

УДК 674.055:621.934(043.3)

**В. В. Чаевский<sup>1</sup>, А. А. Гришкевич<sup>1</sup>, В. В. Жилинский<sup>1</sup>, О. Чернашеюс<sup>2</sup>**<sup>1</sup>Белорусский государственный технологический университет<sup>2</sup>Вильнюсский технический университет имени Гедиминаса**ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ZrN-Ni-Co-ПОКРЫТИЙ  
НА ЛЕЗВИЯХ СТАЛЬНЫХ НОЖЕЙ ДЕРЕВОРЕЖУЩЕГО ИНСТРУМЕНТА**

Определены параметры электролитического синтеза из сернокислого электролита Ni-Co-покрытий на стальную поверхность. Подобраны режимы и сформированы КИБ методом ZrN-покрытия, гальваническими КИБ методами комбинированные ZrN-Ni-Co-покрытия на лезвиях стальных (марки Р6М5) ножей дереворежущего фрезерного инструмента.

Сформированные гальванические Ni-Co-слои не перемешиваются со стальной основой и ZrN-покрытием.

Значение микротвердости ZrN-Ni-Co-покрытий в 1,2–1,5 раза превышает величину микротвердости Ni-Co-покрытия на стальной подложке и стали без покрытия.

Основным видом износа стального лезвия ножа с Ni-Co- и ZrN-Ni-Co-покрытиями при резании ламинированных древесностружечных плит (ДСтП) является абразивный износ. Покрытия на поверхности стальных лезвий ножей фрез уменьшают интенсивность их износа. Величина рассчитанного объемного износа лезвия ножа с ZrN-Ni-Co-покрытием при резании ламинированных ДСтП в лабораторных условиях имела более чем в 3 раза меньшее значение, чем для лезвия с Ni-Co-покрытием.

Проведенные опытно-промышленные испытания на ОАО «Минскдрев» модифицированных фрез с комбинированными ZrN-Ni-Co-покрытиями на лезвиях ножей показали увеличение периода стойкости фрез при резании сосны (штапик) до 30% по сравнению с инструментом без покрытий.

**Ключевые слова:** лезвия, нож, инструмент, покрытия, износ, период стойкости.

**V. V. Chayuski<sup>1</sup>, A. A. Grishkevich<sup>1</sup>, V. V. Zhylnski<sup>1</sup>, O. Cernashejus<sup>2</sup>**<sup>1</sup>Belarusian State Technological University<sup>2</sup>Vilnius Gediminas Technical University**PHYSICAL AND MECHANICAL PROPERTIES OF ZrN-Ni-Co-COATINGS  
ON THE EDGES OF STEEL KNIVES OF WOOD-CUTTING TOOLS**

The article deals with the investigations of the structure, element composition as well as mechanical and tribological properties of ZrN-Ni-Co-coatings formed on the edges of steel (kind R6M5) knives of wood-cutting tools.

Ni-Co-coatings are synthesized from sulfate electrolyte on the steel surface. Modes were selected and ZrN-coating, combined ZrN-Ni-Co-coating are formed by PVD method, by electroplating and PVD methods.

Formed electroplated Ni-Co-layers are not mixed with the steel substrate and the ZrN-coating.

The microhardness value of combined ZrN-Ni-Co-coatings is 1.2–1.5 times more than that of the steel base and bare steel.

When cutting laminated chipboard by steel knives of milling tool with Ni-Co- and ZrN-Ni-Co-coatings under laboratory conditions, abrasive surface wear type of edges is observed. The wear intensity of the edges of knives with deposited coatings is reduced. The value of calculated bulk wear of the edges of knives with ZrN-Ni-Co-coatings had more than 3 times less value in comparison with the knives with Ni-Co-coatings.

Pilot testing of the tool modified with combined ZrN-Ni-Co-coatings at JSC “Minskdrėv” when cutting pine confirmed relevance of the tests carried out, as well as showed an increase in durability period of cutters up to 30% compared with the bare tool.

**Key words:** edges, knives, tool, wear, durability period, coatings.

**Введение.** Высокое значение величины полного периода стойкости режущего инструмента современного оборудования на деревообрабатывающих производствах – одно из основных условий эффективной работы. Физико-механические свойства материала инструмента являются одними из определяющих факторов, оказывающих влияние на его период стойкости. При резании

древесностружечных плит (ДСтП) действие входящих в их состав абразивосодержащих частиц, имеющих твердость, соизмеримую с твердостью инструментального материала, приводит к возрастанию сил трения на задней поверхности резца и к более интенсивному абразивному износу контактных поверхностей инструмента [1]. При резании ДСтП хвостовыми фрезами со стальными

ножами высокие температуры, возникающие в поверхностных слоях лезвия ножей ( $700\text{--}800^\circ\text{C}$ ), вызывают уменьшение прочности металла, которое способствует размягчению и размазыванию тонких поверхностных слоев лезвия из стали [2]. С учетом того, что в Республике Беларусь для механической обработки древесных материалов применяется в основном только инструмент с импортными дорогостоящими твердосплавными ножами, можно заключить, что решение задач, направленных на увеличение периода стойкости дереворежущего инструмента со стальными ножами, изготовленными в Беларуси, России и на Украине, является актуальным, технически и экономически обоснованным.

Одним из наиболее эффективных способов обработки поверхности лезвий ножей дереворежущих инструментов считается метод конденсации вещества из плазменной фазы в вакууме с ионной бомбардировкой поверхности (КИБ), существенно увеличивающий эксплуатационные свойства резцов при осаждении на их поверхность покрытий нитридов тугоплавких металлов Ti, Mo, Zr и др. [1]. В настоящее время в машиностроении широко используются гальванические сплавы на основе железа и покрытия, полученные из сульфатных электролитов на основе железо-никель, которые являются достаточно износостойкими [3].

В связи с этим целью работы являлось получение электрохимических покрытий сплавом Ni-Co и комбинированных гальвано-ионно-плазменных ZrN-Ni-Co-покрытий на поверхности двухлезвийных стальных (P6M5) ножей хвостовых фрез, исследование износа обработанных лезвий ножей при резании ламинированных ДСтП с учетом фазового, элементного состава и микротвердости сформированных слоев, определение периода стойкости модифицированного фрезерного инструмента.

**Основная часть.** Гальванические покрытия сплавом Ni-Co наносили на кафедре химии, технологии электрохимических производств и материалов электронной техники (Х,ТЭПиМЭТ) БГТУ на подготовленную поверхность лезвий ножей при токах  $0,4\text{--}0,8$  А из сернокислого электролита, содержащего ( $\text{г/дм}^3$ ):  $\text{NiSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O} - 200$ ;  $\text{NaCl} - 20$ ;  $\text{CoSO}_4 - 80$ ;  $\text{H}_3\text{BO}_3 - 40$ ; 1,4-бутиндиол – 1–3, при температуре  $40\text{--}50^\circ\text{C}$ . Кислотность (рН) электролита поддерживали рН-метром рН-150 с точностью  $\pm 0,05\%$ . Уровень рН до нужного значения ( $\text{pH} = 4,9\text{--}5,0$ ) корректировался концентрированным раствором серной кислоты. В качестве лиганда использовалось соединение из группы алкилэтилендиаминотетракусусных кислот [4]. Толщина покрытий не превышала 10 мкм.

Перед осаждением гальванических покрытий сплавом Ni-Co проводилась подготовка по-

верхности образцов двумя способами, которая представляла собой химическое обезжиривание при температуре  $60\text{--}80^\circ\text{C}$  в течение 6–8 мин, промывку в горячей (при температуре  $40\text{--}60^\circ\text{C}$  на протяжении 0,5–1,0 мин) и холодной (при температуре  $18\text{--}25^\circ\text{C}$  в течение 1–2 мин) воде, травление (в растворе  $\text{H}_2\text{SO}_4$  ( $50\text{--}100$  г/л) с ингибитором КИ-1 ( $5\text{--}7$  г/л) при температуре  $18\text{--}25^\circ\text{C}$  на протяжении 1 мин) и холодную промывку, активацию, промывку и сушку [4].

ZrN-покрытия осаждались на ножи с Ni-Co-покрытием на установке ВУ-1Б «Булат» на кафедре деревообрабатывающих станков и инструментов (ДОСИИ) БГТУ в два этапа: с предварительной обработкой ионами циркония в вакууме ( $10^{-3}$  Па) при потенциале подложки  $-1$  кВ и последующим нанесением покрытий при токе горения дуги Zr-катода 100 А и опорном напряжении  $-100$  В в атмосфере азота при давлении  $10^{-1}$  Па. Температура при осаждении соответствовала  $400\text{--}450^\circ\text{C}$ . Толщина ZrN-покрытий не превышала 1,5 мкм.

Фазовый состав полученных покрытий исследовался методом рентгеноструктурного анализа (РСА) при помощи дифрактометра Ultima IV (Rigaku, Япония) в  $\text{Cu-K}_\alpha$  излучении. Микротвердость испытываемых покрытий определялась при помощи микротвердомера ПМТ-3 по методу Виккерса при нагрузке 50 г.

Измерение адгезионной прочности образцов с полученными покрытиями проводилось на установке «скретч-тестер», разработанной и изготовленной БГУ – ЗАО «БМЦ». Принцип работы «скретч-тестера» основан на методе склерометрии – горизонтальном перемещении и царапании поверхности покрытия алмазным индентором, предварительно внедренным на определенную глубину при пропорционально возрастающей нагрузке и определении критической нагрузки, при которой происходит отрыв или разрушение покрытия [5].

Лабораторные испытания на период стойкости лезвий ножей сборной фрезы диаметром 21 мм при резании ламинированных ДСтП толщиной 25 мм проводили на обрабатывающем центре ROVER-B4.35 (Италия) на кафедре ДОСИИ при следующих режимах: число ножей на фрезе – 2; частота вращения фрезы –  $15\ 000$   $\text{мин}^{-1}$ ; припуск – 1,0 мм/проход. Длина резания определялась по критерию потери режущей способности ножа – появлению сколов отделки плиты и не превышала 1200 м. п. Объемный износ лезвия ножа после испытаний рассчитывался по методике определения поперечных размеров кромки лезвия по всей ее длине с помощью микротвердомера ПМТ-3 с учетом первоначального неизношенного угла заточки лезвия.

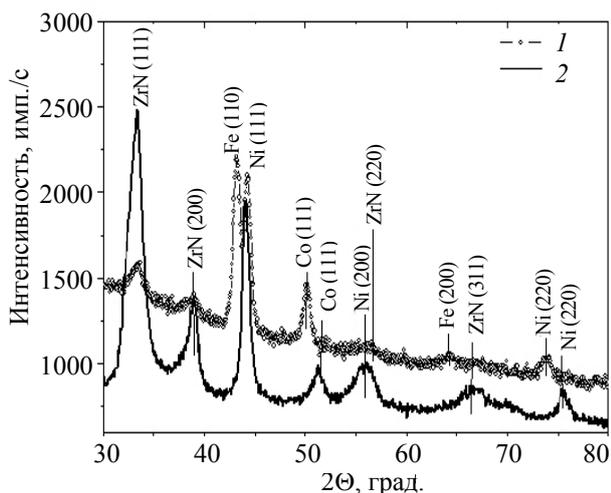


Рис. 1. Рентгенограммы Ni-Co- (1) и ZrN-Ni-Co-покрытий (2)

Для определения элементного состава сформированных слоев, видов износа обработанных лезвий ножей были проведены с помощью методов рентгеноспектрального микроанализа (РСМА), растровой и сканирующей электронной микроскопии (РЭМ и СЭМ) на сканирующем электронном микроскопе LEO-1455 VP фрактографические исследования морфологии режущей кромки лезвия ножа после лабораторных испытаний.

Установлено, что сформированные комбинированные ZrN-Ni-Co-покрытия состоят из отдельных фаз нитрида ZrN, имеющего границентрированную кубическую структуру, никеля и кобальта с гексагональной решеткой (рис. 1).

Сформированные гальванические Ni-Co-слои не перемешиваются со стальной основой и ZrN-покрытием (рис. 2).

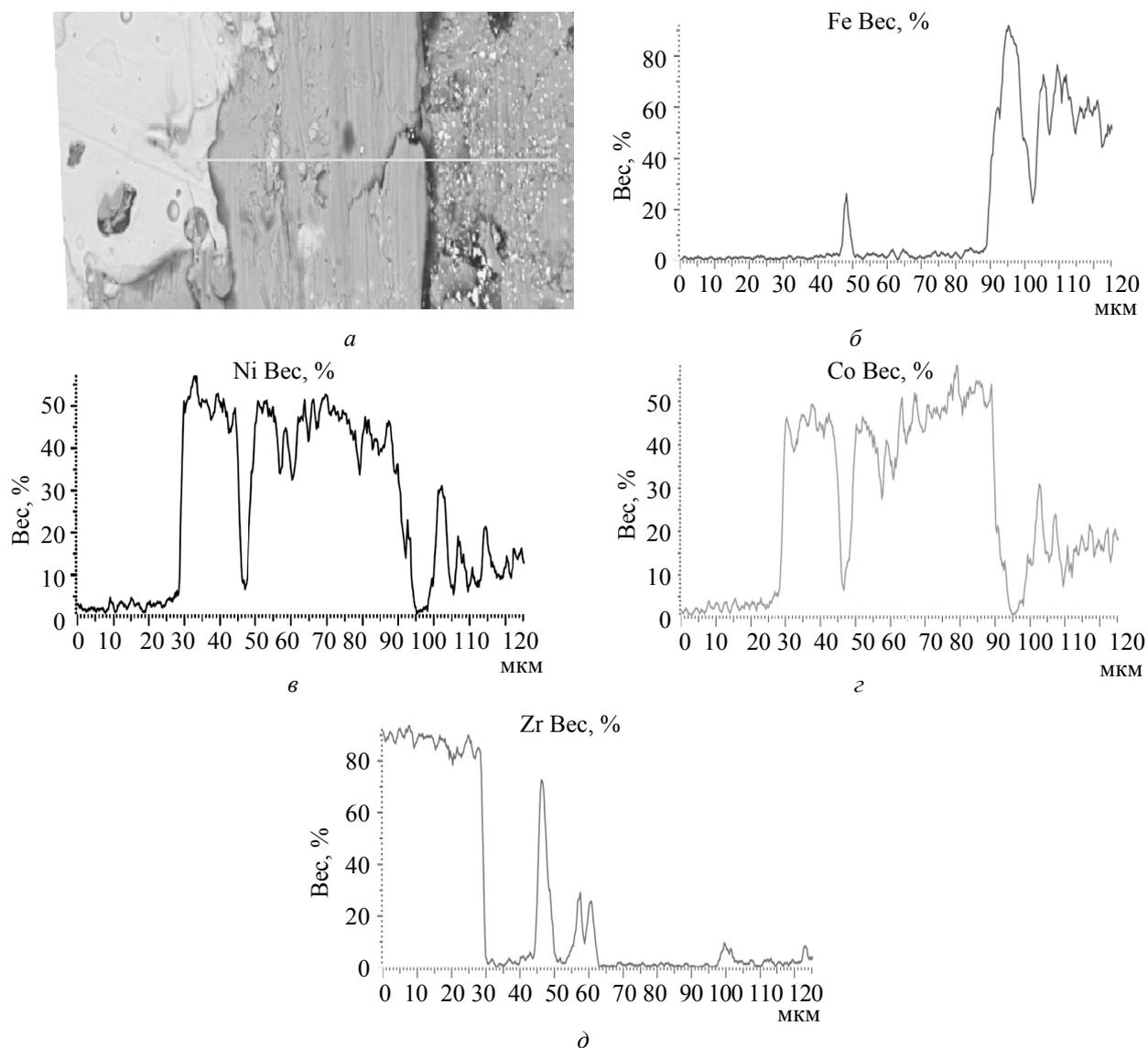
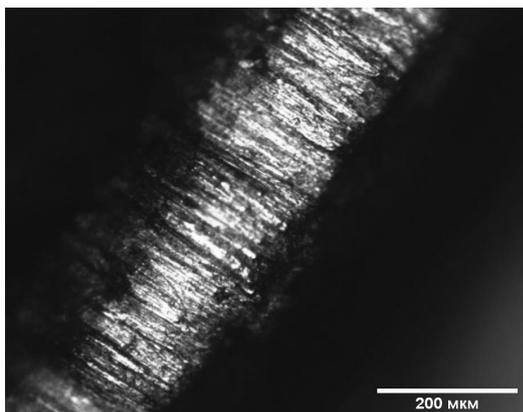


Рис. 2. СЭМ-снимок излома лезвия ножа с ZrN-Ni-Co-покрытием (а) и распределение концентраций элементов Fe (б), Ni (в), Co (г) и Zr (д) вдоль линии (а)

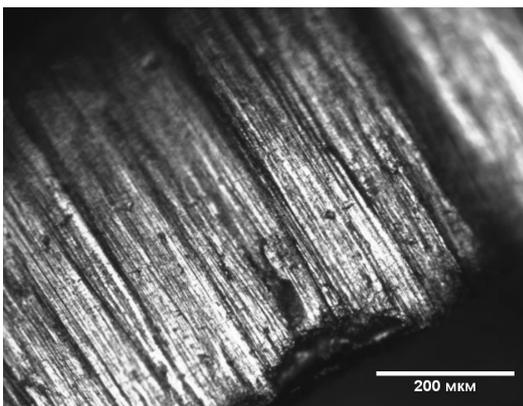
Среднее значение микротвердости Ni-Co-покрытия на стальной основе составило 9,6 ГПа, а ZrN-Ni-Co-покрытия – 13,0 ГПа, что практически в 1,3 раза превышает величину микротвердости Ni-Co-покрытия и в 1,5 раза величину микротвердости стальной подложки без покрытия (8,5 ГПа).

Выполненные расчеты усредненного объемного износа лезвия ножей после лабораторных испытаний показали, что объемный износ комбинированного ZrN-Ni-Co-покрытия ( $6,75 \cdot 10^7$  мкм<sup>3</sup>) уменьшается в 3,4 раза по сравнению с упрочняющим лезвием Ni-Co-покрытием ( $2,30 \cdot 10^8$  мкм<sup>3</sup>).

Оптические снимки изношенной кромки лезвия ножа с ZrN-Ni-Co- и Ni-Co-покрытиями (рис. 3) подтверждают расчеты объемного износа и показывают, что степень износа лезвия ножей с ZrN-Ni-Co-покрытием (рис. 3, а) значительно меньше, чем в случае лезвия ножей с Ni-Co-покрытием (рис. 3, б).



а



б

Рис. 3. Снимки изношенного лезвия ножа с ZrN-Ni-Co- (а) и Ni-Co-покрытиями (б) после резания ламинированной ДСтП

В процессе резания ламинированной ДСтП наблюдается абразивный износ как гальванических (типа Fe-Ni-, Ni-Co-покрытий), так и гальвано-ионно-плазменных ZrN-Ni-Co-покрытий на лезвии ножа, хотя степень износа лезвия ножей с ZrN-покрытием значительно меньше, чем в случае лезвия ножей с Fe-Ni- или Ni-Co-покрытием [1, 4].

Несмотря на то, что высокая твердость и прочность сформированных твердых покрытий к воздействию деформационных нагрузок позволяет, по-видимому, увеличить стойкость к хрупкому износу лезвия модифицированных ножей при резании ДСтП [1], в процессе резания на некотором этапе происходит хрупкое частичное разрушение этих покрытий в области лезвия ножа. Вероятно, это связано с ухудшением адгезии покрытия к подложке вследствие резкого увеличения температуры на границе «лезвие ножа – ДСтП», приводящее к отслаиванию и разрушению покрытия. Тем не менее необходимо отметить, что наличие нитрида циркония, обладающего высокой термической и окислительной стойкостью, в комбинированном ZrN-Ni-Co-покрытии позволяет до разрушения покрытия значительно уменьшать воздействие этих процессов на износ лезвия ножа.

Проведенные на предприятии концерна «Беллесбумпром» ОАО «Минскдрев» (г. Минск) опытно-промышленные испытания модифицированных фрез при резании сосны (штапик) подтвердили выполненные расчетные оценки объемного износа лезвия ножей после лабораторных испытаний и показали, что период стойкости фрезерного инструмента с ZrN-Ni-Co-покрытиями увеличивается до 30% по сравнению с необработанным инструментом.

**Заключение.** Установлено, что сформированные гальваническим методом и КИБ обработкой Ni-Co- и ZrN-Ni-Co-покрытия на лезвиях стальных ножей хвостовых фрез обеспечивают при резании материалов из ламинированных ДСтП и хвойных пород древесины повышение периода стойкости режущего инструмента.

Сформированные гальванические Ni-Co-слои не перемешиваются со стальной основой и ZrN-покрытием.

Величина объемного износа лезвия ножей с ZrN-Ni-Co-покрытием значительно меньше, чем в случае лезвия ножей с Ni-Co-покрытием. Основным видом износа стального лезвия ножа при резании ламинированных ДСтП является абразивный износ.

### Литература

1. Effect of ZrN and Mo – N coatings and sulfacyanization on wear of wood-cuttung knives / A. K. Kuleshov [et al.] // Journal of Friction and Wear. 2014. Vol. 35, no. 3. P. 201–209.

2. Использование комбинированных методов упрочнения инструмента для деревообработки с применением концентрированных потоков энергии / И. И. Бавбель [и др.] // Труды БГТУ. 2014. № 2: Лесная и деревообработ. пром-сть. С. 171–174.

3. Функциональные покрытия на основе сплавов железа / С. С. Попова [и др.] // Гальванотехника и обработка поверхности. 2001. Т. 9, № 1. С. 34–39.

4. Кубрак П. Б., Жилинский В. В., Чаевский В. В. Осаждение износостойких покрытий сплавом Fe-Ni из сульфатных электролитов // Труды БГТУ. 2014. № 3: Химия и технология неорганич. в-в. С. 51–53.

5. Определение механических свойств и адгезионной прочности ионно-плазменных покрытий склерометрическим методом / В. М. Матюнин [и др.] // МИТОМ. 2002. № 3. С. 36–39.

### References

1. Kuleshov A. K., Uglov V. V., Rusalsky D. P., Grishkevich A. A., Chaevski V. V., Haranin V. N. Effect of ZrN and Mo – N coatings and sulfacyanization on wear of wood-cuttung knives. *Journal of Friction and Wear*, 2014, vol. 35, no. 3, pp. 201–209.

2. Bavbel I. I., Chayauski V. V., Grishkevich A. A., Haranin V. N. Use of the combined methods of hardening of the tool for woodworking with the application of the concentrated streams of energy. *Trudy BGTU [Proceedings of BSTU]*, 2014, no. 2: Forest and Woodworking Industry, pp. 171–174 (In Russian).

3. Popova S. S., Tseluikina G. V., Solovieva N. D., Tseluikin V. N. Functional coatings based on iron alloys. *Galvanotekhnika i obrabotka poverkhnosti [Galvanotechnics and Surface Treatment]*, 2001, vol. 9, no. 1, pp. 34–39 (In Russian).

4. Kubrak P. B., Zhylinski V. V., Chayauski V. V. Deposition of wear-resistant platings by the Fe-Ni alloy from the sulphate electrolytes. *Trudy BGTU [Proceedings of BSTU]*, 2014, no. 3: Chemistry and Technology of Inorganic substances, pp. 51–53 (In Russian).

5. Matyunin V. M., Volkov P. V., Saidakhmedov R. Kh., Karpman M. G., Kostina M. V. Determination of the mechanical properties and adhesion strength of ion-plasma coatings using sclerometry. *MITOM [MITOM]*, 2002, no. 3, pp. 36–39 (In Russian).

### Информация об авторах

**Чаевский Вадим Витальевич** – кандидат физико-математических наук, доцент, доцент кафедры физики. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: tchaievsky@tut.by

**Гришкевич Александр Александрович** – кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой деревообрабатывающих станков и инструментов. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: dosy@belstu.by

**Жилинский Валерий Викторович** – кандидат химических наук, старший преподаватель кафедры химии, технологии электрохимических производств и материалов электронной техники. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: zhilinski@yandex.ru

**Чернашеюс Олег** – кандидат технических наук, доцент, заместитель декана факультета механики. Вильнюсский технический университет имени Гедиминаса (03224, г. Вильнюс, ул. Басанавичяуса, 28, Литва). E-mail: olecer@vgtu.lt

### Information about the authors

**Chayauski Vadzim Vitalievich** – Ph. D. (Physics and Mathematics), Assistant Professor, Assistant Professor, the Department of Physics. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: tchaievsky@tut.by

**Grishkevich Aleksandr Aleksandrovich** – Ph. D. (Engineering), Assistant Professor, Head of the Department of Woodworking Machines and Tools. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: dosy@belstu.by

**Zhylinski Valeriy Viktorovich** – Ph. D. (Chemistry), senior lecturer, the Department of Chemistry, Electrochemical Production Technology and Materials for Electronic Equipment. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: zhilinski@yandex.ru

**Cernashejus Oleg** – Ph. D. (Engineering), Assistant Professor, Vice-Dean of the Faculty of Mechanics. Vilnius Gediminas Technical University (28, Basanavichyausa str., 03224, Vilnius, Lithuania). E-mail: olecer@vgtu.lt

Поступила 04.03.2015