

ISSN 2079-004X

40'2015



# ВІСНИК

Національного технічного університету  
«ХПІ»

40(1149)'2015

Харків

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
Національний технічний університет  
«Харківський політехнічний інститут»

## **ВІСНИК**

### **НАЦІОНАЛЬНОГО ТЕХНІЧНОГО УНІВЕРСИТЕТУ «ХПІ»**

*Серія: Технології в машинобудуванні*

№ 40 (1149) 2015

Збірник наукових праць

Видання засноване у 1961 р.

Харків  
НТУ «ХПІ», 2015

**Вісник Національного технічного університету «ХПІ».** Збірник наукових праць. Серія: Технології в машинобудуванні. – Х. : НТУ «ХПІ». – 2015. – № 40 (1149). – 128 с.

**Державне видання**

**Свідоцтво Держкомітету з інформаційної політики України  
КВ № 5256 від 2 липня 2001 року**

Збірник виходить українською та російською мовами.

*Вісник Національного технічного університету «ХПІ» внесено до «Переліку наукових фахових видань України, в яких можуть публікуватися результати дисертаційних робіт на здобуття наукових ступенів доктора і кандидата наук», затвердженого наказом МОН України від 21.12.2015 № 1328 «Про затвердження рішень Атестаційної колегії Міністерства щодо діяльності спеціалізованих вчених рад від 15 грудня 2015 року»*

**Координаційна рада:**

Л. Л. ТОВАЖНЯНСЬКИЙ, д-р техн. наук, проф. (**голова**);  
К. О. ГОРБУНОВ, канд. техн. наук, доц. (**секретар**);  
А. П. МАРЧЕНКО, д-р техн. наук, проф.; Є. І. СОКОЛ, д-р техн. наук, чл.-кор. НАН України;  
Є. Є. АЛЕКСАНДРОВ, д-р техн. наук, проф.; А. В. БОЙКО, д-р техн. наук, проф.;  
Ф. Ф. ГЛАДКИЙ, д-р техн. наук, проф.; М. Д. ГОДЛЕВСЬКИЙ, д-р техн. наук, проф.;  
А. І. ГРАБЧЕНКО, д-р техн. наук, проф.; В. Г. ДАНЬКО, д-р техн. наук, проф.;  
В. Д. ДМИТРИЄНКО, д-р техн. наук, проф.; І. Ф. ДОМНІН, д-р техн. наук, проф.;  
В. В. СПІФАНОВ, канд. техн. наук, проф.; Ю. І. ЗАЙЦЕВ, канд. техн. наук, проф.;  
П. О. КАЧАНОВ, д-р техн. наук, проф.; В. Б. КЛЕПІКОВ, д-р техн. наук, проф.;  
С. І. КОНДРАШОВ, д-р техн. наук, проф.; М. А. ТКАЧУК, д-р техн. наук, проф.;  
В. І. КРАВЧЕНКО, д-р техн. наук, проф.; Г. В. ЛІСАЧУК, д-р техн. наук, проф.;  
О. К. МОРАЧКОВСЬКИЙ, д-р техн. наук, проф.; В. І. НІКОЛАЄНКО, канд. іст. наук, проф.;  
П. Г. ПЕРЕРВА, д-р екон. наук, проф.; В. А. ПУЛЯЄВ, д-р техн. наук, проф.;  
М. І. РИЩЕНКО, д-р техн. наук, проф.; В. Б. САМОРОДОВ, д-р техн. наук, проф.;  
Г. М. СУЧКОВ, д-р техн. наук, проф.; Ю. В. ТИМОФІЄВ, д-р техн. наук, проф..

**Редакційна колегія серії:**

**Відповідальний редактор:** Ю.В. Тимофієв, д-р техн. наук, проф.

**Заст. відповідального редактора:** О. О. Ключко, д-р техн. наук, проф.

**Відповідальний секретар:** Є. В. Басова, канд. техн. наук, доц.

**Члени редколегії:** С.С. Добротворський, д-р техн. наук, проф.; О.А. Мельніченко, д-р техн. наук, проф.; О.Я. Мовшович, д-р техн. наук, проф.; О.А. Пермяков, д-р техн. наук, проф.; Ю.А. Сизий, д-р техн. наук, проф.; Д.В. Сталінський, д-р техн. наук.; М.С. Степанов, д-р техн. наук, проф.; В.А. Фадєєв, д-р техн. наук, проф.; В.Д. Хіщан, д-р техн. наук, проф.; О.М. Шелковий, д-р техн. наук, проф.

*У квітні 2013 р. Вісник Національного технічного університету «ХПІ», серія «Технології в машинобудуванні», включений у довідник періодичних видань бази даних **Ulrich's Periodicals Directory (New Jersey, USA)**.*

Рекомендовано до друку Вченою радою НТУ «ХПІ».  
Протокол № 11 від 25 «грудня» 2015р.

NATIONAL TECHNICAL UNIVERSITY  
«KHARKIV POLYTECHNIC INSTITUTE»

**BULLETIN**  
**OF THE NATIONAL TECHNICAL UNIVERSITY**  
**«KHARKIV POLYTECHNIC INSTITUTE»**

*Series: «Technologies in mechanical engineering»*

№ 40 (1149) 2015

Collected Works

The publication was founded in 1961

Kharkov  
NTU «KhPI»

Collected Works. Series: Technologies in mechanical engineering. – Kharkiv: NTU «KhPI» – 2015. – № 40 (1149). – 128 c.

### **State edition**

### **Certificate of State Committee of Ukraine for Information Policy KB № 5256 from July 2, 2001**

The collection is published in Ukrainian and Russian.

*Bulletin of National Technical University «KhPI» included in the «List of scientific professional editions of Ukraine, which can be published results of dissertations for the degree of doctor and candidate of sciences», approved by order of the (MES of Ukraine) of 21.12. 2015 № 1328 «On approval decisions Certifying Board of the Ministry for academic councils of 28 December 2015»*

### **Coordinating Board:**

L. L. Tovazhnyansky, Dr. Tech. Sci., Prof. (**chief**);  
K. A. Gorbunov, PhD. Tech. Sci., Docent. (**secretary**);  
A. P. Marchenko, Dr. Tech. Sci., Prof.; Ie.I. Sokol, member NAS of Ukraine, Dr. Tech. Sci., Prof.;  
Ie. Ie. Aleksandrov, Dr. Tech. Sci., Prof.; A. V. Boiko, Dr. Tech. Sci., Prof.;  
F. F. Hladkyi, Dr. Tech. Sci., Prof.; M. D. Hodlevskyi, Dr. Tech. Sci., Prof.;  
A. I. Hrabchenko, Dr. Tech. Sci., Prof. V. H. Danko, Dr. Tech. Sci., Prof.;  
V. D. Dmytryienko, Dr. Tech. Sci., Prof.; I. F. Domnin, Dr. Tech. Sci., Prof.;  
V. V. Yepifanov, PhD. Tech. Sci., Prof.; Iu. I. Zaitsev Dr. Tech. Sci., Prof.;  
P. O. Kachanov, Dr. Tech. Sci., Prof.; V. B. Klepikov, Dr. Tech. Sci., Prof.;  
S. I. Kondrashov, Dr. Tech. Sci., Prof.; M. A. Tkachuk Dr. Tech. Sci., Prof.;  
V. I. Kravchenko, Dr. Tech. Sci., Prof.; H. V. Lisachuk, Dr. Tech. Sci., Prof.;  
O. K. Morachkovskyi, Dr. Tech. Sci., Prof.; V. I. Nikolaienko, Dr. Tech. Sci., Prof.;  
P. H. Pererva, Dr. Tech. Sci., Prof.; V. A. Puliaiev, Dr. Tech. Sci., Prof.;  
M. I. Ryshchenko, Dr. Tech. Sci., Prof.; V. B. Samorodov, Dr. Tech. Sci., Prof.;  
H. M. Suchkov, Dr. Tech. Sci., Prof.; Iu. V. Tymofeev Dr. Tech. Sci., Prof.

### **Editorial Board:**

**Editor:** Iu.V. Tymofeev, Dr. Tech. Sci., Prof.

**Deputy editor:** A. A. Klochko, Dr. Tech. Sci., Prof.

**Secretary:** Ie. V. Basova, PhD. Tech. Sci., Docent.

**Members of the editorial board:** S.S. Dobrotvorskyi, Dr. Tech. Sci., Prof.; O.A. Melnichenko, Dr. Tech. Sci., Prof.; A.Ia. Movshovych, Dr. Tech. Sci., Prof.; A.A. Permiakov, Dr. Tech. Sci., Prof.; Iu.A. Syzyi, Dr. Tech. Sci., Prof.; D.V. Stalinskyi, Dr. Tech. Sci.; M.S. Stepanov, Dr. Tech. Sci., Prof.; V.A. Fadieiev, Dr. Tech. Sci., Prof.; V.D. Khitsan Dr. Tech. Sci., Prof.; A.N. Shelkovyi, Dr. Tech. Sci., Prof.

*In April 2013 Bulletin of National Technical University «KhPI» series «Technologies in mechanical engineering» included in the directory database of periodicals **Ulrich's Periodicals Directory (New Jersey, USA)**.*

Recommended for publication by the Academic Council of NTU «KhPI».  
Protocol No 11 of December 25, 2015

УДК 621.865.6

*Г.И. КОСТЮК, БЕХЗАД РАЗМДЖУИ, О.О. БРЮЯКА***ТЕМПЕРАТУРЫ И ТЕМПЕРАТУРНЫЕ НАПРЯЖЕНИЯ ПРИ ДЕЙСТВИИ ИОНОВ НА МАГНИЕВЫЕ СПЛАВЫ И ВОЗМОЖНОСТЬ ПОЛУЧЕНИЯ НАНОСТРУКТУР**

В работе были исследованы поля температур и скорости их возрастания, а также температурные напряжения при действии ионов  $V^+$ ,  $N^+$ ,  $C^+$ ,  $Al^+$ ,  $V^+$ ,  $Cr^+$ ,  $O^+$ ,  $Ni^+$ ,  $Zr^+$ ,  $Mo^+$ ,  $Hf^+$ ,  $W^+$ ,  $Ta^+$ ,  $Pt^+$  с зарядом от одного до трех на магниевые сплавы. Так, диапазон максимальных температур лежит в пределах от  $1,82 \cdot 10^2$  до  $3,9$  К, а скорость изменения температуры меняется от  $10^{14}$  до  $10^{17}$  К/с. Исследование зависимости этих величин от энергии ионов и заряда позволило найти области в объеме материала, где реализуются температуры достаточные для образования наноструктур, но в то же время температуры не приводят к росту зерна, то есть получены технологические параметры потоков иона, которые обеспечивают получение наноструктур.

**Ключевые слова:** температура, скорости нарастания температуры, температурные напряжения, ионы, магниевые сплавы, заряд, энергия ионов

**Введение.** Магниевые сплавы обладают высокими физико-механическими характеристиками и широко применяются в авиационной технике, что говорит о необходимости улучшения их свойств, так как современные авиационные конструкции и особенно авиационные двигатели работают при высоких скоростях и довольно высоких температурах, что выдвигает дополнительные требования к деталям, обеспечивающим работоспособность двигателя. Так например, лопатки компрессора, особенно первых степеней, испытывают действие микро- и макро- частиц, которые приводят к эррозии, то есть дополнительно необходимо обеспечивать и высокую эррозионную прочность (стойкость), а для того чтобы обеспечить эти характеристики, необходимо конструировать материал таким образом, чтобы он имел высокую твердость на поверхности, но в то же время мог деформироваться на большие величины, не испытывая разрушения. Исследования многих авторов показали, что наноструктурные слои имеют пониженный модуль упругости, что позволяет повысить работоспособность деталей, работающих на ударные нагрузки, так как даже при больших перемещениях материала будем иметь относительно невысокие напряжения [1]. Исследования также показывают, что наноструктуры имеют высокие антикоррозионные свойства, что также подтверждает тезис о необходимости использования наноструктурных слоев для снижения воздействия агрессивных сред [2].

Работа выполнялась в рамках программы Министерства образования и науки Украины «Новые и ресурсосберегающие технологии в энергетике, промышленности и агропромышленном комплексе» (подсекция 13 «Аэрокосмическая техника и транспорт») и по темам: «Создание физико-технических основ повышения качества материалов аэрокосмических конструкций» и «Разработка технологических основ интегрированных технологий плазменно-ионной обработки деталей аэрокосмической техники» (подсекция 6 «Физико-технические проблемы материаловедения») «Концепция создания наноструктур, нано- и традиционных покрытий с учетом влияния адгезии на эффективность и работоспособность деталей АТ, АД и РИ», «Экспериментально-теоретическое исследование получения наноструктур при действии

ионных и свето-лучевых потоков на конструкционные материалы и РИ», хозяйственных работ и договоров о сотрудничестве.

**Анализ последних исследований и литературы.** В настоящее время достаточно много работ [3–10], которые посвящены исследованию размера зерна наноструктуры, что весьма оправдано, так как размер зерна наноструктуры влияет на её физико-механические характеристики. Так наблюдалось влияние его на микротвердость, предел усталости, предел текучести, коэффициент трения. Всё это еще раз подтверждает необходимость прогнозирования размера зерна. Моделей, которые бы прогнозировали размер зерна, небольшое количество [1, 2], но они не учитывают необходимую энергию на образование зерна наноструктуры, поэтому мы использовали новую модель, которая учитывала практически все взаимосвязи не только крайних атомов в зерне, но и в объеме наноструктуры, для чего отдельно рассчитывали число частиц в нанокластере, а потом рассматривали их взаимодействие с остальными зёрнами. Применение такой модели позволяет обеспечить в энергетическом плане более точное определение энергии на повышение температуры и температурные напряжения.

**Целью** данной статьи является исследование влияния технологических параметров потоков ионов различной энергии, сорта и заряда на температуру, скорость её нарастания и температурные напряжения, что позволяет оценить возможность получения наноструктур в объеме конструкционного материала.

**Постановка проблемы.** В настоящее время значительное количество работ посвящено исследованию возможности получения наноструктур [1–14], основной объем работ выполнен по проведению эксперимента [11–14], теоретических же работ в этом плане очень мало [1–2], что не позволяет прогнозировать технологические параметры потоков ионов для получения наноструктур в различных конструкционных материалах; это говорит об актуальности и важности исследования.

Благодаря экспериментальным работам, удалось оценить диапазон температур, скоростей их нарастания и величин температурных напряжений, которые необходимы для получения наноструктур. Так, критериями получения наноструктур примем такие: диапа-

© Г.И. Костюк, Бехзад Размджуй, О.О. Брюяка, 2015

зон температур 500–1500 К, скорость нарастания температуры более  $10^7$  К/с. Для ускорения получения наноструктур необходимо действие напряжений в диапазоне от  $10^7$  до  $10^9$  Па (для получения наноструктур за счет действия напряжений возможно при напряжениях, равных  $10^{10}$ ).

**Материалы исследований** получены на основе решения совместной задачи теплопроводности и термоупругости [1] в зоне действия индивидуального иона. Решение проводилось численным методом МКЕ, получены поля температур и температурных напряжений, что позволяет оценить реальность получения наноструктур.

**Результаты исследований.** Для ионов В+, N+, С+, Al+, V+, Cr+, O+, Ni+, Zr+, Mo+, Hf+, W+, Ta+, Pt+, действующих на магниевый сплав, получены зависимости максимальной температуры, максимальных и минимальных температурных напряжений от энергии ионов с различными зарядами ( $Z = 1$ ;  $Z = 2$ ;  $Z = 3$ ).

Так, для случая действия ионов бора и углерода такие зависимости представлены на рис. 1. Очевидно, что температуры (рис. 1, а) существенно возрастают с ростом энергии и достигают температур  $6,7 \cdot 10^3$  К при действии ионов бора ( $Z = 3$ ), тогда как для ионов углерода эти величины значительно меньше – порядка  $5 \cdot 10^3$ . Уменьшение заряда приводит к существенному снижению температур и они достигают  $5 \cdot 10^3$  – в случае действия иона бора и  $4 \cdot 10^3$  – при действии ионов углерода. Очевидно, что рост массы иона приводит к снижению температур. Температурные напряжения с ростом величины энергии, растут. Так, максимальные температурные напряжения сначала плавно возрастают, а затем их скорость роста увеличивается и достигает постоянной стационарной. Максимальные температурные напряжения для ионов бора достигают величин  $7,6 \cdot 10^8$  ( $Z = 3$ ), энергия –  $2 \cdot 10^4$  эВ, а для ионов углерода они меньше  $6,2 \cdot 10^8$  для тех же условий. При малых энергиях иона величины напряжений снижаются практически на порядок, хотя для бора они несколько выше, чем для углерода (рис. 1, б). Для минимальных температурных напряжений зависимости температуры от энергии ионов, т.е. сначала наблюдается быстрый рост, а затем – практически линейная зависимость от энергии. Величины минимальных температурных напряжений снизились больше чем на порядок (рис. 1, в). Так, максимальные значения, которые уже реализуются для ионов углерода, соответствуют  $4,25 \cdot 10^7$  Па. В этом случае напряжения для ионов бора меньше и составляют  $3,2 \cdot 10^7$  Па. Снижение величины заряда иона приводит к уменьшению минимальных температурных напряжений, но характер зависимостей сохраняется. Для малых значений энергии ( $E_i=200$ ) минимальные значения напряжений становятся меньше чем  $10^7$  Па. Исследование температурных напряжений показало: температурные напряжения по величине не достаточны для образования наноструктур, но могут существенно ускорить этот процесс при соответствующих температурах (500 – 1500 К). Исследование скорости роста температуры

показало, что практически для всех исследованных режимов она превышает  $10^7$  К/с.

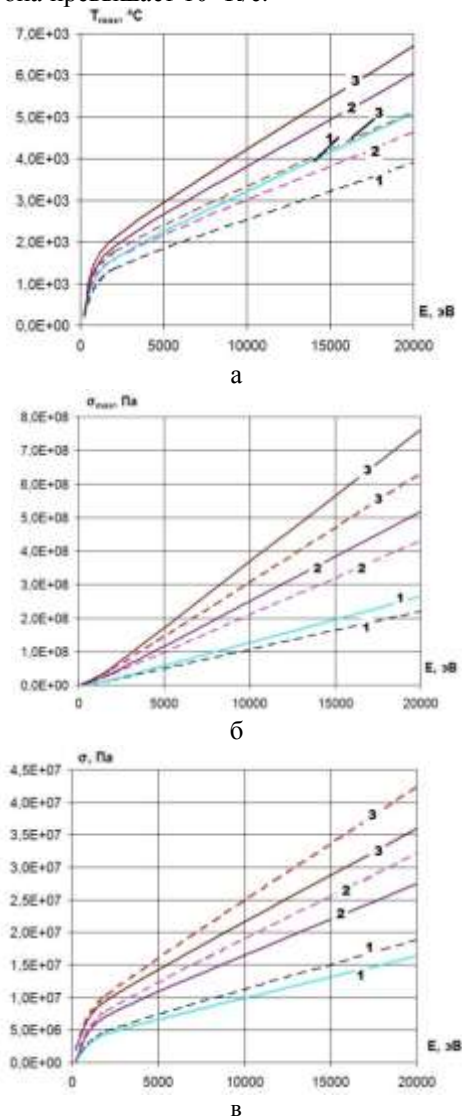


Рис. 1 – Зависимости различных показателей от энергии ионов бора (–) и углерода (---) при их действии на магниевые сплавы ( $Z = 1$  кривые 1, 2;  $Z = 2$  кривые 3, 4;  $Z = 3$  кривые 5, 6): а – зависимость максимальных температур; б – зависимость максимальных температурных напряжений; в – зависимость минимальных температурных напряжений

Аналогичные зависимости для случая действия ионов азота и алюминия на магниевые сплавы представлен на рис. 2. Так, максимальные температуры растут с ростом энергии иона, а характер аналогичен действию ионов бора и углерода. В этом случае максимальные температуры достигают значений, близких  $2 \cdot 10^4$  К ( $Z = 3$ ) и  $1,5 \cdot 10^4$  К ( $Z = 1$ ) ионы азота. Для ионов алюминия температуры существенно ниже и составляют  $8 \cdot 10^3$  и  $6,1 \cdot 10^3$  К для  $Z = 3$  и  $Z = 1$  соответственно (рис. 2, а). Максимальные температурные напряжения плавно растут при малых энергиях, а при больших наблюдается практически линейная зависимость напряжений от энергии ионов, причем для случая действия иона азота они существенно выше и достигают значений  $1,6 \cdot 10^9$  Па при  $Z = 1$  и  $E_i = 2 \cdot 10^4$  эВ, тогда как для ионов алюминия они составляют  $8,4 \cdot 10^8$  Па в этих же условиях. Уменьшение

величины заряда иона приводит к существенному снижению напряжений и они составляют  $4,8 \cdot 10^8$  и  $3 \cdot 10^8$  Па. При малых энергиях ионов эти напряжения порядка  $10^7$  Па (рис 2, б).

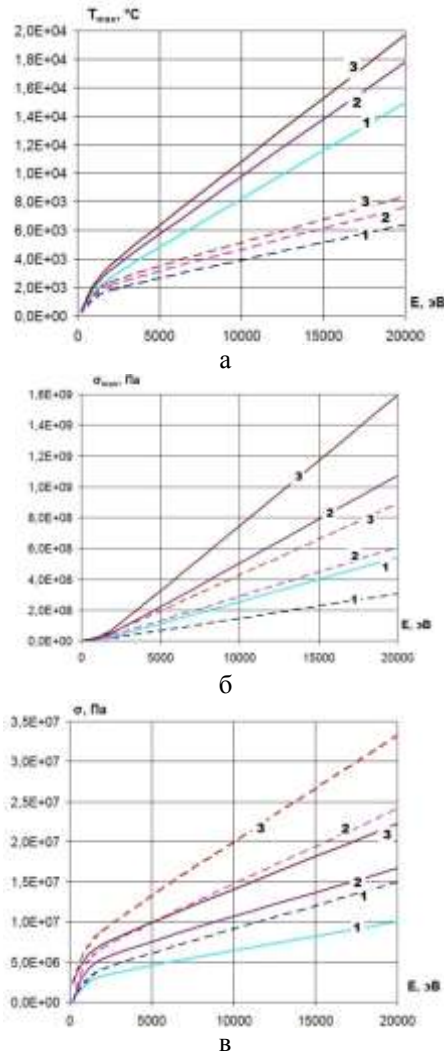


Рис. 2 – Зависимость различных параметров от энергии ионов азота (–) и алюминия (– –) при их действии на магниевые сплавы ( $Z = 1$  кривые 1, 2;  $Z = 2$  кривые 3, 4;  $Z = 3$  кривые 5, 6): а – зависимость максимальных температур; б – зависимость максимальных температурных напряжений; в – зависимость минимальных температурных напряжений

Для минимальных температурных напряжений, как и в предыдущем случае, значения напряжений для случая действия ионов алюминия несколько выше, чем для ионов азота, а их максимальные значения достигают  $3,3 \cdot 10^7$  и  $10^7$  Па, при минимальных энергиях их значения также незначительны.

Характер изменения величин соответствует ионам бора и углерода (рис. 2, в). Очевидно, что значения температурных напряжений несколько увеличилось по сравнению с ионами бора и углерода.

Для ионов ванадия и хрома зависимости температур и температурных напряжений от энергии представлены на рис. 3. Характер зависимостей практически сохранился как для ионов бора и углерода, но величины температур, минимальных и максимальных температурных напряжений практически одинаковы для ванадия и хрома, хотя величины как максимальных

температур ( $3,4 \cdot 10^4$  К), так и максимальных напряжений ( $2,25 \cdot 10^9$  Па) превышают аналогичные значения для ионов бора, углерода, азота и алюминия, а минимальные напряжения несколько ниже –  $1,8 \cdot 10^7$  Па (рис. 3 б, в).

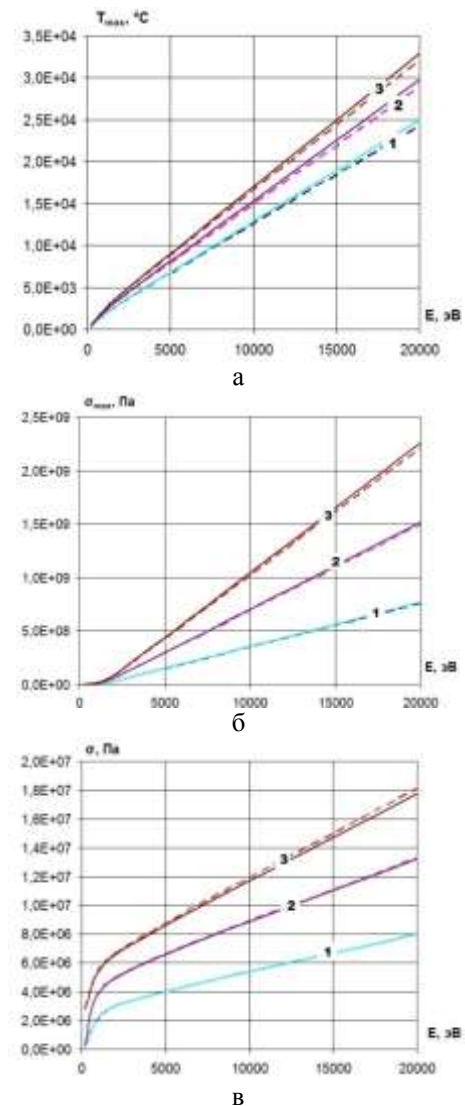


Рис. 3 – Зависимости различных показателей от энергии ионов ванадия (–) и хрома (– –) при их действии на магниевые сплавы ( $Z = 1$  кривые 1, 2;  $Z = 2$  кривые 3, 4;  $Z = 3$  кривые 5, 6): а – зависимость максимальных температур; б – зависимость максимальных температурных напряжений; в – зависимость минимальных температурных напряжений

В случае действия ионов кислорода и железа на магниевые сплавы характер изменения температур и напряжений сохранился (рис. 4). Максимальные температуры реализуются для ионов кислорода и лежат в пределах от  $3,4 \cdot 10^4$  до  $2,6 \cdot 10^4$  К соответственно при энергиях  $2 \cdot 10^4$  эВ и  $Z=3$ . Для ионов железа температуры значительно ниже и составляют  $10^4$  и  $7 \cdot 10^4$  К при тех же энергии и заряде (рис. 4, а). Температурные напряжения как максимальные, так и минимальные имеют значения, близкие к предыдущим, но минимальные несколько выше –  $3,1 \cdot 10^7$  Па (рис. 4 б, в).



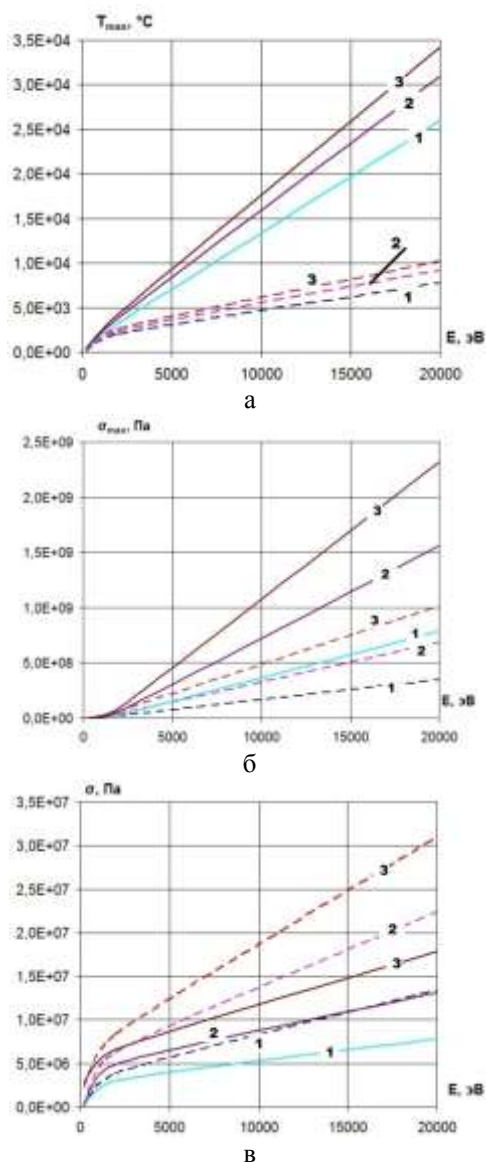


Рис. 4 – Зависимости различных показателей от энергии ионов кислорода (–) и железа (–) при их действии на магниевые сплавы ( $Z = 1$  кривые 1, 2;  $Z = 2$  кривые 3, 4;  $Z = 3$  кривые 5, 6): а – зависимость максимальных температур; б – зависимость максимальных температурных напряжений; в – зависимость минимальных температурных напряжений

При действии ионов никеля и кобальта на магниевый сплав распределение температур (рис. 5, а), максимальных (рис. 5, б) и минимальных температурных напряжений (рис. 5, в) обнаружено, что для обоих ионов реализуются практически одинаковые температуры и температурные напряжения.

Так, температуры составляют  $3,5 \cdot 10^4$  К ( $E_i = 2 \cdot 10^4$  эВ,  $Z=3$ ), уменьшение заряда приводит к снижению температур до  $2,6 \cdot 10^4$  К ( $Z=1$ ). Для малых энергий (200 эВ) температуры практически не отличаются и составляют  $4 \cdot 10^3$  К для всех зарядов (рис. 5, а). Максимальные температурные напряжения для обоих ионов –  $2,3 \cdot 10^9$  Па ( $E_i = 2 \cdot 10^4$  эВ,  $Z=3$ ), с уменьшением заряда они существенно уменьшаются и составляют  $8 \cdot 10^8$  Па ( $Z = 1$ ). Для малых энергий напряжение составляет величины порядка  $10^8$  Па практически для всех зарядов (рис. 5, б).

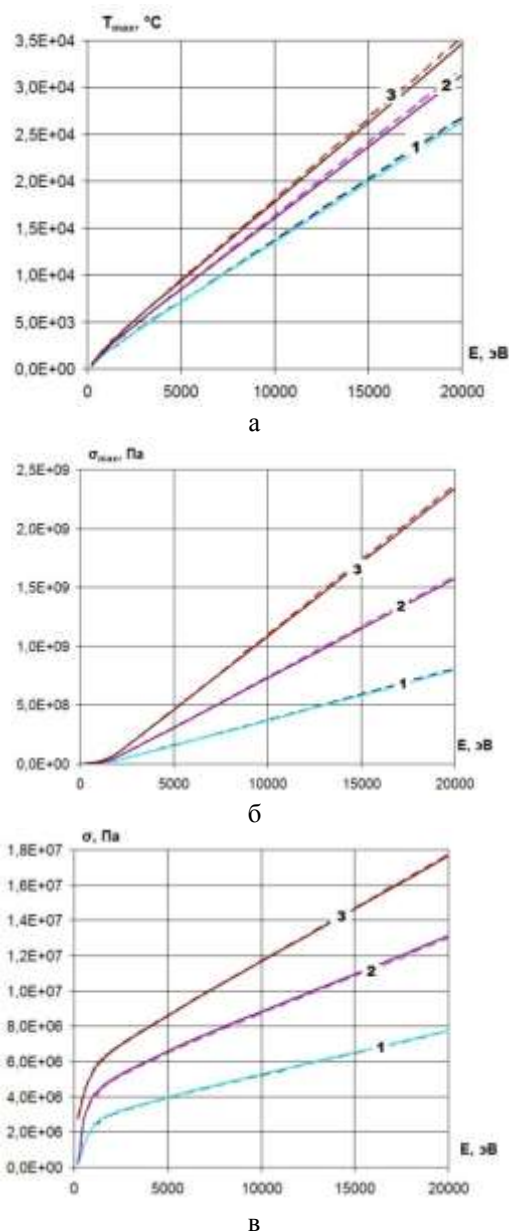


Рис. 5 – Зависимости различных параметров от энергии ионов никеля (–) и кобальта (–) при их действии на магниевые сплавы ( $Z = 1$  кривые 1, 2;  $Z = 2$  кривые 3, 4;  $Z = 3$  кривые 5, 6): а – зависимость максимальных температур; б – зависимость максимальных температурных напряжений; в – зависимость минимальных температурных напряжений

Для минимальных температурных напряжений также значение для ионов никеля и кобальта практически одинаково, максимальное значение составляет  $1,75 \cdot 10^7$  Па ( $E_i = 2 \cdot 10^4$  эВ,  $Z = 3$ ), тогда как для минимальных энергий (200 эВ) они уменьшаются до  $6 \cdot 10^6$  и  $2 \cdot 10^6$  Па.

В случае действия ионов иттрия и циркония на магниевый сплав зависимости практически совпадают как для температур, так и для напряжений.

Максимальные температуры реализуются при энергии  $2 \cdot 10^4$  эВ и  $Z=3$  и составляют  $3,7 \cdot 10^4$  К, тогда как при  $Z=1$  они уменьшаются до  $2,8 \cdot 10^4$  К, для малых энергий (200 эВ) температуры приближаются к  $10^3$  К, поэтому влияние заряда не ощутимо (рис. 6, а).

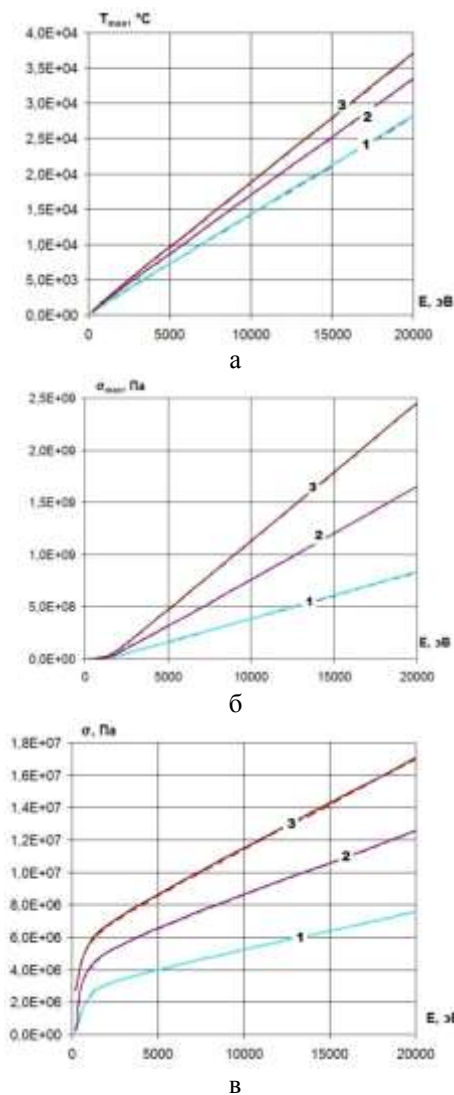


Рис. 6 – Зависимости различных параметров от энергии ионов иттрия (–) и циркония (– –) при их действии на магниевые сплавы ( $Z = 1$  кривые 1, 2;  $Z = 2$  кривые 3, 4;  $Z = 3$  кривые 5, 6): а – зависимость максимальных температур; б – зависимость максимальных температурных напряжений; в – зависимость минимальных температурных напряжений

Максимальные температурные напряжения также одинаковы для ионов иттрия и циркония, максимальные значения которых реализуются при энергии  $2 \cdot 10^4$  эВ ( $Z = 3$ ) и составляют  $2,4 \cdot 10^9$  Па, а при  $Z = 1$  они снижаются до  $8 \cdot 10^8$  Па, при малых энергиях (200 эВ) реализуются практически одинаковые температурные напряжения порядка  $10^8$  Па (рис. 6, б).

Минимальные температурные напряжения при  $E_i = 2 \cdot 10^4$  эВ, ( $Z = 3$ ) составляют  $1,7 \cdot 10^7$  Па, тогда как при  $Z = 1$  они снижаются до  $7,6 \cdot 10^8$  Па, при минимальных энергиях 200 эВ влияние заряда незначительно, а температурные напряжения составляют величину порядка  $2 \cdot 10^6$  эВ (рис. 6, в).

Действие ионов молибдена и гафния на магниевый сплав приводит к реализации довольно высоких температур при энергиях  $2 \cdot 10^4$  эВ. Для гафния они лежат в пределах от  $3,7 \cdot 10^4$  до  $2,8 \cdot 10^4$  К при зарядах  $Z = 3$ ;  $Z = 1$  соответственно, снижение энергий до 200 эВ приводит к реализации температур порядка  $2,5 \cdot 10^3$  К практически для всех зарядов.

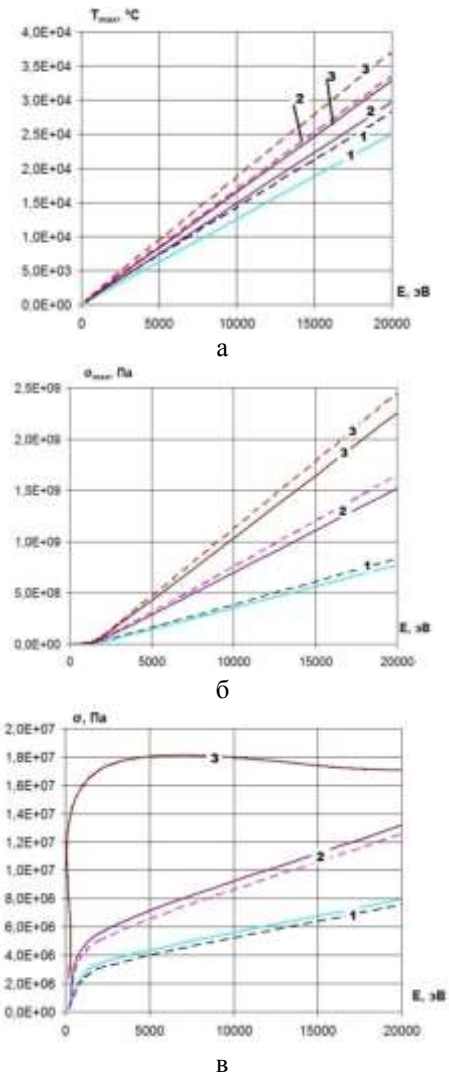


Рис. 7 – Зависимости различных параметров от энергии ионов молибдена (–) и гафния (– –) при их действии на магниевые сплавы ( $Z = 1$  кривые 1, 2;  $Z = 2$  кривые 3, 4;  $Z = 3$  кривые 5, 6): а – зависимость максимальных температур; б – зависимость максимальных температурных напряжений; в – зависимость минимальных температурных напряжений

Для молибдена они несколько ниже и составляют  $2,9 \cdot 10^4$ ,  $2,5 \cdot 10^4$  К при соответствующих  $Z = 3$ ;  $Z = 1$  (рис. 7, а). Максимальные температурные напряжения для ионов гафния несколько выше, чем для ионов молибдена, и составляют для гафния  $2,4 \cdot 10^9$  Па и  $7 \cdot 10^8$  Па при соответствующих  $Z = 3$ ;  $Z = 1$ . Для ионов молибдена реализуются температурные напряжения несколько меньших величин и составляют  $2,3 \cdot 10^9$  –  $6 \cdot 10^8$  Па при  $Z = 3$ ;  $Z = 1$  соответственно (рис. 7, б). Минимальные же значения температурных напряжений при  $E_i = 2 \cdot 10^4$  эВ имеют значения  $1,72 \cdot 10^7$  и  $8 \cdot 10^6$  Па для случая действия ионов молибдена при  $Z = 3$ ;  $Z = 1$  соответственно. Причем для этих ионов при энергии порядка 1000 эВ наблюдаются такие же высокие напряжения при  $Z = 3$ , хотя при  $Z = 1$ ;  $Z = 2$  зависимости ведут себя также, как и ионы иттрия и циркония. При малых энергиях минимальные значения напряжений снижаются и уже составляют порядка  $1,5 \cdot 10^6$  Па для обоих ионов и зарядов  $Z = 1$  и  $Z = 3$  (рис. 7, в).

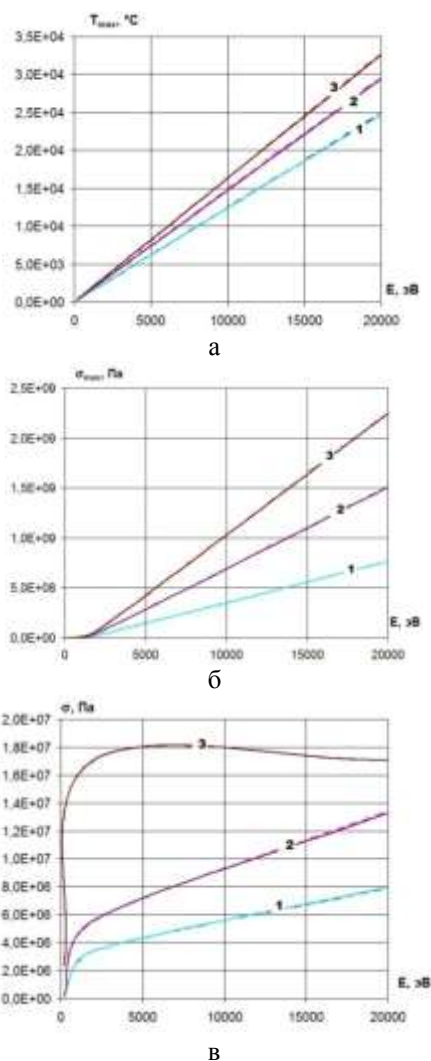


Рис. 8 – Зависимости различных параметров от энергии ионов тантала (—) и вольфрама (---) при их действии на магниевые сплавы ( $Z = 1$  кривые 1, 2;  $Z = 2$  кривые 3, 4;  $Z = 3$  кривые 5, 6): а – зависимость максимальных температур; б – зависимость максимальных температурных напряжений; в – зависимость минимальных температурных напряжений

Действие ионов тантала и вольфрама на магниевые сплавы позволяет реализовать максимальные температуры  $(3,25 - 2,5) \cdot 10^4$  К соответственно при ( $Z = 3, Z = 1$ ), причем их значения для обоих ионов практически совпадают.

При минимальных энергиях (200 эВ) влияние заряда нивелируется, а значение лежит вблизи  $2 \cdot 10^3$  К (рис 8, а). Температурные напряжения, как для случая действия ионов тантала и вольфрама, одинаковые и лежат в пределах от  $2,3 \cdot 10^9$  до  $7,5 \cdot 10^8$  Па при  $Z = 3$ ;  $Z = 1$ . Для малых энергий (200 эВ) они составляют  $10^8$  Па (рис. 8, б). Температурные напряжения имеют зависимость от энергии, аналогичную предыдущим ионам молибдена и гафния – максимальные значения лежат в диапазоне  $1,67 \cdot 10^7 - 8 \cdot 10^6$  Па соответственно при  $Z = 3$ ;  $Z = 1$ . При  $Z = 3$  также наблюдаются высокие значения минимальных температурных напряжений, которые практически равны максимальным для энергий  $2 \cdot 10^3$  эВ, но они снижаются до значений  $10^6$  Па при энергиях 200 эВ, независимо от заряда и сорта иона (рис. 8, в).

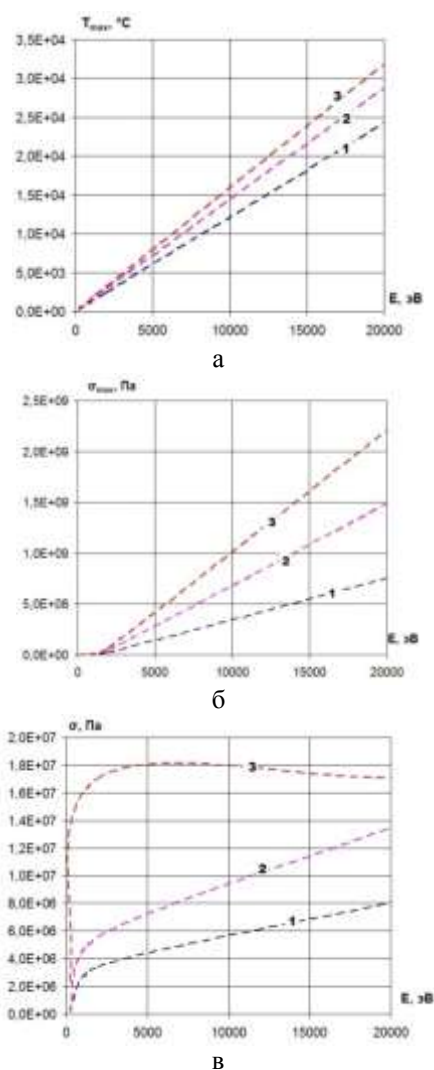


Рис. 9 – Зависимости различных параметров от энергии ионов платины (---) при их действии на магниевые сплавы ( $Z = 1$  кривые 1, 2;  $Z = 2$  кривые 3, 4;  $Z = 3$  кривые 5, 6): а – зависимость максимальных температур; б – зависимость максимальных температурных напряжений; в – зависимость минимальных температурных напряжений

В случае действия ионов платины на магниевые сплавы реализуются температуры порядка  $3,2 \cdot 10^4 - 2,4 \cdot 10^4$  К при  $Z = 3$ ;  $Z = 1$ , тогда как при энергиях 200 эВ температуры составляют порядка  $10^3$  К для всех зарядов (рис. 9, а). Температурные напряжения в этом случае лежат в диапазоне от  $2,2 \cdot 10^9$  до  $5,4 \cdot 10^8$  Па при энергии  $2 \cdot 10^4$  эВ. При малых энергиях (200 эВ) максимальные температурные напряжения составляют  $0,8 \cdot 10^8$  Па практически для всех зарядов (рис. 9, б). Минимальные температурные напряжения имеют зависимости, близкие к молибдену и гафнию – максимальные напряжения составляют величины  $2,2 \cdot 10^9$  и  $7 \cdot 10^8$  Па для  $Z = 3$ ,  $Z = 1$  соответственно (энергия  $2 \cdot 10^4$  эВ, рис. 9, в), причем при  $Z = 3$  и энергии  $2 \cdot 10^3$  эВ также имеем практически максимальные температурные напряжения.

Результаты проведенных исследований можно использовать для оценки возможности получения наноструктур при тех или иных технологических режимах по величине температур, скорости их нарастания и значе-

ниям максимальных и минимальных температурных напряжений, приняв за критерий образование наноструктур, достижение требуемого диапазона температур (500–1500 К), скоростей нарастания температур, больших чем  $10^7$  К/с и наличие температурных напряжений в диапазоне  $10^7 - 10^9$  Па, которые ускоряют процесс получения наноструктур.

#### Выводы

1. Для широкого круга ионов  $V^+$ ,  $N^+$ ,  $C^+$ ,  $Al^+$ ,  $V^+$ ,  $Cr^+$ ,  $O^+$ ,  $Ni^+$ ,  $Zr^+$ ,  $Mo^+$ ,  $Hf^+$ ,  $W^+$ ,  $Ta^+$ ,  $Pt^+$ , действующих на магниевые сплавы, получены зависимость максимальных температур, максимальных и минимальных температурных напряжений от энергии ионов и их заряда, что можно использовать для оценки возможности образования наноструктур при соответствующих технологических режимах обработки.

2. Для ряда ионов получены условия, когда они создают одинаковые температурные поля и поля температурных напряжений, например, ванадий – хром, никель – кобальт, иттрий – цирконий, тантал – вольфрам и платина. Всё это позволяет выбирать наиболее дешёвый из ионов для получения тех же наноструктур.

3. Используя в технологии различные энергии ионов, их заряды и сорта, можно получать слои наноструктур размером до 50–60 мкм, что позволит существенно повысить работоспособность деталей и режущего инструмента, использующих такой способ получения наноструктурного слоя.

**Список литературы:** 1. Костюк, Г.И. Нанотехнологии: выбор технологических параметров и установок, производительность обработки, физико-механические характеристики наноструктур [Текст]: моногр. / Г.И. Костюк. – К.: Изд. центр Междунар. академии наук и инновац. технологий, 2014. – 472 с. 2. Костюк, Г.И. Нанотехнологии: теория, эксперимент, техника, перспективы [Текст]: моногр. / Г.И. Костюк. – К.: Изд. центр Междунар. академии наук и инновац. технологий, 2012. – 648 с. 3. Костюк, Г. И. Физико-технические основы нанесения покрытий, ионной имплантации и ионного легирования, лазерной обработки и упрочнения, комбинированных технологий [Текст]: в 2 кн. / Г. И. Костюк. – К.: Изд-во аину, 2002. – 1030 с. 4. Костюк, Г.И. Наноструктуры и нанопокртытия: перспективы и реальность [Текст]: учеб.пособие / Г.И. Костюк. – Х.: Нац. аэрокосм. ун-т «Харьк. авиац. ин-т», 2009. – 406 с. 5. Костюк, Г.И. Научные основы создания современных технологий [Текст]: учеб.пособие / Г.И. Костюк. – Х.: Нац. аэрокосм. ун-т «Харьк. авиац. ин-т», 2008. – 552 с. 6. Костюк, Г.И. Эффективный режущий инструмент с покрытием и упрочненным слоем [Текст]: моногр.-справ. / Г.И. Костюк. – Х.: Нац. аэрокосм. ун-т «Харьк. авиац. ин-т», 2007. – 633 с. 7. Костюк, Г.И. Эффективный режущий инструмент с покрытием и упрочненным слоем [Текст]: справ. / Г.И. Костюк. – К.: Вид-во АІНУ, 2003. – 412 с. 8. Костюк, Г.И. Физико-технические основы роботизированного производства

[Текст]: учеб.пособие / Г.И. Костюк. – Х.: Нац. аэрокосм. ун-т «Харьк. авиац. ин-т», 2006. – 614 с. 9. Гречихин, Л.И. Физика наночастиц и нанотехнологий [Текст] / Л.И. Гречихин. – М.: УП «Технопринт», 2004. – 397 с. 10. Аксенов, И.И. Вакуумная дуга в эрозийных источниках плазмы [Текст] / И.И. Аксенов. – Х.: Изд-во НИИ «ХФТИ», 2005. – 211 с. 11. Гусев, А.И. Наноматериалы, наноструктуры, нанотехнологии [Текст] / А.И. Гусев. – М.: Физматлит, 2005. – 416 с. 12. Решетняк, Е.Н. Синтез упрочняющих наноструктурных покрытий [Текст] / Е.Н. Решетняк, А.И. Стрельницкий // Вопросы атомной науки и техники. – 2008. – № 2. – С. 119 – 130. 13. Андриевский, Р.А. Наноматериалы: концепция и современные проблемы [Текст] / Р.А. Андриевский // Физика металлов и металловедение. – 2003. – Т. 91, № 1. – С.50 – 56. 14. Состав, структура и свойства наноструктурных пленок боридов тантала [Текст] / А.А. Гончаров, П.И. Игнатенко, В.В. Петухов и др. // ЖТФ. –2006. – Т. 76, вып. 10. – С. 82 – 87.

**Bibliography (transliterated):** 1. Kostyuk, G.I. Nanotekhnologii: vybor tekhnologicheskikh parametrov i ustanovok, proizvoditel'nost' obrabotki, fiziko-mekhanicheskiye kharakteristiki nanostruktur [Текст]: monogr. / G.I. Kostyuk. - Kiev: Izd. tsentr Mezhdunar. akademii nauk i innovatP. tekhnologii, 2014. - 472 P. 2. Kostyuk, G.I. Nanotekhnologii: teoriya, eksperiment, tekhnika, perspektivy [Текст]: monogr. / G.I. Kostyuk. - Kiev: Izd. tsentr Mezhdunar. akademii nauk i innovatP. tekhnologii, 2012. - 648 P. 3. Kostyuk, G. I. Fiziko-tekhnicheskiye osnovy naneseniya pokrytiy, ionnoy implantatsii i ionnogo legirovaniya, lazernoy obrabotki i uprochneniya, kombinirovannykh tekhnologii [Текст]: v 2 kn. / G.I. Kostyuk. - Kiev: Izd-vo ainu, 2002. - 1030 P. 4. Kostyuk, G.I. Nanostrukturny i nanopokrytiya: perspektivy i real'nost' [Текст]: ucheb.posobiye / G.I. Kostyuk. - Kharkov. : NatP. aerokosm. un-t «Khark. aviatP. in-t », 2009. - 406 P. 5. Kostyuk, G.I. Nauchnyye osnovy sozdaniya sovremennykh tekhnologii [Текст]: ucheb.posobiye / G.I. Kostyuk. - Kharkov.: NatP. aerokosm. un-t «Khark. aviatP. in-t », 2008. - 552 P. 6. Kostyuk, G.I. Effektivnyy rezhushchiy instrument s pokrytiyem i uprochnennym sloyem [Текст]: sprav monogr.- / G.I. Kostyuk. - Kharkov: NatP. aerokosm. un-t «Khark. aviatP. in-t », 2007. - 633 P. 7. Kostyuk, G.I. Effektivnyy rezhushchiy instrument s pokrytiyem i uprochnennym sloyem [Текст]: sprav. / G.I. Kostyuk. - Kiev: Vid-vo AІNU, 2003. - 412 P. 8. Kostyuk, G.I. Fiziko-tekhnicheskiye osnovy robotizirovannogo proizvodstva [Текст]: ucheb.posobiye / G.I. Kostyuk. - Kharkov: NatP. aerokosm. un-t «Khark. aviatP. in-t », 2006. - 614 P. 9. Grechikhin, L.I. Fizika nanochastits i nanote-khnologii [Текст] / L.I. Grechikhin. - Moscow: UP «Tekhnoprint», 2004. - 397 P. 10. Aksenov, I.I. Vakuumnaya duga v eroziyonykh istochnikakh plazmy [Текст] / I.I. Aksenov. - Kharkov: Izd-vo NII «KhFTI», 2005. - 211 P. 11. Gusev, A.I. Nanomaterialy, nanostrukturny, nanotekhnologii [Текст] / A.I. Gusev. - Moscow: Fizmatlit, 2005. - 416 P. 12. Reshetnyak, Ye.N. Sintez uprochnyayushchikh nanostrukturnykh pokrytiy [Текст] / Ye.N. Reshetnyak, A.I. Strel'nitskiy // Voprosy atomnoy nauki i tekhniki. - 2008. - No 2. - P. 119 - 130. 13. Andriyevskiy, R.A. Nanomaterialy: kontseptsiya i sovremennyye problemy [Текст] / R.A. Andriyevskiy // Fizika metallov i metallovedeniye. - 2003. - Vol. 91, No 1. - P.50 - 56. 14. Sostav, struktura i svoystva nanostrukturnykh plenok boridov tantala [Текст] / A.A. Goncharov, P.I. Ignatenko, V.V. Petukhov i dr. // ZHTF. -2006. - Vol. 76, No. 10. - P. 82 - 87.

Поступила (received) 05.09.2015

**Костюк Геннадий Игоревич** – д-р техн. наук, проф., проф. Нац. аэрокосм. ун-т «ХАИ», тел.: (057)-788-42-06, e-mail: [g.kostyuk206@yandex.ru](mailto:g.kostyuk206@yandex.ru);

**Kostyuk Gennadiy Igorevich** – Doctor of Technical Sciences, Full Professor, National Aerospace University "KhAI", tel.: (057)-788-42-06, e-mail: [g.kostyuk206@yandex.ru](mailto:g.kostyuk206@yandex.ru);

**Бехзад Размдзху** – аспирант НАУ «ХАИ», тел.: (057)-788-42-06;

**Bekhzad Razmdzhu** – graduate student, National Aerospace University "KhAI", тел.: (057)-788-42-06;

**Бруяка Ольга Олеговна** – канд. техн. наук, доц., доц. Нац. авиацион. ун-т, г. Киев, тел.: (057)-788-42-06

**Bruyaka Olha Olehovna** – Candidate of Technical Sciences, assistant professor, National Aerospace University, Kiev, tel.: (057)-788-42-06.