



Научная статья
2.6.17 – Материаловедение (технические науки)
УДК 669.66-9

doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2024.01.033

 EDN: HUCJKF

МОДИФИКАЦИЯ ТВЕРДОГО СПЛАВА WC-Co ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ МОЩНОГО ИОННОГО ПУЧКА НАНОСЕКУНДНОЙ ДЛИТЕЛЬНОСТИ

Арте́м Маратович Бада́мшин¹, Влади́мир Степа́нович Кови́вчак²,
Дени́с Андре́евич Поло́нъянкин³, Серге́й Никола́евич Поворо́знюк⁴

^{1,3,4} Омский государственный технический университет, Омск, Россия

² Омский государственный университет им. Ф.М. Достоевского, Омск, Россия

¹ Artembadamschin@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6695-4945>

² Kvs_docent@mail.ru

³ Polonjan@mail.ru

⁴ Povorozn@mail.ru

Аннотация. В работе исследовано изменение морфологии и износостойкости металлорежущих пластин из твердого сплава VK8 при воздействии мощного ионного пучка (МИП) наносекундной длительности: состав - 30 %H⁺ + 70 % C⁺, плотность тока пучка $j = 150 \text{ A/cm}^2$, средняя энергия частиц $E = 200 \text{ кэВ}$. В экспериментах варьировалось число импульсов облучения (n) = 1, 3, 10. Установлено, что данные режимы облучения приводят к оплавлению поверхности твердого сплава, возникновению кратеров и микротрещин в поверхностном слое. Определены режимы облучения, позволяющие повысить ресурс работы режущих пластин на 40 % в сравнении с исходными при обработке жаропрочного хромоникелевого сплава ХН62БМКТЮ.

Ключевые слова: твердые сплавы, мощный ионный пучок, ионно-лучевая обработка, карбид вольфрама, обработка металлов резанием, морфология, поверхность.

Для цитирования: Модификация твердого сплава WC-Co при воздействии мощного ионного пучка наносекундной длительности / А. М. Бадамшин [и др.] // Ползуновский вестник. 2024. № 1, С. 258–263. doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2024.01.033. EDN: <https://elibrary.ru/HUCJKF>.

Original article

MODIFICATION OF HARD ALLOY WC-Co WITH EXPOSURE TO A POWERFUL ION BEAM NANOSECOND DURATION

Artem M. Badamshin¹, Vladimir S. Kovivchak², Denis A. Polonyankin³,
Sergey N. Povoroznyuk⁴

^{1,3,4} Omsk State Technical University, Omsk, Russia

² Omsk State University F.M. Dostoevsky, Omsk, Russia

¹ Artembadamschin@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6695-4945>

² Kvs_docent@mail.ru

³ Polonjan@mail.ru

⁴ Povorozn@mail.ru

Abstract. The paper studies the change in the morphology and wear resistance of metal-cutting plates made of VK8 hard alloy under the influence of a high-power ion beam (HIB) of nano-second duration: composition - 30% H⁺ + 70% C⁺, beam current density $j = 150 \text{ A/cm}^2$, average particle energy $E = 200 \text{ keV}$. In the experiments, the number of irradiation pulses (n) = 1, 3, 10 was varied. It was

© Бадамшин А. М., Ковивчак В. С., Полонянкин Д. А., Поворознюк С. Н., 2024

МОДИФИКАЦИЯ ТВЕРДОГО СПЛАВА WC-CO ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ МОЩНОГО ИОННОГО ПУЧКА НАНОСЕКУНДНОЙ ДЛИТЕЛЬНОСТИ

found that these irradiation modes lead to melting of the surface of the hard alloy, the appearance of craters and microcracks in the surface layer. Irradiation regimes are determined that allow increasing the service life of cutting inserts by 40% in comparison with the initial ones when processing heat-resistant chromium-nickel alloy KhN62BMKTYu.

Keywords: *hard alloys, powerful ion beam, ion beam processing, tungsten carbide, metal cutting, morphology, surface.*

For citation: Badamshin, A.M., Kovivchak, V.S., Polonyankin, D.A. & Povoroznyuk, S.N. (2024). Modification of hard alloy WC-Co with exposure to a powerful ion beam nanosecond duration. *Polzunovskiy vestnik*, (1), 258-263. (In Russ). doi: 10/25712/ASTU.2072-8921.2024.01.033. EDN: <https://elibrary.ru/HUCJKF>.

ВВЕДЕНИЕ

Твердые сплавы (ТС) WC-Co являются наиболее распространенным классом материалов для обработки резанием сталей и некоторых цветных сплавов [1–2]. Широкую сферу применения данные ТС получили благодаря сочетанию высокого значения предела прочности и теплостойкости [3–4]. Несмотря на это, существует проблема низкого ресурса работы твердосплавных инструментов при выполнении операций токарной и фрезерной обработки ряда высокопрочных сплавов. К ним, прежде всего, относятся применяемые в авиации жаропрочные хромоникелевые сплавы. Распространенным методом повышения стойкости режущих инструментов является метод нанесения покрытий. Износостойкие покрытия на основе карбидов и нитридов переходных металлов, а также некоторых интерметаллидных соединений в ряде случаев позволяют повысить ресурс работы режущего инструмента в несколько раз [5–6]. При этом у наиболее бюджетных однослойных покрытий есть существенный недостаток – склонность к отслаиванию ввиду отличия их коэффициента термического расширения от основного твердого сплава.

Другим перспективным способом улучшения свойств твердосплавных композиционных материалов является модификация их поверхностных слоёв ионными пучками с различным составом, энергией и дозой облучения [7]. В зависимости от данных параметров ионное облучение может приводить к возникновению новых химических соединений [8], изменению дефектности кристаллического строения [9] и морфологии [10] тонких поверхностных слоёв облучаемых твердых сплавов, что, в свою очередь, приводит к изменению их свойств.

В настоящее время наиболее часто используется технология низко- и среднеэнергетического ($E < 100$ кэВ) непрерывного ионного облучения твердосплавных материалов (ионная имплантация). Это обусловлено большой площадью ($\sim 10\text{--}20$ см²) генерируе-

мых ионных пучков и возможностью проводить серийное облучение одновременно нескольких пластин, а также большой распространённостью установок для реализации данной технологической операции. Главным недостатком ионной имплантации является малая глубина пробега ионов (< 100 нм), что, как правило, не позволяет получать эффективный функциональный слой, обеспечивающий высокий ресурс в течение длительного времени работы инструмента. Другим видом ионного облучения является модификация материалов мощными ионными пучками (МИП) наносекундной длительности. МИП отличается от ионной имплантации существенно большей энергией облучения (от сотен кэВ до нескольких единиц МэВ), высокой плотностью ионного пучка (\sim до 250 А/см²) и меньшей дозой облучения ($\sim 10^{14}$ ион/см² за один импульс), которая достигается за весьма короткое время воздействия пучка ($\sim 30\text{--}100$ нс). Воздействие МИП обеспечивает большую глубину пробега ионов (\sim несколько сотен нм), быстрый ввод энергии в модифицируемый слой, его разогрев, плавление, частичное испарение и последующее сверхбыстрое охлаждение и затвердевание, что сопровождается существенно большим изменением структуры и свойств поверхностных слоёв материалов в сравнении с традиционной ионной имплантацией.

Целью настоящей работы является исследование изменения морфологии поверхности твердосплавных режущих пластин BK8 (92 WC – 8 Co) масс. % и их износостойкости при токарной обработке жаропрочного хромоникелевого сплава марки ХН62БМКТЮ.

МЕТОДЫ

Объектом исследования являлись трёхгранные съёмные металлорежущие пластины марки BK8 (92 WC – 8 Co) масс. %. Для исследования изменения морфологии подготавливалась внутренняя сторона пластин методом шлифовки поверхности на абразивной бумаге с постепенным уменьшением размера зерна (с P80 до P2500) с последующей поли-

ровкой пастой ГОИ до зеркального блеска и отсутствием видимых под микроскопом крупных рисок. Далее пластины подвергались ультразвуковой очистке в этаноле для удаления поверхностных загрязнений.

Модификация пластин мощным ионным пучком проводилась на ускорителе «ТЕМП» (ОмГУ им. Ф.М. Достоевского). Состав ионного пучка: 30% H^+ + 70% C^+ . Средняя энергия ионов $E \sim 250$ кэВ. Плотность тока ионного пучка составляла ~ 150 А/см². Число импульсов облучения (n): 1, 3, 10.

Испытания на износостойкость металло-режущих пластин проводились на модернизированном токарно-винторезном станке модели 163 с системой автоматического регулирования скорости резания при колебании нагрузки. Данная модернизация позволяла сохранять постоянную скорость резания при уменьшении диаметра обрабатываемого материала. Обрабатываемый материал – хромоникелевый сплав ЭП 742ВД (ХН62БМКТЮ). Скорость резания v в двух экспериментах составляла 12 и 20 м/мин соответственно. Критерием износа служила величина фаски на задней поверхности пластины H_z , контроль которой проводился на закрепленном в области суппорта оптическом микроскопе без снятия пластин с державки.

Исследование морфологии поверхности твердого сплава проводилось методом сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) на микроскопе Jeol JCM-5700 (JEOL Ltd., Япония) в режиме вторичных электронов при ускоряющем напряжении зондирующего электронного пучка 20 кВ. Дополнительно проводилось исследование изменения элементного химического состава образцов на встроенной в микроскоп приставке для энергодисперсионного анализа (ЭДА).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

На рисунке 1 представлены СЭМ-изображения исходной и облученной с различным числом импульсов поверхностей твердого сплава. На поверхности исходного образца (а) видны зёрна карбидной фазы WC и тонкой кобальтовой прослойки между ними. Максимальный размер карбидных зёрен достигает ~ 5 мкм, а их распределение является достаточно равномерным. Помимо этого, поверхность характеризуется наличием небольших одноосноориентированных рисок, которые образовались на финишных этапах шлифовки, и минимальным для данной группы материалов количеством мелких пор. Однократное облучение МИП (б) приводит к существенному изменению морфологии поверхности. Помимо оплавления,

вызванного разогревом поверхности под действием пучка, наблюдается большое количество мелких (\sim до 1 мкм) пор и кратеров (\sim до 2 мкм). Примечательно, что в данном случае оплавленный слой является неоднородным: на поверхности образца видны сильно оплавленные небольшие зёрна WC, а также слабо оплавленные крупного размера зерна. Вероятно, это связано с особенностями распределения температуры в такой пространственно неоднородной среде при воздействии МИП.

Кроме того, хорошая идентификация карбидных зёрен объясняется тем, что WC (на границах зёрен) слабо растворяется в расплавленном Co при этом режиме облучения. Воздействие трёх импульсов МИП (в) приводит к формированию более оплавленного и однородного слоя, что сопровождается отсутствием видимых границ зёрен WC, что, вероятно, связано с более сильным растворением границ зёрен WC в расплавленной связке Co. Также наблюдается заплывание части крупных кратеров. При этом на поверхности остается достаточно большое количество микропор. Десятикратное облучение МИП (г) способствует формированию однородного оплавленного слоя, на поверхности которого остаются поры, однако их диаметр несколько увеличился, а концентрация снизилась. Помимо пор на поверхности имеется большое количество микро-трещин, которые возникают из-за сильных растягивающих напряжений, генерируемых на этапе охлаждения расплавленного поверхностного слоя. На оплавленной поверхности прослеживаются границы зёрен WC, которые состоят из Co и частично растворенного в нем WC.

Более детальное исследование поверхности (рис. 2) свидетельствует о том, что как однократное (рис. 2, а), так и трёхкратное облучение МИП (рис. 2, б) приводит к формированию сети микро-трещин. В случае однократного облучения размер и количество микро-трещин является минимальным. Стоит отметить, что трещины проходят преимущественно через поры (рис. 1, а, 2, б), что позволяет предположить, о том, что они являются очагами их образования.

Исследование образцов методом ЭДА не позволило выявить закономерности изменения элементного состава ТС в результате облучения. Во всех четырёх случаях среднее содержание химических элементов являлось соизмеримым и соответствовало допустимому диапазону для химического состава сплава ВК8, что, вероятно, связано с особенностями генерации рентгеновского излучения в таком сильно неоднородном композиционном материале с различной плотностью входящих химических элементов и соединений.

МОДИФИКАЦИЯ ТВЕРДОГО СПЛАВА WC-CO ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ МОЩНОГО ИОННОГО ПУЧКА НАНОСЕКУНДНОЙ ДЛИТЕЛЬНОСТИ

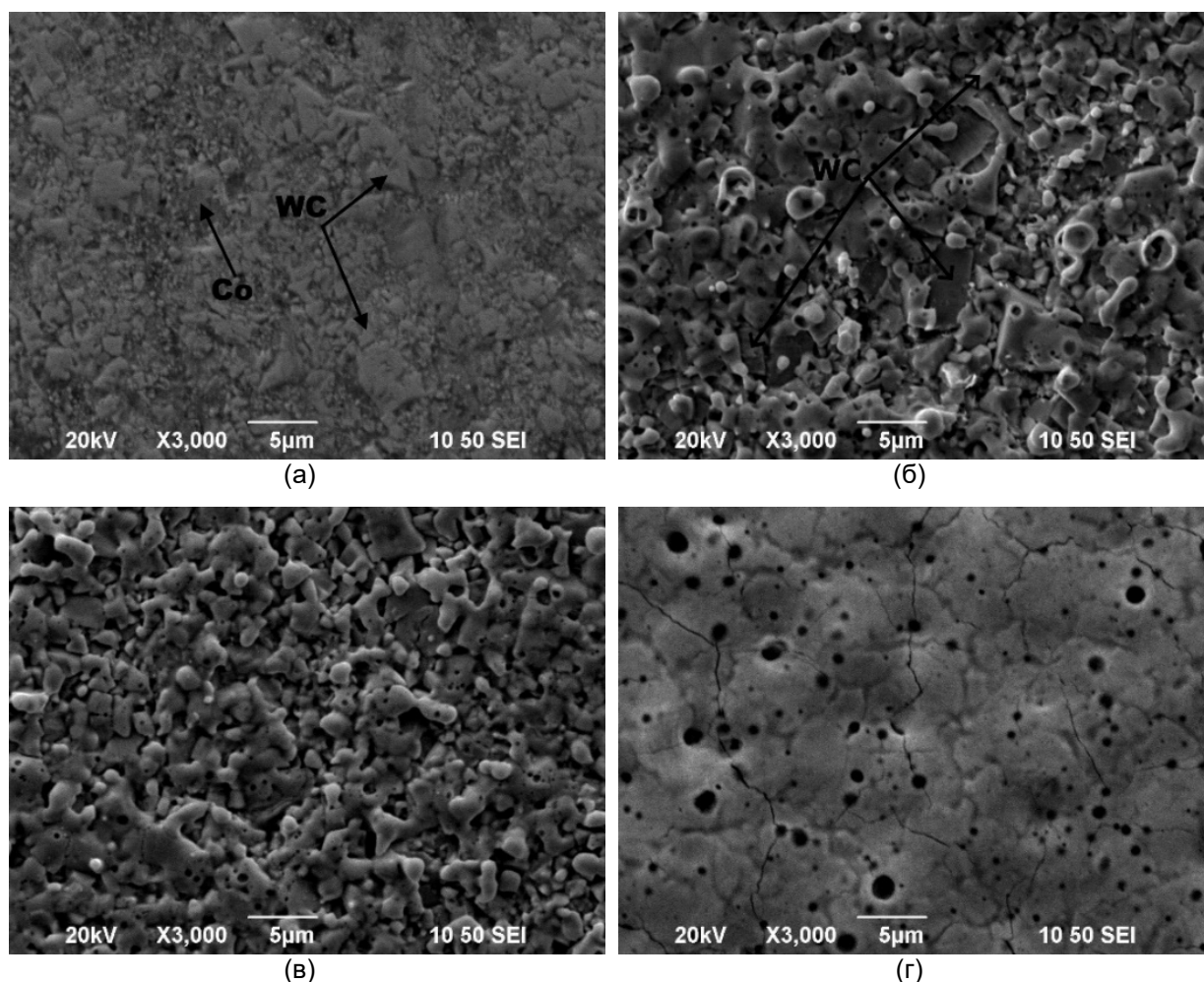


Рисунок 1 – СЭМ-изображения поверхности твердого сплава: (а) – в исходное состояние; после облучения МИП с числом импульсов облучения n: 1 (б), 3 (в) и 10 (г)

Figure 1 – SEM images of the hard alloy surface: (a) in the initial state; after HIP irradiation with the number of irradiation pulses n: 1 (b), 3 (c) and 10 (d)

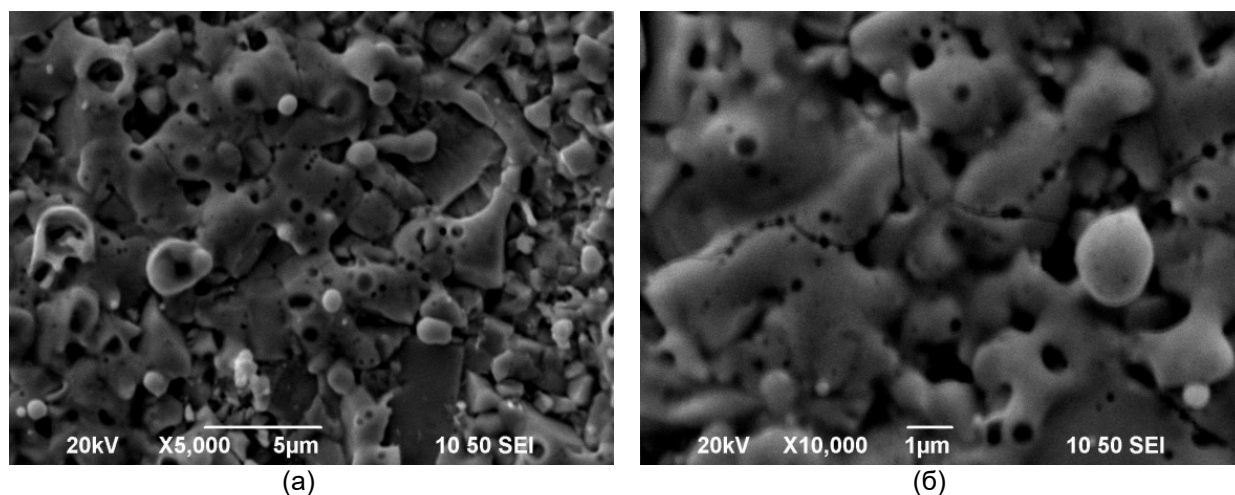


Рисунок 2 – СЭМ-изображения поверхности твердого сплава после облучения МИП с числом импульсов n: 1 (а), 3 (б)

Figure 2 – SEM images of the hard alloy surface after PIB irradiation with the number of pulses n: 1 (a), 3 (b)

Результаты исследования кинетики изнашивания исходных и модифицированных пластин из сплава ВК8 при резании сплава ХН62БМКТЮ представлены на рисунках 3–4. Полученные результаты свидетельствуют о том, что во всех случаях кинетические зависимости имеют схожую форму с ярко выраженным периодом приработки (первые 10–20 м резания) после чего скорость изнашивания снижается. При этом среднее значение фаски износа для серии однократно облученных пластин (кривые 2, рис. 3–4) на данном периоде существенно ниже, чем у исходной, и составляет ~ 0,1 мм для $v = 12$ м/мин и 0,15 для $v = 20$ м/мин после 20 м точения, в то время как у исходных пластин величина фаски износа составляет 0,15 и 0,3 мм уже после 10 м пути резания. После этапа приработки наблюдалась некоторая стабилизация, а скорость изнашивания пластин практически сравнялась. Тем не менее, после окончания испытаний (150 м) среднее значение величины фаски износа исходной пластины составляла ~ 0,45 мм ($v = 12$ м/мин) и 0,6 мм ($v = 20$ м/мин), в то время как у однократно облученной – 0,3 мм ($v = 12$ м/мин) и 0,35 ($v = 20$ м/мин).

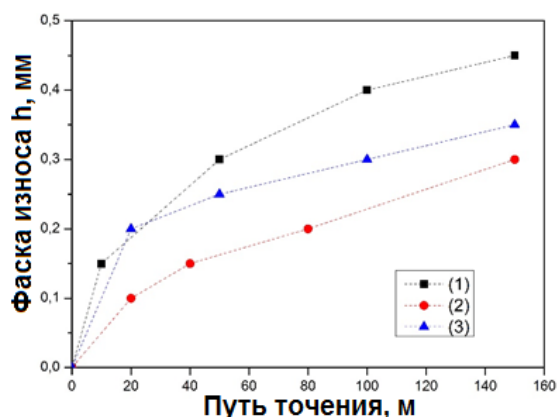


Рисунок 3 – Кинетические зависимости изнашивания пластин из сплава ВК8 при токарной обработке сплава ХН62БМКТЮ ($v = 12$ м/мин): (1) – исходная пластина; (2) – МИП $n = 1$; (3) – МИП $n = 3$

Figure 3 – Kinetic dependences of wear of VK8 alloy plates during turning of KhN62BMKTYu alloy ($v = 12$ m/min): (1) - initial plate, (2) - PIB $n = 1$, (3) - PIB $n = 3$

Пластины, облученные МИП с числом импульсов $n = 3$, показали промежуточные результаты между исходными и однократно облученными. Некоторое «ухудшение» свойств данных пластин может быть связано с возникновением на их поверхности микротрещин и общим охрупчиванием модифицированных поверхностных слоёв ТС. По этой причине испытания для десятикратно облученных пластин не проводились, поскольку они содержат

большое количество поверхностных микротрещин и для них прогнозируется ещё большее снижение износостойкости.

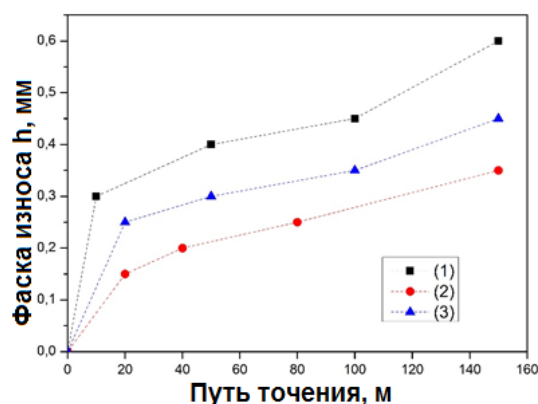


Рисунок 4 – Кинетические зависимости изнашивания пластин из сплава ВК8 при токарной обработке сплава ХН62БМКТЮ ($v = 12$ м/мин): (1) – исходная пластина; (2) – МИП $n = 1$; (3) – МИП $n = 3$

Figure 4 – Kinetic dependences of wear of VK8 alloy plates during turning of KhN62BMKTYu alloy ($v = 12$ m/min): (1) - initial plate, (2) - PIB $n = 1$, (3) - PIB $n = 3$

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе исследована модификация твердого сплава ВК8 при воздействии мощного ионного пучка. Установлено, что ионное облучение приводит к плавлению поверхностного слоя ТС. Учитывая более низкую, в сравнении с WC, температуру плавления кобальта и наличие карбидных зёрен на поверхности однократно облученного образца, предположено, что при таком режиме облучения не происходит заметного растворения зерен WC в расплаве кобальтовой связки. Увеличение числа импульсов до 3, и особенно до 10, приводит к возникновению микротрещин в оплавленном поверхностном слое, очагами образования которых, по всей видимости, являются поверхностные поры. Проведенные стойкостные испытания исходных и модифицированных пластин позволяют утверждать, что модификация МИП с плотностью тока пучка $j = 150$ А/см² и числом импульсов облучения $n = 1$ является эффективным методом повышения ресурса работы режущего инструмента при обработке жаропрочных хромоникелевых сплавов. Увеличение числа импульсов облучения до 3 снижает эффект модификации, что, предположительно, связано с возникновением микротрещин и охрупчиванием поверхностного слоя ТС. Исследование элементного состава методом энергодисперсионного анализа не выявило закономерностей изменения состава ТС при ионном облучении. Для этих целей требуется использовать поверхностно-чувствительные методы анализа материалов.

МОДИФИКАЦИЯ ТВЕРДОГО СПЛАВА WC-CO ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ МОЩНОГО ИОННОГО ПУЧКА НАНОСЕКУНДНОЙ ДЛИТЕЛЬНОСТИ

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Твердые сплавы WC-Co, легированные карбидом тантала Обзор / В.С. Панов, А.А. Зайцев // Известия высших учебных заведений. Порошковая металлургия и функциональные покрытия. 2015. № 2. С. 44–48. DOI 10.17073/1997-308X-2015-2-44-48.
2. Сравнение механических свойств твердых сплавов VK6, полученных традиционным методом и искровым плазменным спеканием / Ю.О. Пристинский, Н.Ю. Перетягин, Е.В. Кузнецова, П.Ю. Перетягин // Вестник машиностроения. 2019. № 9. С. 51–54.
3. Модификация металлорежущих пластин из безвольфрамового твердого сплава KNT16 мощным ионным пучком / А.М. Бадамшин, В.С. Ковивчак, А.А. Крутько, О.Ю. Бургонова // Ползуновский вестник. 2023. № 1. С. 237–244. DOI 10.25712/ASTU.2072-8921.2023.01.030.
4. Повышение износостойкости твердых сплавов VK6, VK8, T5K10, T15K6 методом объемного импульсного лазерного упрочнения / И.А. Пинахин, В.А. Черниговский, А.А. Брацихин, М.А. Ягмуров // Трение и износ. 2015. №4(36). С. 429–432.
5. Функциональные покрытия для режущего инструмента / А.С. Верещака, А.А. Верещака // Упрочняющие технологии и покрытия. 2010. № 6(66). С. 28–37.
6. Исследование триботехнических свойств ионно-плазменного покрытия TiN на твердосплавной пластине VK6 / В.Н. Лавро, А.И. Николаев, А.Е. Климова // Современные материалы, техника и технологии. 2017. № 2(10). С. 78–84.
7. Модификация твердого сплава T15K6 мощными импульсными ионными пучками и компрессионными плазменными потоками / В.В. Углов, А.К. Кулешов, Г.Е. Ремнев [и др.] // Известия высших учебных заведений. Порошковая металлургия и функциональные покрытия. 2011. № 3. С. 63–68.
8. Физико-химические свойства и функциональные характеристики безвольфрамового твердого сплава системы "TiC – TiNi", подвергнутого ионно-лучевой обработке / А.М. Бадамшин, С.Н. Несов, С.Н. Поворознюк [и др.] // Перспективные материалы. 2023. № 5. С. 72–81. DOI 10.30791/1028-978X-2023-5-72-81.
9. Модифицирование инструментальных твердых сплавов ионно-лучевой обработкой / С.Н. Поворознюк, К.Н. Полещенко, Н.П. Калистратова // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. 2006. № 4. С. 59–62.
10. Получение градиентных композиций повышенной коррозионной стойкости и твердости методами ионной имплантации и химического модифицирования / В.Ф. Борбат, И.Б. Козорог, В.А. Мухин, К.Н. Полещенко // Вестник ОмГУ. 2004. № 3. С. 60–62.

REFERENCES

1. Panov, V.S., Zaitsev, A.A. (2015). Tantalum Carbide Alloyed WC-Co Carbide Overview. News of higher educational institutions. Powder metallurgy and functional coatings. 2. 44-48. (In Russ.).
2. Pristinsky, Yu.O. [et. al]. (2019). Comparison of the mechanical properties of VK6 hard alloys obtained by the traditional method and spark plasma sintering. Bulletin of mechanical engineering. 9. 51-54. (In Russ.).
3. Badamshin, A.M. [et. al]. (2023). Modification of metal-cutting plates from tungsten-free hard alloy KNT16 by

a powerful ion beam // Polzunovskiy vestnik. 2023. 1. 237-244. (In Russ.).

4. Pinakhin, I.A. [et. al]. (2015). Improving the wear resistance of hard alloys VK6, VK8, T5K10, T15K6 by volumetric pulsed laser hardening. Friction and wear. 4 (36). 429-432. (In Russ.).
5. Vereshchaka, A.A. [et. al]. (2010). Functional coatings for cutting tools. Strengthening technologies and coatings. 6(66). 28-37. (In Russ.).
6. Lavro, V.N. [et. al]. (2017). Investigation of the tribotechnical properties of the TiN ion-plasma coating on a VK6 hard-alloy plate. Modern materials, equipment and technologies. 2(10). 78-84. (In Russ.).
7. Uglov, V.V. [et. al]. (2011). Modification of the T15K6 hard alloy with powerful pulsed ion beams and compression plasma flows. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii. Powder metallurgy and functional coatings. 3. 63-68. (In Russ.).
8. Badamshin, A.M. [et al.]. (2023). Physical and chemical properties and functional characteristics of a tungsten-free hard alloy of the "TiC - TiNi" system subjected to ion-beam treatment // Perspective Materials. 2023. 5. 72-81. (In Russ.).
9. Povoroznyuk, S.N. [et. al]. (2006). Modification of tool hard alloys by ion-beam processing. Surface. X-ray, synchrotron and neutron studies. 4. 59-62. (In Russ.).
10. Borbat, V.F. [et. al]. (2004). Obtaining gradient compositions of increased corrosion resistance and hardness by methods of ion implantation and chemical modification. Vestnik OmGU. 3. 60-62. (In Russ.).

Информация об авторах

А. М. Бадамшин – ассистент кафедры «Машиностроение и материаловедение» Омского государственного технического университета.

В. С. Ковивчак – кандидат физико-математических наук, доцент кафедры «Общая, прикладная и медицинская физика» Омского государственного университета им. Ф.М. Достоевского.

Д. А. Полонянкин – кандидат педагогических наук, доцент кафедры «Физика» Омского государственного технического университета

С. Н. Поворознюк – кандидат технических наук, доцент кафедры «Машиностроение и материаловедение» Омского государственного технического университета.

Information about the authors

A.M. Badamshin - Assistant of the Department of Mechanical Engineering and Materials Science, Omsk State Technical University.

V.S. Kovivchak - Ph.D, Associate Professor of the Department of General, Applied and Medical Physics, Dostoevsky Omsk State University.

D.A. Polonyankin - Ph.D, Associate Professor of the Department of Physics, Omsk State Technical University.

S.B. Povoroznyuk - Ph.D, Associate Professor of the Department of Mechanical Engineering and Materials Science, Omsk State Technical University.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors declare that there is no conflict of interest.

Статья поступила в редакцию 15 июня 2023; одобрена после рецензирования 29 февраля 2024; принята к публикации 05 марта 2024.

The article was received by the editorial board on 15 June 2023; approved after editing on 29 Feb 2024; accepted for publication on 05 Mar 2024.