

БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

Объект авторского права
УДК 539.21

**КРУТИЛИНА
ЕВГЕНИЯ АЛЕКСАНДРОВНА**

**МИКРОСТРУКТУРА И ФАЗОВЫЙ СОСТАВ КОМПОЗИЦИОННОГО
ТВЕРДОГО СПЛАВА WC-TiC-Co
МАРКИ T15K6, МОДИФИЦИРОВАННОГО ИМПУЛЬСНЫМИ
КОМПРЕССИОННЫМИ ПЛАЗМЕННЫМИ ПОТОКАМИ И
СИЛЬНОТОЧНЫМИ ЭЛЕКТРОННЫМИ ПУЧКАМИ**

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук
по специальности
01.04.07 – Физика конденсированного состояния

Минск 2024

Работа выполнена в Белорусском государственном университете.

Научный руководитель –

Углов Владимир Васильевич,
доктор физико-математических наук, профессор,
заведующий кафедрой физики
твердого тела и нанотехнологий
Белорусского государственного университета.

Официальные оппоненты:

Кукареко Владимир Аркадьевич,
доктор физико-математических наук, профессор,
начальник Центра структурных исследований и
трибомеханических испытаний
материалов и изделий машиностроения
государственного научного учреждения
«Объединенный институт машиностроения
Национальной академии наук Беларуси»;

Смягликов Иван Петрович,
кандидат физико-математических наук,
заместитель директора по научной работе
государственного научного учреждения
«Физико-технический институт
Национальной академии наук Беларуси».

Оппонирующая организация –

Государственное научное учреждение
«Научно-практический центр
Национальной академии наук Беларуси
по материаловедению».

Защита состоится 24 января 2025 г. в 14.00 на заседании совета по защите диссертаций Д 02.01.16 при Белорусском государственном университете по адресу: 220030 Минск, ул. Ленинградская 8 (корпус юридического факультета), ауд. 407.

Телефон ученого секретаря: 209-57-09; e-mail: fedotov@bsu.by.

С диссертацией можно ознакомиться в Фундаментальной библиотеке Белорусского государственного университета.

Автореферат разослан «23» декабря 2024 г.

Ученый секретарь совета
по защите диссертаций Д 02.01.16,
доктор физико-математических наук,
профессор



А.К.Федотов

ВВЕДЕНИЕ

В последнее время ведется разработка технологий упрочнения и повышения долговечности твердосплавных режущих инструментов. Широкое распространение получили методы упрочнения твердых сплавов, основанные на воздействии пучков заряженных частиц (электроны, ионы) и потоков плазмы со значениями плотностей энергий от единиц до десятков Дж/см². Такого рода воздействие эффективно повышает эксплуатационные характеристики твердых сплавов за счет формирования их неравновесной высокодисперсной структуры в результате плавления и последующей кристаллизации из расплава в условиях его скоростного охлаждения. Кроме того, импульсное высокоэнергетическое воздействие пучков частиц и потоков плазмы субмиллисекундной длительности на систему «покрытие/подложка» позволяет эффективно осуществлять легирование поверхностных слоев материала элементами покрытия. Степень модифицирования поверхностных слоев определяется параметрами высокоэнергетического воздействия – плотностью поглощенной энергии, числом, частотой и длительностью импульсов. Однако, несмотря на достаточно большое количество исследований структурно-фазовых превращений, происходящих в твердых сплавах под импульсным высокоэнергетическим воздействием, необходимо отметить, что целостная картина механизмов и процессов, контролирующих эти изменения, пока далека от понимания.

Таким образом, *актуальным* представляется исследование микроструктуры, фазового и элементного составов, а также физико-механических свойств твердого сплава WC-TiC-Co (состав в вес. %: WC – 79, TiC – 15, Co – 6) после воздействия на него сильноточных электронных пучков и компрессионных плазменных потоков. Выбор твердого сплава WC-TiC-Co марки T15K6 в качестве объекта исследования обусловлен его широким использованием в инструментальной промышленности Республики Беларусь.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Связь работы с научными программами (проектами) и темами

Диссертационная работа выполнена в Белорусском государственном университете в рамках плана НИР БГУ. Тема диссертации полностью соответствует приоритетным направлениям фундаментальных и прикладных научных исследований Республики Беларусь на 2011–2015 гг., в частности, пунктам 8.1. (структура и физические свойства конденсированных сред, новые магнитные, сегнетоэлектрические, полупроводниковые, сверхпроводящие, радиационно-стойкие и сверхтвердые материалы и композиты, фотонные и

нелинейно-оптические кристаллы) и 12.2. (физика фундаментальных взаимодействий, высоких энергий и экстремальных состояний вещества, плазма и ее применение, плазменно-пучковые технологии); п. 8 (многофункциональные материалы и технологии) перечня приоритетных направлений научных исследований Республики Беларусь на 2016–2020 гг.; п. 3 (энергетика, строительство, экология и рациональное природопользование) и п. 4 (машиностроение, машиностроительные технологии, приборостроение и инновационные материалы) приоритетных направлений научно, научно-технической и инновационной деятельности в Республике Беларусь на 2021–2025 гг. Диссертационная работа выполнялась в рамках следующих научных программ и исследовательских проектов:

– ГПНИ «Междисциплинарные научные исследования, новые зарождающиеся технологии как основа устойчивого инновационного развития (Конвергенция)», задание 2.4.01 «Плазмодинамические системы нового поколения и физические процессы высокоэнергетического воздействия гетерогенных плазменных потоков на материалы, структурно-фазовая эволюция и радиационно-плазменная активация модифицированных объектов, синтез низкоразмерных структур и покрытий» (№ ГР 20114972, 2011–2013 гг.);

– ГПНИ «Энергетические системы, процессы и технологии», подпрограмма «Эффективные теплофизические процессы и технологии», задание 2.72 «Формирование высокоэнергетических плазменных образований и синтез модифицированных слоев и покрытий с улучшенными эксплуатационными свойствами поверхности в квазистационарных сильноточных электроразрядных системах» (№ ГР 20190749, 2019–2020 гг.);

– ГПНИ «Энергетические ядерные процессы и технологии», подпрограмма «Энергетические процессы и технологии», задание 2.1.02 «Плазменный синтез композиционных поверхностных слоев с улучшенными физико-механическими свойствами в металлических и керамических материалах, работающих в условиях повышенных тепловых и механических нагрузок» (№ ГР 20212226, 2021–2025 гг.);

– проекта Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований – Министерства образования «Формирование стойких к окислительному изнашиванию слоев в композиционных карбидосодержащих сплавах при высокоэнергетической плазменной обработке» (№ ГР 20221197, договор T22MB-016 от 04.05.2022).

– гранта студентов и аспирантов БГУ «Модификация структурно-фазового состояния и механических свойств поверхностных слоев металлов и сплавов воздействием сильноточных электронных пучков» (регистрационный № 48, 01.01.2011–31.12.2011);

– гранта студентов и аспирантов БГУ «Структура и механические свойства металлов и сплавов, легированных с помощью компрессионных плазменных потоков» (регистрационный № 14, 01.01.2012–31.12.2012).

Цель, задачи, объект и предмет исследования. *Целью работы* являлось выявление закономерностей, особенностей и механизмов изменений микроструктуры, фазового и элементного составов, а также микротвердости и жаростойкости композиционного твердого сплава WC-TiC-Co марки T15K6 после воздействия компрессионных плазменных потоков и сильноточных электронных пучков.

Достижение поставленной цели связано с решением следующих *задач*:

- установить влияние воздействия компрессионных плазменных потоков и сильноточных электронных пучков на микроструктуру, фазовый состав и распределение элементов в приповерхностном слое композиционного твердого сплава WC-TiC-Co;

- выявить основные механизмы структурно-фазовых превращений в приповерхностном слое композиционного твердого сплава WC-TiC-Co после высокоэнергетического импульсного воздействия потоков плазмы и электронных пучков;

- легировать цирконием или титаном приповерхностный слой композиционного твердого сплава WC-TiC-Co посредством воздействия компрессионных плазменных потоков с предварительным нанесением покрытий циркония или титана;

- выявить влияние легирующих элементов (циркония и титана) на микроструктуру и фазовый состав приповерхностного слоя композиционного твердого сплава WC-TiC-Co;

- установить механизмы изменения микротвердости приповерхностного слоя композиционного твердого сплава WC-TiC-Co, вызванного воздействием компрессионных плазменных потоков и легированием цирконием или титаном;

- изучить жаростойкость приповерхностного слоя композиционного твердого сплава WC-TiC-Co, легированного цирконием в результате воздействия компрессионных плазменных потоков с предварительным нанесением покрытия циркония.

Объектом исследования являлся приповерхностный слой композиционного твердого сплава WC-TiC-Co марки T15K6 (состав в вес. %: WC – 79, TiC – 15, Co – 6) после воздействия компрессионных плазменных потоков и сильноточных электронных пучков.

Предметом исследования являлись элементный состав, микроструктура, фазовый состав, микротвердость и жаростойкость приповерхностного слоя композиционного твердого сплава WC-TiC-Co марки T15K6, подвергнутого

воздействию компрессионных плазменных потоков и сильнооточных электронных пучков.

Научная новизна. Новизна полученных результатов, выносимых на защиту, обусловлена тем, что впервые было исследовано влияние импульсного воздействия компрессионных плазменных потоков и сильнооточных электронных пучков на структуру, фазовый состав и физико-механические свойства композиционного твердого сплава WC-TiC-Co.

Следующие основные научно обоснованные результаты диссертационной работы относятся к новым:

- импульсным воздействием компрессионных плазменных потоков с плотностью поглощенной энергии 35 – 50 Дж/см² и сильнооточных электронных пучков с плотностью поглощенной энергии 50 – 80 Дж/см² на композиционный твердый сплав WC-TiC-Co марки T15K6 впервые сформирован приповерхностный слой с однородным элементным составом и дисперсной ячеистой структурой за счет плавления и кристаллизации в условиях скоростного охлаждения;

- впервые обнаружено перераспределение вольфрама в расплавленном слое после воздействия компрессионных плазменных потоков с плотностью поглощенной энергии 35 – 50 Дж/см², приводящее к формированию пересыщенного вольфрамом твердого раствора (Ti,W)C и карбида W₂C;

- впервые осуществлено легирование приповерхностного слоя композиционного твердого сплава WC-TiC-Co марки T15K6 атомами циркония с концентрацией до 25 ат. % при импульсном воздействии компрессионных плазменных потоков с плотностью поглощенной энергии 35 – 50 Дж/см² с предварительным нанесением покрытия циркония толщиной 2 мкм, в результате чего происходит формирование твердых растворов (Ti,W,Zr)C и W(Zr);

- впервые обнаружено диффузионное обогащение приповерхностного слоя (до 0,1 мкм) композиционного твердого сплава WC-TiC-Co марки T15K6 азотом, обуславливающее поверхностную сегрегацию титана и кобальта в расплаве при импульсном воздействии компрессионных плазменных потоков, генерируемых в остаточной атмосфере азота (0,4 кПа);

- впервые выявлено повышение микротвердости поверхностного слоя композиционного твердого сплава WC-TiC-Co марки T15K6 в 2,5 раза (до 33 ГПа) в результате воздействия компрессионных плазменных потоков с плотностью поглощенной энергии 35 – 50 Дж/см² при давлении остаточной атмосферы азота 0,4 кПа и в 3 раза (до 39 ГПа) при дополнительном легировании атомами циркония;

- впервые выявлено образование карбонитрида титана TiCN

в поверхностном слое композиционного твердого сплава WC-TiC-Co при увеличении давления остаточной атмосферы азота до 1,3 кПа при формировании компрессионного плазменного потока, что обеспечивает увеличение микротвердости до 43 ГПа.

Положения, выносимые на защиту:

1. Формирование в композиционном твердом сплаве WC-TiC-Co (состав в вес. %: WC – 79, TiC – 15, Co – 6) приповерхностного слоя толщиной 4 – 6 мкм при импульсном ($n = 5$) воздействии компрессионных плазменных потоков ($Q = 35 - 50$ Дж/см²) и 4 – 14 мкм при воздействии сильнофокусированных электронных пучков ($Q = 50 - 80$ Дж/см²), характеризующегося однородным распределением элементов сплава, дисперсной (0,1 – 0,3 мкм) ячеистой структурой, который образован за счет плавления частиц (Ti,W)C и WC, скоростного ($10^6 - 10^7$ К/с) охлаждения расплава и состоит из пересыщенного вольфрамом твердого раствора (Ti,W)C и локализованного по границам ячеек карбида W₂C.

2. Импульсное ($n = 1 - 5$) воздействие компрессионных плазменных потоков ($Q = 35 - 50$ Дж/см²), генерируемых в остаточной атмосфере азота ($p_N = 0,4 - 1,3$ кПа), на композиционный твердый сплав WC-TiC-Co (состав в вес. %: WC – 79, TiC – 15, Co – 6) с покрытием Zr толщиной 2 мкм приводит к формированию

– однородно легированного цирконием (2 – 25 ат. %) приповерхностного слоя на основе твердого раствора (Ti,W,Zr)C за счет жидкофазного перемешивания расплава;

– нитрида ZrN и карбонитрида (Ti,W)CN за счет диффузионного азотирования приповерхностного слоя.

3. Экспериментально выявленное увеличение микротвердости приповерхностного слоя композиционного твердого сплава WC-TiC-Co (состав в вес. %: WC – 79, TiC – 15, Co – 6) до 43 ГПа при легировании цирконием или титаном воздействием компрессионных плазменных потоков ($Q = 35 - 50$ Дж/см², $p_N = 0,4 - 1,3$ кПа) вследствие формирования ячеистой структуры (0,1 – 0,3 мкм), твердого раствора (Ti,W,Zr)C, дисперсных частиц карбида W₂C и карбонитрида титана TiCN, что может быть использовано при разработке новых технологий упрочнения и повышения износостойкости режущих инструментов.

Личный вклад соискателя ученой степени. Основные результаты, приведенные в диссертационной работе, получены автором лично.

В статьях в соавторстве с научным руководителем Угловым В. В. последнему принадлежит обсуждение постановки задач, возможных подходов к их решению и полученных результатов.

Соавторы работ к.ф.-м.н. Кулешов А. К., к.ф.-м.н. Черенда Н. Н. и к.ф.-м.н. Шиманский В. И. принимали участие в обсуждении экспериментальных

данных, результатов расчетов. Обработка образцов компрессионными плазменными потоками проводилась сотрудниками Института тепло- и массообмена им. А. В. Лыкова Национальной академии наук Беларуси д.ф.-м.н. Асташинским В. М. и к.ф.-м.н. Кузьмицким А. М. Обработка образцов сильноточными электронными пучками проводилась сотрудниками Института сильноточной электроники Сибирского отделения РАН (г. Томск, Россия) д.ф.-м.н. Ковалем Н. Н., д.ф.-м.н. Ивановым Ю. Ф. и Тересовым А. Д.

Результаты, полученные другими соавторами или с другими соавторами, не вошли в диссертацию.

Апробация диссертации и информация об использовании её результатов. Результаты работы докладывались и обсуждались на следующих международных и республиканских конференциях: Международная конференция по физике взаимодействия заряженных частиц с кристаллами (Москва, 2010, 2011, 2012, 2014); «Радиационная физика твердого тела» (Севастополь, 2010, 2011, 2012, 2013, 2021); «Modification of Materials with Particle Beams and Plasma Flows» (Томск, 2010); «Radiation Physics, High Current Electronics and Modification of Materials» (Томск, 2012, 2014); «Взаимодействие излучений с твердым телом» (ВИТТ) (Минск, 2011, 2013, 2015, 2021, 2023); «Быстрозакаленные материалы и покрытия» (Москва, 2010); «Plasma Physics and Plasma Technology» (PPPT) (Минск, 2012); “Protective Coatings and Thin Films” European Materials Research Society (Strasbourg, 2013); Минский международный форум по тепло- и массообмену (Минск, 2022); «Физика конденсированного состояния» (ФКС) (Гродно, 2010, 2011, 2014).

Опубликованность результатов диссертации. Основные результаты диссертации опубликованы в 31 научной работе, в числе которых: 7 статей в научных рецензируемых изданиях в соответствии с п. 19 Положения о присуждении ученых степеней и присвоении ученых званий (общим объемом 4,6 авторского листа), 15 статей в сборниках материалов научных конференций, 9 тезисов докладов.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из перечня условных обозначений, введения, общей характеристики работы, пяти глав, заключения, библиографического списка и двух приложений. Полный объем диссертации составляет 176 страниц, в том числе: 78 рисунков, 8 таблиц и 1 приложение занимают 60 страниц. Список использованных источников содержит 165 наименований на 18 страницах, включая 31 публикацию соискателя на 6 страницах.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В **первой главе** проведен анализ литературных источников, описывающих современные методы модифицирования структурно-фазового состояния композиционных твердых сплавов с помощью пучков заряженных частиц и потоков плазмы. Обосновано использование компрессионных плазменных потоков и высокоэнергетических электронных пучков. Сформулированы цель и основные задачи диссертационной работы.

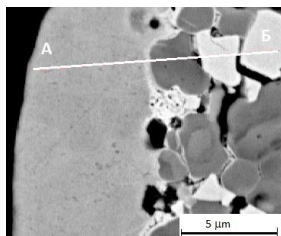
Во **второй главе** описывается объект исследования – композиционный твердый сплав WC-TiC-Co марки T15K6 (состав в вес. %: WC–79, TiC–15, Co–6), способ формирования в нем поверхностных легированных слоев, который заключается в предварительном нанесении на поверхность твердого сплава металлических (Zr, Ti) покрытий толщиной 2 мкм с помощью вакуумно-дугового осаждения, а также в последующем воздействии компрессионных плазменных потоков (КПП) в атмосфере азота (давление остаточной атмосферы азота (p_N) 0,4 и 1,3 кПа) и высокоэнергетических электронных пучков (СЭП), длительность импульса которых составляет 100 мкс, а плотность поглощенной энергии (Q) изменялась в диапазонах 20 – 50 и 10 – 80 Дж/см² соответственно. Обработка проводилась одним и пятью последовательными импульсами (n). Изучение жаростойкости модифицированных слоев осуществлялось в результате высокотемпературного (700°С) изотермического отжига в муфельной печи в течение 30–420 минут.

Описываются методы экспериментальных исследований – растровая электронная микроскопия (РЭМ), рентгеноспектральный микроанализ (РСМА), Оже-электронная спектроскопия (ОЭС), рентгеноструктурный фазовый анализ (РСА), взвешивание образцов и измерение микротвердости их приповерхностного слоя по методике Виккерса.

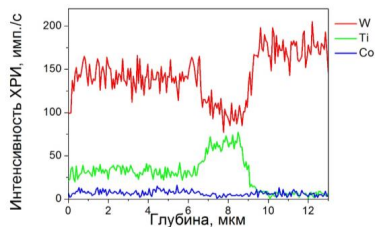
В **третьей главе** представлены результаты исследования элементного и фазового составов, а также микроструктуры приповерхностных слоев твердого сплава T15K6, сформированных в результате воздействия КПП и СЭП, представлены результаты расчета пространственного распределения температуры в приповерхностном слое твердого сплава после импульсного высокоэнергетического воздействия с учетом гетерогенной внутренней структуры исследуемого материала.

Методом рентгеноспектрального микроанализа установлено однородное распределение элементов в приповерхностном слое твердого сплава глубиной 4–6 мкм при воздействии КПП с плотностью поглощенной энергии 35–50 Дж/см² и глубиной 4–14 мкм при воздействии СЭП с плотностью поглощенной энергии 50–80 Дж/см². Перераспределение элементов в приповерхностном слое осуществляется в результате плавления частиц карбидов WC и (Ti,W)C с последующим жидкофазным перемешиванием их компонентов. На рисунке 1 представлены зависимости интенсивности характеристического рентгеновского излучения (ХРИ) атомов металлических элементов, входящих в состав твердого сплава T15K6 (W, Ti,

Со), указывающие на их однородное распределение по глубине модифицированного слоя.



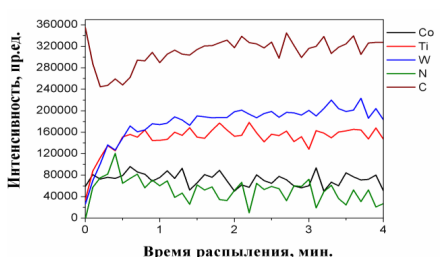
а)



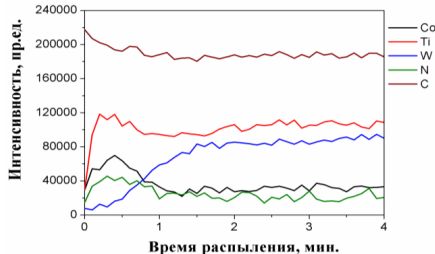
б)

Рисунок 1 – РЭМ-изображение (а) и распределение характеристического рентгеновского излучения атомов L_{α} вольфрама, K_{α} титана и K_{α} кобальта по глубине образцов (б), обработанных КПП при $Q = 50$ Дж/см²

Методом Оже-электронной спектроскопии установлено насыщение приповерхностного слоя композиционного твердого сплава Т15К6 плазмообразующим газом – азотом при воздействии КПП с плотностью поглощенной энергии 20 – 50 Дж/см² (рисунок 2). Обнаружено повышение содержания азота в тонком приповерхностном слое толщиной до 0,1 мкм за счет его диффузии, реализуемой преимущественно в жидкой фазе расплава, которое происходит при повышении плотности поглощенной энергии плазменного потока до 50 Дж/см² и давления остаточной атмосферы азота до 1,3 кПа. За счет высокого химического сродства титана к азоту происходит его поверхностная сегрегация, вызванная диффузионным потоком титана из жидкой фазы к поверхности и сопровождаемая диффузионным потоком кобальта к поверхности из-за меньшей энтальпии смешения в системе Co-Ti по сравнению с таковой для системы Co-W.



а)



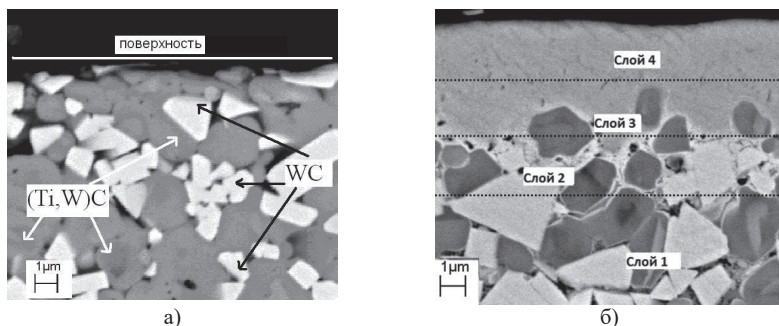
б)

а – $Q = 20$ Дж/см²; б – $Q = 50$ Дж/см²

Рисунок 2 – Изменение выхода Оже-электронов с глубиной при распылении образца твердого сплава, обработанного КПП ($p_N = 1,3$ кПа)

Плавление приповерхностного слоя композиционного твердого сплава Т15К6 в результате импульсного воздействия КПП с плотностью поглощенной энергии 35–50 Дж/см² и СЭП с плотностью поглощенной энергии 50–80 Дж/см² приводит к распаду карбида вольфрама WC с последующим выделением свободного углерода. При кристаллизации расплава происходит образование пересыщенного вольфрамом твердого раствора (Ti,W)C за счет высокой скорости движения фронта кристаллизации (1–2 м/с). Методом рентгеноструктурного анализа обнаружено уменьшение параметра элементарной ячейки кубической кристаллической решетки твердого раствора (Ti,W)C от 0,4324 до 0,4306 нм, связанное с увеличением концентрации вольфрама в нем от 44 до 58 ат. %.

Методом растровой электронной микроскопии установлено формирование многозонной структуры в приповерхностном слое твердого сплава Т15К6 после воздействия КПП с плотностью поглощенной энергии 35–50 Дж/см² и СЭП с плотностью поглощенной энергии 50–80 Дж/см² (рисунок 3).



а – исходное состояние;
б – после воздействия КПП ($Q = 40$ Дж/см², $p_N = 0,4$ кПа)

Рисунок 3 – РЭМ-изображение поперечного сечения твердого сплава

Образование многозонной структуры является следствием селективного плавления частиц карбидов вольфрама WC, карбида титана (Ti,W)C и кобальта за счет нагрева приповерхностного слоя выше температур их плавления, а также результатом жидкофазного перемешивания расплава. Интенсивный теплоотвод от расплавленной части на объем твердого сплава позволяет достичь высокой скорости охлаждения, 10^7 К/с, которая обеспечивает формирование ячеистой структуры в закристаллизовавшемся слое со средним размером ячеек 0,1–0,3 мкм. Распад карбида вольфрама WC в жидкой фазе приводит к увеличению в нем концентрации вольфрама, избыток которого

вследствие его ограниченной растворимости в твердой фазе карбида (Ti,W)C вытесняется на границы ячеек и приводит к формированию карбида W_2C .

Численный расчет пространственного распределения температуры в приповерхностных слоях твердого сплава T15K6 после импульсного воздействия КПП и СЭП с плотностями энергии от 45 до 80 Дж/см², учитывающий гетерогенность структурного состояния сплава, продемонстрировал достижение температур плавления карбидов и формирование многозонной структуры. Установлено, что глубина расплавленного слоя увеличивается с повышением плотности поглощенной энергии и достигает 15 мкм при 80 Дж/см². Полученные значения соответствуют экспериментально обнаруженным глубинам расплавленного слоя в твердом сплаве T15K6 после воздействия СЭП, что указывает на преобладание механизма теплопроводности при нагреве и охлаждении приповерхностного слоя. Обнаружено, что плавление приповерхностного слоя твердого сплава T15K6 после воздействия КПП начинается при плотности поглощенной энергии 35 Дж/см², что ниже соответствующего значения при воздействии СЭП и объясняется наличием дополнительных источников нагрева в виде ударно-сжатого слоя в приповерхностной области и конвективного движения расплава.

В четвертой главе приведены результаты исследований структурно-фазовых превращений в поверхностных слоях твердого сплава T15K6 после воздействия КПП с предварительным нанесением покрытий циркония и титана, а также описан процесс эрозии поверхности твердого сплава в результате плазменной обработки.

Установлено, что воздействие КПП ($Q = 35\text{--}50$ Дж/см², $p_N = 0,4\text{--}1,3$ кПа) на твердый сплав T15K6 с покрытием (2 мкм) циркония приводит к плавлению покрытия и приповерхностного слоя твердого сплава. Жидкофазное перемешивание сформированного расплава способствует однородному распределению компонентов сплава в слое 4 – 6 мкм, кристаллизация которого в условиях высокой скорости охлаждения позволяет сформировать приповерхностный слой, легированный цирконием с концентрацией от 2 до 25 ат. %.

Методом Оже-электронной спектроскопии было установлено насыщение азотом приповерхностного слоя систем циркониевое покрытие – твердый сплав и титановое покрытие – твердый сплав в результате воздействия КПП с плотностью поглощенной энергии 35–50 Дж/см². Выявлено, что содержание азота в поверхностном слое и глубина его проникновения уменьшаются с ростом как числа импульсов при постоянной плотности поглощенной энергии ($Q = 35$ Дж/см²), так и с увеличением плотности поглощенной энергии при постоянном количестве импульсов плазменного воздействия ($n = 5$), что

обусловлено формированием ударно-сжатого слоя, характеризующегося большей плотностью и длительностью существования вследствие присутствия на поверхности твердого сплава покрытий титана и циркония с меньшей температурой плавления по сравнению с карбидными составляющими твердого сплава.

Легирование приповерхностного слоя твердого сплава Т15К6 атомами циркония при воздействии КПП приводит к изменению фазового состояния модифицированного слоя. Тепловое воздействие КПП обеспечивает плавление и распад карбида вольфрама WC , что увеличивает количество вольфрама в расплаве и способствует образованию карбида W_2C при кристаллизации. Растворение циркония в расплавленном приповерхностном слое твердого сплава приводит к формированию твердого раствора $W(Zr)$. Обнаружено, что в результате многократного перемешивания расплавленного циркония и компонентов твердого сплава происходит образование твердого раствора на основе карбида титана $(Ti,W,Zr)C$ (рисунок 4).

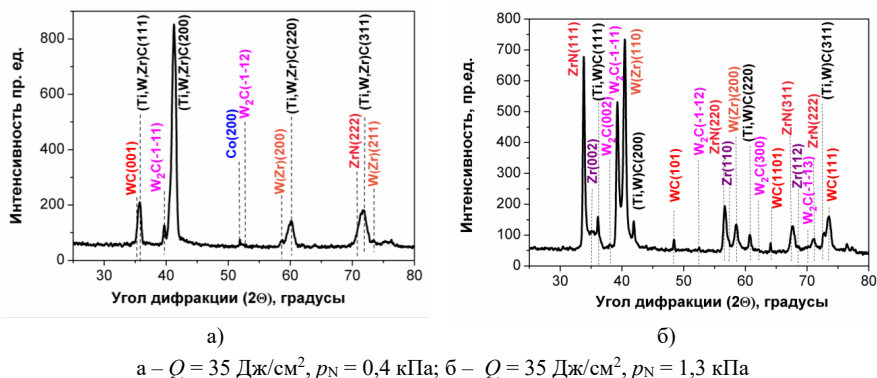


Рисунок 4 – Рентгеновская дифрактограмма образца твердого сплава Т15К6 с покрытием Zr после обработки КПП (n = 5)

При легировании поверхностного слоя твердого сплава титаном посредством воздействия КПП с плотностью поглощенной энергии 35–50 Дж/см² фазовый состав анализируемого слоя соответствует твердому раствору на основе карбида титана $(Ti,W)C$, карбиду W_2C и твердому раствору на основе вольфрама $W(Ti)$.

На поверхности легированного цирконием слоя формируется нитрид ZrN , а также твердый раствор на основе нитрида титана $Ti(Co)N$ при воздействии КПП. Увеличение давления остаточной атмосферы азота до 1,3 кПа повышает количество азота, диффундировавшего в модифицированный слой твердого

сплава, в результате чего образуется карбонитридная фаза на основе твердого раствора $(\text{Ti,W})\text{CN}$. Дополнительное легирование поверхностного слоя твердого сплава атомами титана увеличивает его поверхностную концентрацию, в результате происходит образование карбонитрида титана TiCN .

Методом растровой электронной микроскопии обнаружено формирование дисперсной ячеистой структуры в слое твердого сплава T15K6, легированного цирконием при воздействии КПП (рисунок 5). При плотности поглощенной энергии 35 Дж/см^2 в приповерхностном слое выявлено формирование равноосных ячеек со средним размером $0,3 - 0,6 \text{ мкм}$, представляющих собой фазу циркония, по границам которых локализованы обогащенные вольфрамом фазы $\text{W}(\text{Zr})$ и W_2C . Увеличение плотности поглощенной энергии до $40 - 50 \text{ Дж/см}^2$ способствует увеличению времени существования расплавленного состояния твердого сплава и покрытия циркония, в результате чего происходит растворение циркония в твердом растворе на основе карбида титана $(\text{Ti,W,Zr})\text{C}$, кристаллизующегося в виде вытянутых ячеек средним размером $0,1 - 0,3 \text{ мкм}$.

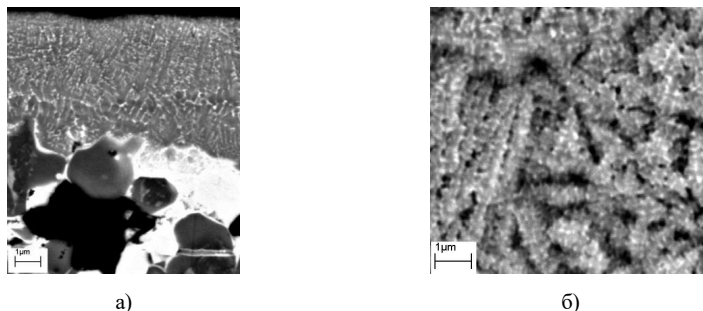


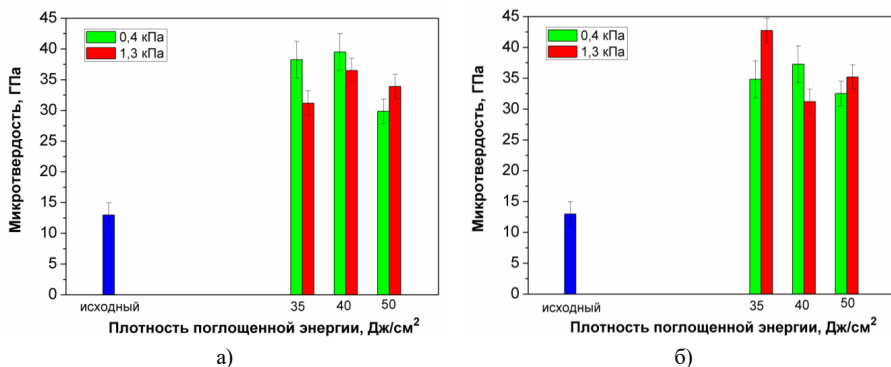
Рисунок 5 – Микроструктура приповерхностного слоя (а) и морфология поверхности (б) образца твердого сплава T15K6 с покрытием Zr после обработки КПП при $Q = 40 \text{ Дж/см}^2$, $p_n = 1,3 \text{ кПа}$, $n = 5$

Снижение размера ячеек обусловлено дополнительным действием концентрационного переохлаждения расплава вследствие ограниченной растворимости циркония в нем. На поверхности модифицированного слоя обнаружено образование дендритных структур на основе нитридов циркония и титана – ZrN и $\text{Ti}(\text{Co})\text{N}$. На рисунке 5 представлена внутренняя структура и микроструктура поверхности системы циркониевое покрытие – твердый сплав, модифицированной плазменным воздействием.

В пятой главе приведены результаты измерения микротвердости

поверхностных слоев твердого сплава Т15К6 после обработки КПП и СЭП. Кроме того, проанализирована жаростойкость твердого сплава Т15К6, непосредственно модифицированных КПП и при предварительном нанесении на поверхность покрытий циркония и титана.

Воздействие на композиционный твердый сплав Т15К6 КПП ($Q = 20\text{--}50$ Дж/см², $p_N = 0,4$ кПа), а также СЭП ($Q = 10\text{--}50$ Дж/см²) приводит к увеличению микротвердости поверхностного слоя твердого сплава толщиной 1,5 мкм до 23 – 34 ГПа, что в 1,9 – 2,6 раза превышает микротвердость исходного состояния. Установлено, что упрочнение приповерхностного модифицированного слоя твердого сплава происходит преимущественно за счет твердорастворного механизма, обусловленного образованием пересыщенного вольфрамом твердого раствора (Ti,W)C, формирования дисперсной ячеистой структуры, а также за счет формирования упрочняющей дисперсной фазы W₂C на границах между ячейками. Повышение давления остаточной атмосферы азота до 1,3 кПа при формировании компрессионных плазменных потоков позволяет обеспечить дополнительное упрочнение поверхностного слоя за счет образования карбонитрида на основе твердого раствора (Ti,W)CN, приводящего к увеличению микротвердости до 40 ГПа. Легирование поверхностного слоя композиционного твердого сплава Т15К6 цирконием или титаном при воздействии КПП ($Q = 35\text{--}50$ Дж/см²) позволяет повысить микротвердость модифицированного приповерхностного слоя твердого сплава толщиной до 0,5 мкм до 37 – 43 ГПа (рисунок 6).



а – покрытие Zr; б – покрытие Ti

Рисунок 6 – Микротвердость приповерхностного слоя твердого сплава в зависимости от плотности поглощенной энергии КПП

Дополнительное упрочнение приповерхностного слоя, связанное с добавлением атомов циркония и титана, обусловлено формированием твердых

растворов (Ti,Zr,W)C, W(Zr) и W(Ti), а также фазами нитрида и карбонитрида ZrN и TiCN.

Легирование цирконием поверхностного слоя твердого сплава T15K6 в результате воздействия КПП приводит к повышению его жаростойкости. На основании полученных результатов, а также с учетом данных рентгеноструктурного анализа предложена схема окисления модифицированного слоя, согласно которой увеличение жаростойкости твердого раствора T15K6 после воздействия КПП обуславливается последовательным формированием оксидных слоев ZrO_2 , TiO_2 , $CoWO_4$, WO_3 . Образованные оксиды на основе титана и циркония выступают в качестве барьерных слоев, ограничивающих поступление кислорода в область твердых растворов (Ti,W)C и (Ti,Zr,W)C.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные научные результаты диссертационной работы

1. Воздействием компрессионных плазменных потоков с длительностью импульса 100 мкс и плотностью поглощенной энергии 35–50 Дж/см² при давлении остаточной атмосферы азота 0,4 и 1,3 кПа, а также сильнофокусированных электронных пучков с длительностью импульса 100 мкс и плотностью поглощенной энергии 50–80 Дж/см² на твердый сплав WC-TiC-Co марки T15K6 был сформирован поверхностный слой с модифицированной структурой и фазовым составом за счет его нагрева выше температуры плавления компонентов, их жидкофазного перемешивания и последующей скоростной кристаллизации. Методами растровой электронной микроскопии и энергодисперсионного микроанализа было установлено формирование многозонной структуры с гомогенизированным по элементному составу приповерхностным слоем 4–6 мкм, обладающим дисперсной ячеистой структурой со средним размером ячеек 0,1–0,3 мкм. Методом

Оже-электронной спектроскопии обнаружено диффузионное обогащение азотом приповерхностного слоя твердого сплава WC-TiC-Co при воздействии на него компрессионными плазменными потоками, приводящее к приповерхностной сегрегации титана и кобальта [1–А–4–А, 6–А–13–А, 15–А, 18–А–20–А, 23–А–25–А, 28–А, 31–А].

2. Методом рентгеноструктурного анализа обнаружен распад карбида WC в твердом сплаве WC-TiC-Co после воздействия компрессионных плазменных потоков и сильнофокусированных электронных пучков с плотностями поглощенной энергии, обуславливающими плавление приповерхностного слоя, в результате чего происходит обогащение вольфрамом твердого раствора (Ti,W)C и выделение второй фазы карбида вольфрама W_2C . С помощью растровой электронной

микроскопии установлено формирование фазы W_2C в виде дисперсных включений на границах ячеек твердого раствора $(Ti,W)C$. Воздействие компрессионных плазменных потоков, генерируемых в остаточной атмосфере азота, приводит к формированию нитридной фазы $Ti(Co)N$ [1–А–4–А, 6–А, 7–А, 8–А–13–А, 15–А, 18–А–26–А, 28–А, 31–А].

3. Методами растровой электронной микроскопии и энергодисперсионного микроанализа установлено формирование легированного цирконием приповерхностного слоя толщиной 4 – 6 мкм в композиционном твердом сплаве $WC-TiC-Co$ при воздействии на него компрессионных плазменных потоков с плотностью поглощенной энергии 35 – 50 Дж/см² и предварительным нанесением покрытия циркония толщиной 2 мкм. Легирование приповерхностного слоя композиционного твердого сплава $WC-TiC-Co$ цирконием осуществляется в жидкофазном режиме при плавлении компонентов сплава и их последующем перемешивании, обеспечивающим их однородное распределение в легированном слое, причем концентрация циркония изменяется от 25 до 2 ат. % при повышении плотности поглощенной энергии плазменного потока от 35 до 50 Дж/см² [5–А, 21–А, 22–А, 29–А, 30–А].

4. Методом рентгеноструктурного анализа установлено, что при воздействии компрессионных плазменных потоков в остаточной атмосфере азота при давлении 0,4 и 1,3 кПа с плотностью поглощенной энергией 35 – 50 Дж/см² происходит азотирование приповерхностного слоя глубиной до 0,1 мкм, в котором формируется нитрид циркония ZrN и карбонитрид $(Ti,W)CN$. Легирование приповерхностного слоя твердого сплава атомами циркония способствует формированию твердого раствора $(Ti,W,Zr)C$ с ячеистой структурой со средним размером ячеек 0,1 – 0,3 мкм, а также карбида W_2C и твердого раствора $W(Zr)$. При увеличении давления остаточной атмосферы азота до 1,3 кПа при формировании компрессионных плазменных потоков увеличивается глубина азотированного приповерхностного слоя, сопровождаемое формированием нитрида ZrN [5–А, 17–А, 22–А, 29–А, 30–А].

5. Обнаружено увеличение микротвердости приповерхностного слоя глубиной 1,5 мкм в композиционном твердом сплаве $WC-TiC-Co$ после воздействия компрессионных плазменных потоков с плотностью поглощенной энергии 35 – 50 Дж/см² до 33 ГПа преимущественно за счет формирования дисперсной ячеистой структуры, повышения содержания пересыщенного вольфрамом твердого раствора $(Ti,W)C$ и выделения дисперсных частиц карбида W_2C . Повышение давления остаточной атмосферы от 0,4 до 1,3 кПа в камере при формировании плазменного потока обеспечивает увеличение глубины азотирования, сопровождаемое повышением микротвердости приповерхностного слоя до 40 ГПа [2–А, 4–А, 13–А, 15–А, 18–А–20–А, 23–А, 25–А, 28–А].

6. Легирование цирконием и титаном приповерхностного слоя композиционного твердого сплава WC-TiC-Co при воздействии компрессионных плазменных потоков с плотностью поглощенной энергии 35 – 50 Дж/см² позволяет повысить микротвердость поверхностного слоя до 37 – 39 ГПа. Обнаруженное упрочнение легированного слоя обусловлено дисперсной ячеистой структурой и твердорастворным механизмом (за счет формирования твердых растворов (Ti,W,Zr)C, W(Zr), W(Ti)), а также частицами твердой карбидной фазы W₂C. Увеличение микротвердости до 43 ГПа в легированном титаном приповерхностном слое твердого сплава происходит при повышении давления остаточной атмосферы азота до 1,3 кПа за счет дополнительного формирования карбонитрида титана TiCN [5–А, 14–А, 16–А, 27–А, 29–А, 30–А].

Рекомендации по практическому использованию результатов

На основе результатов проведенных исследований был выбран оптимизированный режим обработки компрессионными плазменными потоками ножей фрезерного дереворежущего инструмента, изготовленных из твердого сплава марки T15K6. Производственные испытания проходили в условиях производства на предприятии Городищенская мебельная фабрика (ф-л ЗАО «Холдинговая компания Пинскдрев») и показали, что период стойкости ножей, обработанных компрессионными плазменными потоками, больше в сравнении с не обработанными ножами в 2 – 3 раза.

Таким образом, результаты по повышению прочностных свойств твердых сплавов после воздействия компрессионных плазменных потоков представляют интерес и могут быть использованы на металло- и деревообрабатывающих предприятиях Республики Беларусь.

Результаты, полученные при выполнении диссертационной работы, используются в образовательном процессе на кафедре физики твердого тела и нанотехнологий физического факультета Белорусского государственного университета.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ СОИСКАТЕЛЯ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ

*Статьи в научных рецензируемых изданиях в соответствии с п. 19
Положения о присуждении ученых степеней и присвоении ученых званий*

1–А. Структурно-фазовые превращения в поверхностных слоях твердого сплава в результате воздействия сильноточными электронными пучками / В. В. Углов, Н. Н. Коваль, А. К. Кулешов, Ю. Ф. Иванов, А. Д. Тересов, Е. А. Солдатенко (Крутилина) // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. – 2011. – № 4. – С. 50–58.

2–А. Фазообразование в твердом сплаве на основе карбидов вольфрама и титана и системе Мо покрытие – твердый сплав при воздействии компрессионных плазменных потоков / В. В. Углов, А. К. Кулешов, Е. А. Солдатенко, В. М. Асташинский, А. М. Кузьмицкий // Физика и химия обработки материалов. – 2012. – № 2. – С. 18–25.

3–А. Structure, phase composition and mechanical properties of hard alloy treated by intense pulsed electron beams / V. V. Uglov, A. K. Kuleshov, E. A. Soldatenko (Krutsilina), N. N. Koval, Yu. F. Ivanov, A. D. Teresov // Surface and Coatings Technology. – 2012. – Vol. 206. – P. 2972–2976.

4–А. Changes of T15K6 hard alloy structure and phase composition as a result of nitriding by compressive plasma flows / V. V. Uglov, A. K. Kuleshov, E. A. Krutsilina, V. M. Astashinski, A. M. Kuzmitski // Известия высших учебных заведений. Физика. – 2012. – Т. 55, № 12/3. – С. 182–185.

5–А. Модификация поверхностных слоев твердого сплава T15K6 с покрытиями из титана и циркония под воздействием компрессионных плазменных потоков / В. В. Углов, А. К. Кулешов, Е. А. Крутилина, В. М. Асташинский, А. М. Кузьмицкий // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. – 2013. – № 4. – С. 81–87.

6–А. Микроструктура, теплоперенос и плавление слоев твердого сплава, содержащего карбиды Ti и W, в условиях мощной импульсной обработки / А. К. Кулешов, А. С. Якушевич, В. В. Углов, В. М. Асташинский, Н. Н. Коваль, Ю. Ф. Иванов, Е. А. Крутилина // Известия высших учебных заведений. Порошковая металлургия и функциональные покрытия. – 2014. – № 1. – С. 55–62.

7–А. Теплоперенос в поверхностном слое гетерогенного твердого сплава T15K6 при импульсном высокоэнергетическом воздействии / В. В. Углов, А. К. Кулешов, Е. А. Крутилина, Н. Н. Коваль, В. И. Шиманский, Ю. Ф. Иванов // Известия высших учебных заведений. Физика. – 2020. – № 4. – С. 144–149.

8–А. Солдатенко (Крутилина) Е. А. Влияние плотности энергии электронных пучков на структуру и микротвердость твердого сплава // Физика конденсированного состояния: материалы XVIII респ. науч. конф. аспирантов, магистрантов и студентов, Гродно, 21-23 апреля 2010 г. / Мин. обр. Респ. Бел., ГрГУ имени Я. Купалы; редкол.: Е. А. Ровба [и др.]. – Гродно, 2010. – С. 320–322.

9–А. Фазаобразование в твердом сплаве Т15К6 в результате воздействия сильноточными электронными пучками / В. В. Углов, Н. Н. Коваль, А. К. Кулешов, Ю. Ф. Иванов, А. Д. Тересов, Е. А. Солдатенко (Крутилина) // Радиационная физика твердого тела: труды XX Междунар. совещания, Севастополь, 5–10 июля 2010 г. В 2 т. / Мин. обр. и науки РФ, НИИ перспективных материалов и технологий Моск. гос. ин-та электроники и математики (Технич. ун-та); редкол.: Г. Г. Бондаренко [и др.]. – М., 2010. – Т. 2. – С. 732–739.

10–А. Солдатенко (Крутилина) Е. А. Структура и микротвердость твердого сплава в зависимости от длительности импульсов сильноточными электронными пучками // Физика конденсированного состояния: материалы XIX респ. науч. конф. аспирантов, магистрантов и студентов, Гродно, 19-20 апреля 2011 г. / Мин. обр. Респ. Бел., ГрГУ имени Я. Купалы; редкол.: Е. А. Ровба [и др.]. – Гродно, 2011. – С. 341–343.

11–А. Структурно-фазовые изменения в поверхностных слоях твердого сплава Т15К6 при воздействии высокоинтенсивными сильноточными электронными пучками / А. К. Кулешов, Е. А. Солдатенко (Крутилина), Н. Н. Коваль, Ю. Ф. Иванов, А. Д. Тересов, Ю. А. Колубаева // Радиационная физика твердого тела: труды XXI Междунар. конф., Севастополь, 22-27 августа 2011 г. В 2 т. / Мин. обр. и науки РФ, ФГБНУ «НИИ перспективных материалов и технологий», Моск. гос. ин-т электроники и математики (Технич. ун-т); под ред. Г. Г. Бондаренко. – Москва, 2011. – Т. 2. – С. 353–362.

12–А. Солдатенко (Крутилина) Е. А., Колубаева Ю. А. Влияние плотности энергии и длительности импульса сильноточного электронного пучка на внутреннюю структуру твердого сплава Т15К6 // Взаимодействие излучения с твердым телом: материалы 9-й Междунар. конф., Минск, 20-22 сентября 2011 г. / Бел. гос. ун-т, НАН Беларуси, Мин. обр. Респ. Бел., ГКНТ, БРФФИ; редкол.: В. М. Анищик [и др.]. – Минск, 2011. – С. 83–85.

13–А. Модификация поверхностных слоев твердых сплавов компрессионными плазменными потоками / В. В. Углов, В. М. Асташинский, А. К. Кулешов, Е. А. Солдатенко (Крутилина), А. М. Кузьмицкий // Взаимодействие излучения с твердым телом: материалы 9-й Междунар. конф., Минск, 20–22 сентября 2011 г. / Бел. гос. ун-т, НАН Беларуси, Мин. обр.

Респ. Бел., ГКНТ, БРФФИ; редкол.: В. М. Анищик [и др.]. – Минск, 2011. – С. 278–280.

14–А. Влияние параметров компрессионных плазменных потоков на структуру и фазовый состав системы титановое покрытие – твердый сплав Ti5K6 / В. В. Углов, А. К. Кулешов, Е. А. Крутилина, В. М. Асташинский, А. М. Кузьмицкий // Радиационная физика твердого тела: труды XXII Междунар. конф., Севастополь, 9–14 июля 2012 г. / Мин. обр. и науки РФ, ФГБНУ «НИИ перспектив. материалов и технологий», Моск. ин-т электроники и математики, НИУ «Высшая школа экономики»; под ред. Г. Г. Бондаренко. – М., 2012. – С. 297–306.

15–А. Modification of WC-TiC-Co hard alloy surface layers by compressive plasma flows and low-energy high-current electron beams / V. V. Uglov, A. K. Kuleshov, V. M. Anisichik, E. A. Krutisilina, V. M. Astashinski, A. M. Kuzmitski, N. N. Koval, Yu. F. Ivanov // Plasma physics and Plasma technology: proc. of the 7th Internat. Conf., Minsk, 17–21 September 2012 / The State Scientific Institution «B.I. Stepanov Institute of Physics of the National Academy of Sciences of Belarus», National Academy of Sciences Belarus; edit: V.M. Astashinski [et. al.]. – Minsk, 2012. – P. 324–327.

16–А. Фазовый и элементный состав поверхностных слоев твердого сплава с титановым покрытием после воздействия компрессионными плазменными потоками / В. В. Углов, А. К. Кулешов, Е. А. Крутилина, В. М. Асташинский, А. М. Кузьмицкий // Радиационная физика твердого тела: труды XXIII Междунар. конф., Севастополь, 8–13 июля 2013 г. / ФГБНУ «НИИ перспектив. материалов и технологий», НИУ «Высшая школа экономики»; под ред. Г. Г. Бондаренко. – М., 2013. – С. 502–509.

17–А. Изменение фазового состава системы циркониевое покрытие – твердый сплав в зависимости от параметров воздействия компрессионными плазменными потоками / А. К. Кулешов, Е. А. Крутилина, А. М. Кузьмицкий, Х. Комста, Ю. А. Данилович // Взаимодействие излучения с твердым телом: материалы 10-й Междунар. конф., Минск, 24–27 сентября 2013 г. / БГУ, НАН Беларуси, Мин. обр. Респ. Бел., БРФФИ; редкол.: В. М. Анищик [и др.]. – Минск, 2013. – С. 309–311.

18–А. Семак В. С., Крутилина Е. А. Влияние давления остаточной атмосферы азота на фазовый состав и микротвердость поверхностных слоев твердого сплава при воздействии компрессионными плазменными потоками // Физика конденсированного состояния: материалы XXII респ. науч. конф. аспирантов, магистрантов и студентов, Гродно, 17–18 апреля 2014 г. / ГрГУ имени Я. Купалы, редкол.: Е. А. Ровба [и др.]. – Гродно, 2014. – С. 201–202.

19–А. Упрочнение твердого сплава после воздействия компрессионными

плазменными потоками в атмосфере азота / А. К. Кулешов, Е. А. Крутилина, В. В. Углов, А. М. Кузьмицкий, В. С. Семак // Современные методы и технологии создания и обработки материалов: сб. науч. тр. IX Междунар. науч.-техн. конф., Минск, 17–19 сентября 2014 г. В 3 ч. / ФТИ НАН Беларуси; редкол.: С. А. Астапчик [и др.]. – Минск, 2014. – Ч. 2. – С. 178–184.

20–А. Азотирование сплавленных поверхностных слоев твердого сплава под воздействием компрессионных плазменных потоков / А. К. Кулешов, Н. Н. Черенда, Е. А. Крутилина, В. М. Асташинский, В. М. Анищик, М. Опеляк, Ч. Карват // Взаимодействие излучения с твердым телом: материалы 11-й Междунар. конф., Минск, 23–25 сентября 2015 г. / БГУ, НАН Беларуси, Мин. обр. Респ. Бел., БРФФИ; редкол.: В. М. Анищик [и др.]. – Минск, 2015. – С. 59–61.

21–А. Эрозия поверхностного слоя твердого сплава T15K6 в результате воздействия компрессионных плазменных потоков / Е. А. Крутилина, М. И. Терешко, В. И. Шиманский, Н. Н. Черенда, В. В. Углов, В. М. Асташинский, А. М. Кузьмицкий // Радиационная физика твердого тела: труды XXXI Междунар. совещания, Севастополь, 5–10 июля 2021 г. / ФГБНУ «НИИ перспектив. материалов и технологий»; редкол.: Г. Г. Бондаренко [и др.]. – М., 2021. – С. 376–383.

22–А. Крутилина Е. А., Терешко М. И. Окислительная стабильность твердого сплава T15K6, легированного цирконием в результате высокоэнергетического плазменного воздействия // Взаимодействие излучения с твердым телом: материалы 15-й Междунар. конф., Минск, 26–29 сентября 2023 г. / Бел. гос. ун-т; редкол.: В. В. Углов [и др.]. – Минск, 2023. – С. 261–263.

Тезисы докладов

23–А. Структурные изменения в поверхностных слоях твердого сплава при облучении сильноточными электронными пучками и компрессионными плазменными потоками / В. В. Углов, Н. Н. Коваль, А. К. Кулешов, Ю. Ф. Иванов, Е. А. Солдатенко (Крутилина) // Тезисы докладов XL Междунар. Тулиновской конф. по физике взаимодействия заряженных частиц с кристаллами, Москва, 25–27 мая 2010 г. / Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Научно-исследовательский институт ядерной физики им. Д. В. Скобельцына; редкол.: М.И. Панасюк [и др.]. – М., 2010. – С. 172.

24–А. Structure, phase composition and mechanical properties of “nitride coatings – hard alloy” systems after low-energy high-current electron beams influence / V. V. Uglov, N. N. Koval, A. K. Kuleshov, Y. F. Ivanov, E. A. Soldatenko (Krutsilina) // Modification of Materials with Particle Beams and

Plasma Flows: proc. of the 10th Internat. Conf., Tomsk, September 19–24, 2010 / National Research Tomsk Polytechnic University, Institute of High Current Electronics SB RAS. – Tomsk, 2010. – P. 332–335.

25–А. Фазообразование в твердом сплаве и системе молибденовое покрытие – твердый сплав в результате воздействия компрессионными плазменными потоками / В. В. Углов, А. К. Кулешов, Е. А. Солдатенко (Крутилина), В. М. Асташинский, А. М. Кузьмицкий // Тезисы докладов XLI Междунар. Тулиновской конф. по физике взаимодействия заряженных частиц с кристаллами, Москва, 31 мая – 2 июня 2011 г. / Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова, Научно-исследовательский институт ядерной физики им. Д. В. Скобельцына; редкол.: М. И. Панасюк [и др.]. – М., 2011. – С. 122.

26–А. Влияние плотности энергии сильноточных электронных пучков на структуру и механические характеристики твердого сплава Т15К6 / Е. А. Солдатенко, В. В. Углов, А. К. Кулешов // “НИРС – 2011”: сб. тезисов докладов Республиканской научной конференции студентов и аспирантов высших учебных заведений Республики Беларусь, Минск, 18 октября 2011 г. / БГУ, БНТУ, БГАТУ, БГТУ, БГУИР, «Белорусский государственный университет культуры и искусств», «Витебский государственный технологический университет». – Минск, 2011. – С. 28.

27–А. Структурно-фазовое состояние системы титановое покрытие – твердый сплав в зависимости от параметров воздействия компрессионными плазменными потоками / В. В. Углов, А. К. Кулешов, Е. А. Крутилина, В. М. Асташинский, А. М. Кузьмицкий // Тезисы докладов XLII Междунар. Тулиновской конференции по физике взаимодействия заряженных частиц с кристаллами, Москва, 29–31 мая 2012 г. / Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова, Научно-исследовательский институт ядерной физики им. Д. В. Скобельцына; редкол.: М. И. Панасюк [и др.]. – М., 2012. – С. 161.

28–А. Changes of T15K6 hard alloy structure and phase composition as a result of nitriding by compressive plasma flows / V.V. Uglov, A.K. Kuleshov, V.M. Anischik, E.A. Krutsilina, V.M. Astashinski, A.M. Kuzmitski // Radiation Physics, High Current Electronics and Modification of Materials: abstr. of 3-rd International Congress, Tomsk, Russia, September 17–21, 2012 / National Research Tomsk Polytechnic University, Institute of High Current Electronics SB RAS. – Tomsk, 2012. – P. 418.

29–А. Фазовый и элементный состав системы Zr/твердый сплав после воздействия компрессионными плазменными потоками / А. К. Кулешов, Е. А. Крутилина, В. В. Углов, В. М. Асташинский, А. М. Кузьмицкий

// Тезисы докладов XLIV Междунар. Тулиновской конференции по физике взаимодействия заряженных частиц с кристаллами, Москва, 27–29 мая 2014 г. / Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова, Научно-исследовательский институт ядерной физики им. Д. В. Скобельцына; редкол.: М.И. Панасюк [и др.]. – М., 2014. – С. 111.

30–А. Influence of compressive plasma flows treatment parameters on structure and microhardness of the Zr coating/T15K6 hard alloy system / E. A. Kruttilina, V. V. Uglov, A. K. Kuleshov, V. M. Astashynski, A. M. Kuzmitski // Radiation Physics, High Current Electronics and Modification of Materials: abstr. of the 4th International Congress, Tomsk, Russia, September 21–26, 2014 / National Research Tomsk Polytechnic University, Institute of High Current Electronics SB RAS. – Tomsk, 2014 – P. 300.

31–А. Высокотемпературный теплоперенос в твердом сплаве в условиях воздействия концентрированными потоками энергии / В. В. Углов, Е. А. Крутилина, В. И. Шиманский, А. К. Кулешов, В. М. Асташинский, А. М. Кузьмицкий // Тезисы докладов и сообщений XVI Минского международного форума по тепло- и массообмену, Минск, 16–19 мая 2022 г. / Ин-т тепло- и массообмена им. А. В. Лыкова НАН Беларуси; редкол.: О.Г. Пенязьков [и др.]. – URL: <https://www.itmo.by/conferences/abstracts/mif-16/mif16.pdf> (дата обращения: 30.12.2021).

РЕЗЮМЕ

Крутилина Евгения Александровна

Микроструктура и фазовый состав композиционного твердого сплава WC-TiC-Co марки T15K6, модифицированного импульсными компрессионными плазменными потоками и сильноточными электронными пучками

Ключевые слова: компрессионные плазменные потоки, сильноточные электронные пучки, твердый сплав, легированные слои, гомогенизация, азотирование, твердые растворы, микроструктура, фазовый состав, эрозия, жаростойкость, микротвердость, упрочнение.

Цель работы: выявление закономерностей, особенностей и механизмов изменений микроструктуры, фазового и элементного составов, а также микротвердости и жаростойкости композиционного твердого сплава WC-TiC-Co марки T15K6 после воздействия компрессионных плазменных потоков и сильноточных электронных пучков.

Методы исследования: растровая электронная микроскопия, рентгеноспектральный микроанализ, Оже-электронная спектроскопия, рентгеноструктурный анализ, измерение микротвердости по методике Виккерса, взвешивание.

Полученные результаты и их новизна. Впервые воздействием компрессионных плазменных потоков и сильноточных электронных пучков с длительностью импульса 100 мкс и плотностью поглощенной энергии 20–80 Дж/см² в твердом сплаве марки T15K6 был сформирован приповерхностный слой толщиной 4–14 мкм с дисперсной (0,1–0,3 мкм) структурой, который характеризуется однородным элементным составом и состоит из пересыщенного вольфрамом (концентрация вольфрама увеличивается от 44 до 58 ат.%) твердого раствора (Ti,W)C и карбида W₂C. Обнаружено диффузионное обогащение азотом поверхностного слоя при воздействии компрессионных плазменных потоков, приводящее к приповерхностной сегрегации титана и кобальта. Впервые воздействием компрессионных плазменных потоков с плотностью поглощенной энергии 35–50 Дж/см² при предварительном нанесении покрытия Zr толщиной 2 мкм в твердом сплаве T15K6 сформирован дисперсный слой толщиной 4 – 6 мкм, равномерно легированный цирконием до 2–25 ат. %. Микротвердость модифицированного сильноточными электронными пучками и компрессионными плазменными потоками поверхностного слоя увеличивается в 2,3–2,5 раз. Дополнительное легирование цирконием и титаном повышает микротвердость до 3 раз.

Область применения. Результаты по повышению прочностных свойств твердых сплавов после воздействия компрессионных плазменных потоков и сильноточных электронных пучков могут быть использованы на металло- и деревообрабатывающих предприятиях Республики Беларусь.

РЭЗІЮМЭ

Круціліна Яўгенія Аляксандраўна

Мікраструктура і фазавы склад кампазіцыйнага цвёрдага сплаву WC-TiC-Co маркі T15K6, мадыфіцыраванага імпульснымі кампрэсійнымі плазменымі патокамі і моцнатокавымі электроннымі пучкамі

Ключавыя словы: кампрэсійныя плазменныя патокі, моцнатокавыя электронныя пучкі, цвёрды сплаў, легіраваныя слаі, гамагенізацыя, азатаванне, цвёрдыя растворы, мікраструктура, фазавы склад, эрозія, цеплатрываласць, мікрацвёрдасць, умацаванне.

Мэта работы: выяўленне заканамернасцяў, асаблівасцяў і механізмаў змянення мікраструктуры, фазавога і элементнага саставаў, а таксама мікрацвёрдасці і цеплатрываласці кампазіцыйнага цвёрдага сплава WC-TiC-Co пасля ўздзеяння кампрэсійных плазменных патокаў і моцнатокавых электронных пучкоў.

Метады даследвання: растравая электронная мікраскапія, рэнтгенаспектральны мікрааналіз, Ажэ-электронная спектраскапія, рэнтгенаструктурны аналіз, вымярэнне мікрацвёрдасці па метадыцы Вікерса, узважванне.

Атрыманыя вынікі і іх навізна. Упершыню ўздзеяннем кампрэсійнымі плазменымі патокамі і моцнатокавымі электроннымі пучкамі з працягласцю імпульсу 100 мкс і шчыльнасцю паглынутай энергіі 20–80 Дж/см² у цвёрдым сплаве маркі T15K6 быў сфарміраваны паверхневы слой таўшчынёй 4–14 мкм з дысперснай (0,1–0,3 мкм) структурай, які складаецца з перасычанага вальфрама (канцэнтрацыя вальфраму павялічваецца ад 44 да 58 ат.%) цвёрдага раствора (Ti,W)C і карбіду W₂C. Выяўлена дыфузійнае ўзбагачэнне азотам паверхневага слоя пры ўздзеянні на яго кампрэсійнымі плазменымі патокамі, якое прыводзіць да прыпаверхневай сэгрэгацыі тытана і кобальту. Упершыню ўздзеяннем кампрэсійных плазменных патокаў з шчыльнасцю паглынутай энергіі 35–50 Дж/см² пры папярэднім нанясенні пакрыцця Zr таўшчынёй 2 мкм у цвёрдым сплаве T15K6 сфармаваны дысперсны паверхневы слой таўшчынёй 4–6 мкм, аднародна легіраваны цырконіем да 2–25 ат.%. Мікрацвёрдасць мадыфікаванага моцнатокавымі электроннымі пучкамі і кампрэсійнымі плазменымі патокамі паверхневага слоя павялічваецца ў 2,3–2,5 разоў. Дадатковае легіраванне цырконіем і тытанам павышае мікрацвёрдасць да 3 разоў.

Галіна прымянення. Вынікі па павышэнню трываласці цвёрдых сплаваў пасля ўздзеяння кампрэсійных плазменных патокаў і моцнатокавых электронных пучкоў могуць быць выкарыстаны на метала- і дрэваапрацоўчых прадпрыемствах Рэспублікі Беларусь.

SUMMARY

Yauheniya A. Krutsilina

Microstructure and phase composition of composite WC-TiC-Co hard alloy T15K6 modified with pulsed compression plasma flows and high-current electron beams exposures

Keywords: compression plasma flows, high-current electron beams, hard alloy, alloying layers, homogenization, nitriding, solid solutions, microstructure, phase composition, erosion, heat resistance, microhardness, hardening.

Objective of the research: is to determine the regularities and peculiarities of the structure, phase and elemental composition changes, microhardness and heat resistance of the surface layers of the WC-TiC-Co composite hard alloy after compression plasma flows and high-current electron beams exposure.

Methods of investigation: scanning electron microscopy, energy-dispersive X-ray analysis, Auger electron spectroscopy, X-ray diffraction, Vickers microhardness measurement, weighing.

The obtained results and their novelty. For the first time, under the influence of compression plasma flows and high-current electron beams with a pulse duration of 100 μs and an absorbed energy density of 20–80 J/cm², a surface layer (thickness of 4–14 μm) with a dispersed (0.1–0.3 μm) structure, which is characterized by homogeneous elemental composition and consists of a (Ti,W)C solid solution supersaturated with tungsten (tungsten concentration increases from 44 to 58 at.%) and W₂C carbide. A surface layer diffusion enrichment with nitrogen was discovered when it was exposed to compression plasma flows, leading to near-surface titanium and cobalt segregation. For the first time, under the influence of compression plasma flows with an absorbed energy density of 35–50 J/cm², with the preliminary Zr coating deposition (thickness of 2 μm) on the T15K6 hard alloy, a dispersed layer (thickness of 4–6 μm) was formed, uniformly alloyed with zirconium up to 2–25 at. %. The microhardness of the surface layer modified by high-current electron beams and compression plasma flows increases by 2.3–2.5 times. Additional alloying with zirconium and titanium increases microhardness up to 3 times.

Recommendations for application. The results of the hard alloys strength properties increasing after compression plasma flows and high-current electron beams exposures can be used in metal and woodworking enterprises of the Republic of Belarus.



Подписано в печать 20.12.2024. Формат 60×84 ¹/₁₆. Бумага офсетная.
Цифровая печать. Усл. печ. л. 1,63. Уч.-изд. л. 1,75.
Тираж 70 экз. Заказ 289.

Отпечатано с оригинала-макета заказчика
в республиканском унитарном предприятии
«Издательский центр Белорусского государственного университета».
Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя,
распространителя печатных изданий № 2/63 от 19.03.2014.
Ул. Красноармейская, 6, 220030, Минск.