающие высокими температурой плавления и твёрдостью. Толщина покрытий колеблется от 3 до 20 мкм. Выбор данных соединений в качестве материалов износостойких покрытий можно объяснить их удовлетворительными эксплуатационными свойствами, а также освоённой технологией нанесения. Однако отсутствует единое мнение у исследователей, связанное с использованием объёмной термической обработки (заковки) твёрдых сплавов группы ВК, а также возникает необходимость в создании покрытий новых составов для повышения эксплуатационного срока изделий, изготовленных или оснащённых этим сплавом.

В настоящее время с целью повышения долговечности твёрдосплавных изделий, помимо покрытий, используются поверхностные методы упрочнения с применением различных источников внешних высокоэнергетических воздействий, механизмы которых являются не достаточно изученными, поэтому поиск новых технических решений, ориентированных на модифицирование поверхности твёрдых сплавов группы ВК, используя импульсные плазменные струи, является актуальным.

Результаты предварительных исследований и проведенный анализ состояния проблемы повышения эксплуатационных свойств карбидовольфрамовых твёрдых сплавов позволяют сформулировать задачи исследования.

**Во втором разделе «Развитие теоретических основ технологий упрочнения карбидовольфрамовых твёрдых сплавов»** дано обоснование выбранным способам упрочнения твёрдых сплавов группы ВК.

На возможность заковки твёрдых сплавов указывает изменение с ростом температуры растворимости карбида вольфрама в кобальте в твёрдом состоянии и наличие аллотропического превращения кобальтовой фазы.

Используемые индустриальные масла в качестве охлаждающей среды при заковке твёрдых сплавов группы ВК имеют ряд недостатков: повышенная воспламеняемость, образование пригара на поверхности изделий, высокая стоимость, старение при эксплуатации и необходимости в периодической замене. В связи с этим в последнее время большое внимание уделяют разработке и

применению охлаждающих сред на основе водорастворимых полимеров. Полимерные охлаждающие среды предназначены для замены масел с целью устранения их недостатков или для заполнения области между водой и маслом по охлаждающей способности. В этой связи представляет интерес изучение охлаждающих способностей некоторых водополимерных растворов (ПК-М, Бреокс Термо А, Термовит М) различных концентраций, приближающихся к охлаждающим способностям индустриального масла, и их апробация в качестве охлаждающих сред при закалке твёрдого сплава ВК10КС с целью возможности замены индустриального масла.

Японские исследователи А. Miyashi и А. Nara в своих работах по изучению свойств твёрдых растворов на основе кобальта отмечают рост пластических характеристик при одновременном увеличении твёрдости и прочности при растяжении и сжатии. Указанное изменение объясняется стабилизацией кубической модификации кобальта при растворении карбида вольфрама, кристаллическая решётка которого обладает большим числом плоскостей скольжения при деформации и большей способностью к упрочнению по сравнению с гексагональной модификацией кобальта. Вместе с тем, можно предположить, что существенного повышения прочности и износостойкости твёрдых сплавов группы ВК после проведения закалки, не следует. Одним из эффективных путей решения этой задачи является разработка новых видов покрытий на твёрдых сплавах. На рисунке 1 представлены виды упрочняющих поверхностных обработок для WC-Co твёрдых сплавов, используемых в диссертационной работе.

Наиболее распространёнными являются покрытия из TiC, TiN, которые обладают высокой энергией связи решётки, высокой температурой плавления и твёрдостью. Применение TiC, TiN в качестве поверхностных слоёв на твёрдосплавном инструменте даёт снижение коэффициента трения в паре со сталью в  $1,5 \div 2$  раза. Однако покрытия из *TiC* и *TiN* не лишены недостатков, главным из которых является резкое снижение защитных свойств покрытий при высоких скоростях резания из-за их невысокой трещиностойкости. В этой связи представляет интерес введение в состав ионно-плазменного покрытия TiN циркония и изучение свойств TiN+ZrN покрытия на твёрдом сплаве ВК10КС, ВК8, так как предположительно цирконий должен снижать хрупкость при одновременном повышении твёрдости покрытия. Кроме того, предположительно высокую износостойкость ионно-плазменного TiN+ZrN покрытия можно объяснить с позиции атомно-энергетической концепции В.Ф. Моисеева, согласно которой меньшую интенсивность износа обеспечивают нитриды металлов IV группы (Ti, Zr) таблицы Д.И. Менделеева из-за того, что химические соединения с максимальной энергией связи между атомами, должны обеспечить и максимальную износостойкость.

Для штампового и бурового инструмента требуется, помимо повышенной работы разрушения твёрдого сплава, высокая износостойкость. Кроме нанесения покрытий на твёрдосплавный инструмент известны и другие способы повышения его износостойкости. К ним относится метод изготовления «многослойного» инструмента из твёрдых сплавов.

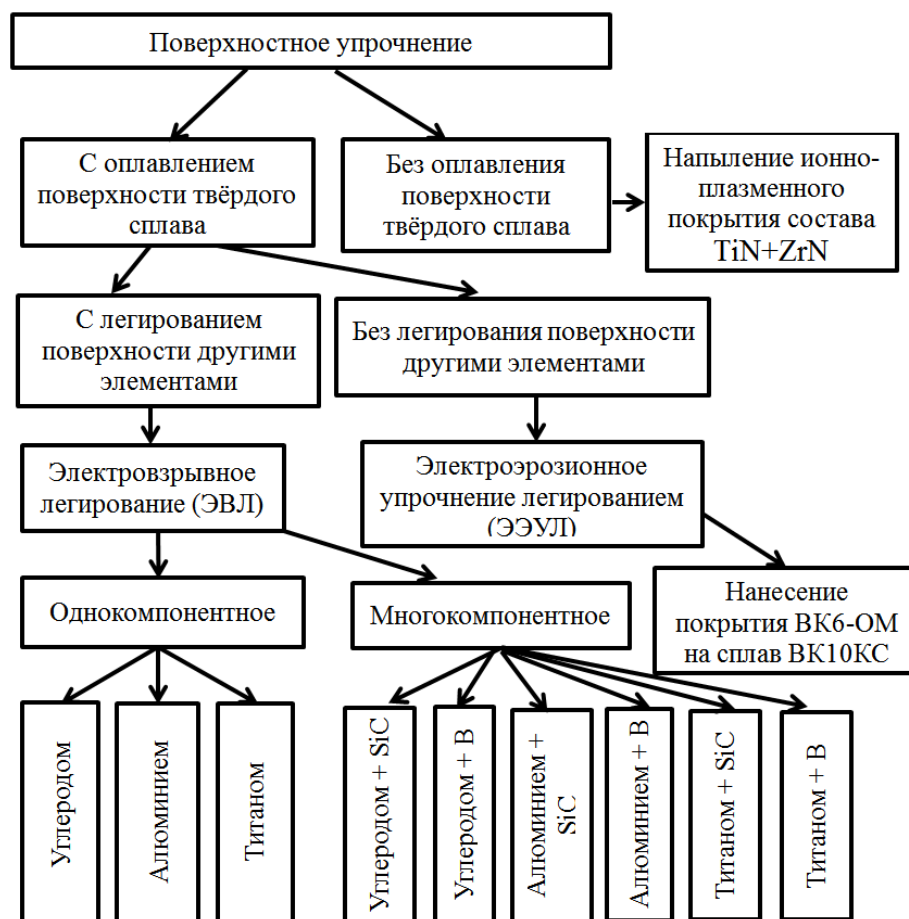


Рисунок 1 – Виды упрочняющих поверхностных обработок для WC-Co твёрдых сплавов, используемых в диссертационной работе

Теоретически возможно получить градиентную структуру твёрдосплавной пластины от вязкой сердцевины до износостойкой поверхности способом ЭЭУЛ. Процесс ЭЭУЛ основан на эрозии упрочняющего электрода при искровом разряде и переносе продуктов эрозии на деталь. Используя данный метод при поверхностной обработке твёрдого сплава ВК10КС более низкокобальтовым сплавом ВК6-ОМ, можно повысить поверхностную твёрдость и износостойкость твёрдого сплава при сохранении всех его свойств, которыми он обладает.

Стремление интенсифицировать процесс получения упрочнённых слоёв-покрытий, повысить их чистоту и адгезию к подложкам привело к применению импульсных плазменных ускорителей. При импульсно-плазменном нанесении покрытий используют более плотные потоки плазмы, чем при ионно-плазменном распылении.

Один из способов импульсного плазменного воздействия является ЭВЛ, при котором работа плазменного ускорителя основана на накоплении энергии батареями импульсных конденсаторов до 10 кДж и её последующем разряде в течение 100 мкс через проводник, испытывающий при этом взрывное разрушение.

Инструментом теплового воздействия на поверхность и источником легирующих элементов при ЭВЛ является импульсная многофазная плазменная

струя, которая формируется из материала взрываемого проводника, закреплённого на коаксиально-торцевых электродах плазменного ускорителя.

В данной работе в качестве взрываемых проводников применялись углерод (в виде углеграфитовых волокон массой 140 мг на 15 см<sup>2</sup> обрабатываемой поверхности), алюминий и титан (в виде фольг толщиной 20÷25 мкм массой 40 мг из расчёта на 15 см<sup>2</sup> обрабатываемой поверхности). Их выбор был обусловлен следующими причинами: углерод – это один из элементов системы W–C. При его наличии может происходить образование различных карбидов с высокими твёрдостями, состоящих как из элементов обрабатываемого материала, так и элементов взрываемых проводников. Применение алюминия в качестве взрываемого проводника может привести к образованию на поверхности твёрдого сплава при низком вакууме в камере оксида алюминия  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ , который в настоящее время часто применяется в качестве покрытий для WC-Co твёрдых сплавов. Взрывая титан, можно ожидать формирование на поверхности карбидовольфрамовых твёрдых сплавов карбидов титана TiC – основу твёрдых сплавов группы ТК.

Возможности упрочнения поверхности твёрдых сплавов группы ВК от электровзрыва проводников могут быть увеличены в результате совместного взрыва проводников с порошками тугоплавких соединений. В рамках настоящей работы было проведено дополнительное упрочнение поверхностного слоя твёрдого сплава ВК10КС за счёт совместного электровзрыва проводников с порошками бора, карбида кремния. Выбор данных порошков основывается на том, что они образуют высокотемпературные бориды, карбиды, силициды с высокими твёрдостями.

Обработка поверхности твёрдого сплава ВК10КС производилась в двух энергетических режимах: низкоэнергетический режим может осуществляться при поглощаемой плотности мощности 2,9 ГВт/м<sup>2</sup> (диаметр внутреннего электрода  $d = 15$  мм; диаметр канала сопла  $d_0 = 10$  мм; расстояние облучаемой поверхности от среза сопла  $x = 20$  мм; величина зарядного напряжения  $U = 1,6$  кэВ), при этом облучаемая поверхность не испытывала оплавления, либо оплавление было минимальным. Высокоэнергетический режим при интенсивности воздействия 6,0 ГВт/м<sup>2</sup> отличается от низкоэнергетического величиной зарядного напряжения  $U = 2,3$  кэВ и обеспечивает оплавление поверхности и интенсивное конвективное перемешивание расплава из-за неоднородного давления, оказываемой плазменной струёй на поверхность.

На основе математического моделирования исследованы теплофизические процессы в твердосплавных пластинах при ЭВЛ. Для теоретического анализа был взят образец в виде круглой пластины конечных размеров с радиусом  $R$  и толщиной  $H$  (рисунок 2). В работе использовалась математическая модель в форме задачи для однородного уравнения теплопроводности с граничными условиями III рода, поскольку динамика температуры от начала действия импульса определялась механизмом теплопроводности образца из твёрдого сплава, его размерами и мало зависит от длительности импульса энергетической обработки при неизменном значении его энергии.

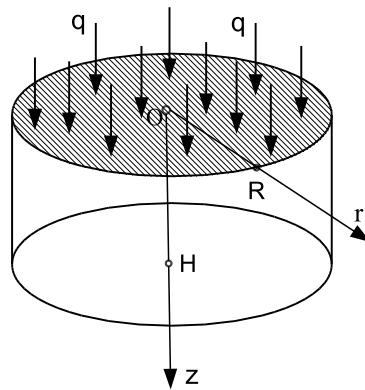


Рисунок 2 – Геометрия цилиндрического образца

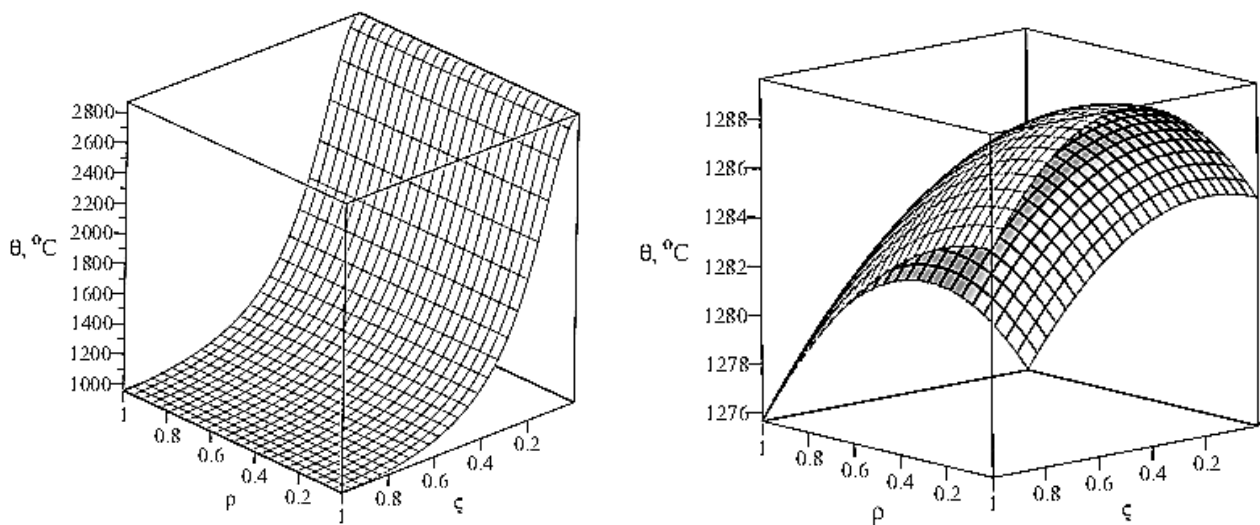
Переменная температура в представленной модели может быть использована для оценки влияния уровней и градиента температуры, скорости её изменения на микроструктуру поверхностного слоя образца.

Математическая модель, имитирующая нагружение энергетическим импульсом образца цилиндрической формы: в цилиндрической системе координат  $r, \varphi, z$  ( $r$  – радиальная,  $\varphi$  – окружная,  $z$  – осевая координаты) осесимметричное однородное уравнение теплопроводности для температуры  $t(\tau, r, z)$ , где переменная  $\tau$  – время, имеет вид:

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = a \left( \frac{\partial^2 t}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial t}{\partial r} + \frac{\partial^2 t}{\partial z^2} \right), \text{ где } a - \text{коэффициент температуропроводности ма-}$$

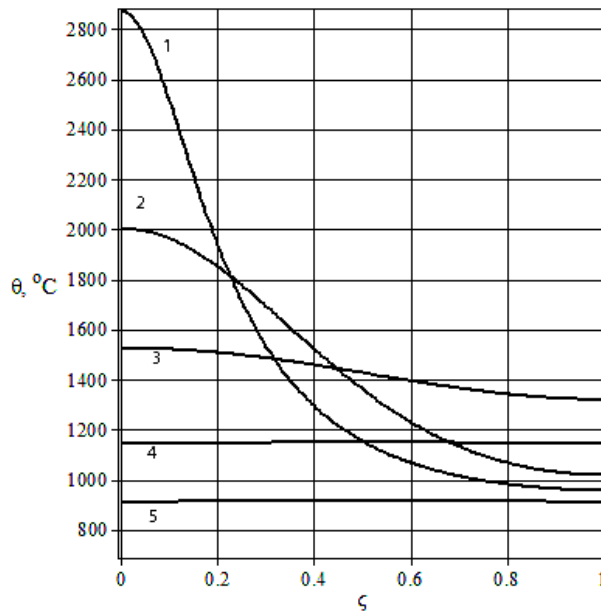
териала образца.

На основе математического моделирования исследованы теплофизические процессы в твердосплавных пластинах при ЭВЛ. Получены новые количественные данные о влиянии параметров энергетического воздействия на тепловое состояние твердосплавных пластин, градиенты изменения температуры (рисунок 3, 4).



а –  $\tau = 50$  мкс; б –  $\tau = 5,0$  с

Рисунок 3 – Модель динамики температуры при обработке поверхности изделия импульсом энергии



1 –  $\tau = 100$  мкс; 2 –  $\tau = 100$  мс; 3 –  $\tau = 0,5$  с; 4 –  $\tau = 10$  с; 5 –  $\tau = 20$  с.

Рисунок 4 – Распределения температуры вдоль оси образца в различные моменты времени

В третьем разделе «Изучение влияния термической обработки на структуру и свойства карбидовольфрамовых твёрдых сплавов» изучено влияние заковки твёрдого сплава ВК10КС в полимерных средах ПК-М, Брекс Термо А, Термовит М на его структуру и свойства.

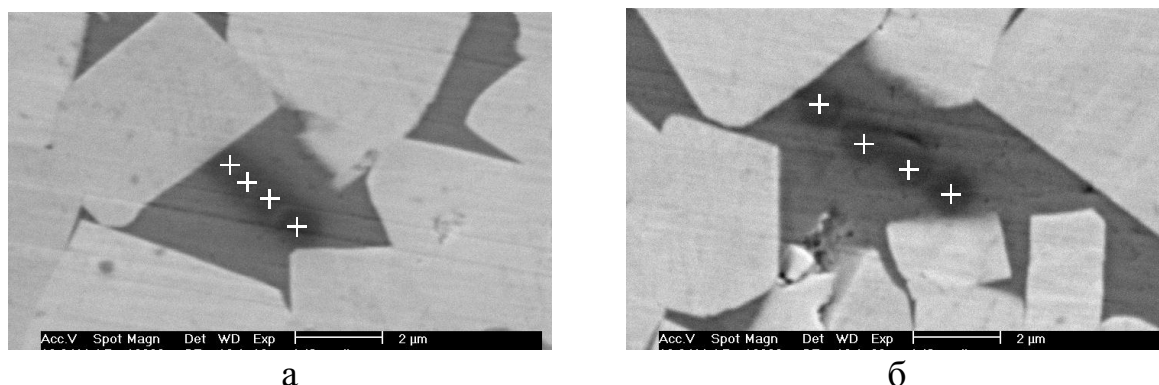
В работе были исследованы охлаждающие способности водных растворов полимеров и определены их оптимальные концентрации. Для заковки твёрдого сплава ВК10КС были использованы водные растворы полимеров 10 % ПК-М, 8 % Брекс-Термо А, 4 % Термовит М, охлаждающие способности которых максимально приближались к охлаждающей способности масла И-20А.

Эксплуатационные характеристики твёрдых сплавов зависят во многом от состояния связующей фазы. Изменение химического состава и свойств этой фазы достигается путём заковки, позволяющей фиксировать структурные изменения, которые происходят во время нагрева. В работе твёрдый сплав ВК10КС подвергался заковке от температур 1150 °C в водополимерных растворах ПК-М, Брекс Термо А, Термовит М вышеописанных концентраций при температуре 40 °C. Для сравнения сплав ВК10КС, нагретый до этой же температуры, подвергался заковке в масле И-20А при температуре 40 °C.

Микроструктура твёрдого сплава ВК10КС после спекания состоит из зёрен монокрибида вольфрама WC и кобальтовой связующей. Зёрна монокрибида вольфрама выглядят как многогранники с чёткими границами, углы которых между собой могут служить концентраторами напряжений, и при дальнейшей эксплуатации будут способствовать образованию микротрещин.

Микроструктуры твёрдого сплава после заковки в водополимерных растворах и после заковки в масле И-20А идентичны (рисунок 5). Можно наблюдать размытые границы зёрен WC, особенно в острых двугранных углах, вершины многогранников сглажены. Такая картина может являться следствием частично-

го растворения зерен карбида вольфрама в кобальте при нагреве под закалку, за счёт чего углы притупляются, при этом происходит уменьшение размеров монокарбидов вольфрама в среднем на 2 мкм.



а – масло И-20А; б – 4 % раствор полимера Термовит М  
Рисунок 5 – Микроструктура твёрдого сплава ВК10КС после закалки

Дополнительное растворение вольфрама в кобальтовой связующей подтверждают данные энергодисперсионного анализа, представленные в таблице 1. Легирование кобальтовой фазы при закалке отражается в увеличении параметра кристаллической решётки до  $a = 3,574 \text{ \AA}$  вместо  $a = 3,552 \text{ \AA}$  в исходном состоянии. Следует отметить, что большее легирование кобальтовая связующая достигла при закалке твёрдого сплава в водополимерных средах из-за более быстрого охлаждения. Дополнительное легирование кобальтовой связующей вольфрамом и углеродом подтверждается показателями микротвёрдости, которая увеличивается на 15 % по сравнению с исходным спечённым состоянием ( $H_{\mu} = 7300 \text{ МПа}$ ).

Таблица 1 – Содержание вольфрама в кобальтовой связке в сплаве ВК10КС

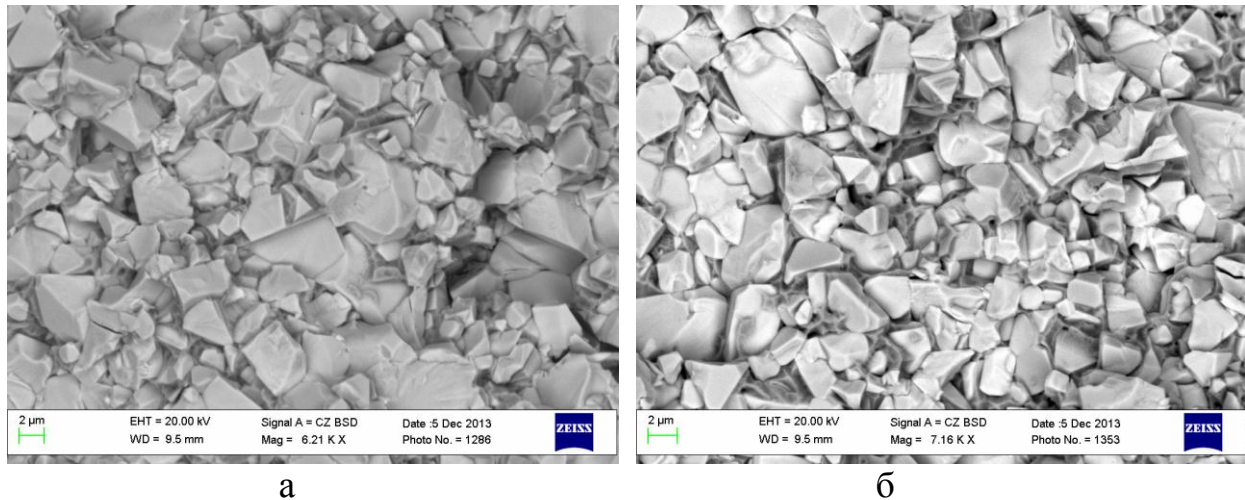
Режим обработки	Вольфрам, %
Исходный образец в спечённом виде (без термической обработки)	10,89
Закалка в промышленном масле И-20 А	13,60
Закалка в 4 % полимере Термовит М	20,18

Фрактографическими исследованиями в поверхности излома сплава выявлено после закалки большее количество частиц монокарбида вольфрама с меньшими размерами на 2 мкм по сравнению с исходным состоянием (рисунок б).

Таким образом, структура твёрдого сплава ВК10КС после закалки в водополимерных средах способствует сохранению более высокой концентрации вольфрама и углерода в связующей фазе. Что способствует её стабилизации. По мнению М.Г. Лошака, А.Ф. Лисовского изменяется и напряжённое состояние кобальтовой связующей и карбидной фазы. При медленном охлаждении после нагрева возрастают термические напряжения в кобальтовой фазе, а в случае быстрого охлаждения, как при закалке твёрдого сплава в полимерах, наоборот,



уменьшается за счёт образования более легированного вольфрамом твёрдого раствора и уменьшения в связи с этим разницы в коэффициентах термического расширения карбидной и кобальтовой фазы.



а – исходный образец; б – после закалки в полимере Термовит М  
Рисунок 6 – Поверхность изломов твёрдого сплава ВК10КС

Механические свойства образцов до и после закалки (на примере закалки в 4 % полимере Термовит М) представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Свойства сплава ВК10КС после закалки

Режим обработки	Твёрдость, HRA	$\sigma_{изг.}$ , Н/мм <sup>2</sup>	Глубина трека износа, мкм	Площадь трека износа, мкм <sup>2</sup>
Спечённое состояние	87,0	2730	58,0	12921
Закалка в 4 % водополимерном растворе Термовит М	87,3	2980	47,4	8494

Меньший износ и повышение предела прочности на изгиб закалённого сплава ВК10КС связан с уменьшением зёрен монокарбида вольфрама, увеличением степени легирования кобальтовой связующей. Небольшая стоимость и доступность водных растворов полимеров позволяет использовать их вместо индустриального масла И-20А для закалки твёрдого сплава ВК10КС при изготовлении штампового инструмента, работающего с ударными нагрузками средней интенсивности, а также породоразрушающих элементов бурового инструмента.

Однако, небольшого увеличения износостойкости после закалки не достаточно для твердосплавного инструмента, применяемого в механообрабатывающем производстве. Эффективным путём решения этой задачи является использование износостойких покрытий на твёрдых сплавах.

**В четвёртом разделе «Исследование структуры и свойств износостойких покрытий на карбидовольфрамовых твёрдых сплавах»** представлены особенности строения и свойств упрочнённых поверхностных слоёв, получен-

ных на карбидовольфрамовых твёрдых сплавах способом ионно-плазменного напыления и электроэрозионного упрочнения легированием.

В работе ионно-плазменное покрытие состава TiN+ZrN наносили в вакуумной камере установки «Квант-6», которую откачивали до давления  $6,0 \cdot 10^{-3}$  Па, применяя отдельные катоды из титана и циркония при соотношении этих элементов 50 % Ti + 50 % Zr при использовании азота в качестве реакционного газа. Ионное осаждение осуществлялось при энергии ионных потоков 100 эВ, отрицательном напряжении 160В и токе фокусирующей катушки  $0,3 \div 0,4$  А. Два катода из титанового сплава расположены в камере установки друг против друга, а катод из циркониевого сплава – между ними.

Наличие двух фаз TiN и ZrN в покрытии, обнаруженных на дифрактограммах, свидетельствует о микрослоистости его структуры (рисунок 7). Установлено, что введение в состав покрытия TiN циркония приводит к увеличению нанотвёрдости на  $22 \div 23$  % до значений 38500 МПа, модуля Юнга на 67 %.

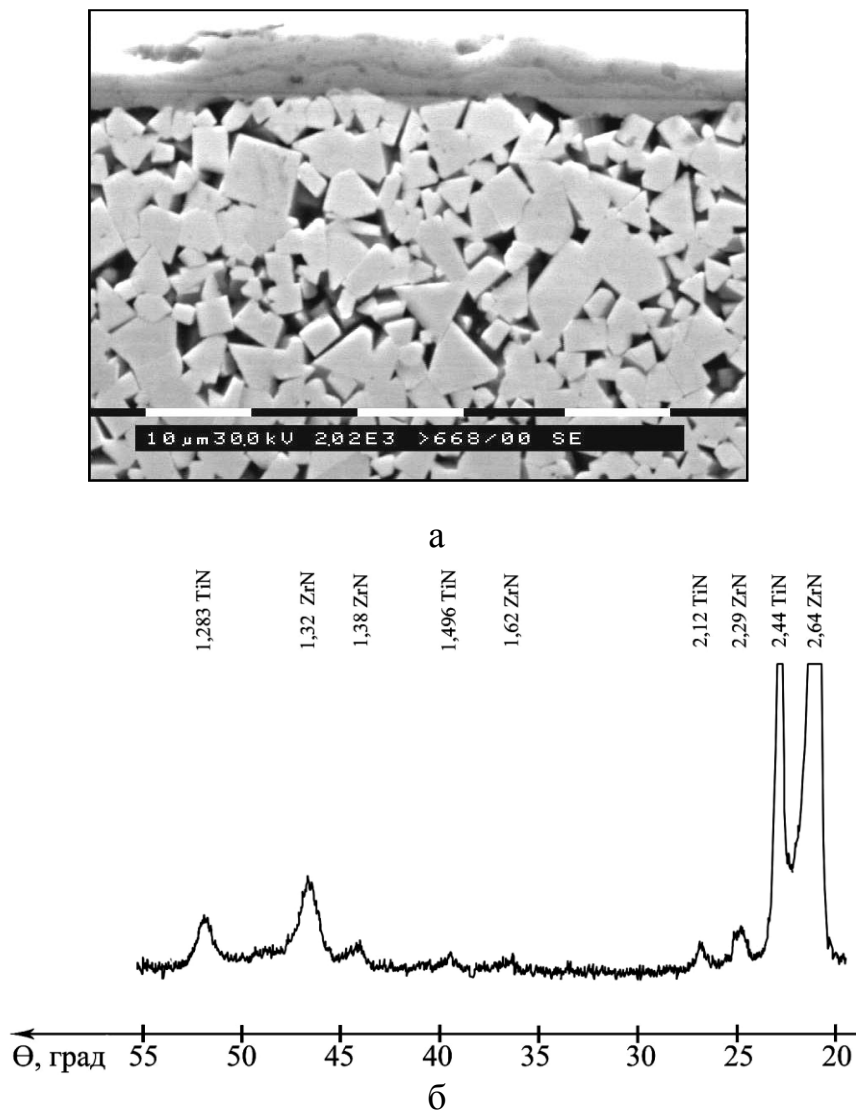


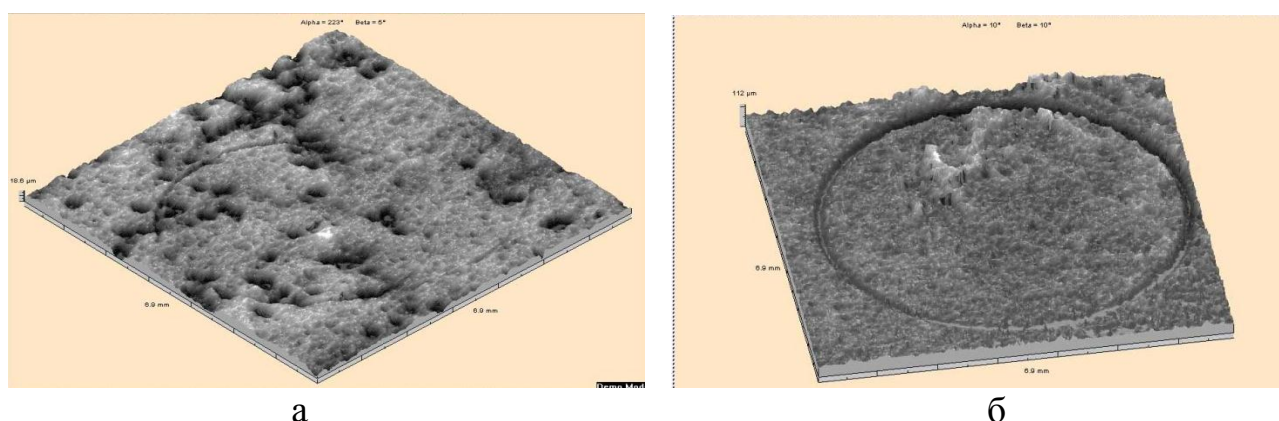
Рисунок 7 – Микроструктура (а) и фрагмент дифрактограммы (б) сплава ВК10КС с ионно-плазменным TiN+ ZrN покрытием

Износ образцов определялся путем измерения глубины и площади трека

после испытаний, образованного в результате действия неподвижного алмазного индентора на вращающийся образец при нагрузке 3 Н, числе оборотов 12000, линейной скорости движения 2,5 см/с (рисунок 8). Для сравнения аналогичные испытания проводились на исходных образцах при таких же параметрах, но количестве оборотов 4000.

Трибологические испытания образцов с ионно-плазменным покрытием показали, что площадь трека износа с покрытием на сплавах составляет  $4,2 \text{ мкм}^2$ , на сплаве без покрытия –  $12921 \text{ мкм}^2$ , максимальная глубина трека у сплавов с покрытием составляет 97 нм, а у исходного образца – 58 мкм. Коэффициенты трения ( $\mu$ ) сплавов с покрытиями равны  $\mu=0,07$  при  $\mu=0,41$  у исходного. Высокая износостойкость ионно-плазменного TiN+ZrN покрытия на твёрдом сплаве ВК10КС хорошо согласуется с атомно-энергетической концепцией В.Ф. Моисеева.

Покрытие будет полностью выполнять свои функции, когда будет существовать высокая прочность сцепления его с материалом основы. Адгезионные характеристики ионно-плазменного TiN+ZrN покрытия на твёрдых сплавах ВК10КС и ВК8 производились по методике «царапания» алмазным индентором, на который действует линейно-возрастающая сила нагружения. Характеристикой адгезионной прочности является нагрузка в момент начала отслаивания покрытия, которая определяется точно при помощи акустического датчика, датчика глубины проникновения индентора и изображений встроенного оптического микроскопа. При значении 56,6 Н выявлен одновременный внезапный скачок сигналов акустической эмиссии и силы трения. Данное значение является критическим, поскольку соответствуют моменту начала отслоения покрытия. Высокая адгезия ионно-плазменного TiN+ZrN покрытия с твёрдосплавной основой объясняется наличием в покрытиях, полученных из отдельных катодов, микрослоистости. Граница между микрослоями покрытия тормозит рост трещины, образовавшейся при внедрении в него индентора, что способствует снижению отслоения покрытия и, следовательно, повышает его трещиностойкость.



а – сплав ВК10КС с ионно-плазменными TiN+ ZrN покрытием; б – исходный сплав

Рисунок 8 – Внешний вид треков при трибологических испытаниях

Ионно-плазменное напыление является финишной операцией, и ни в каких действиях по доводке покрытие не нуждается. Известно, что инструмент с боль-

шей шероховатостью эксплуатируется меньший срок, поэтому при конструировании детали задаётся допустимая микрогеометрия её поверхности, обеспечивающая длительную её работоспособность. Допустимая чистота обработки поверхности твёрдого сплава ВК10КС  $R_a = 2,5$  мкм. Профилометрические исследования показали, что ионно-плазменное покрытие улучшает качество поверхности образцов. Шероховатость поверхности исходного образца составляет  $R_a = 1,32$  мкм. После нанесения ионно-плазменного TiN+ZrN покрытия на твёрдый сплав ВК10КС и ВК8 шероховатость поверхности образца составляет 0,97 мкм.

Вырубные штампы, работающие с ударными нагрузками средней интенсивности, а также буровой инструмент при ударно-поворотном бурении породы изготавливают из карбидовольфрамовых твёрдых сплавов группы КС (сплав ВК10КС). Применение более износостойкой твёрдосплавной вставки с меньшим содержанием кобальтовой связующей нецелесообразно, поскольку она не будет способна противостоять ударным нагрузкам и произойдёт преждевременное её разрушение. В этой связи возникла необходимость упрочнить поверхностный слой твёрдого сплава ВК10КС с целью повышения износостойкости при сохранении вязкой сердцевины за счёт большого содержания кобальтовой связующей в сплаве.

В рамках настоящей работы способом ЭЭУЛ получена твёрдосплавная пластина с градиентной структурой, состоящая из более износостойкого слоя ВК6-ОМ и прочной, но недостаточно износостойкой основы ВК10КС. Поверхностная обработка сплава ВК10КС способом ЭЭУЛ осуществлялась с помощью переносной установки UR – 121. В качестве электрода применялся твёрдый сплав ВК6-ОМ. Обработка поверхности твёрдого сплава ВК10КС производилась с применением двух технологических режимов установки: 1) режим 1: из расчёта 1,0 мин. /1 см<sup>2</sup> обрабатываемой поверхности по режиму «Turbo»; 2) режим 2: из расчёта 0,55 мин. /1 см<sup>2</sup> по режиму «Norma 3» + 1,0 мин. /1 см<sup>2</sup> по режиму «Turbo». При выполнении второго режима между слоями рекомендуется нанести графитовый слой для устранения обезуглероживания, поскольку без использования графита рентгенофазовым анализом фиксируется недопустимая ГОСТ 9391-85  $\eta_I$ -фаза. Металлографически в обоих случаях обнаружены плохо травящиеся слои, толщина которых зависит от времени обработки и достигает значений 5÷25 мкм (рисунок 9).

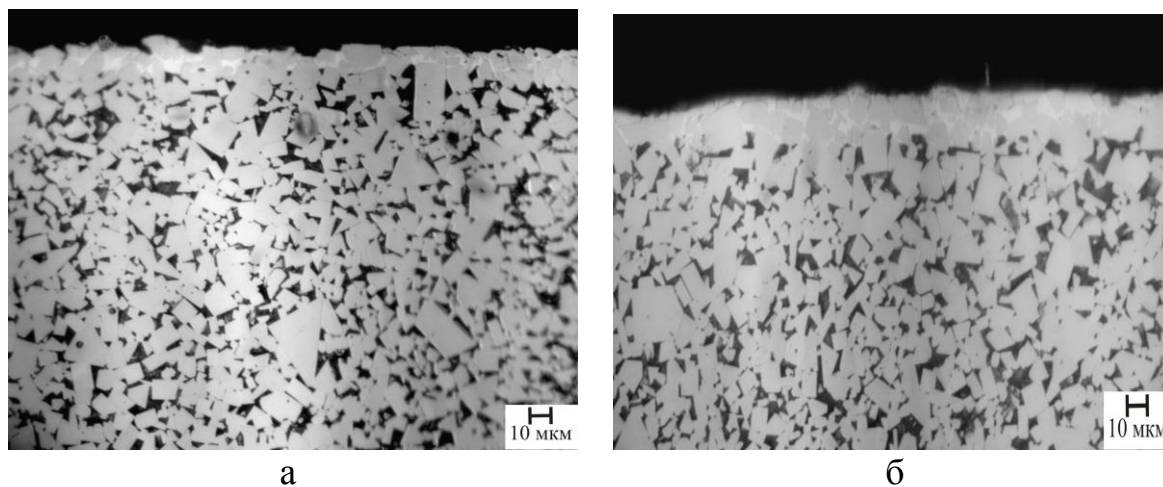
Результаты растровой электронной микроскопии подтверждают наличие градиентной структуры на сплаве ВК10КС: повышенное содержание вольфрама в поверхностном слое и пониженное – кобальта (рисунок 10).

Рентгенофазовый анализ показал, что обработка поверхности твёрдого сплава ЭЭУЛ приводит к формированию в поверхностном слое карбида дивольфрама  $W_2C$ . Известно, что образование фазы  $W_2C$  повышает твёрдость вставок из твёрдого сплава на основе WC. Результатом наноиндентирования сплава ВК10КС после ЭЭУЛ является повышение поверхностной твёрдости до 22000 МПа (рисунок 11).

Испытания на износ проводились по режимам, описанным выше, при числе оборотов, равным 4000. Износ образцов с покрытием ВК6-ОМ после ЭЭУЛ показал, что глубина трека износа составляет 10,8 мкм при исходной 58 мкм.

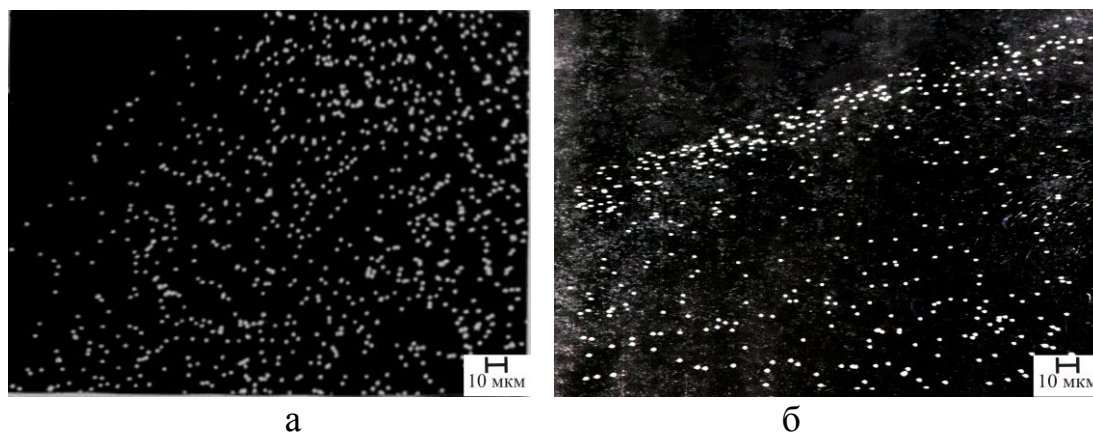


Площадь сечения трека изношенных образцов с покрытием и без него составляет  $941 \text{ мкм}^2$  и  $12921 \text{ мкм}^2$  соответственно. Коэффициент трения ( $\mu$ ) сплава ВК10КС с покрытием из ВК6-ОМ, полученного способом ЭЭУЛ, после приработки устанавливается на значении  $\mu = 0,23$ .



а – режим 1; б – режим 2

Рисунок 9 – Микроструктура сплава ВК10КС после ЭЭУЛ с покрытием ВК6-ОМ



а – кобальт; б – вольфрама

Рисунок 10 – Микроструктура сплава ВК10КС после ЭЭУЛ по режиму 2 в характеристических рентгеновских излучениях

Получены новые данные, на основе которых для практического применения построены номограммы для определения основных параметров режимов поверхностной обработки карбидовольфрамовых твёрдых сплавов способом ЭЭУЛ, обеспечивающих формирование регламентированных характеристик и свойств (толщина, твердость, шероховатость) поверхностного слоя, удовлетворяющих техническим условиям.

**В пятом разделе «Исследование структуры и свойств упрочнённой поверхности карбидовольфрамового твёрдого сплава после однокомпонентного электровзрывного легирования»** представлены результаты упрочнения поверхности твёрдого сплава ВК10КС способом однокомпонентного ЭВЛ, который ранее не применялся для твёрдых сплавов.

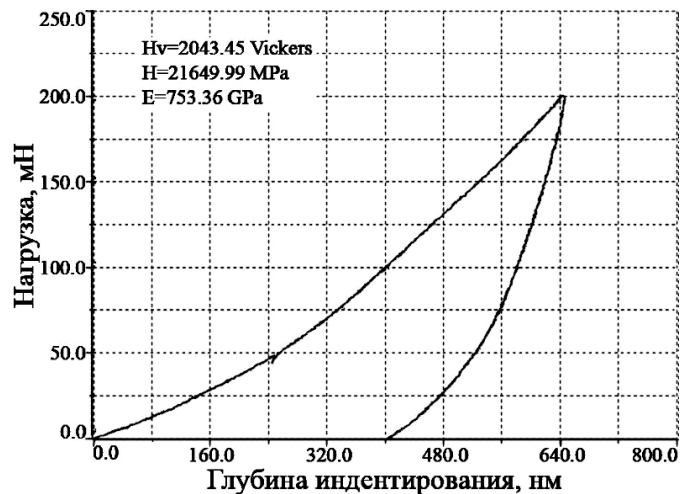


Рисунок 11 – Кривые нагрузки – разгрузки наноиндентирования на сплаве ВК10КС с упрочнённым слоем ВК6-ОМ

Исследования микроструктур сплавов после однокомпонентного ЭВЛ (рисунок 12) показали, что при обработке твёрдого сплава ВК10КС указанным способом по разным энергетическим режимам и взрываемым проводникам не образуются микротрещины на границе зоны легирования с основным сплавом.

При электровзрыве углерода в низкоэнергетическом режиме видимых изменений структуры твёрдого сплава не выявлено, о чём свидетельствуют данные рентгенофазового анализа.

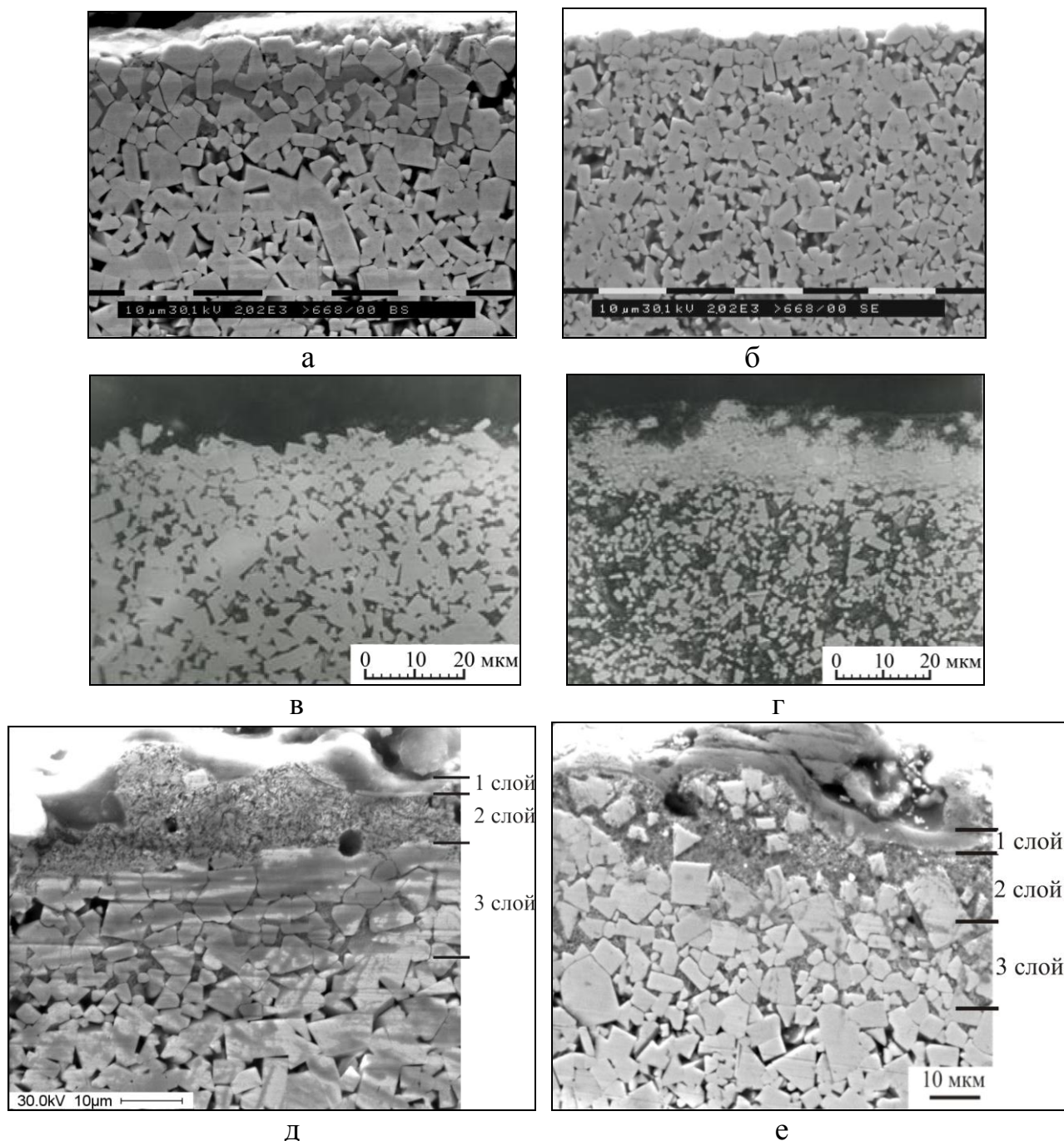
При высокоэнергетическом воздействии происходит оплавление поверхности твёрдого сплава на глубину 15 мкм, дальнейшая кристаллизация в неравновесных условиях с образованием в основном карбида дивольфрама  $W_2C$  размером  $1\div 3$  мкм, а также небольшого количество неустойчивого карбида  $W_{1-x}C$ .

Механизм формирования упрочнённых поверхностных слоёв после обработки электровзрывом углерода в низко- и высокоэнергетическом режиме, исходя из диаграммы состояния системы W–C, следующий: обработка в низкоэнергетическом режиме с использованием углерода приводила к оплавлению очень тонкого поверхностного слоя и легированию его углеродом. При этом конвективное перемешивание образующегося на поверхности расплава было минимальным. В этом случае фазовый состав определялся фазами  $\alpha-WC + C$ . Обработка в высокоэнергетическом режиме приводила к интенсивному перемешиванию образующегося на поверхности расплава и, как следствие этого, нарушению стехиометрического соотношения между вольфрамом и углеродом в сторону меньшего содержания углерода, поэтому фазовый состав определялся фазами  $WC + W_2C$ .

Исследование микроструктуры после обработки электровзрывом алюминия в низко- и высокоэнергетическом режиме показали, что при обработке твёрдосплавных пластин образуется изменённый поверхностный слой толщиной  $20\div 25$  мкм с уменьшенными размерами вновь образующихся фаз до  $1\div 1,5$  мкм (особенно в высокоэнергетическом режиме), плавно переходящий в основу.

Рентгенофазовый анализ показал, что обработка поверхности твёрдого сплава по низкоэнергетическому режиму приводит к качественному изменению

её фазового состава: наряду с имеющимся монокарбидом вольфрама  $WC$ , образуется карбид дивольфрама  $W_2C$  и небольшое количество оксида  $\alpha-Al_2O_3$ . С увеличением поглощаемой плотности мощности (высокоэнергетический режим) на поверхности обработанного сплава формируется в основном карбид дивольфрама  $W_2C$  и  $\alpha-Al_2O_3$ .



а, б – углерод; в, г – алюминий; д, е – титан; а, в, д – низкоэнергетический режим;  
б, г, е – высокоэнергетическом режиме

Рисунок 12 – Микроструктуры сплава ВК10КС после обработки электровзрывом разных проводников

Механизм формирования поверхностных слоёв после обработки электровзрывом алюминия в низко- и высокоэнергетическом режиме объясняется, исхо-

дя из следующего: при низкоэнергетическом воздействии на поверхность твёрдого сплава BK10КС, когда оплавление было очень незначительным, на облучаемой поверхности формировалось покрытие, образованное конденсированными частицами продуктов взрыва. Обладая большим сродством с кислородом, алюминий соединялся с алюминием, образуя оксид алюминия  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$  в виде мелкодисперсных частиц. Эти частицы располагаются в верхней части упрочнённого слоя твёрдого сплава, поскольку плотность оксида алюминия меньше плотности монокарбида вольфрама  $\alpha\text{-WC}$  и карбида дивольфрама  $\text{W}_2\text{C}$ . Ниже располагался слой, состоящий из карбида дивольфрама  $\text{W}_2\text{C}$  и монокарбида вольфрама, частицы которых в процессе кристаллизации после обработки уменьшались в размерах. Исходя из диаграммы состояния системы W–C, при низкоэнергетической обработке концентрация углерода становилась меньше 50 ат. % из-за нарушения стехиометрического соотношения при низко развитом конвективном перемешивании, поэтому фазовый состав определялся  $\text{WC} + \text{W}_2\text{C}$ . Обработка в высокоэнергетическом режиме приводила к интенсивному перемешиванию образующегося на поверхности расплава, ещё большему нарушению стехиометрического соотношения между вольфрамом и углеродом и, как следствие этого, образованию большего количества карбида дивольфрама.

Исследование поперечных шлифов после ЭВЛ титаном показало, что обработка поверхности твёрдого сплава в низкоэнергетическом режиме приводит к локальному образованию плохо травящегося слоя 1 толщиной 1 мкм, за которым располагается слой 2 толщиной 10÷15 мкм с мелкодисперсной структурой. Под этим слоем располагается слой 3 с изменённой кобальтовой связующей. Изменения кобальтовой фазы связаны с её дополнительным легированием. Общая глубина зоны плазменного воздействия составляет 30÷40 мкм. Рентгенофазовые исследования показали, что при низкоэнергетическом режиме обработки в зоне легирования формируются фазы  $(\text{Ti}, \text{W})\text{C}$ ,  $\text{W}_2\text{C}$  и небольшое количество WC.

При использовании высокоэнергетического режима обработки на облучаемой поверхности формируется плохо травящийся сплошной слой 1 толщиной 3 ÷ 4 мкм. Основываясь на результатах сканирующей электронной микроскопии, рентгенофазового анализа и растровой электронной микроскопии, установлено, что данный слой состоит из  $\text{TiC}$  и  $(\text{Ti}, \text{W})\text{C}$ . Под верхним слоем располагается слой 2 с мелкодисперсной структурой, состоящий из карбидов  $\text{W}_2\text{C}$  и WC. Под слоем 2 располагается слой 3, в котором изменения структуры затрагивают только кобальтовую связку.

Механизм формирования упрочнённых слоёв после ЭВЛ титаном в низко- и высокоэнергетическом режиме заключается в следующем. Поскольку плотность титана в три раза ниже плотности твёрдого сплава, при взаимодействии с поверхностью расплава капельной компоненты продуктов взрыва титана они не проникают в расплав глубоко, и вблизи поверхности формируется слой с высокой концентрацией титана. Титан является сильным карбидообразующим элементом, поэтому углерод из расплава попадает к поверхности, где и происходит образование фаз  $\text{TiC}$  и  $(\text{Ti}, \text{W})\text{C}$ . Под верхним слоем располагается слой 2 с мелкодисперсной структурой. В нём из-за недостатка углерода, вследствие нарушения стехиометрического равновесия между вольфрамом и углеродом на стадии



кристаллизации, формируется карбид дивольфрама  $W_2C$ . В этом слое наблюдаются также отдельные частицы  $WC$  с исходными размерами, которые выносятся из глубины расплава конвективными потоками, возникающими при развитии сдвиговой неустойчивости Кельвина-Гельмгольца. Под слоем 2 располагается слой 3, в котором изменения структуры затрагивают только кобальтовую связующую и проявляются в дополнительном её легировании.

Исследование кобальтовой связующей в зоне термического влияния после ЭВЛ по разным режимам показало, что кобальтовая связующая при электровзрыве всех проводников в низкоэнергетическом режиме легируется вольфрамом (20,02÷28,05 %), алюминием (0,12 % при взрыве алюминиевой фольги), титаном (0,04 % при взрыве титановой фольги), углеродом, хотя известно, что растворение углерода в кобальте оказывает слабое влияние на свойства кобальтового твёрдого раствора.

При высокоэнергетическом режиме легирование кобальтовой связующей происходит в большей степени, чем при низкоэнергетическом режиме: вольфрамом (25,6÷32,96 %), алюминием (0,14 % при взрыве алюминиевой фольги), титаном (0,2 % при взрыве титановой фольги), углеродом. Дополнительное легирование кобальтовой связующей ( $\beta$ -Co) приведёт к её стабилизации, что согласуется с результатами исследований японских учёных А. Miyashi и А. Nara.

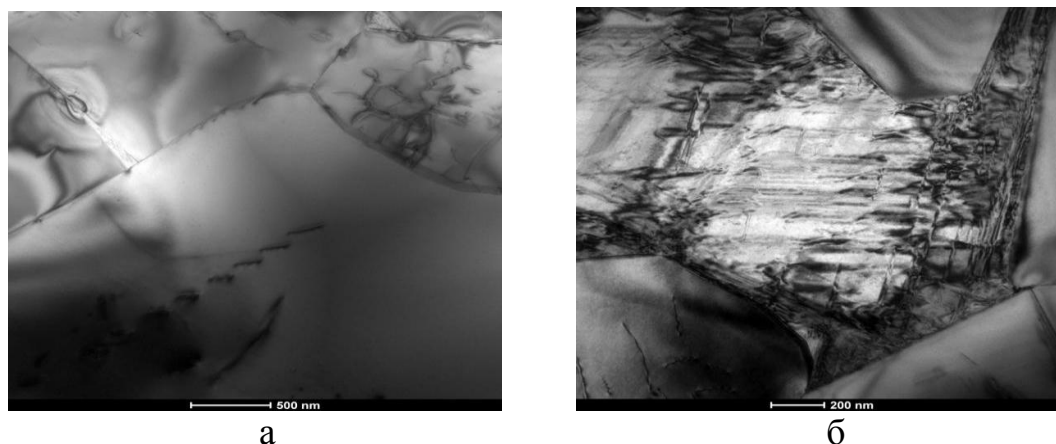
Исследование кобальтовой связующей в зоне импульсного плазменного воздействия после ЭВЛ при разных взрываемых проводниках сплава ВК10КС в низко- и высокоэнергетическом режиме, используя просвечивающую электронную микроскопию, позволяет заключить, что происходит формирование в пересыщенном твёрдом растворе кобальта мелкодисперсных карбидов вольфрама. Увеличение степени легирования кобальтовой связующей приведёт к её стабилизации, что положительно повлияет на эксплуатационную стойкость карбидовольфрамовых твёрдых сплавов в целом.

Результаты просвечивающей электронной микроскопии свидетельствуют о протекании в твёрдом сплаве ВК10КС деформационных процессов после электровзрывной обработки в низко- и высокоэнергетическом режимах: выявлены изменения, которые претерпевают как карбидная, так и кобальтовая фазы. В карбидной фазе обнаружены скопления дислокаций, плотность которых больше при обработке твёрдосплавных пластин по высокоэнергетическому режиму (рисунок 13, а). Изменения в кобальтовой связующей, помимо дополнительного её легирования продуктами взрыва при импульсной плазменной обработке и выделением мелкодисперсных частиц карбидов вольфрама из пересыщенного твёрдого раствора, связаны ещё с образованием деформационных полос скольжения (рисунок 13, б).

Свойства поверхностных слоёв твёрдого сплава ВК10КС после ЭВЛ по разным энергетическим режимам и взрываемым проводникам представлены в таблице 3.

Сопоставление результатов фазового анализа, измерений нанотвёрдости, износостойкости позволяет заключить, что обработка твёрдого сплава в высокоэнергетическом режиме, вызывающем оплавление облучаемой поверхности при всех взрываемых проводниках, является предпочтительной. Наилучший эффект

от обработки твёрдого сплава (максимальная глубина обработки до 40 мкм, поверхностная твёрдость 25000 МПа) достигается при его обработке продуктами электровзрыва титана, используя высокоэнергетический режим.



а – поверхностный слой; б – кобальтовая связующая на расстоянии 20 мкм от поверхности

Рисунок 13 – Структура сплава ВК10КС после ЭВЛ титаном в высокоэнергетическом режиме

Таблица 3 – Свойства поверхностного слоя твёрдого сплава ВК10КС после ЭВЛ по разным энергетическим режимам взрываемых проводников

Взрываемый проводник	Свойства сплава ВК10КС после ЭВЛ				
	Шероховатость Ra, мкм	Нанотвёрдость поверхности, МПа	Глубина трека износа, мкм	Площадь сечения трека износа, мкм <sup>2</sup>	Коэффициент трения, $\mu$
Углерод (низкоэнергетический режим)	1,36	17000	16,9	2143	–
Углерод (высокоэнергетический режим)	0,87	20000	11,7	1495	0,24
Алюминий (низкоэнергетический режим)	1,34	17500	11,0	1308	–
Алюминий (высокоэнергетический режим)	1,73	23500	9,02	948	0,22
Титан (низкоэнергетический режим)	1,54	20750	10,8	1449	–
Титан (высокоэнергетический режим)	1,98	25000	5,40	243	0,14
Исходное (спечённое) состояние	1,32	11000	58,0	12921	0,41

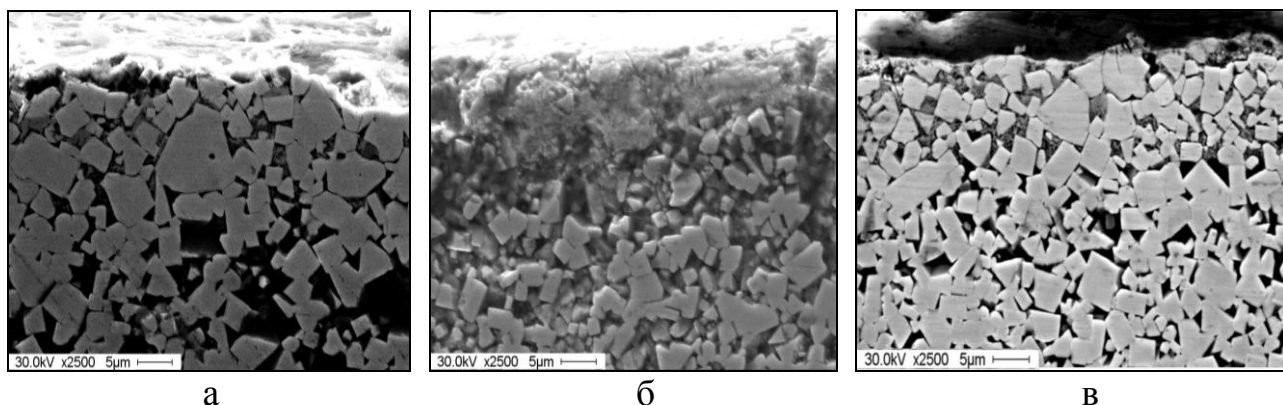
Очевидно, что незначительный износ упрочнённых образцов связан с образованием на поверхности твёрдого сплава ВК10КС карбида титана TiC с высокой твёрдостью. Поскольку карбид титана является основной составляющей

твёрдых сплавов группы ТК, предназначенных для механической обработки металлов при высоких скоростях резания, получение упрочнённого поверхностного слоя из карбида титана с высокими показателями твёрдости и износостойкости на карбидовольфрамовом твёрдом сплаве, является важным, т.к. поверхностные слои сплавов группы ВК приобретают свойства твёрдых сплавов группы ТК. Следовательно, создаётся возможность увеличения скорости резания при механической обработке.

В шестом разделе «Исследование структуры и свойств упрочнённой поверхности твёрдого сплава ВК10КС после многокомпонентного электровзрывного легирования» представлены результаты дополнительного упрочнения поверхностного слоя твёрдого сплава ВК10КС способом ЭВЛ путём совместного взрыва вышеперечисленных проводников и порошков бора (фракцией 5 мкм), карбида кремния (фракцией 3 мкм) в количестве 60 мг на каждые  $15 \text{ см}^2$  обрабатываемой поверхности.

В связи с тем, что ранее описанные процессы показали максимальное упрочнение поверхности твёрдого сплава при электровзрыве углерода, алюминия и титана, выполненные в высокоэнергетическом режиме, многокомпонентная электровзрывная обработка была проведена в данном режиме, обеспечивающем оплавление поверхности и интенсивное конвективное перемешивание расплава.

Сканирующая электронная микроскопия поперечных шлифов показала, что при всех взрываемых проводниках с карбидом кремния фракцией 3 мкм образуется упрочнённый поверхностный слой толщиной до  $10 \div 30$  мкм (рисунок 14), плавно переходящий в основной материал.



а – углерод; б – алюминий; в – титан

Рисунок 14 – Микроструктура сплава ВК10КС после ЭВЛ SiC с использованием разных проводников

Наличие данного слоя при ЭВЛ углеродом совместно с карбидом кремния можно связать, по данным рентгенофазового анализа, с кристаллизацией на поверхности твёрдого сплава  $\alpha$ -SiC. В результате кристаллизации углерод, находящийся в расплаве, соединяясь с атомами кремния, образует  $\alpha$ -SiC. Из-за недостатка углерода формируются карбиды дивольфрама  $W_2C$  размером  $2 \div 3$  мкм, фиксируется также WC.

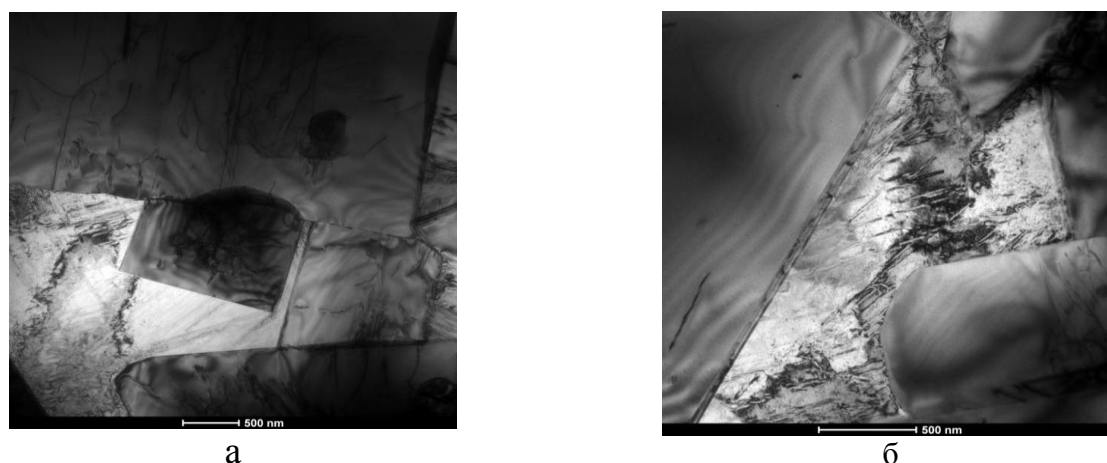
При обработке твёрдого сплава электровзрывом алюминия с частицами SiC выявлено, что поверхностный слой имеет мелкодисперсную структуру. Рентгенофазовым анализом установлено на поверхности твёрдого сплава существование следующих фаз:  $\alpha$ -SiC и промежуточный политип SiC (6H) с гексагональной решёткой, интерметаллид  $W(Si, Al)_2$ , мелкодисперсные частицы  $W_2C$  и WC.

Сканирующей электронной микроскопией твёрдосплавных пластин после обработки электровзрывом титана с порошком SiC выявлен тонкий около 1 мкм плохо травящийся слой, связанный, по данным рентгенофазового анализа, с формированием TiC. Ниже этого слоя выявлена упрочнённая зона, в которой идентифицируется дисилицид вольфрама  $WSi_2$  и карбиды  $W_2C$  и WC, переходящие в зону исходной структуры.

По данным растровой электронной микроскопии во всех трёх случаях после обработки выявлено изменение химического состава кобальтовой связующей в поверхностном слое. Данная фаза представляет собой пересыщенный твёрдый раствор, дополнительно легированный вольфрамом (до 36 %), углеродом, алюминием (до 0,23 % при электровзрыве алюминия), титаном (до 0,12 % при электровзрыве титана) и кремнием (до 1,07 %). Легирование кремнием кобальтовой фазы, по мнению А.Ф. Лисовского, способствует упрочнению межфазных границ в твёрдом сплаве и тормозит рост усталостных трещин при эксплуатации.

Помимо дополнительного легирования кобальтовой связующей элементами взрывааемых материалов в высокоэнергетическом режиме и основы, выделением мелкодисперсных частиц карбидов вольфрама из пересыщенного кобальтового твёрдого раствора, с помощью электронной микроскопии в твёрдом сплаве на расстоянии 10 мкм от поверхности выявлены деформационные линии и дислокации (рисунок 15).

Свойства поверхностного слоя сплава BK10KC после ЭВЛ карбидом кремния при разных взрывааемых проводниках представлены в таблице 4.



а – углерод; б – титан

Рисунок 15 – Структура сплава BK10KC после электровзрывной обработки карбидом кремния с использованием разных проводников на расстоянии 10 мкм от поверхности

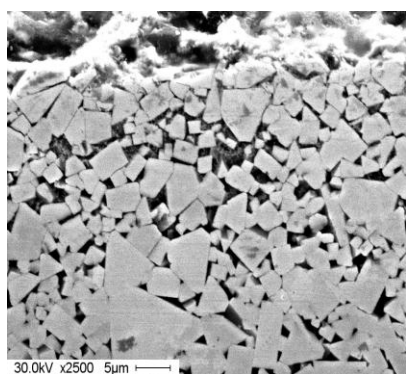
Таким образом, многокомпонентное легирование поверхности твёрдого сплава ВК10КС ЭВЛ углеродом, алюминием, титаном с порошком карбида кремния увеличивает ее нанотвёрдость до  $24000 \div 26000$  МПа при глубине упрочнения до 30 мкм. Данная обработка приводит к формированию в поверхностных слоях высокотвёрдых фаз  $TiC$ ,  $(Ti, W)C$ ,  $W_2C$ ,  $\alpha-SiC$ , интерметаллидов  $WSi_2$ ,  $W(SiAl)_2$ . Обработанный твёрдый сплав обладает повышенной износостойкостью по сравнению с исходным состоянием, коэффициенты трения снижаются в  $2,0 \div 2,2$  раза. Наилучший эффект упрочнения поверхностного слоя и снижения коэффициента трения достигнуто при ЭВЛ титаном совместно с карбидом кремния.

Таблица 4 – Свойства поверхностного слоя сплава ВК10КС после ЭВЛ  $SiC$  при разных взрывааемых проводниках

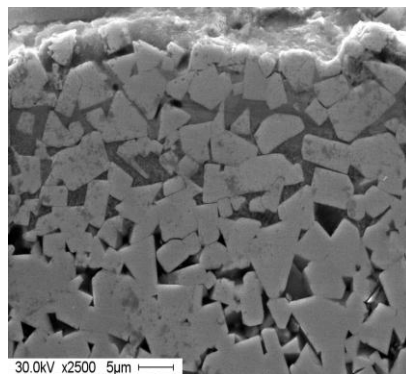
Взрываемые материалы	Шероховатость $Ra$ , мкм	Нанотвёрдость, МПа	Глубина изношенного трека, мкм	Площадь трека износа, $мкм^2$	Коэффициент трения, $\mu$
Углерод + $SiC$	2,45	24000	5,89	596	0,202
Алюминий + $SiC$	2,42	24500	5,73	537	0,200
Титан + $SiC$	2,16	26000	4,11	373	0,185

Электровзрыв вышеперечисленных проводников совместно с порошком аморфного бора (размеры частиц бора 5 мкм) приводит к формированию на поверхности твердого сплава ВК10КС плохо травящихся упрочнённых слоёв толщиной  $1 \div 2$  мкм. По данным рентгенофазового анализа при взрыве титана с бором этот слой состоит из диборида титана  $TiB_2$ , карбидов  $TiC$ ,  $W_2C$ . При электровзрыве алюминиевой фольги с бором данный слой состоит из оксида  $\alpha-Al_2O_3$ ,  $W_2C$  и борсодержащей фазы  $(Co_{1,25}W_{1,33})B_2$ . При обработке электровзрывом углерода с бором плохо травящийся слой состоит из  $W_2B_5$ ,  $B_4C$  и  $W_2C$ . Вновь образующиеся фазы характеризуются высокой твёрдостью.

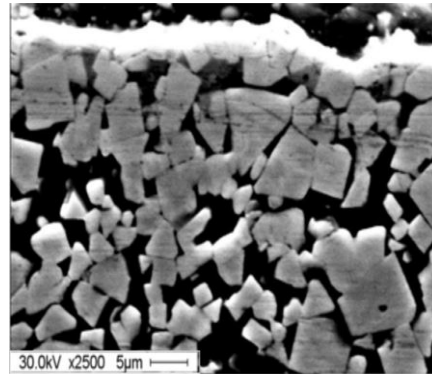
Ниже данных слоёв располагаются зоны толщиной  $10 \div 15$  мкм с измельчёнными карбидами вольфрама и плавно переходящие в основной материал без формирования резкой границы между упрочнённой зоной и сплавом ВК10КС (рисунок 16).



а



б



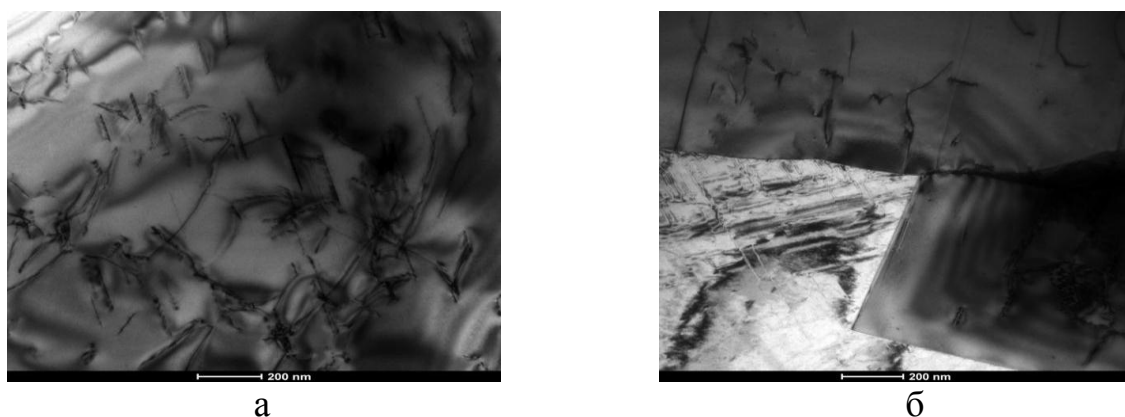
в

а – углерод; б – алюминий; в – титан

Рисунок 16 – Микроструктура сплава ВК10КС после ЭВЛ бором с использованием разных проводников

Во всех трёх случаях наблюдаются изменения химического состава кобальтовой связующей на глубине до 15 мкм, подтверждённые растровой электронной микроскопией. Кобальтовая связующая дополнительно легируется углеродом, вольфрамом (26,2÷32,7 %), алюминием (1,38 % при взрыве алюминиевой фольги), титаном (0,18 % при взрыве титановой фольги). Идентифицировать углерод и бор с помощью растровой электронной микроскопии не представляется возможным, хотя совершенно очевидно, что они диффундируют в кобальтовую связующую.

Просвечивающей электронной микроскопией (рисунок 17) выявлены изменения, возникающие в карбидной и кобальтовой фазах при многокомпонентном электровзрывном легировании. В карбидной фазе обнаружена дислокационная структура. Помимо дополнительного легирования кобальтовой связующей элементами взрывааемых проводников и основного материала, формируются мелкодисперсные частицы карбидов вольфрама, выявлены деформационные линии и дислокации.



а – поверхность; б - на расстоянии 10 мкм от поверхности

Рисунок 17 – Структура сплава ВК10КС после электровзрывной обработки титаном с бором

Свойства поверхностного слоя твёрдого сплава ВК10КС после ЭВЛ бором при разных взрывааемых проводниках представлены в таблице 5, из которой видно, что обработка твёрдого сплава ВК10КС ЭВЛ углеродом, алюминием и титаном в высокоэнергетическом режиме с бором приводит к формированию упрочнённого слоя с шероховатостью в пределах технических требований. Обработка приводит к формированию упрочнённых поверхностных слоёв с нанотвёрдостью 25000 ÷ 27500 МПа. Максимальная нанотвёрдость при ЭВЛ достигается при взрыве титана с бором из-за формирования диборида титана  $TiB_2$ . С увеличением поверхностной твёрдости возрастает износостойкость и уменьшается коэффициент трения  $\mu$  до значений 0,1 ÷ 0,14 по сравнению с исходным  $\mu = 0,41$ .

Таблица 5 – Свойства поверхностного слоя сплава ВК10КС после ЭВЛ бором при разных взрываемых проводниках

Взрываемые материалы	Шероховатость Ra, мкм	Нанотвёрдость, МПа	Глубина изношенного трека, мкм	Площадь трека износа, мкм <sup>2</sup>	Коэффициент трения, $\mu$
Углерод + бор	0,98	25000	3,72	196	0,10
Алюминий + бор	1,80	24500	4,21	208	0,14
Титан + бор	2,00	27500	2,42	155	0,10

В седьмом разделе «Промышленное внедрение упрочняющих технологий для карбидовольфрамовых твёрдых сплавов» представлены результаты апробации и внедрения упрочняющих технологий карбидовольфрамовых твёрдых сплавов для штампового, металлорежущего, бурового и горно-режущего инструмента.

Внедрение научных результатов диссертационного исследования осуществлено на:

- ООО «Технокомплекс-НК» (г. Новокузнецк) для вырубных штампов и металлорежущего инструмента;
- ФГУП «НПЦ газотурбостроения «Салют» – филиал «Омское моторостроительное объединение им. П.И. Баранова» для металлорежущего инструмента, обрабатывающего титановые сплавы;
- ООО «Механообработка» (г. Прокопьевск) для металлорежущего инструмента, обрабатывающего нержавеющие стали.
- ЗАО УК «Казанковская» (г. Новокузнецк) для горно-режущего инструмента.

Совокупный экономический эффект от ожидаемых и реализованных мероприятий составляет 4 млн. 900 тыс. рублей и 3 млн. 475 тыс. рублей в год соответственно.

Результаты теоретических и экспериментальных исследований внедрены в учебный процесс в ФГБОУ ВО «Сибирский государственный индустриальный университет» и используются при подготовке аспирантов по направлению подготовки 22.06.01 – Технологии материалов.

## Заключение

Диссертация является научно-квалификационной работой, в которой решена актуальная научно-техническая проблема – повышение износостойкости карбидовольфрамовых твёрдых сплавов, имеющая важное значение для развития машиностроения, горнодобывающей и деревообрабатывающей промышленности России.

Решение задач, поставленных в работе, позволили сделать следующие выводы:

1. На основе теоретического анализа физико-химических свойств, процессов, способов и технологий термической обработки твердых сплавов дока-

заны и научно обоснованы эффективность и перспективность применения для повышения износостойкости карбидовольфрамовых твердых сплавов для бурового, горнорезающего, штампового и металлорежущего инструментов технологий объемной закалки, поверхностного упрочнения путем воздействия на поверхность концентрированных потоков энергии (нанесения ионно-плазменных покрытий, электроэрозионного упрочнения легированием, модифицирования поверхности электровзрывным легированием).

2. Установлены закономерности и особенности влияния закалки твердого сплава ВК10КС в полимерных средах: 10 % растворе ПК-М (при температурах  $+20 \dots +40$  °C), 8 % растворе Бреккс Термо А и  $4 \div 4,5$  % растворе Термовит М (в интервале температур  $+20 \dots +60$  °C) на его структуру и свойства. Научно обосновано, что закалка твердого сплава в водополимерных средах способствует улучшению его структуры за счет уменьшения величины зерен монокарбида вольфрама  $WC$  и скругления их границ (особенно в острых двугранных углах), дополнительного растворения вольфрама и углерода в кобальтовой связующей. Данные структурные изменения приводят к увеличению предела прочности твердого сплава при изгибе на 10 %, уменьшению площади износа при трибологических испытаниях на 35 % по сравнению со спеченным состоянием.

3. Научно обоснованы закономерности структурообразования сверхтвердых ионно-плазменных  $TiN + ZrN$  покрытий, нанесенных из отдельных катодов титана и циркония на карбидовольфрамовые твердые сплавы ВК10КС и ВК8 при содержании циркония и титана в покрытии по 50 %. Наличие двух фаз  $TiN$  и  $ZrN$  в покрытии свидетельствует о микрослоистости его структуры, которая, несмотря на высокую нанотвердость данных покрытий (38500 МПа) и хорошую адгезионную прочность с твердосплавной основой, сдерживает в нем процессы трещинообразования и отслоения от основы. Установлено, что введение в состав покрытия  $TiN$  циркония приводит к увеличению нанотвердости на  $22 \div 23$  %, модуля Юнга на 67 %, коэффициент трения ионно-плазменного  $TiN + ZrN$  покрытия уменьшается по сравнению с исходным спеченным состоянием твердого сплава в 5,9 раз.

4. Раскрыт механизм формирования структуры и фазового состава поверхностного слоя (ВК6-ОМ), полученного способом ЭЭУЛ в твердосплавных пластинах, состоящих из основы ВК10КС. Установлено, что при обработке в поверхностном слое происходит образование мелкодисперсного карбида ди-вольфрама  $W_2C$ , способствующего снижению коэффициента трения по сравнению со спеченным состоянием в 1,8 раз.

5. Получены новые данные, на основе которых для практического применения построены номограммы для определения основных параметров режимов поверхностной обработки карбидовольфрамовых твердых сплавов способом ЭЭУЛ, обеспечивающих формирование регламентированных характеристик и свойств (толщина, твердость, шероховатость) поверхностного слоя, удовлетворяющих техническим условиям.

6. Выявлены и обоснованы характерные особенности процессов структурообразования, протекающих в поверхностных слоях твердых сплавов в неравновесных условиях при однокомпонентном электровзрывном легировании уг-



леродом, алюминием, титаном, в низко- (поглощаемая плотность мощности  $2,9 \text{ ГВт/м}^2$ ) и высокоэнергетическом (поглощаемая плотность мощности  $6,0 \text{ ГВт/м}^2$ ) режимах. Установлено, что обработка твёрдого сплава в высокоэнергетическом режиме, вызывающем оплавление облучаемой поверхности при всех взрываемых проводниках, является предпочтительной, поскольку в процессе кристаллизации формируются упрочняющие фазы меньших размеров, чем монокристалл вольфрама в исходном состоянии, что повышает поверхностную твердость и износостойкость. Наилучший эффект (максимальная глубина обработки около  $40 \text{ мкм}$ , поверхностная нанотвердость  $25000 \text{ МПа}$ ) достигается при обработке твёрдого сплава в высокоэнергетическом режиме продуктами взрыва титана. Данная обработка приводит к формированию трёхслойной зоны легирования: поверхностной, обогащенной карбидами  $\text{TiC}$ ,  $(\text{Ti}, \text{W})\text{C}$ ,  $\text{W}_2\text{C}$  с более высокой по сравнению с карбидом  $\text{WC}$  твердостью; промежуточной, состоящей в основном из мелкодисперсного карбида дивольфрама  $\text{W}_2\text{C}$  с твердостью выше твердости монокристалла вольфрама  $\text{WC}$  и третьей зоной, затрагивающей изменения только в кобальтовой связующей, связанные с дополнительным её легированием продуктами взрыва и основы.

7. Установлены особенности формирования структур композиционных слоёв твёрдого сплава ВК10КС при многокомпонентном взрывном легировании в высокоэнергетическом режиме углеродом, алюминием, титаном с карбидом кремния, бором, которые переносятся плазменной струей совместно с продуктами взрыва на облучаемую поверхность. Обработка приводит к формированию упрочнённых слоёв с толщиной  $15 \text{ мкм}$ , состоящих из высокотвёрдых карбидов  $\text{TiC}$ ,  $\text{B}_4\text{C}$ ,  $\text{W}_2\text{C}$ ,  $\text{SiC}$ , боридов  $\text{W}_2\text{B}_5$ ,  $\text{TiB}_2$ , оксида  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . Максимальная нанотвердость ( $27500 \text{ МПа}$ ) поверхностного слоя и минимальный коэффициент трения ( $\mu = 0,1$ ) достигается при ЭВЛ титаном с бором.

8. Результаты просвечивающей электронной микроскопии выявили изменения, которые претерпевают как поверхностная карбидная, так и приповерхностная кобальтовая фазы при ЭВЛ. В карбидной фазе обнаружены скопления дислокаций, плотность которых больше при обработке твёрдого сплава по высокоэнергетическому режиму. Кобальтовая связующая в зоне термического влияния при одно- и многокомпонентном ЭВЛ при всех взрываемых проводниках дополнительно легируется химическими элементами (вольфрам, углерод, алюминий, титан, кремний, бор), входящими в состав взрываемых материалов и основы. Выявлено выделение мелкодисперсных частиц карбидов вольфрама из пересыщенного твёрдого кобальтового раствора. Увеличение степени легирования кобальтовой связующей приводит к стабилизации ГЦК решётки ( $\beta\text{-Co}$ ), что положительно влияет на эксплуатационную стойкость карбидовольфрамовых твёрдых сплавов. Изменения в кобальтовой связующей связаны также с образованием деформационных полос скольжения и дислокаций.

9. Для практического использования разработаны: способ закалки твёрдого сплава (патент РФ 229426); способ закалки твёрдого сплава на основе карбида вольфрама (патент РФ 2355513); способ закалки твёрдого сплава (патент РФ 2356693); способ закалки твёрдого сплава на основе карбида вольфрама (патент РФ 2392342); способ поверхностного упрочнения вольфрамокобальтового

твёрдосплавного инструмента (патент РФ 2398046); способ поверхностной обработки вольфрамокобальтового твёрдосплавного инструмента (патент РФ 2405061); способ получения изделия из многослойного твёрдого сплава на основе карбида вольфрама (патент РФ 2401720); способ поверхностного упрочнения вольфрамокобальтового твёрдосплавного инструмента (патент РФ 2398046); способ поверхностной обработки вольфрамокобальтового твёрдосплавного инструмента (патент РФ 2405061).

10. На основе обобщения результатов теоретических и экспериментальных исследований разработаны технологии поверхностного упрочнения с применением концентрированных потоков энергии, даны рекомендации по совершенствованию технологического процесса объемной термической обработки карбидовольфрамовых твердых сплавов на основе применения водополимерных закалочных сред для бурового, горно-режущего, штампового и металлорежущего инструментов. Разработанные технологии внедрены и освоены в условиях ООО «Технокомплекс-НК» (г. Новокузнецк), ФГУП «НПЦ газотурбостроения «Салют» – филиал «Омское моторостроительное объединение им. П.И. Баранова», ООО «Механообработка» (г. Прокопьевск). Совокупный экономический эффект от ожидаемых и внедрённых мероприятий на предприятиях составляет 4,9 и 3,475 млн. рублей в год соответственно.

11. Результаты теоретических и экспериментальных исследований внедрены в учебный процесс в ФГБОУ ВО «Сибирский государственный индустриальный университет» и используются при подготовке аспирантов по направлению подготовки 22.06.01 – Технологии материалов.

**Перспективы дальнейшей разработки темы.** При выполнении настоящей работы изучено структурообразование модифицированных поверхностных слоёв карбидовольфрамовых твёрдых сплавов, образованных под действием концентрированных потоков энергии, повышающих поверхностную твёрдость и износостойкость. Представленные в работе упрочняющие обработки целесообразно использовать для улучшения структуры и свойств твёрдых WC-Co сплавов, широко используемых при производстве металлорежущего, бурового, горно-режущего, штампового инструмента. Перспективы дальнейшего развития данного направления связаны с поиском новых эффективных технических решений, ориентированных на модифицирование поверхности твёрдых сплавов группы ВК, используя импульсные плазменные струи, т.к. анализ полученных результатов проведенных исследований свидетельствует о его перспективности. Применяя более плотные потоки плазмы, целесообразно проведение исследований по получению модифицированных поверхностей с формированием новых наноразмерных упрочняющих фаз.

### **Список публикаций по теме диссертационной работы**

#### **Статьи в журналах из перечня ВАК**

1. Осколкова Т.Н. Износостойкие покрытия на WC-Co твёрдых сплавах, синтезируемые концентрированными потоками энергии / Т.Н. Осколкова, А.М. Глезер // Материаловедение. – 2018. - № 6. – С.21 – 31.

2. Базайкин В.И. Математическое моделирование тепловых процессов при обработке поверхности металлоизделий высококонцентрированными потоками энергии / В.И. Базайкин, О.Л. Базайкина, Т.Н. Осколкова, М.В. Темлянец // Известия вузов. Чёрная металлургия, 2017, № 5, С. 398 – 409.

3. Осколкова Т.Н. Исследование структуры и свойств твёрдого сплава ВК10КС после закалки в водополимерной среде Термовит М / Т.Н. Осколкова, А.А. Батаев, В.А. Батаев., Тюрин А.Г., Козырев Н.А., Фёдоров А.А. // Обработка металлов: технология, оборудование, инструменты. – 2014. – № 4 (65). – С. 36 – 42.

4. Осколкова Т.Н. Карбидовольфрамовый твёрдый сплав с износостойким покрытием / Т.Н. Осколкова // Изв. Самарского научного центра РАН. – 2013. – Том 15, № 4(2). – С. 473 – 475.

5. Осколкова Т.Н. Упрочнение поверхности карбидовольфрамового твёрдого сплава при двухкомпонентном электровзрывном легировании / Т.Н. Осколкова, Е.А. Будовских // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. – 2012. – Том 9, № 3. – С. 394 – 398.

6. Осколкова Т.Н. Упрочнение поверхности твёрдого сплава ВК10КС при двухкомпонентном электровзрывном легировании / Т.Н. Осколкова, Е.А. Будовских // Изв. Самарского научного центра РАН. – 2012. – Том 14, № 1(2). – С. 416 – 418.

7. Осколкова Т.Н. Особенности структурообразования поверхностного слоя при электровзрывном легировании карбидовольфрамового твёрдого сплава / Т.Н. Осколкова, Е.А. Будовских, В.Ф. Горюшкин // Изв. вузов. Порошковая металлургия и функциональные покрытия. – 2012. – № 3. – С. 46 – 50.

8. Осколкова Т.Н. Изменение структуры поверхности сплава ВК10КС после электровзрывной обработки с бором / Т.Н. Осколкова, Е.А. Будовских // Технология металлов. – 2012. – № 3. – С. 13 – 19.

9. Осколкова Т.Н. Особенности электровзрывного легирования поверхности твёрдого сплава ВК10КС титаном / Т.Н. Осколкова, Е.А. Будовских, В.Е. Громов // Материаловедение. – 2012. – № 1. – С. 41 – 46.

10. Осколкова Т.Н. Особенности упрочнения поверхности WC-Co твёрдого сплава электровзрывным легированием / Т.Н. Осколкова, Е.А. Будовских // Перспективные материалы. – 2012. – № 1. – С. 66 – 70.

11. Осколкова Т.Н. Инновационный способ упрочнения поверхности карбидовольфрамового твёрдого сплава / Т.Н. Осколкова, Е.А. Будовских // Изв. Самарского научного центра РАН. – 2011. – Том 13, № 1(3). – С. 695 – 697.

12. Осколкова Т.Н. Упрочнение поверхности карбидовольфрамового твёрдого сплава электровзрывной обработкой / Т.Н. Осколкова, Е.А. Будовских // Вести высших учеб. завед. Черноземья. – 2011. – № 1(23). – С. 88 – 92.

13. Шорохова О.В. Особенности охлаждающей способности водного раствора полимера «Термовит-М» / О.В. Шорохова, Т.Н. Осколкова // Изв. вузов. Чёрная металлургия. – 2011. – № 8. – С. 56 – 58.

14. Осколкова Т.Н. Влияние способов нанесения покрытий на шероховатость WC-Co твёрдого сплава / Т.Н. Осколкова // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2011. – № 10. – С. 15 – 19.

15. Осколкова Т.Н. Покрытия на карбидовольфрамовых твёрдых сплавах с повышенной твёрдостью / Т.Н. Осколкова // Изв. вузов. Чёрная металлургия». – 2010. – № 6. – С. 53 – 55.

16. Осколкова Т.Н. Наноструктурное состояние поверхности карбидовольфрамового твёрдого сплава после электровзрывного легирования / Т.Н. Осколкова, Е.А. Будовских // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. – Барнаул. – 2010. – № 3. – С. 95 – 99.

17. Осколкова Т.Н. Твёрдый сплав на основе карбида вольфрама с ионно-плазменным TiZrN покрытием / Т.Н. Осколкова // Изв. Самарского научного центра РАН. – 2010. – Том 12, № 1(2). – С. 476 – 478.

18. Осколкова Т.Н. Упрочнение поверхности карбидовольфрамового твёрдого сплава способом электровзрывного легирования / Т.Н. Осколкова, Е.А. Будовских // Современные наукоёмкие технологии. – 2010. – № 7. – С. 146 – 148.

19. Осколкова Т.Н. Наноструктурирование поверхности карбидовольфрамовых твёрдых сплавов при электровзрывном легировании / Т.Н. Осколкова, Е.А. Будовских, В.Е. Громов // Заготовительные производства в машиностроении. – 2010. – № 8. – С. 33 – 36.

20. Осколкова Т.Н. Поверхностные явления в карбидовольфрамовых твёрдых сплавах, обусловленные импульсным воздействием / Т.Н. Осколкова, Е.А. Будовских // Вестник Тамбовского университета. Серия: Естественные и технические науки. – Тамбов. – 2010. – Том 15, вып. 3. – С. 870 – 872.

21. Осколкова Т.Н. Электроэрозионное покрытие на карбидовольфрамовом твёрдосплавном изделии / Т.Н. Осколкова // Изв. Самарского научного центра РАН. – 2009. – Том 11, № 5 (2). – С. 320 – 323.

22. Осколкова Т.Н. Напряжения, возникающие при пайке горнорежущего инструмента / Т.Н. Осколкова // Изв. вузов. Чёрная металлургия. – 2006. – № 6. – С. 35 – 37.

23. Осколкова Т.Н. Использование водополимерной охлаждающей среды при закалке твёрдого сплава ВК10КС / Т.Н. Осколкова // Изв. вузов. Чёрная металлургия. – 2006. – № 4. – С. 40 – 42.

24. Осколкова Т.Н. Изменение структуры и свойств твёрдого сплава ВК10КС после окончательной термической обработки / Т.Н. Осколкова // Изв. вузов. Чёрная металлургия». – 2005. – № 12. – С. 33 – 34.

25. Осколкова Т.Н. Закалка как способ повышения эксплуатационной стойкости твёрдого сплава / Т.Н. Осколкова // Изв. вузов. Чёрная металлургия. – 2005. – № 9. – С. 36 – 37.

### Патенты

1. Патент РФ 2430194, МПК С23С 14/32, С23С 14/48, В23В 27/14. Способ упрочнения поверхности твёрдосплавного инструмента на основе карбида вольфрама / Т.Н. Осколкова, Е.А. Будовских; ГОУ ВПО «Сибирский государственный индустриальный университет» // № 2010110976/02; заявл. 22.03.2010; опубл. 27.09.2011.

2. Патент РФ 2413792, МПК С23С 14/32, С23С 14/48. Способ упрочнения поверхности вольфрамокобальтового твёрдосплавного инструмента / Т.Н. Осколкова, Е.А. Будовских; ГОУ ВПО «Сибирский государственный индустри-

альный университет» // № 2009134016/02; заявлено 10.09.2009; опубл. 10.03.2011.

3. Патент РФ 2405061, МПК С 23 С 14/32/ С 23 С 14/06. Способ поверхностной обработки вольфрамокобальтового твёрдосплавного инструмента / Т.Н. Осколкова, Е.А. Будовских. // № 2009126395/02; заявл. 09.07.2009; опубл. 27.11.2010.

4. Патент РФ 2401720, МПК В22F 7/02В23Н 9/00. Способ получения изделия из многослойного твёрдого сплава на основе карбида вольфрама / Т.Н. Осколкова; ГОУ ВПО «Сибирский государственный индустриальный университет» // № 2009106344/02; Заявл. 24.02.2009; опубл. 20.10.2010.

5. Патент РФ 2398046, МПК С 23 С 14/48/ С 23 С 14/32. Способ поверхностного упрочнения вольфрамокобальтового твёрдосплавного инструмента / Т.Н. Осколкова, Е.А. Будовских. // № 2009132441/02; Заявл. 27.08.2009; опубл. 27.08.2010.

6. Патент РФ 2392342, МПК В 22 F 3/24/С 22 С 29/00. Способ закалки твёрдого сплава на основе карбида вольфрама / Т.Н. Осколкова; ГОУ ВПО «Сибирский гос. индустр. ун-т». // № 2009116915/02; заявл. 04.05.2009; опубл. 20.06.2010.

7. Патент РФ 2356693, МПК В 22 F 3/24/С 22 С 29/00. Способ закалки твёрдого сплава / Т.Н. Осколкова; ГОУ ВПО «Сибирский государственный индустриальный университет». // № 2007139225/02; заявл. 22.10.2007; опубл. 27.05.2009.

8. Патент РФ 2355513, МПК В 22 F 3/24/С 22 С 29/08. Способ закалки твёрдого сплава на основе карбида вольфрама / Т.Н. Осколкова, А.Б. Щеглова; ГОУ ВПО «Сибирский государственный индустриальный университет». // № 2007133961/02; заявл. 11.09.2007; опубл. 20.05.2009.

9. Патент РФ 2294261, МПК В 22 F 3/24/С 22 С 29/00. Способ закалки твёрдого сплава / Т.Н. Осколкова; ГОУ ВПО «Сибирский государственный индустриальный университет». // № 2005118570/02; заявл. 15.06.2005; опубл. 27.02.2007.

#### **Статьи в зарубежных изданиях (из списка Scopus, Web of Science)**

1. Oskolkova T.N. Surface Hardening of Hard Tungsten-Carbide Alloys: A Review / T.N. Oskolkova, A.M. Glezer // Steel in Translation. – 2017. – V. 47. – № 12. – P. 980 – 991.

2. Oskolkova T.N. Improving the wear resistance of tungsten – carbide hard alloys / T.N. Oskolkova // Steel in Translation. – 2015. – V. 45. – № 5. – P. 318 – 321.

3. Oskolkova T.N. Wear-Resistant Coating on Hard Alloy / T.N. Oskolkova // Applied Mechanics and Materials. 2015. – V. 788. – P. 281– 285.

4. Oskolkova T.N. Wear-resistant coating on hard alloy / T.N. Oskolkova // Applied Mechanics and Materials» IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 91 (2015) 012020.

5. Oskolkova T.N. A new technology for producing carbide alloys with gradient structure / T.N. Oskolkova // Applied Mechanics and Materials IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 91 (2015) 012019.

6. Oskolkova T.N. Features of structure formation of the surface layer in the course of electroexplosive alloying tungsten carbide hard alloy / T.N. Oskolkova, E.A. Budovskikh, V.F. Goryushkin // Non-Ferrous Metals. – V. 55, № 2. – 2014. – P. 196 – 200.

7. Oskolkova T.N. Electric explosion alloying of the surface of hard alloy VK10KS with titanium and silicon carbide / T.N. Oskolkova, E.A. Budovskikh // Metal Science and Heat Treatment. – V. 55, № 1. – 2013. – P. 96 – 99.

8. Oskolkova T.N. Pulse plasma treatment of the surface of alloy VK10KS / T.N. Oskolkova, E.A. Budovskikh // Metal Science and Heat Treatment. – V. 53, № 11. – 2012. – P. 608 – 610.

9. Shorokhova O.V. Termovit-M Water-polymer Quenching Fluid / O.V. Shorokhova, T.N. Oskolkova // Steel in Translation. – 2011. – V. 41. – № 4. – P. 291 – 293.

### *Монографии*

1. Формирование структурно-фазовых состояний металлов и сплавов при электровзрывном легировании и электронно-пучковой обработке (монография) / Е.А. Будовских, Е.С. Ващук, В.Е. Громов, Ю.Ф. Иванов, Н.Н. Коваль, Т.Н. Осколкова [и др.]. – Новокузнецк: изд-во «Интер-Кузбасс». – 2011. – 212 с.

2. Нано: структуры, материалы и технологии. Серия «Фундаментальные проблемы современного материаловедения» (монография) / Е.А. Будовских, В.Е. Громов, Д.В. Загуляев, С.В. Коновалов, О.И. Нохрина, Т.Н. Осколкова. – Новокузнецк: изд-во ОАО «Новокузнецкий полиграфический комбинат». – 2010. – 201 с.

3. Трещинообразование в процессах нагрева и охлаждения сталей и сплавов (монография) / М.В. Темлянец, Т.Н. Осколкова. – М.: изд-во «Флинта», «Наука». – 2005. – 195с.

Подписано в печать 25.09.2018. Формат 60x84 1/16

Бумага писчая. Печать офсетная. Усл. печ. л. 1,66

Тираж 100 Заказ

Отпечатано в редакции ФГБОУ ВО «Сибирский государственный индустриальный университет»

654007, г. Новокузнецк, ул.Кирова, 42