

МОДИФИКАЦИЯ МЕТАЛЛОРЕЖУЩИХ ПЛАСТИН ИЗ БЕЗВОЛЬФРАМОВОГО ТВЕРДОГО СПЛАВА МАРКИ КНТ16 НЕПРЕРЫВНЫМИ ИОННЫМИ ПУЧКАМИ

Данная работа посвящена проблеме разработки технологических операций, направленных на совершенствование структуры и свойств и, как следствие, на расширение области применения металлорежущих пластин из безвольфрамовых твердых сплавов. Поиск альтернативных аналогов традиционным вольфрамокобальтовым твердым сплавам является актуальной задачей современного материаловедения, что обусловлено высокой стоимостью и дефицитом их компонентов. В данной работе проводится исследование влияния непрерывных ионных пучков различного состава на изменение морфологии, механических свойств и эксплуатационных характеристик металлорежущих пластин из безвольфрамового твердого сплава марки КНТ16 (TiCN-Ni-Mo). Обнаружено, что воздействие непрерывных ионных пучков приводит к существенному изменению износостойкости режущих пластин при проведении операций токарной обработки среднеуглеродистой стали 40ХН. Установлен рациональный состав ионного пучка, при котором режущая пластина подвергается наименьшему износу после завершения цикла испытаний. С применением методов растровой электронной микроскопии и сканирующей зондовой микроскопии проведено исследование микрорельефа и морфологии поверхности образцов.

Ключевые слова: безвольфрамовые твердые сплавы, непрерывный ионный пучок, морфология поверхности, токарная обработка, сканирующая и атомно-силовая микроскопия.

Введение. Безвольфрамовые твердые сплавы (БВТС) являются перспективным аналогом традиционных вольфрамокобальтовых твердых сплавов (ВКТС) для производства металлорежущего инструмента [1–2]. Причиной их разработки и активного внедрения в промышленность является дефицит и высокая стоимость вольфрама и кобальта [3]. Проведенные в последние годы исследования [4–6] показали, что наиболее перспективным аналогом карбида вольфрама (WC) является карбид или карбонитрид титана TiC(TiCN). Данная группа сплавов, наиболее распространенными в России из которых являются марки: ТН20 и КНТ16, обладают соизмеримым с большинством ВКТС значением твердости, кроме того, они менее склонны к адгезионно-

му взаимодействию с обрабатываемым материалом при резании. Эти преимущества способствовали активному внедрению БВТС на основе TiC/TiCN в производство металлорежущих пластин, предназначенных для чистового и получистового точения углеродистых и низколегированных сталей [7]. Вместе с тем БВТС обладают существенными недостатками, что снижают их ресурс работы и ограничивают область применения. К ним относятся: низкое значение предела прочности на изгиб, ударной вязкости и теплопроводности.

Для устранения данных недостатков и приближения свойств БВТС к традиционным ВКТС проводятся исследования, направленные на совершенствование их состава [8–9], технологии их

изготовления [10–11] и нанесение защитных покрытий [12].

Другой группой перспективных исследований, направленных на совершенствование структуры и свойств твердых сплавов, является обработка их поверхностных слоёв пучками заряженных частиц — ионов и электронов различной интенсивности и длительности. В результате данных видов воздействия тонкие поверхностные слои облучаемых материалов могут претерпевать существенные изменения фазового и химического состава, морфологии и структуры, что сопровождается изменением их физико-механических свойств [13].

Технология радиационно-пучкового модифицирования хорошо себя зарекомендовала в области модифицирования структуры и свойств традиционных ВКТС. В работе [14] показано влияния воздействия импульсных ионных пучков наносекундной длительности на износостойкость металлорежущих пластин из сплавов систем WC-Co и WC-TiC-Co при проведении токарной обработки жаропрочных хромоникелевых сплавов. Идентичные исследования [15] проводились и по модифицированию ВКТС сильноточными электронными пучками (СЭП). Помимо данных видов воздействия большой интерес представляет и низкоэнергетическая высокодозная ионная имплантация. Так, например, в работе [16] показано что ионная имплантация пучками $Ag^+ + Zr^+$ и $N^+ + Ti^+$ приводит к существенному повышению износостойкости при резании различных сплавов и коррозионной стойкости ВКТС марки ВК6.

Несмотря на большое количество работ в области модификации структуры и свойств традиционных ВКТС пучками заряженных частиц, которые открыли определенные перспективы для внедрения данных технологий в массовую промышленность идентичных исследований, объектом в которых являлись БВТС, крайне недостаточно, однако они представляют большой научно-практический интерес.

Целью данной работы является исследование морфологии, состава и износостойкости при точении углеродистых сталей безвольфрамового твердого сплава марки КНТ16 (TiCN-Ni-Mo) после воздействия непрерывных ионных пучков (НПИ) составов $Ag^+ + Zr^+$ и $N^+ + Ti^+$.

Материалы и методы. В качестве объекта исследования были использованы трёхгранные съёмные металлорежущие пластины из БВТС марки КНТ16 (TiCN-Ni-Mo), химический состав и область применения которых нормированы в ГОСТ 26530-85.

Ионно-лучевое модифицирование образцов непрерывными газометаллическими ионными пучками проводилось на установке для ионной имплантации «КОМПОЗИТ» (ОНЦ СО РАН). Режимы облучения были следующие: энергия ионов $E \approx 20$ кэВ, доза (флюенс) облучения $D \approx 5 \cdot 10^{17}$ ион/см². Состав пучков: $Ag^+ + Zr^+$ и $N^+ + Ti^+$. Выбор данных составов пучков обусловлен тем, что в настоящий момент существует две наиболее общепринятые теории изменения свойств твердосплавных инструментов после ионно-лучевой модификации. В работе [17] излагается мнение, что основным механизмом упрочнения металлов при ионной имплантации является — деформационный. С этой точки зрения, были выбраны тяжелые ионы аргона и циркония. По другому мнению, изложенному в работе [18], основной вклад в повышение механических характеристик в результате ионного облучения вносит образование твердых и устойчивых химических со-

единений. Поэтому в качестве второго состава пучка были выбраны более химически активные ионы азота и титана.

Стойкостные испытания исходных и облученных пластин проводились на токарно-винторезном станке 1К62. Токарной обработке подвергались прутки из стали 40ХН (твёрдость материала в состоянии поставки составляла 19 HRC) диаметром $d = 55$ мм и длиной $l = 0,8$ м. Режимы точения были следующие: $V = 70$ м/мин; глубина резания $t = 1$ мм; подача $S = 0,3$ мм/об.

Микротвёрдость образцов определялась с использованием микротвердомера Shimadzu HNV-2 (Shimadzu, Япония). Нагрузка на индентор составляла 0,98 Н. Число испытаний для определения среднего значения микротвердости каждого из образцов составляло 9.

Оценка характера разрушения пластин после проведения токарных испытаний проводилась с применением оптического микроскопа ZEISS Axio Observer.

Для исследования морфологии поверхности образцов до и после ионно-лучевой обработки был использован метод растровой электронной микроскопии (РЭМ) на электронном микроскопе JEOL JCM-5700 (Омский государственный технический университет). Химический состав поверхностных слоёв БВТС был определён с использованием метода энергодисперсионного анализа (ЭДА) при использовании приставки JED-2300, входящей в состав электронного микроскопа.

Исследование топографии поверхности проводилось с использованием метода сканирующей зондовой микроскопии (СЗМ) на микроскопе NTEGRA Prima (Омский государственный технический университет, г. Омск) в контактном режиме с применением зондовых датчиков CSG10 с жесткостью 0,5 Н/м.

Результаты экспериментов. После проведения токарной обработки были получены микрофотографии передних поверхностей металлорежущих пластин. Передняя поверхность исходной пластины (рис. 1) характеризуется наличием развитой лунки износа, длина которой составляет $\sim 0,3$ мм. Причина её образования, по всей видимости, связана с процессом адгезионного взаимодействия образующейся в процессе резания стружки и инструмента с последующим сходом стружки вместе с частицами инструмента. В данном случае износ передней поверхности пластины можно охарактеризовать как критический.

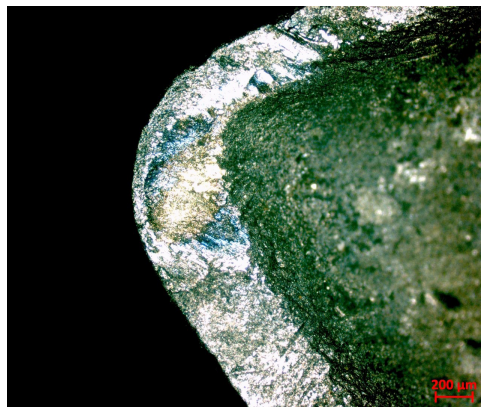


Рис. 1. Износ передней поверхности исходной пластины из сплава КНТ16 после точения стали 40ХН

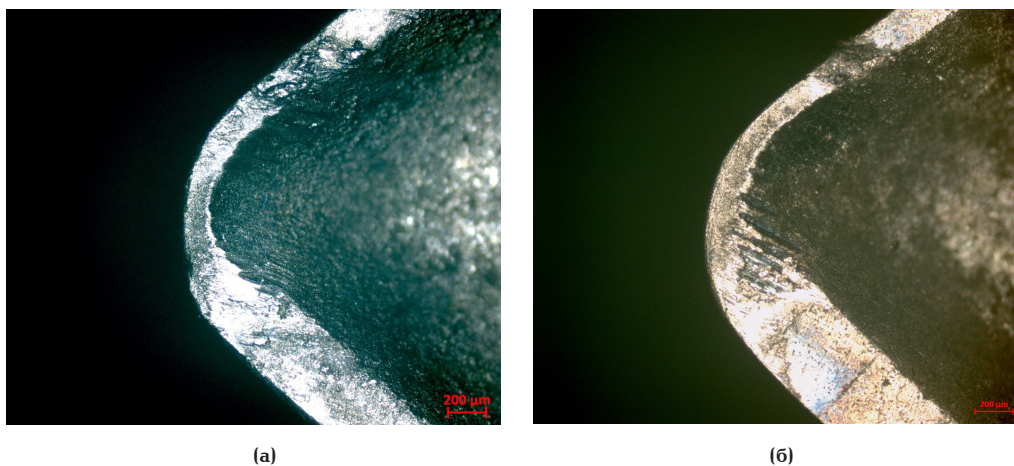


Рис. 2. Износ передних поверхностей пластин из сплава КНТ16 после точения стали 40ХН: (а) — после имплантации $\text{Ag}^+ + \text{Zr}^+$, (б) — после имплантации $\text{N}^+ + \text{Ti}^+$

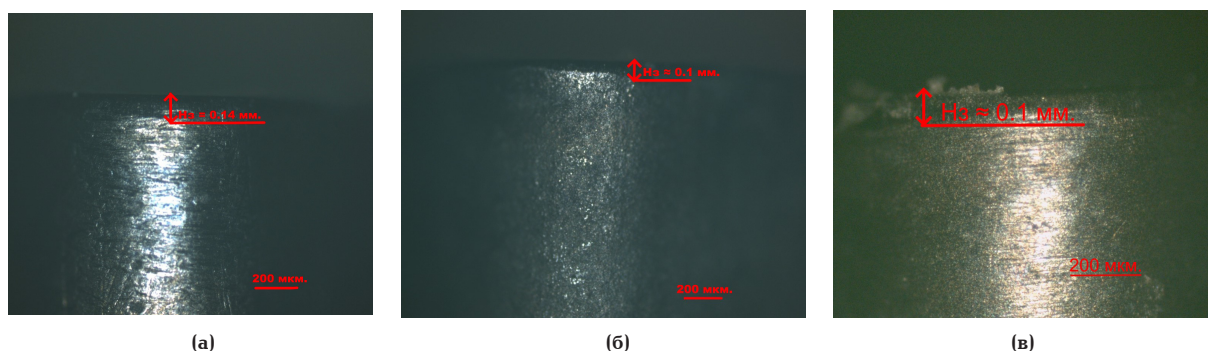


Рис. 3. Износ задних поверхностей пластин из сплава КНТ16 после точения стали 40ХН: (а) — исходная, (б) — после имплантации $\text{Ag}^+ + \text{Zr}^+$, (в) — после имплантации $\text{N}^+ + \text{Ti}^+$

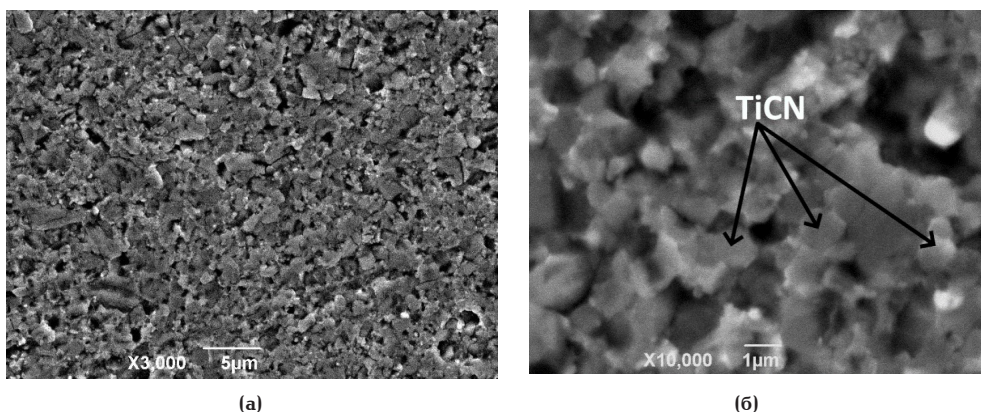


Рис. 4. РЭМ изображение поверхности исходного сплава КНТ16: (а) — $\times 3000$, (б) — $\times 10000$

На рис. 2 приведены идентичные микроизображения пластин, предварительно облученных НПИ $\text{Ag}^+ + \text{Zr}^+$ (рис. 2а) и $\text{N}^+ + \text{Ti}^+$ (рис. 2б). По изображениям видно, что ионно-лучевое модифицирование приводит к значительному снижению интенсивности изнашивания пластин. На передней поверхности пластины, облученной пучком $\text{Ag}^+ + \text{Zr}^+$, отсутствует лунка, а общее её состояние характеризуется лишь прохождением периода приработки. На передней поверхности пластины, облученной пучком $\text{N}^+ + \text{Ti}^+$, образуется лунка, однако её протяженность существенно меньше, чем у исходной.

При этом примечательным является тот факт, что задние поверхности пластин после проведения

испытаний были подвержены незначительному износу порядка 0,1–0,15 мм. Так, например, величина фаски износа по задней поверхности у не облученной пластины (рис. 3а) составила лишь ~ 0,14 мм, в то время как на передней поверхности длина лунки составляла критическое значение. Облучение НПИ (рис. 3б, в) приводит к незначительному уменьшению фаски износа на задней поверхности пластин.

При исследовании микротвердости исходного и облученных образцов было обнаружено, что воздействие газометаллического пучка $\text{Ag}^+ + \text{Zr}^+$ приводит к повышению среднего значения микротвердости ~ на 20 % (с 1420 до 1750 ед. HV). В результате

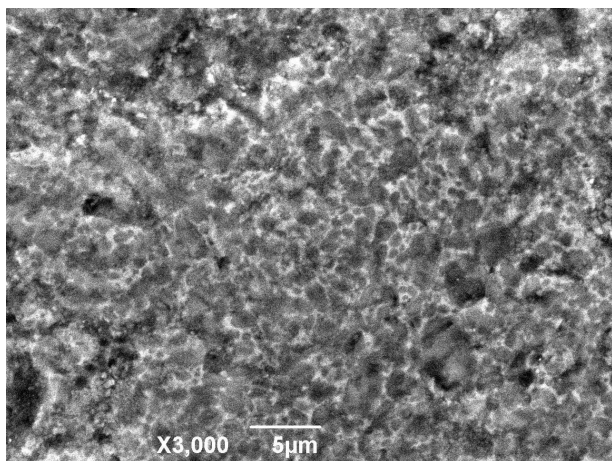


Рис. 5. РЭМ изображение поверхности сплава КНТ16 после имплантации ионов $N^+ + Ti^+$

воздействие пучка $N^+ + Ti^+$ значение микротвердости повышается незначительно (\sim до 1540 ед. HV). Предположительно, более существенное повышение микротвердости в результате выбора сравнительно тяжелых ионов $Ag^+ + Zr^+$ может быть связано с процессом деформационного упрочнения компонентов БВТС при ионной имплантации (образованием дефектной структуры).

Изображения поверхностей БВТС, полученные методом растровой электронной микроскопии, свидетельствуют о существенном изменении морфоло-

гии поверхности твердого сплава после ионно-лучевой обработки. Поверхность исходного образца (рис. 4а, б) представляет собой гетерогенную систему карбонитридных зёрен $TiCN$ и никель-молибденовой связки. Ввиду мелкого размера карбонитридных зёрен $TiCN$ (характерный размер составляет ~ 1 мкм.) их идентификация возможна лишь при весьма больших увеличениях (~ 10000 крат.). Помимо этого, по всей поверхности образца присутствуют поры размером $\sim 1-2$ мкм.

Воздействие непрерывного ионного пучка приводит к возможности наблюдения фазовых составляющих на поверхности БВТС при увеличении $\times 3000$ крат (рис. 5). В этом случае карбонитридная составляющая твердого сплава представляет собой тёмные зёрна округлой формы, а связка — светлые участки с достаточно равномерным распределением по поверхности образца. Помимо этого, в результате воздействия НИП уменьшается количество микропор, а их характерный размер остаётся без изменений. Такое изменение микрорельефа поверхности обусловлено процессом ионного распыления тонких поверхностных слоёв БВТС в процессе облучения.

Для получения количественных характеристик изменения топографии поверхности БВТС проводились СЗМ-исследования образцов. На рис. 6 представлены СЗМ — изображения поверхности исходного образца. Среднее значение шероховатости поверхности Sa , измеренное по полю 10×10 мкм, составило 234,9 нм. Номинальная площадь поверхности 129,8 мкм². На всей поверхности наблюдается

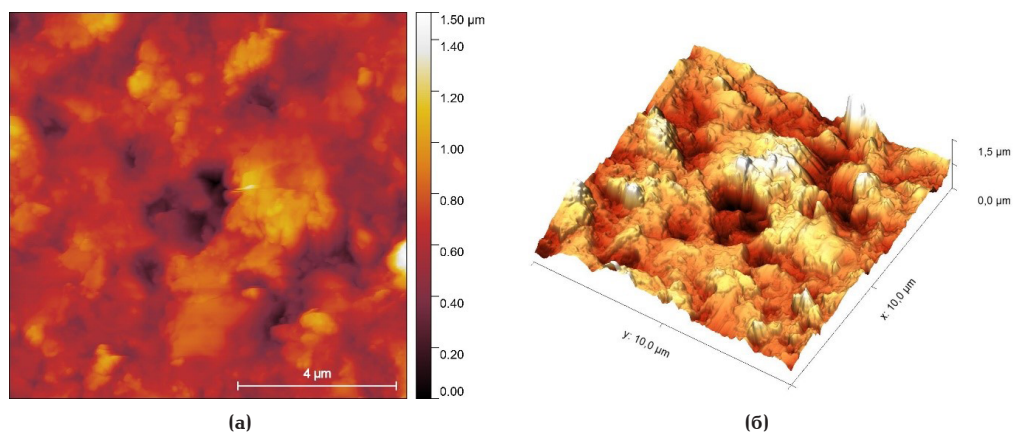


Рис. 6. АСМ-изображение поверхности исходного БВТС КНТ16: (а) — 2D, (б) — 3D

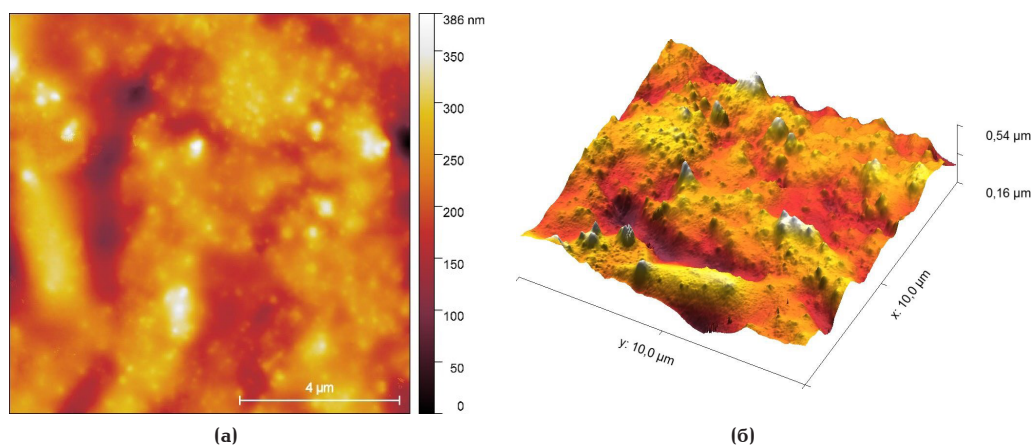


Рис. 7. АСМ-изображение поверхности БВТС КНТ16, облученного НИП $N^+ + Ti^+$: (а) — 2D, (б) — 3D

наличие большого количества равномерно распределенных макрозёрен, диаметр которых составляет $\sim 0,5-1$ мкм, а усредненная высота выступа относительно поверхности $\sim 0,2-0,4$ мкм. Очевидно, данные макрозёрна являются карбонитридным компонентом БВТС.

Воздействие непрерывного ионного пучка (рис. 7) приводит к существенному повышению количества зёрен TiCN на поверхности БВТС. При этом средние значения их диаметра и выступа относительно поверхности ниже, чем у зёрен исходного образца, и составляют $\sim 0,3$ и $0,2$ мкм соответственно. «Оголение» зёрненной фазы связано с процессом ионного травления никель-молибденовой связи в результате ионно-лучевого модифицирования.

Заключение. Таким образом, в данной работе с применением методов растровой электронной микроскопии и сканирующей зондовой микроскопии проведено исследование влияния облучения непрерывными газометаллическими ионными пучками составов: $Ag^+ + Zr^+$ и $N^+ + Ti^+$ на топографию и морфологию поверхностных слоёв БВТС марки КНТ16. Выявлено, что воздействие непрерывных ионных пучков приводит к формированию более развитого микрорельефа поверхности твердого сплава, что выражается в «оголении» карбонитридных зёрен TiCN в результате селективного распыления связующей никель-молибденовой связи. Установлено, что данный вид воздействия существенно повышает стойкостные характеристики металлорежущих пластин из БВТС при токарной обработке углеродистых сталей. При этом более предпочтительной, с точки зрения повышения ресурса работы пластин, является ионная имплантация тяжелыми ионами $Ag^+ + Zr^+$, причиной чего может служить процесс дефектообразования компонентов твердого сплава при внедрении ионов в их поверхностные слои. Данная теория также подтверждается повышением микротвердости БВТС.

Данное исследование позволяет утверждать, что модификация поверхностных слоёв безвольфрамовых твердых сплавов непрерывными ионными пучками является перспективным методом повышения их характеристик, что может позволить перейти к их более широкому применению в качестве материалов для изготовления металлорежущего инструмента.

Библиографический список

- Панов В. С. Безвольфрамовые твердые сплавы: аналитический обзор // *Материаловедение*. 2019. № 10. С. 33–39.
- Бурков П. В. Рентгенографические исследования структурных изменений твердых сплавов TiC–TiNi на разных стадиях технологического процесса // *Известия Томского политехнического университета*. 2004. Т. 307. С. 113–118.
- Акимов В. В., Бадамшин А. М., Несов С. Н. [и др.]. Изменение структурно-фазового состояния и физико-химических свойств безвольфрамовых твердых сплавов TiC–TiNi после различных видов ионно-лучевой обработки // *Омский научный вестник*. 2021. № 2 (176). С. 5–9. DOI: 10.25206/1813-8225-2021-176-5-9.
- Сивоха В. П., Миронов Ю. П., Рудай В. В. [и др.]. Структура и свойства композиционных материалов TiC–NiTi, легированных железом // *Журнал технической физики*. 2004. № 1 (74). С. 53–57.
- Акимов В. В. Механизм жидкофазного спекания твердых композитов TiC–TiNi // *Известия высших учебных заведений. Черная металлургия*. 2006. № 6. С. 33–35.
- Бурков П. В., Кульков С. Н. Оптимизация режимов горячего прессования сплавов TiC–NiTi // *Вестник Томского государственного педагогического университета*. 2004. № 6 (43). С. 71–75.
- Верещака А. А., Хожаев О. Повышение эксплуатационных характеристик инструмента из безвольфрамовых твердых сплавов с помощью наноструктурированных многослойно-композиционных покрытий // *Вестник Брянского государственного технического университета*. 2014. № 3 (43). С. 20–25.
- Крутский Ю. Л., Максимовский Е. А., Петров Р. В. [и др.]. Синтез карбида и диборида титана для металлообработки и получения керамики // *Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты)*. 2021. № 4(23). С. 155–166. DOI: 10.17212/1994-6309-2021-23.4-155-166.
- Акимов В. В. Исследование микротвердости безвольфрамовых твердых сплавов на основе карбида титана // *Вестник ИГТУ*. 2005. № 3 (23). С. 121–124.
- Агеева Е. В., Сабельников Б. Н., Колмыков В. И. [и др.]. Оптимизация процесса спекания диспергированных электроэрозией частиц сплава КНТ16 // *Известия Юго-Западного государственного университета*. Серия: Техника и технологии. 2022. №1 (12). С. 8–24.
- Янюшкин А. С., Якимов Н. П., Петров Н. П. [и др.]. Исследование поверхности безвольфрамового твердого сплава, шлифованного комбинированным методом // *Системы. Методы. Технологии*. 2009. № 2 (2). С. 70–77.
- Хижняк В. Г., Карпец М. В., Долгих В. Ю. Нанесение защитных покрытий на безвольфрамовые твердые сплавы // *Порошковая металлургия*. 2003. № 9. С. 118–123.
- Бадамшин А. М., Лептюк А. О. Исследование морфологии, химического состава и коррозионной стойкости твердого сплава TiC–NiTi, модифицированного мощным ионным пучком // *Омский научный вестник*. 2022. № 2 (182). С. 33–37. DOI: 10.25206/1813-8225-2022-182-33-37.
- Калистратова Н. П., Поleshchenko К. Н., Геринг Г. И. [и др.]. Модификация твердых сплавов мощными ионными пучками и послерадиационной термической обработкой // *Физика и химия обработки материалов*. 1999. № 1. С. 10–14.
- Поleshchenko К. Н., Вершинин Г. А., Геринг Г. И. [и др.]. Модифицирование структуры и свойств твердых сплавов системы WC–Co сильноточными пучками заряженных частиц // *Вестник Омского университета*. 1996. № 2. С. 39–43.
- Поleshchenko К. Н., Вершинин Г. А., Поворожнюк С. Н. [и др.]. Износостойкость твердых сплавов системы WC–Co, модифицированных ионными пучками различной интенсивности // *Трение и износ*. 1998. № 4(19). С. 475–479.
- Vershinin G. A., Poletshenko K. N., Povoroznjuk S. N. [et al.]. Mass transfer in heterogeneous materials under irradiation with high-intensity beams of charged particles // *Surface Investigation: X-Ray, Synchrotron and Neutron Techniques*. 2001. No. 5 (16). P. 761–767.
- Кулешов А. К., Углов В. В., Брюхов В. В. Упрочнение инструментальных материалов имплантацией ионов (Zr, b, n) и (Zr, b, Kr) // *Вакуумная техника и технология*. 2011. № 4(21). С. 231–236.

БАДАМШИН Артем Маратович, ассистент кафедры «Машиностроение и материаловедение» Омского государственного технического университета, г. Омск.

SPIN-код: 3531-5945

ORCID: 0000-0002-6695-4945

Адрес для переписки: Artembadamschin@mail.ru

ПОВОРОЗНЮК Сергей Николаевич, кандидат технических наук, доцент кафедры «Машиностроение и материаловедение» Омского государственного технического университета, г. Омск.

SPIN-код: 2805-9830

AuthorID (SCOPUS): 57192694672

ResearcherID: htt-3208-2013

АКИМОВ Валерий Викторович, доктор технических наук, доцент (Россия), профессор кафедры «Автомобильный транспорт» Сибирского государственного автомобильно-дорожного университета, г. Омск.

SPIN-код: 8808-0899

AuthorID (SCOPUS): 7101604913

РОГАЧЁВ Евгений Анатольевич, кандидат технических наук, доцент кафедры «Физика» Омского государственного технического университета, г. Омск.

SPIN-код: 1373-4622

AuthorID (SCOPUS): 56503848300

ORCID: 0000-0003-2622-7492

ResearcherID: AAS-1459-2020

КРУТЬКО Андрей Александрович, кандидат технических наук, доцент кафедры «Машиностроение

и материаловедение» Омского государственного технического университета, г. Омск.

SPIN-код: 6202-2690

AuthorID (SCOPUS): 57211277289

ORCID: 0000-0002-7121-5004

Для цитирования

Бадамшин А. М., Поворознюк С. Н., Акимов В. В., Рогачёв Е. А., Крутько А. А. Модификация металлорежущих пластин из безвольфрамового твердого сплава марки КНТ16 непрерывными ионными пучками // Омский научный вестник. 2023. № 1 (185). С. 31 – 36. DOI: 10.25206/1813-8225-2023-185-31-36.

Статья поступила в редакцию 15.09.2022 г.

© А. М. Бадамшин, С. Н. Поворознюк, В. В. Акимов,
Е. А. Рогачёв, А. А. Крутько