

УДК 62-408.2

П. В. Рудак¹, Д. В. Куис¹, С. Д. Латушкина², О. Г. Рудак¹, С. Барчик³,
П. Бир⁴, А. Балтрушайтис⁵, Е. Ю. Разумов⁶, Е. А. Зборин¹

¹Белорусский государственный технологический университет

²Физико-технический институт Национальной академии наук Беларуси

³Технический университет в Зволене (Словацкая Республика)

⁴Варшавский университет естественных наук (Республика Польша)

⁵Каунасский технологический университет (Литовская Республика)

⁶Поволжский государственный технологический университет (Российская Федерация)

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ КОРРОЗИОННОЙ СТОЙКОСТИ НАНОСТРУКТУРИРОВАННЫХ ВАКУУМНО-ПЛАЗМЕННЫХ ПОКРЫТИЙ СИСТЕМЫ TiZrN ДЛЯ ДЕРЕВОРЕЖУЩЕГО ИНСТРУМЕНТА

Работа посвящена изучению структурообразования и экспериментальным исследованиям коррозионной стойкости покрытий системы TiZrN, осажденных вакуумно-плазменным электродуговым методом из многокомпонентных плазменных потоков.

Применены методы электронной микроскопии с микрорентгеноспектральным анализом, метод рентгеноструктурного анализа. Проведены комплексные электрохимические испытания образцов с покрытиями путем хронопотенциометрирования и снятия поляризационных кривых. Установлено, что для покрытий системы TiZrN вне зависимости от концентрации Zr основной кристаллической составляющей является твердый раствор TiZrN на основе кубической решетки структурного типа NaCl.

Введение легирующих элементов в покрытия TiN приводит к уменьшению размера зерна до 6–8 нм в случае покрытий TiZrN в зависимости от концентрации легирующего элемента в покрытии. В то время как для покрытий TiN этот показатель составляет 30–40 нм. Период решетки покрытий TiZrN увеличивается с повышением концентрации Zr. Для всех исследованных покрытий характерны высокие значения сжимающих остаточных напряжений порядка 13–20 ГПа.

Результаты электрохимических испытаний на коррозионную стойкость для образцов пластин из стали 10X18H10T с вакуумно-плазменными покрытиями системы TiZrN позволили сделать вывод о наибольшей коррозионной стойкости (в ≈1,5–2 раза по сравнению с наименее стойким покрытием из исследованных) покрытия ТЦЗ.

Ключевые слова: вакуумно-плазменные покрытия, дереворежущий инструмент, коррозионная стойкость, структурообразование, хронопотенциометрирование, поляризационная кривая.

P. V. Rudak¹, D. V. Kuis¹, S. D. Latushkina², O. G. Rudak¹, Š. Barčík³,
P. Beer⁴, A. Baltrusaitis⁵, E. Yu. Razumov⁶, E. A. Zborin¹

¹Belarusian State Technological University

²Physical Technical Institute of the National Academy of Sciences of Belarus

³Technical University in Zvolen (Slovak Republic)

⁴Warsaw University of Life Sciences (Republic of Poland)

⁵Kaunas University of Technology (Republic of Lithuania)

⁶Volga State University of Technology (Russian Federation)

RESEARCH RESULTS OF CORROSION RESISTANCE OF NANOSTRUCTURED VACUUM-PLASMA TiZrN SYSTEM COATING FOR WOODCUTTING TOOLS

The article presents the results of experimental studies of structure and corrosion resistance of the TiZrN system coatings deposited vacuum plasma arc method from multi-component plasma flows. Applying the method of electron microscopy with micro X-ray analysis, X-ray diffraction method. Conducted complex electrochemical tests of coated samples by removing chronopotentiometry and polarization curves.

It was found that for TiZrN system covers the main crystal component is a solid solution based on TiZrN cubic NaCl-type lattice. The intensity of the reflection from the crystal plane (111) has a pronounced peak for coatings TiZrN at different Zr concentrations. Introduction of alloying elements Zr in the coating TiN reduces grain size of 6–8 nm. TiZrN coatings grating period increases with the concentration of Zr.

All the coatings are characterized by high values of compressive residual stresses around 13–20 GPa. The highest corrosion resistance has TC3 coating on the steel plate samples.

Key words: vacuum plasma coating, woodcutting tools, structure, corrosion resistance, chronopotentiometry, polarization curve.

Введение. В процессе резания древесины и композиционных материалов на ее основе на инструмент воздействуют продукты деструкции древесины и связующего. Это может приводить к явлениям химического, механохимического и электрохимического характера на лезвиях инструмента, которые оказывают существенное влияние на стойкость.

Возможности по повышению стойкости дереворежущего инструмента открывает применение вакуумно-плазменных покрытий различных составов и структур [1, 2].

Целью работы является изучение структурообразования и экспериментальное исследование коррозионной стойкости покрытий системы TiZrN, осажденных вакуумно-плазменным электродуговым методом из многокомпонентных плазменных потоков.

Для достижения поставленной цели требуется применение методов электронной микроскопии с микрорентгеноспектральным анализом, рентгеноструктурного анализа, а также необходимо проведение комплексных электрохимических испытаний образцов с покрытиями путем хронопотенциометрирования и снятия поляризационных кривых.

Основная часть. Осаждение покрытий системы TiZrN проводилось на вакуумно-дуговой установке УРМЗ.279.048, оснащенной сепаратором макрочастиц. При этом были использованы катоды из титана ВТ1-0 и циркония. Осаждение при различных режимах осуществляли на подложки из стали 10X18H10T. Парциальное давление азота $1,8-2,0 \cdot 10^{-4}$ Торр. Ток дуги для титанового катода I_{Ti} устанавливался из диапазона 40–80 А, ток дуги для циркониевого катода I_{Zr} – из диапазона 55–80 А.

Исходя из максимальной скорости осаждения равномерных покрытий, выбраны: ток фокусирующей катушки – 3 А, ток направляющей катушки – 0,7 А. Образцы с покрытиями изучали методом электронной микроскопии с микрорентгеноспектральным анализом, методом рентгеноструктурного анализа. Режимы нанесения и результаты исследований образцов с покрытиями, в том числе концентрации титана и циркония (соответственно C_{Ti} и C_{Zr}), представлены в таблице.

Для покрытий системы TiZrN вне зависимости от концентрации Zr основной кристаллической составляющей является твердый раствор TiZrN на основе кубической решетки структурного типа NaCl.

Интенсивность отражения от кристаллографической плоскости (111) имеет ярко выраженный пик для покрытий TiZrN при различных концентрациях Zr. Рост текстуры (111) возможно связан с минимизацией общей сво-

бодной энергии покрытия, которая включает в себя энергию деформации и поверхностную энергию. Период решетки покрытий TiZrN увеличивается с повышением концентрации Zr, поскольку атомный радиус циркония (0,160 нм) превышает атомный радиус титана (0,146 нм) и происходило образование твердого раствора $Ti_xZr_{1-x}N$ на базе решетки TiN. Установлено, что введение легирующих элементов в покрытия TiN приводит к уменьшению размера зерна до 6–8 нм в случае покрытий TiZrN в зависимости от концентрации легирующего элемента в покрытии. В то время как для покрытий TiN этот показатель составляет 30–40 нм.

Режимы нанесения и результаты исследований образцов с покрытиями

| Номер образца | I_{Ti} , А | I_{Zr} , А | C_{Ti} , ат. % | C_{Zr} , ат. % | Внутренние напряжения, ГПа |
|---------------|--------------|--------------|------------------|------------------|----------------------------|
| ТЦ1 | 60 | 60 | 53,37 | 15,36 | – |
| ТЦ2 | 40 | 60 | 40,57 | 28,62 | –22,2 |
| ТЦ3 | 80 | 60 | 55,46 | 13,36 | –25,4 |
| ТЦ4 | 60 | 80 | 45,64 | 23,84 | –13,1 |
| ТЦ5 | 80 | 55 | 48,08 | 5,04 | – |

Необходимо отметить, что для всех исследованных покрытий характерны высокие значения сжимающих остаточных напряжений порядка 13–20 ГПа. Это свойственно конденсатам нитридов, полученным в условиях ионной бомбардировки, способствующей улучшению адгезии покрытия к материалу основы и развитию в нем структурных напряжений сжатия, обусловленных atomic peening эффектом.

Испытания на коррозионную стойкость образцов стальных пластин (сталь 10X18H10T) с вакуумно-плазменными покрытиями проводились электрохимическими методами: путем измерения временных зависимостей потенциалов образцов и методом снятия поляризационных кривых.

Снятие поляризационных кривых проводилось потенциостатическим методом с использованием стандартной электрохимической ячейки с применением потенциостата IPC Pro M в комплекте с персональным компьютером.

Согласно общим изменениям во времени электродных потенциалов, показанных на рис. 1, наибольшей стабильностью характеризуются хронопотенциометрические зависимости для электродов, выполненных из образцов ТЦ1 и ТЦ3.

На рис. 2 представлены зависимости плотности тока i от электродных потенциалов для образцов стальных пластин с вакуумно-плазменными покрытиями системы TiZrN.

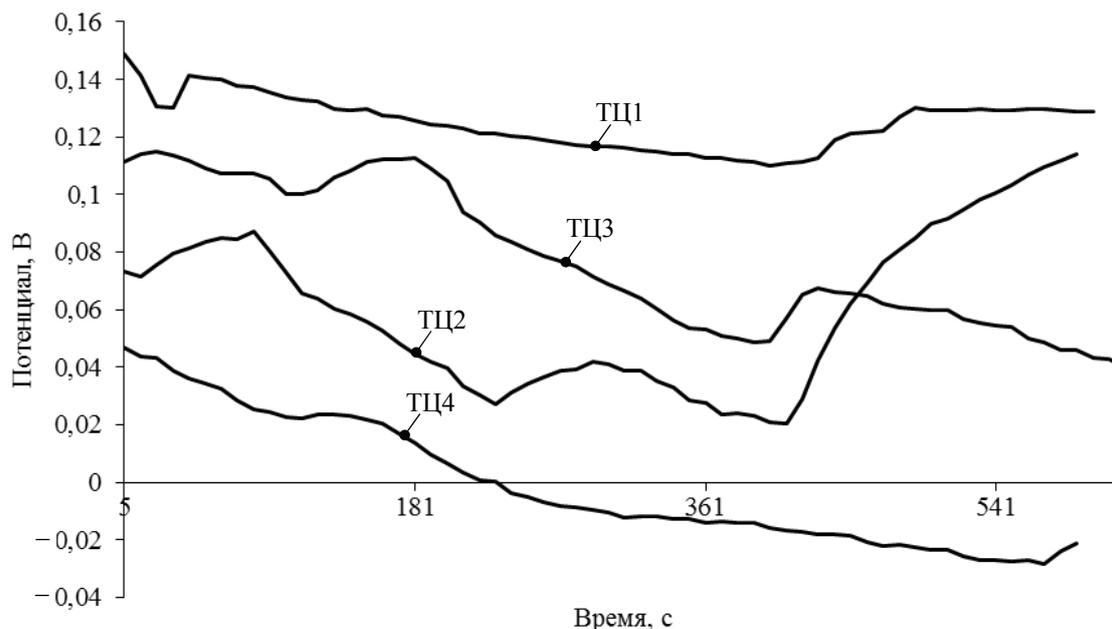


Рис. 1. Общее изменение во времени электродных потенциалов для образцов стальных пластин с вакуумно-плазменными покрытиями системы TiZrN

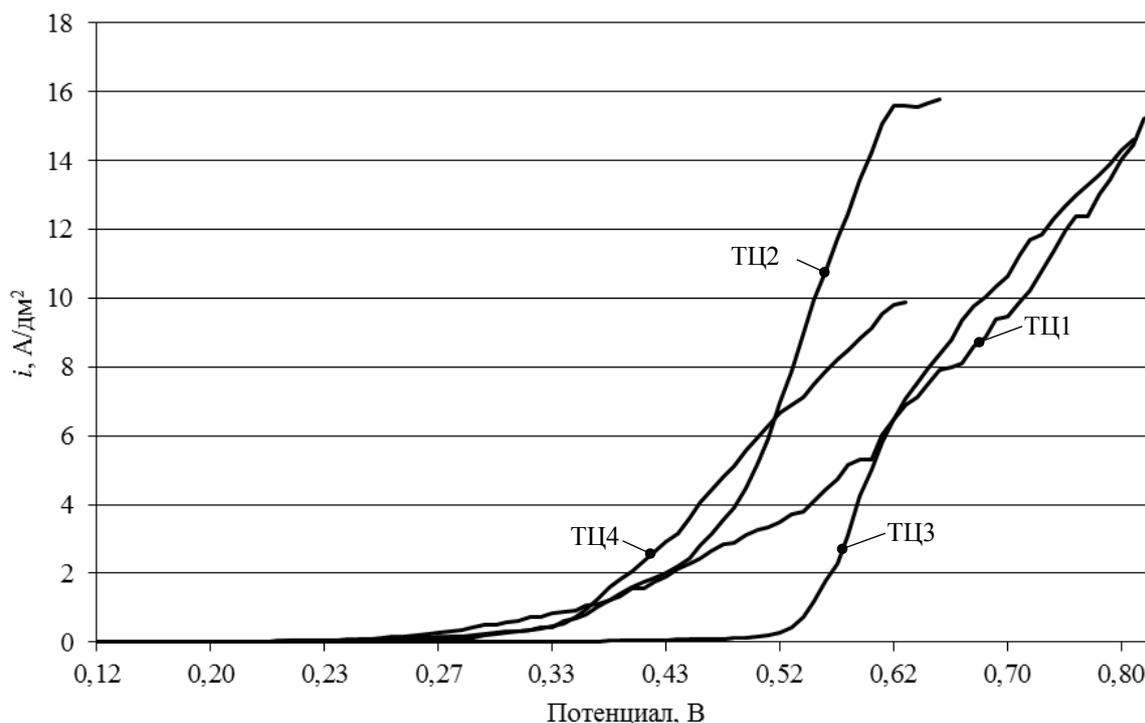


Рис. 2. Зависимости плотности тока i от электродных потенциалов для образцов стальных пластин с вакуумно-плазменными покрытиями системы TiZrN

Поляризационные кривые позволяют сделать вывод о том, что при изменении плотности тока наибольшую стабильность проявляют потенциалы электродов из образцов ТЦ3 и ТЦ1. Электрод из образца ТЦ3 проявил наибольшее сопротивление протеканию на нем реакции.

Заключение. Таким образом, результаты электрохимических испытаний на коррозион-

ную стойкость путем хронопотенциометрирования и снятия поляризационных кривых для образцов пластин из стали 10X18H10T с вакуумно-плазменными покрытиями системы TiZrN позволяют сделать вывод о наибольшей коррозионной стойкости (в $\approx 1,5-2$ раза по сравнению с наименее стойким покрытием из исследованных) покрытия ТЦ3 ($C_{Ti} = 55,46$ ат. %, $C_{Zr} = 13,36$ ат. %).

Литература

1. Rudak P. V., Kovac J., Kuis D. V., Rudak O. G., Barcik S., Krilek J., Razumov E. J. Experimental researches tribological properties of hard-alloy blades with a vacuum-plasma coating in the chipboards milling process // *Acta Univ. Agric. Silvic. Mendelianae Brun.* 2015. Vol. 63. Issue 5. P. 1543–1547.
2. Вакуумно-плазменные защитные покрытия на дереворежущий инструмент / С. Д. Латушкина [и др.] // Упрочняющие технологии и покрытия. 2014. № 11. С. 23–28.

References

1. Rudak P. V., Kovac J., Kuis D. V., Rudak O. G., Barcik S., Krilek J., Razumov E. J. Experimental researches tribological properties of hard-alloy blades with a vacuum-plasma coating in the chipboards milling process. *Acta Univ. Agric. Silvic. Mendelianae Brun*, 2015, vol. 63, issue 5, pp. 1543–1547.
2. Latushkina S. D., Kuis D. V., Zhizhchenko A. G., Posilkina O. I., Rudak P. V., Komarovskaya V. M. Vacuum plasma protective coating on the wood-cutting tools. *Uprochnyayushchie tekhnologii i pokrytiya* [Hardening and coating technology], 2014, no. 6, pp. 23–28 (In Russian).

Информация об авторах

Рудак Павел Викторович – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры материаловедения и технологии металлов. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: RudakPV@belstu.by

Куис Дмитрий Валерьевич – кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой материаловедения и технологии металлов. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: KuisDV@belstu.by

Латушкина Светлана Дмитриевна – кандидат технических наук, заведующая лабораторией вакуумно-плазменных покрытий. Физико-технический институт Национальной академии наук Беларуси (220141, ул. Академика В. Ф. Купревича, 10, Республика Беларусь). E-mail: phti@tut.by

Рудак Оксана Геннадьевна – магистр технических наук, ассистент кафедры технологии и дизайна изделий из древесины. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: RudakOG@belstu.by

Барчик Стэфан – кандидат технических наук, профессор кафедры контроля машин и автоматизации. Технический университета в Зволене (SK-96053, г. Зволен, ул. Т. Г. Машарика, 24, Словацкая Республика). E-mail: barcik@tuzvo.sk

Бир Петр – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой технологии и предпринимательства в деревообрабатывающей промышленности. Варшавский университет естественных наук (02-787, г. Варшава, ул. Новоурсиновская, 166, Республика Польша). E-mail: piotr_beer@sggw.pl

Балтрушайтис Антанас – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры материаловедения. Каунасский технологический университет (44249, г. Каунас, ул. К. Донилайтиса, 73, Литовская Республика). E-mail: antanas.baltrusaitis@ktu.lt

Разумов Евгений Юрьевич – доктор технических наук, доцент, доцент кафедры деревообрабатывающей промышленности. Поволжский государственный технологический университет (424000, г. Йошкар-Ола, пл. Ленина, 3, Республика Марий Эл, Российская Федерация). E-mail: evgeny.razumov2011@yandex.ru

Зборин Евгений Александрович – студент. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: Zborin2011@yandex.ru

Information about the authors

Rudak Pavel Viktorovich – PhD (Engineering), Assistant Professor, Assistant Professor, the Department of Material Science and Metal Technology. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: RudakPV@belstu.by

Kuis Dmitriy Valer'yevich – PhD (Engineering), Assistant Professor, Head of the Department of Material Science and Metal Technology. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: KuisDV@belstu.by

Latushkina Svetlana Dmitrievna – PhD (Engineering), Head of the Laboratory of Vacuum Plasma Coatings. Physico-Technical Institute of the National Academy of Sciences of Belarus (10, Kuprevicha Str., 220141, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: phti@tut.by

Rudak Oksana Gennad'yevna – Master of Engineering, assistant, the Department of Technology and Design of Wooden Articles. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: RudakOG@belstu.by

Barčík Štefan – PhD (Engineering), Professor, Department of Machinery Control and Automation. Technical University in Zvolen (24, T. G. Masaryka, SK-96053, Zvolen, Slovak Republic). E-mail: barcik@tuzvo.sk

Beer Piotr – DSc (Engineering), Professor, Head of the Department of Technology and Entrepreneurship in Woodworking Industry. Warsaw University of Life Sciences (166, Nowoursynowska str., 02-787, Warsaw, Republic of Poland). E-mail: piotr_beer@sggw.pl

Baltrusaitis Antanas – PhD (Engineering), Assistant Professor, Department of Materials Engineering. Kaunas University of Technology (73, K. Donelaicio str., 44249, Kaunas, Republic of Lithuania). E-mail: antanas.baltrusaitis@ktu.lt

Razumov Evgeniy Yur'yevich – DSc (Engineering), Assistant Professor, Assistant Professor, Department of Wood Processing Industry. Volga State University of Technology (3, Lenina Sq., 424000, Yoshkar-Ola, Republic of Mari El, Russian Federation). E-mail: evgeny.razumov2011@yandex.ru

Zborin Evgeniy Aleksandrovich – student. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: Zborin2011@yandex.ru

Поступила 15.02.2016