

УДК 539.197; 674.055:621.934:630.652

**В. В. Чаевский<sup>1</sup>**, кандидат физико-математических наук, доцент,**М. А. Андреев<sup>2</sup>**, кандидат физико-математических наук,**В. В. Жилинский<sup>3</sup>**, кандидат физико-математических наук, доцент,**О. Г. Рудак<sup>4</sup>, А. М. Милюкова<sup>5</sup>**, кандидат технических наук, **О. А. Толкачева<sup>6</sup>**<sup>1</sup>Учреждение образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники», ул. Гикало, 9, 220013 Минск, Республика Беларусь, v.chaevskij@bsuir.by, Белорусский национальный технический университет, ул. Якуба Коласа, 22, 220013 Минск, Республика Беларусь, chaevskiv@gmail.com<sup>2</sup>ОХП «Институт сварки и защитных покрытий» государственного научного учреждения «Институт порошковой металлургии имени академика О. В. Романа», ул. Платонова, 12Б, 220005 Минск, Республика Беларусь<sup>3,4</sup>Учреждение образования «Белорусский государственный технологический университет», ул. Свердлова, 13а, 220006 Минск, Республика Беларусь<sup>5,6</sup>Государственное научное учреждение «Физико-технический институт Национальной академии наук Беларуси», ул. Академика Купревича, 10, 220141 Минск, Республика Беларусь

## СТРУКТУРА И СВОЙСТВА Cr-ДНА/Hf-Zr-ZrN-ПОКРЫТИЙ НА ДЕРЕВОРЕЖУЩЕМ ИНСТРУМЕНТЕ

В работе рассмотрены характеристики структуры и свойств комбинированных Cr-ДНА (детонационные наноалмазы) / Hf-Zr-ZrN-покрытий, сформированных на рубильных стальных (марки 6ХС) ножах дерево-режущего инструмента методами ионно-лучевого распыления и конденсации вещества из газоплазменной фазы в вакууме с ионной бомбардировкой и гальванической обработки. Микроструктура покрытий была исследована методами сканирующей электронной микроскопии и рентгеноспектрального микроанализа. Кроме того, применялись методы измерения твердости покрытий и опытно-промышленные испытания образцов. Покрытия Cr-ДНА /Hf-Zr-ZrN имеют слоистую структуру. Верхний Cr-ДНА-слой не перемешивается с промежуточным слоем ZrN и нижним слоем ZrHf. Максимальная величина микротвердости Hf-Zr-ZrN-покрытия составила  $6,6 \pm 0,3$  ГПа. Проведенные опытно-промышленные испытания режущих инструментов с покрытием Cr-ДНА/Hf-Zr-ZrN показали, что срок их службы при резании заготовок из древесины хвойных и лиственных пород в 1,7...1,9 раза выше, чем у инструмента без покрытия.

**Ключевые слова:** дерево-режущие рубильные ножи; покрытия; наноалмазы; хром; цирконий.

Рис. 5. Библиогр.: 16 назв.

**V. V. Chayevski<sup>1</sup>**, PhD in Physics and Mathematics Sciences, Associate Professor,**M. A. Andreev<sup>2</sup>**, PhD in Physics and Mathematics Sciences,**V. V. Zhylinski<sup>3</sup>**, PhD in Physics and Mathematics Sciences, Associate Professor,**O. G. Rudak<sup>4</sup>, A. M. Miliukova<sup>5</sup>**, PhD in Technical Sciences, **O. A. Tolkachova<sup>6</sup>**<sup>1</sup>Institution of Education “Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics”, 9 Gikalo Str., 220013 Minsk, the Republic of Belarus, v.chaevskij@bsuir.by, Institution of Education “Belarusian National Technical University”, 22 Yakub Kolas Str., 220013 Minsk, the Republic of Belarus, chaevskiv@gmail.com<sup>2</sup>“Institute of Welding and Protective Coatings” of the State Scientific Institution “Powder Metallurgy Institute”, 12B Platonova Str., 220005 Minsk, the Republic of Belarus<sup>3,4</sup>Institution of Education “Belarusian State Technological University”, 13a Sverdlov Str., 220006 Minsk, the Republic of Belarus<sup>5,6</sup>State Scientific Institution “Physical-Technical Institute of the National Academy of Sciences of Belarus”, 10 Ak. Kuprevich Str., 220084 Minsk, the Republic of Belarus

## STRUCTURE AND PROPERTIES OF Cr-DND/Hf-Zr-ZrN-COATINGS ON WOODCUTTING TOOLS

In this work research of the structure and properties features of combined Cr-DND (detonation nanodiamonds) / Hf-Zr-ZrN-coatings synthesized on steel (grade 6HC) chopping knives of wood-cutting tools by ion-beam sputtering and Arc-PVD vacuum methods as well as galvanic treatment have been conducted. The microstructure of the coatings by SEM, EDX techniques have been studied. Moreover, methods of a microindentation and pilot testing of coatings have

been used. The coatings Cr-DND/Hf-Zr-ZrN have a layered structure. There is an intermediate ZrN layer between Cr-DND top and ZrHf bottom layers which are not mixed with each other. The maximum value of the microhardness of the Hf-Zr-ZrN coating is  $6.6 \pm 0.3$  GPa. Held pilot tests of Cr-DND/Hf-Zr-ZrN coated cutting tools have proved their increasing durability period to be 1.7...1.9 times higher, if compared with bare tools, when cutting blanks from pine and deciduous wood.

**Key words:** wood-cutting chopping knives; coatings; nanodiamonds; chromium; zirconium.

Fig. 5. Ref.: 16 titles.

**Введение.** Процесс обработки древесины считается более сложным, чем процесс обработки металлов [1]. Это связано со специфическими свойствами древесины, в том числе с анизотропией, внутренними напряжениями, твердыми минеральными частицами, переменной плотностью в поперечном сечении. Кроме того, при обработке древесины используются высокие скорости (20...40 м / с), на фрезы действуют высокие термические нагрузки в агрессивных средах [2]. В результате дереворежущий инструмент подвергается высоким механическим и термическим нагрузкам, пластической деформации, адгезии, диффузному износу и окислению [3; 4]. В этих условиях инструменты из стальных сплавов быстро изнашиваются. Поэтому для изготовления фрез используются методы модификации поверхности, такие как покрытия, текстурирование поверхности [5] и режущие кромки различной формы [6]. Защитные покрытия, полученные методом конденсации вещества из газоплазменной фазы в вакууме с ионной бомбардировкой (КИБ), широко применяются при обработке древесины благодаря их способности защищать подложку от механического износа и коррозии, рассеивать тепло, снижать напряжения [7; 8]. В настоящее время при разработке покрытий для повышения эффективности их применения используют следующие методы: 1) создание многослойных покрытий, каждый слой которых выполняет собственную функцию и обеспечивает плавный переход физико-механических свойств от поверхности покрытия к упрочняемой (восстанавливаемой) поверхности детали; 2) создание многокомпонентных слоев переменного состава по толщине покрытия [9]. Среди методов создания многослойных покрытий наблюдается новая тенденция — развитие интегрированных многооперационных гибридных (комбинированных) технологий [8].

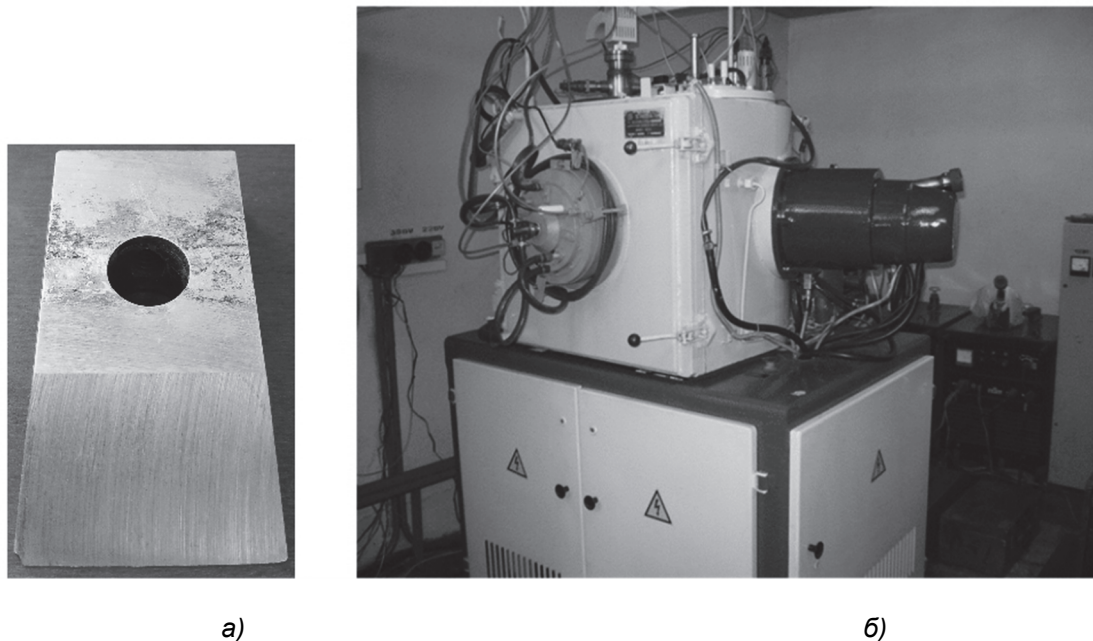
Использование детонационных наноалмазов (далее — ДНА) [10] при электрохимическом осаждении хрома, никеля, цинка приводит к получению покрытий с высокими эксплуатационными характеристиками, такими как микротвердость, износостойкость, коррозионная стойкость. По этой причине перспективным направлением является использование композиционных электрохимических покрытий (далее — КЭП) на основе хрома с ДНА (Cr-ДНА), обеспечивающих высокую прочностную характеристику для укрепления инструмента. Исследования [8] показали, что период стойкости твердосплавного фрезерного инструмента с комбинированными ZrC-Ni-УДА-покрытиями, сформированными электрохимическим методом (Ni-УДА (ультрадисперсные наноалмазы)) и методом КИБ (ZrC), увеличился в 1,5...1,6 раза по сравнению с необработанным инструментом при резании древесностружечных плит.

В Республике Беларусь широко применяется деревообрабатывающий фрезерный инструмент со строгальными и рубительными ножами из твердых сплавов и быстрорежущих сталей, в основном производства Российской Федерации и дальнего зарубежья (например, марок Pilana (Чехия) и Faba (Польша)), что требует дополнительных материальных производственных затрат, поэтому упрочнение его является актуальной задачей. В связи с этим основной целью данной работы было разработать методику послойного осаждения, сформировать на лезвиях стальных рубительных ножей деревообрабатывающего фрезерного инструмента упрочняющих мультислойных комбинированных гальванических ионно-плазменных покрытий на основе нитридов тугоплавких металлов (Zr, Hf) и Cr-ДНА и исследовать их структуру и физико-механические свойства.

**Материалы и методы исследования.** Для целей эксперимента были использованы рубительные ножи из стали марки 6ХС рубительной машины МРР8-50ГН (ОАО «Борисовский

ДОК», Борисов, Республика Беларусь) и ультрадисперсные алмазы детанационного синтеза торговой марки «УДА-ВК» производства ЗАО «Синта» (Минск, Республика Беларусь).

Hf-Zr-ZrN-покрытия на лезвиях рубильных ножей (рисунок 1, а) формировались в едином технологическом цикле в вакуумной установке Института сварки и защитных покрытий НАН Беларуси ННВ-6,6-И1 (см. рисунок 1, б), оснащенной электродуговыми источниками генерации плазменных потоков и двухлучевым распылительным ионным источником.



**Рисунок 1. — Вид рубильного ножа (а) и оборудования ННВ 6,6-И1 с двухлучевым распылительным ионным источником ИРЛУ-2 и катодным узлом ARC (б)**

Слой ZrHf наносился с использованием технологии ионно-лучевого распыления. Один из ионных пучков был направлен в сторону обрабатываемого изделия (ножа фрезы) для предварительной обработки (ионной очистки) в среде инертного газа аргона и активации поверхности изделия перед распылением мишени, обеспечивая высокую адгезию к поверхности изделия. Другой пучок был направлен на распыляемую мишень, в качестве которой был использован сплав циркония с гафнием (сплав ЦГ 20), состоящий из 80 % Zr и 20 % Hf. Слой нитрида циркония (ZrN) формировался методом КИБ в стандартных режимах [11]: предварительно — ионами циркония в вакууме  $10^{-3}$  Па при потенциале, равном  $-1$  кВ, с последующим нанесением покрытия при токах горения дуги катода  $100 \dots 120$  А и опорном напряжении  $-100$  В в атмосфере азота при давлении  $10^{-1}$  Па. Температура при осаждении соответствовала  $600 \dots 650$  °С.

Затем на поверхность ZrN-покрытия по уже ранее выявленным и апробированным нами методикам [12] наносился слой Cr-ДНА в гальваностатическом режиме электролиза при средней катодной плотности тока  $50$  А/дм<sup>2</sup> из классического электролита хромирования с добавлением ДНА  $2,5 \dots 5,1$  г/л. Процесс осаждения Cr-ДНА КЭП проводили при температуре  $40 \dots 50$  °С. В целях получения высокой адгезионной прочности Cr-ДНА КЭП с ZrN-покрытием предварительно на поверхность ZrN-покрытия осаждались химическим способом слои никеля, так как наличие Ni-слоя в многослойном покрытии улучшает адгезионную прочность покрытия с основой [8]. Также в целях улучшения адгезии Cr-ДНА КЭП с ZrN-покрытием и предотвращением пассивации Ni-слоя, характерной самопассивации КЭП хрома [13] проводилось нанесение электрохимическим способом дополнительного промежуточного слоя меди из серноокислого электролита.

С помощью электронных микроскопов MIRA 3 (TESCAN) и Hitachi S-4800 методами сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) и рентгеноспектрального микроанализа исследовалась морфология поверхностей, структура и состав сформированных покрытий.

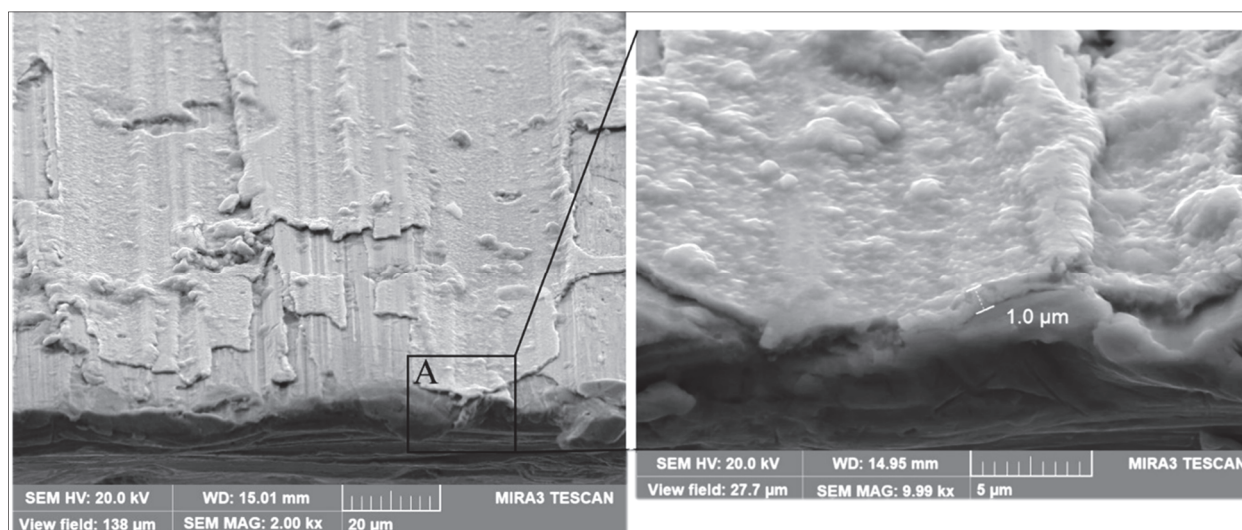
Микротвердость образцов была измерена при нагрузках 50, 100 и 300 г по методу Виккерса с помощью микротвердомеров Wilson Instruments 402MVD (Голландия) и ПМТ-3.

Опытно-промышленные испытания на период стойкости стальных рубильных ножей многоразового использования, модифицированных покрытиями, были проведены на рубильной машине МРР8-50ГН на линии изготовления щепы участка лесосырья на предприятии ОАО «Борисовский ДОК» при изготовлении пилопродукции из хвойных и лиственных пород древесины при следующих режимах: число ножей на фрезерном барабане — 4; скорость подачи — 0,053 м / с; частота вращения фрезерного барабана — 148 мин<sup>-1</sup>. Обработка велась четырьмя рубильными ножами до затупления режущей кромки лезвия ножа.

**Результаты исследования и их обсуждение.** Установлено, что покрытие Hf-Zr-ZrN имеет незначительную толщину (~ 1 мкм) на острие лезвия и неравномерно распределено по поверхности (рисунок 2), что объясняется отсутствием операции шлифовки после перезатачивания лезвий ножей на производстве.

На основании изучения морфологии поверхностного слоя Cr-ДНА (рисунок 3, а) можно заключить, что полученные покрытия имеют глобулярные поверхностные образования и содержат поры. Показано [14], что глобулярные образования формируются в виде частиц кластерами наноалмазов, создающих связанные агломераты размером от 204 нм в КЭП до 4,53 мкм в электролитах хромирования. Кластеры наноалмазов в этом случае являются центрами осаждения ионов хрома. Рисунок 3, б, показывает, что верхний слой, содержащий Cr-ДНА и медь, достаточно плотно покрывает ZrN-пленку.

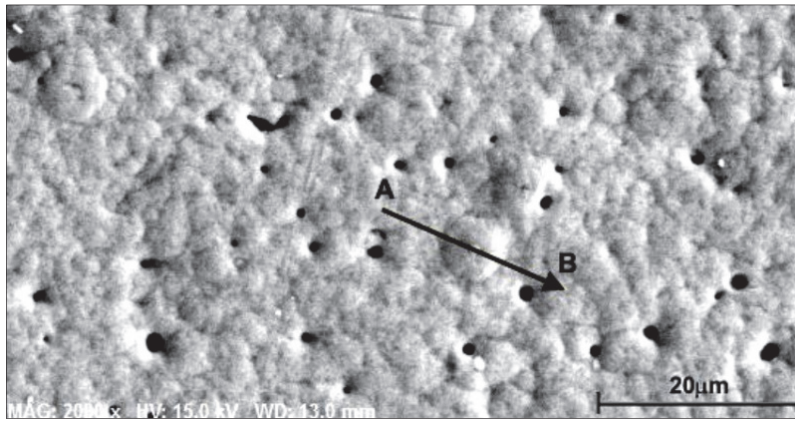
Проведенные ранее исследования [15] доказали, что Cr-ДНА/ZrN-покрытие на лезвии твердосплавного (WC-Co) дереворежущего ножа фрезы имеет слоистую структуру. Было показано наличие слоев различной микроструктуры и толщины для данного покрытия (рисунок 4, а). При этом толщина верхнего слоя составляла 304 нм, промежуточного — 939 нм, нижнего — 2,50 мкм. Верхний слой состоял из Cr-ДНА, промежуточными слоями были медь и никель, нижний слой — ZrN (см. рисунок 4, б, в). Слои не перемешивались друг с другом и основой.



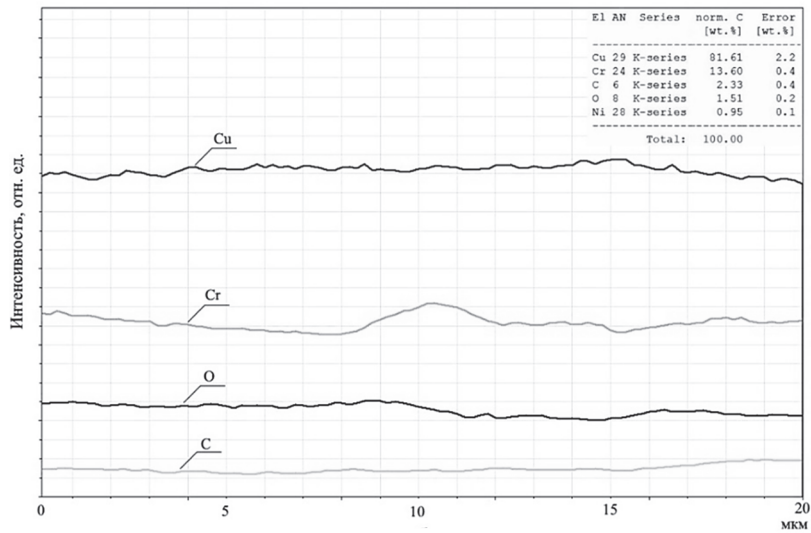
а)

б)

**Рисунок 2. — СЭМ-снимки лезвия ножа с Cr-ДНА/Hf-Zr-ZrN-покрытием: режущей кромки (а) и выделенной зоны А скола на острие лезвия (б)**

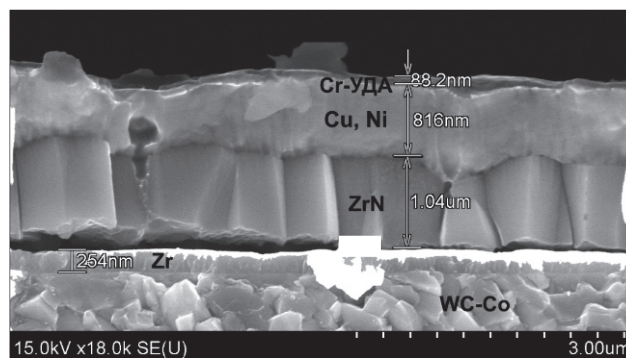


а)



б)

Рисунок 3. — СЭМ-снимок поверхности Cr-ДНА/Hf-Zr-ZrN-покрытия (а), элементный состав поверхности и распределение элементов вдоль линии АВ покрытия (б)



а)

Рисунок 4. — Микроструктура твердосплавного (WC-Co) ножа с Cr-ДНА/ZrN-покрытием: СЭМ-снимок фрактографического скола образца (а), распределение характеристического рентгеновского излучения Cr, Cu, Ni, Zr, W (б) и C, Cu, Ni, Zr, Co (в)

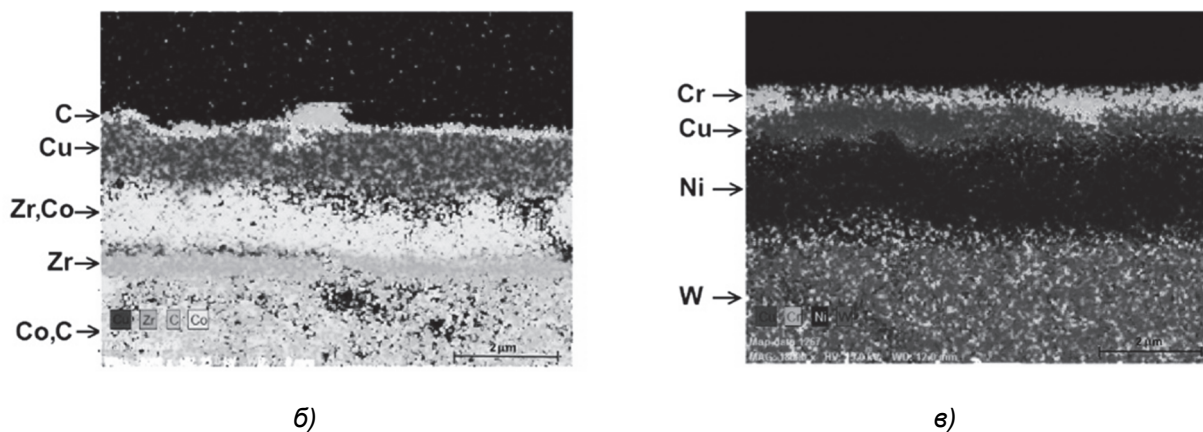
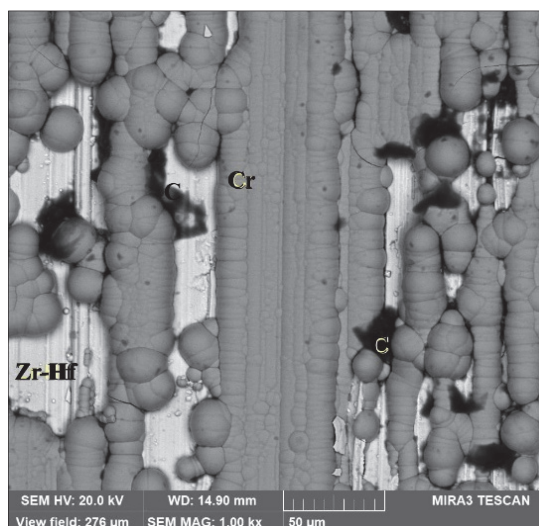


Рисунок 4. — Окончание

Значения микротвердости ( $6,6 \pm 0,3$  ГПа) сформированных на рубильных ножах Hf-Zr-ZrN-покрытий превышают твердость ( $5,2 \pm 0,2$  ГПа) стальных (марки 6ХС) ножей без покрытия. Опытно-промышленные испытания при резании заготовок из древесины хвойных и лиственных пород на рубильной машине МРР8-50ГН показали, что период стойкости инструмента с рубильными ножами с покрытием на основе Zr-Hf и ZrN и с покрытием на основе Cr-ДНА, Zr-Hf и ZrN в 1,9...2,2 и в 1,7...1,9 раза больше по сравнению с инструментом без покрытий соответственно.

Сформированные комбинированные Cr-ДНА/Hf-Zr-ZrN-покрытия также имеют слоистую структуру, состоящую из верхнего гальванического Cr-ДНА-слоя (рисунок 5, а, в), ионно-плазменного среднего ZrN-слоя (см. рисунок 5, в) и нижнего Zr-Hf-слоя (см. рисунок 5, а, в). ZrN-слой не перемешивается с Cr-ДНА- и Zr-Hf-слоями (см. рисунок 5, в). Поверхность верхнего Cr-ДНА-слоя имеет характерную структуру в виде глобулярных образований, сформированных, как доказано в работах [14; 16], фосфидом никеля ( $\text{Ni}_3\text{P}$ ) и кластерами наноалмазов.



а)

Рисунок 5. — СЭМ-снимки лезвия ножа с Cr-ДНА/Hf-Zr-ZrN-покрытием: поверхности покрытия (а), режущей кромки (б) и выделенной зоны В скола на острие лезвия (в)

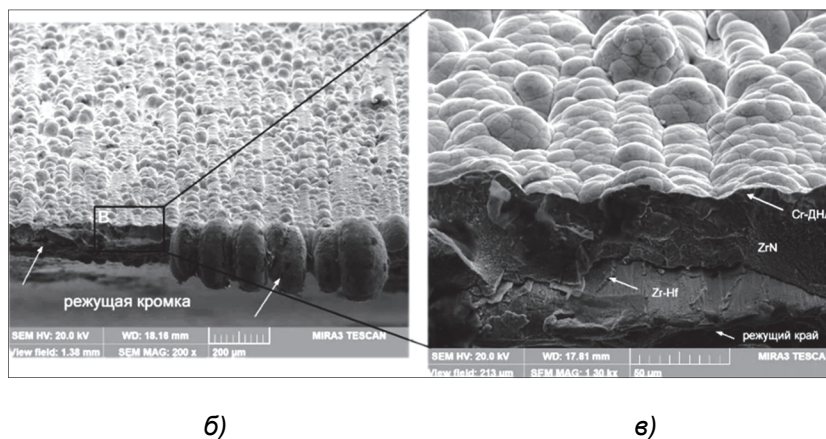


Рисунок 5. — Окончание

**Заключение.** Комбинированными методами ионно-лучевого распыления, КИБ и гальванической обработки на рубильных стальных (марки 6ХС) ножах фрезерного инструмента сформированы Cr-ДНА/Hf-Zr-ZrN-покрытия. В целях получения высокой адгезионной прочности Cr-ДНА-слоя с ZrN-покрытием дополнительно на поверхность ZrN-покрытия осаждались химическим и электрохимическим способами промежуточные слои никеля и меди. Полученные комбинированные покрытия имеют слоистую структуру, состоящую из верхнего гальванического Cr-ДНА-слоя, ионно-плазменных среднего ZrN-слоя и нижнего Zr-Hf-слоя. ZrN-слой не перемешивается с Cr-ДНА- и Zr-Hf-слоями. Значения микротвердости ( $6,6 \pm 0,3$  ГПа) сформированных на рубильных ножах Hf-Zr-ZrN-покрытий превышают твердость ( $5,2 \pm 0,2$  ГПа) стальных (марки 6ХС) ножей без покрытия. Опытно-промышленные испытания показали, что период стойкости фрезерного инструмента с рубильными ножами с покрытием Cr-ДНА/Hf-Zr-ZrN в 1,7...1,9 раза больше по сравнению с инструментом без покрытий при резании заготовок из древесины хвойных и лиственных пород.

#### Список цитированных источников

1. CrCN/CrNta-C multilayer coating for applications in wood processing / A. Gilewicz [et al.] // Tribology Intern. — 2013. — Vol. 57. — P. 1—7.
2. Hard coatings for woodworking tools a review / J. Ratajski [et al.] // J. of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering. — 2009. — Vol. 37, no. 2. — P. 668—674.
3. Corrosion mechanisms in the wood industry, especially caused by tannins / H. Winkelmann [et al.] // Materials and Corrosion. — 2009. — Vol. 60, iss. 1. — P. 40—48.
4. Pamfilov, E. A. Mechanochemical fracture of the components of wood-cutting equipment / E. A. Pamfilov, S. V. Lukashov, Ya. S. Prozorov // Materials Science. — 2014. — Vol. 50, no. 1. — P. 148—155.
5. State of the art of tool texturing in machining / A. R. Machado [et al.] // J. of Materials Processing Technology. — 2021. — Vol. 293. — P. 117096.
6. Performance of helical edge milling cutters in planing wood / W. Darmawan [et al.] // Europ. J. of Wood and Wood Products. — 2011. — Vol. 69. — P. 565—572.
7. Hard CrCN/CrN multilayer coatings for tribological applications / B. Warcholinski [et al.] // Surface and Coatings Technology. — 2010. — Vol. 204, iss. 14. — P. 2289—2293.
8. Structural and mechanical properties of the ZrC/Ni-nanodiamond coating synthesized by the PVD and electroplating processes for the cutting knives / V. Chayeuski [et al.] // J. of Materials Engineering and Performance. — 2019. — Vol. 28. — P. 1278—1285.
9. Investigation of Properties of the Zr,Hf-(Zr,Hf)N-(Zr,Hf,Me,Al)N coatings, where Me means Cr, Ti, or Mo / A. Vereschaka [et al.] // Coatings. — 2021. — No. 11. — P. 1471.
10. Detonation nanodiamonds: new aspects in the theory and practice of synthesis, properties and applications / V. Yu. Dolmatov [et al.] // Russ. Chem. Reviews. — 2020. — Vol. 89, no. 12. — P. 1428—1462.
11. Влияние ZrN, Mo-N покрытий, сульфацианирования на износ ножей дереворежущего инструмента / А. К. Кулешов [и др.] // Трение и износ. — 2014. — Т. 35, № 3. — С. 276—285.
12. Preparation and characterization of the Cr-nanodiamonds/MoN coatings with performant mechanical properties / V. Chayeuski [et al.] // Coatings. — 2022. — Vol. 12, iss. 7. — P. 1012.

13. Electrodeposition of nanocrystalline chromium coatings from Cr(III)-based electrolyte using pulsed current / F. I. Danilov [at al.] // *Protection of Metals and Phys. Chemistry of Surfaces*. — 2011. — Vol. 47, no. 5. — P. 598—605.
14. *Tseluikin, V. N.* On the structure and properties of composite electrochemical coatings. A review / V. N. Tseluikin // *Protection of Metals and Phys. Chemistry of Surfaces*. — 2016. — Vol. 52, no. 2. — P. 254—266.
15. *Чаевский, В. В.* Формирование и структура Cr-ДНА/ZrN покрытия на твердом сплаве / В. В. Чаевский, В. В. Жилинский // *Взаимодействие излучений с твердым телом : материалы 14-й Междунар. конф., посвящ. 100-летию Белорус. гос. ун-та, Минск, Беларусь, 21—24 сент. 2021 г.* — Минск : БГУ, 2021. — С. 557—560.
16. *Чаевский, В. В.* Влияние параметров электрохимического осаждения на структуру и фазовый состав покрытия сплавом Ni-P / В. В. Чаевский, В. В. Жилинский, О. Чернашеюс // *Тр. БГУ*. — 2016. — № 6. — С. 106—109.

Поступила в редакцию 28.03.2024.