

УДК 621.9.044

*Г.И. КОСТЮК, Т.А. ПОСТЕЛЬНИК, О.М. МЕЛКОЗЕРОВА***ОБЪЕМ НАНОКЛАСТЕРА И ГЛУБИНЫ ЕГО ЗАЛЕГАНИЯ ПРИ ДЕЙСТВИИ ИОНОВ РАЗНЫХ ЭНЕРГИЙ, СОРТОВ И ЗАРЯДОВ НА ТИТАНОВЫЙ СПЛАВ ВТ-1**

Проведены исследования величины объема нанокластера и глубины его залегания в зависимости от энергии, заряда и сорта ионов (B^+ , N^+ , C^+ , Al^+ , V^+ , Cr^+ , O^+ , Ni^+ , Zr^+ , Mo^+ , Hf^+ , W^+ , Ta^+ , Pt^+), что позволяет определить состав ионов, их энергии и заряды для получения наноструктур в требуемом слое, а с учетом необходимой плотности ионного тока оценить практически все технологические параметры для получения слоя требуемой толщины и физико-механических характеристик в титановом сплаве ВТ-1.

Ключевые слова: объем нанокластера, ионы, глубина залегания, плотность ионного тока, титановый сплав, наноструктуры.

Введение. Применение титановых сплавов для создания деталей авиационной и ракетной техники выдвигает ряд важных требований к их поверхностному слою: высокая износостойкость и контактная прочность (что связано с необходимостью получения высокой микротвердости), повышение ударной и усталостной прочности, а также коррозионной стойкостью (что связано с необходимостью получения высоких физико-механических характеристик поверхностного слоя). При реализации НС в достаточно большом слое при соответствующем выборе плотности ионного тока для каждого сорта иона можно прогнозировать глубину слоя и эксплуатационные характеристики детали. Всё это позволит получать детали авиационной техники из титановых сплавов с высокими прочностными характеристиками и достаточной работоспособностью.

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», хозяйственных работ и договоров о сотрудничестве.

Анализ последних исследований и литературы. На основе многих исследований наноструктур [1–18] показана возможность конструирования поверхностного слоя детали за счет наноструктур, но научных основ такого конструирования еще не создано. Очевидно, что имея возможность создавать слои из наноструктур требуемых физико-механических характеристик и на необходимой глубине можно существенно продвинуть эти исследования и решить вопрос о наноструктурах в поверхностном слое, обеспечивающих существенное повышение работоспособности деталей. Ясно, что, зная размер зерна, который будет получаться в соответствующем слое, можно прогнозировать изменение физико-механических ха-

рактеристик поверхностного слоя по глубине, а следовательно, выбирать слои, которые обеспечат конструирование слоя по требуемым характеристикам. Всё это говорит о своевременности и актуальности проводимых исследований и дает пути создания сложных композитных наноструктурных слоев, имеющих высокую работоспособность и достаточно высокие физико-механические характеристики, причем по глубине они будут изменяться с учетом возможностей соответствующих слоев наноструктур.

Целью данной статьи является определение технологических режимов потоков ионов различных сортов, энергий и зарядов для получения наноструктур.

Постановка проблемы. Анализ исследований по получению наноструктур в конструкционных материалах, результаты которых приведены в обзорах работ [1–18], показал, что теоретических работ, за исключением [1–2], по получению наноструктур практически нет, а значит, и отсутствуют научные основы получения технологических параметров потоков ионов для прогноза и научного подхода к определению технологических параметров для получения слоев наноструктур требуемой толщины в целях повышения работоспособности деталей и режущего инструмента.

Материалы исследований. На основе моделирования [1] тепловых и термомеханических процессов в зоне действия ионов определили зону материала, где выполняются условия для образования наноструктур: температуры лежат в диапазоне 500–1500 К, скорости их нарастания больше 10^7 К/с и температурные напряжения в диапазоне 10^7 – 10^9 Па, что ускоряет процесс образования наноструктур. Из условия наиболее удачного заполнения наноструктурами объема плотность тока выбрана равной первой критической плотности тока [3].

Результаты исследований. В настоящей статье рассматриваются объем наноструктурированного кластера и глубина его залегания в магниевом сплаве, что позволит обеспечить высокий ресурс деталей из магниевых сплавов. Величина объема наноструктур при единичном действии иона на титановый сплав дает возможность прогнозировать требуемую плотность ионного тока в потоке для полного заполнения слоя, где возможно образование НС для этого иона соответствующего сорта, энергии и заряда. На рис. 1–9

представлены зависимости объема нанокластера и глубин его залегания от энергии E и зарядового числа z для ионов: В, С – рис. 1; N, Al – рис. 2; V, Cr – рис. 3, аналогичные зависимости для ионов O, Fe – рис. 4; Ni, Co – рис. 5; Y, Zr – рис. 6; Mo, Hf – рис. 7; Ta, W – рис. 8; Pt – рис. 9.

Очевидно, что с ростом энергии ионов и их зарядов реализуется существенный рост объемов НС, также влияет и заряд для ионов бора и углерода на объем $V_{\max} = 1,1 \cdot 10^{-22} \text{ м}^3$ (рис. 1, а) и на глубину залегания объемов НС (рис 1, б, в) $h_{\max} = 8,7 \cdot 10^{-8} \text{ м}$; $h_{\min} = 7,3 \cdot 10^{-8} \text{ м}$ ($E = 2 \cdot 10^4 \text{ эВ}$).

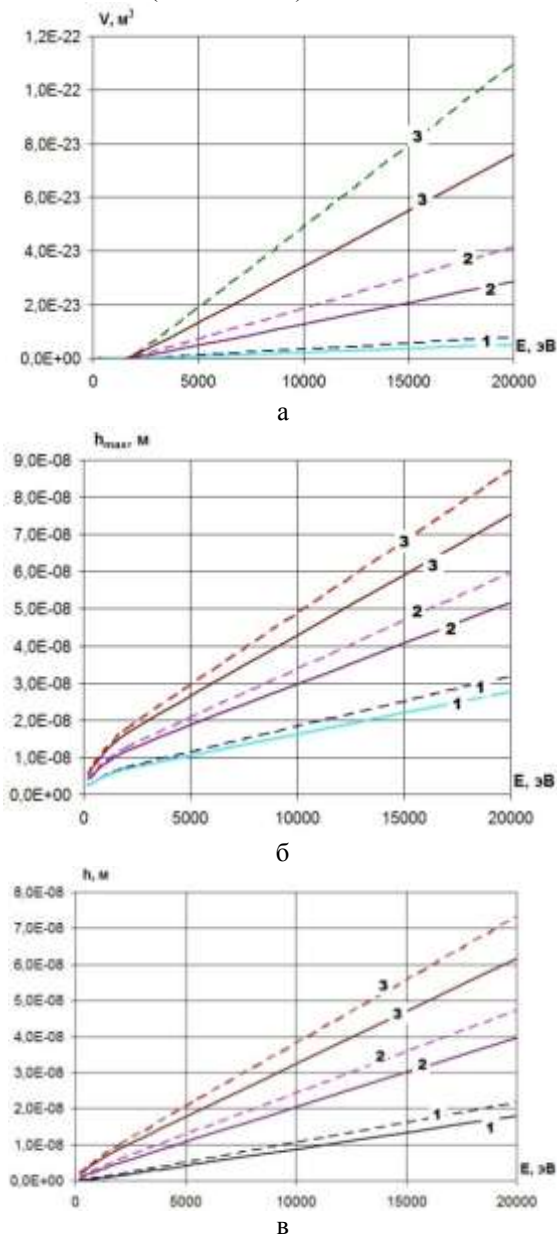


Рис. 1 – Объем нанокластера V , максимальная $h_{\max}$ и минимальная $h_{\min}$ глубина его залегания в зависимости от энергии ионов бора (---) и углерода (—) на титановый сплав (1 – $Z = 1$, 2 – $Z = 2$, 3 – $Z = 3$): а – бъем нанокластера; б – максимальная глубина залегания нанокластера; в – минимальная глубина залегания нанокластера

Для случая действия ионов азота и алюминия на титановый сплав определяющее влияние оказывают энергия и заряд иона (рис. 2, а), причем глубина его

залегания растет существенно с ростом энергии и заряда ионов. Максимальная глубина, на которой существует нанокластер составляет $6,6 \cdot 10^{-8} \text{ м}$, тогда как минимальная – $5,3 \cdot 10^{-8}$, а максимальный объем НК – $5,5 \cdot 10^{-23} \text{ м}^3$ при $E = 2 \cdot 10^4 \text{ эВ}$.

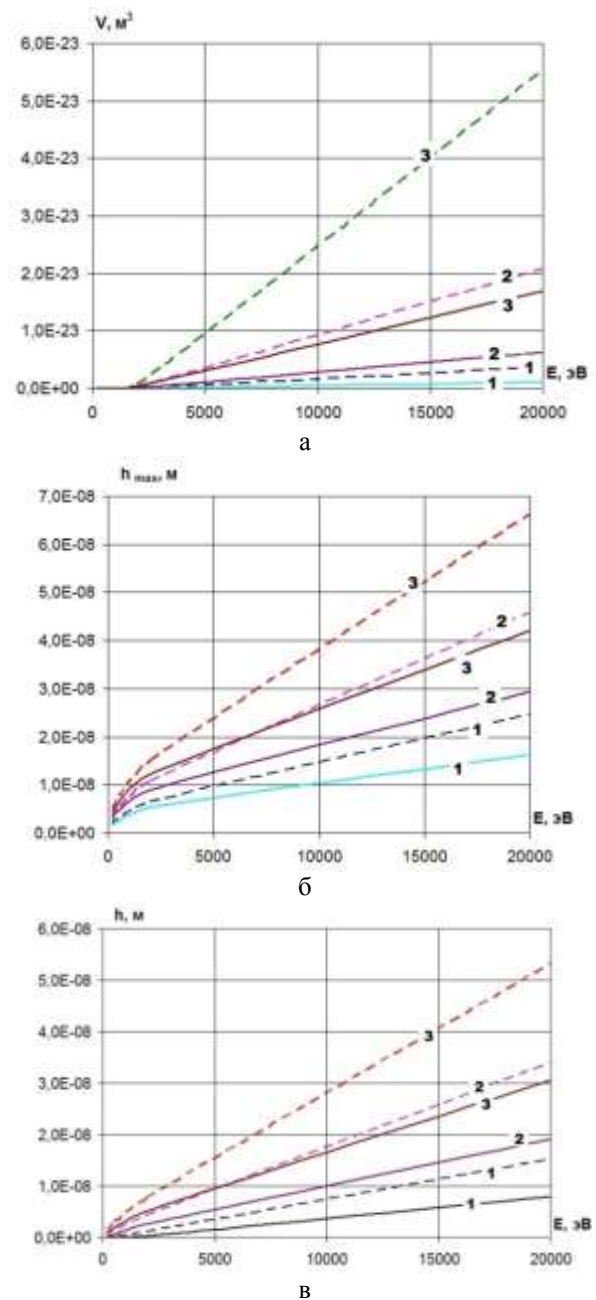


Рис. 2 – Объем нанокластера V , максимальная $h_{\max}$ и минимальная $h_{\min}$ глубина его залегания в зависимости от энергии ионов азота (---) и алюминия (—) на титановый сплав (1 – $Z = 1$, 2 – $Z = 2$, 3 – $Z = 3$): а – бъем нанокластера; б – максимальная глубина залегания нанокластера; в – минимальная глубина залегания нанокластера

Аналогичные зависимости для случая действия ионов ванадия и хрома представлены на рис. 3. Очевидно, что энергия, а также и заряд иона влияют существенно (рис. 3, а), тогда как переход от ванадия к хрому практически не изменил характера и численного значения величин.

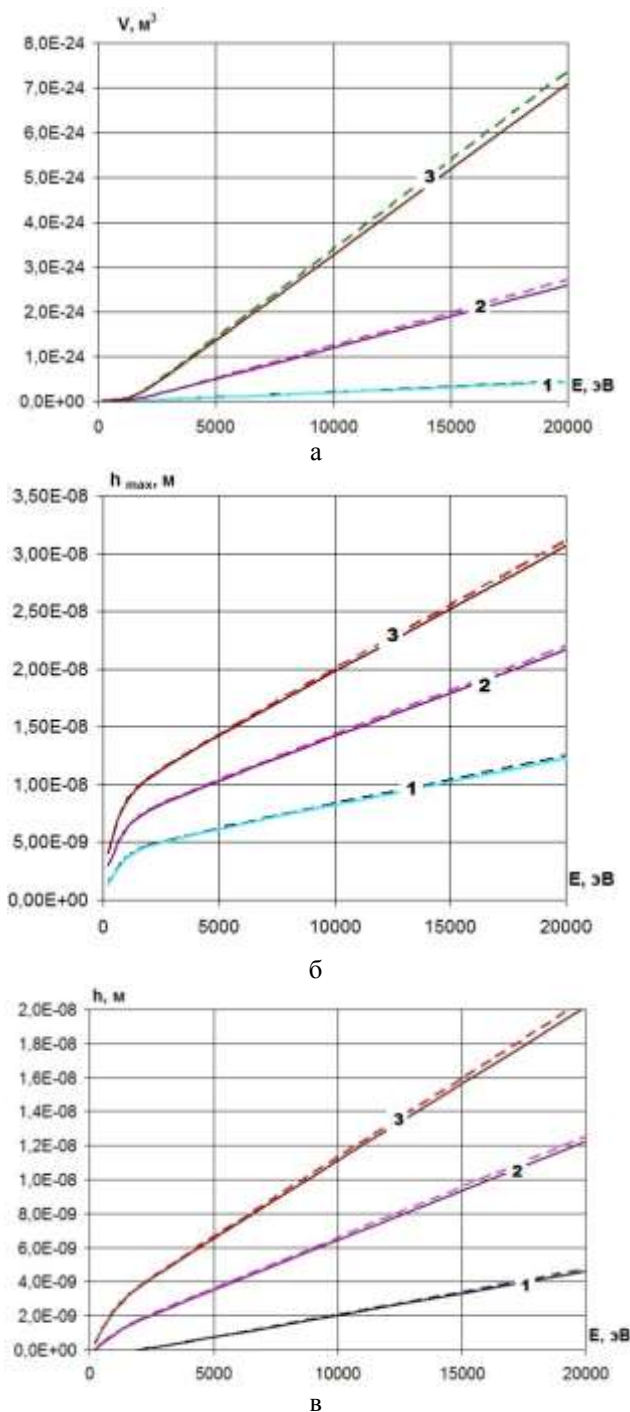


Рис. 3 – Объем нанокластера V , максимальная $h_{\max}$ и минимальная h глубина его залегания в зависимости от энергии ионов ванадия (--) и хрома (--) на титановый сплав (1 – $Z = 1$, 2 – $Z = 2$, 3 – $Z = 3$): а – бъем нанокластера; б – максимальная глубина залегания нанокластера; в – минимальная глубина залегания нанокластера

То же самое наблюдается и для глубин залегания НК, причем на глубину залегания существенно влияют энергия и заряд ионов. В случае действия ионов кислорода и железа объем нанокластера также существенно зависит от энергии и заряда (рис. 4, а), и глубины залегания нанокластера (максимальная и минимальная), (рис. 4, б, в). Максимальный объем НК – $4,27 \cdot 10^{-23} \text{ м}^3$, а максимальная и минимальная глубина

залегания – соответственно $6 \cdot 10^{-8}$ и $4,71 \cdot 10^{-8} \text{ м}$ ($E = 2 \cdot 10^4 \text{ эВ}$).

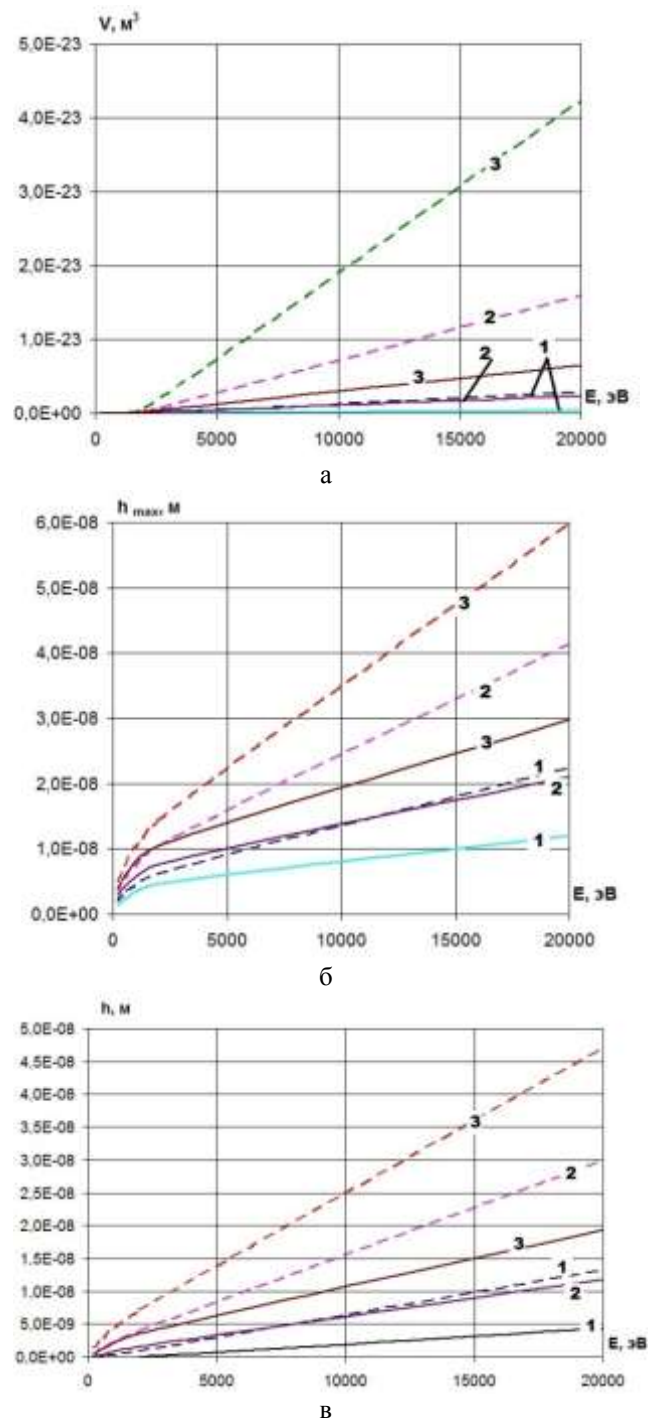


Рис. 4 – Объем нанокластера V , максимальная $h_{\max}$ и минимальная h глубина его залегания в зависимости от энергии ионов кислорода (--) и железа (--) на титановый сплав (1 – $Z = 1$, 2 – $Z = 2$, 3 – $Z = 3$): а – бъем нанокластера; б – максимальная глубина залегания нанокластера; в – минимальная глубина залегания нанокластера

Действие ионов никеля и кобальта позволяет получать нанокластеры довольно значительных размеров, причем их величина существенно зависит от энергии и заряда ионов. Такое же влияние испытывает и максимальная и минимальная глубина залегания НК (рис. 5, б, в), но переход от никеля к кобальту практически

не меняет ни объема нанокластера, ни глубины его залегания. Максимальный объем НК – $6,32 \cdot 10^{-24} \text{ м}^3$, а $h_{\max} = 2,95 \cdot 10^{-8}$, $h_{\min} = 1,91 \cdot 10^{-8} \text{ м}$ ($E = 2 \cdot 10^4 \text{ эВ}$; $Z = 3$).

также наблюдается определяющая зависимость объема (рис. 6, а) и глубин его залегания (рис. 6, б, в) от энергии и заряда иона, тогда как переход от иона иттрия к иону циркония эти зависимости не изменяет.

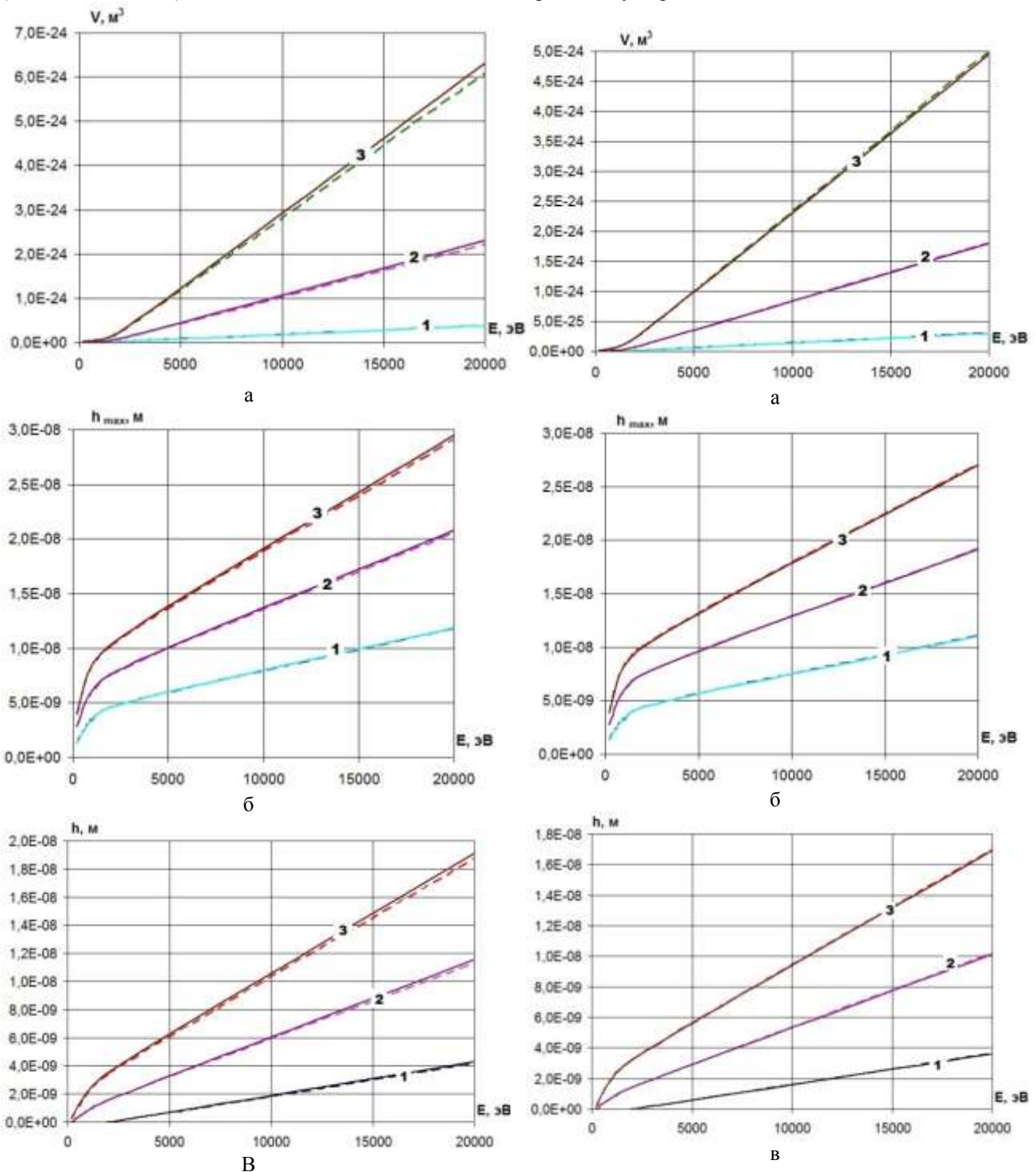


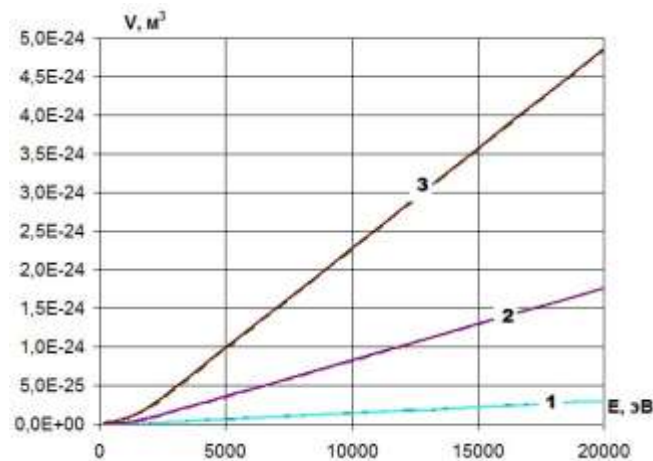
Рис. 5 – Объем нанокластера V , максимальная $h_{\max}$ и минимальная h глубина его залегания в зависимости от энергии ионов никеля (--) и кобальта (–) на титановый сплав (1 – $Z = 1$, 2 – $Z = 2$, 3 – $Z = 3$): а – бъем нанокластера; б – максимальная глубина залегания нанокластера; в – минимальная глубина залегания нанокластера

Аналогичные зависимости для случая действия ионов иттрия и циркония представлены на рис. 6,

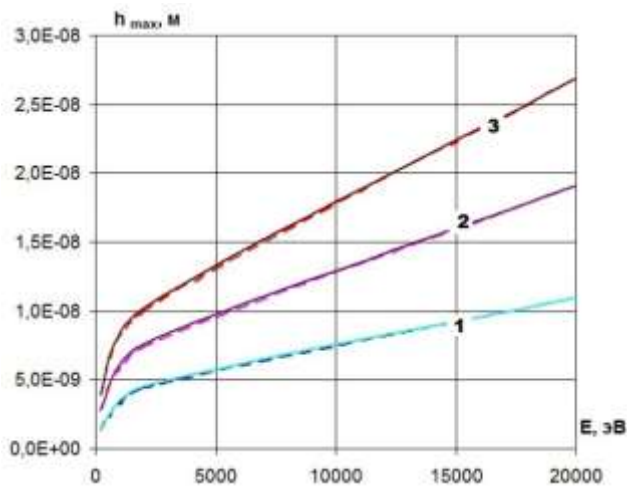
Рис. 6 – Объем нанокластера V , максимальная $h_{\max}$ и минимальная h глубина его залегания в зависимости от энергии ионов иттрия (--) и циркония (–) на титановый сплав (1 – $Z = 1$, 2 – $Z = 2$, 3 – $Z = 3$): а – бъем нанокластера; б – максимальная глубина залегания нанокластера; в – минимальная глубина залегания нанокластера

При действии ионов молибдена и гафния на магниевый сплав объем (рис. 7, а) и глубина залегания (рис.

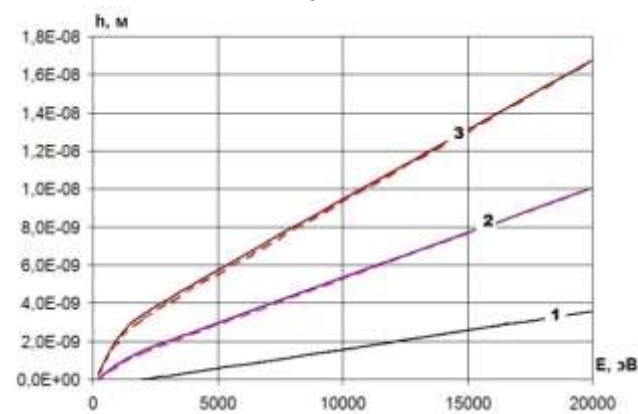
7, б, в) нанокластера существенно зависят от энергии и заряда иона. Для этих ионов величины объемов и глубин залегания практически одинаковы.



а



б

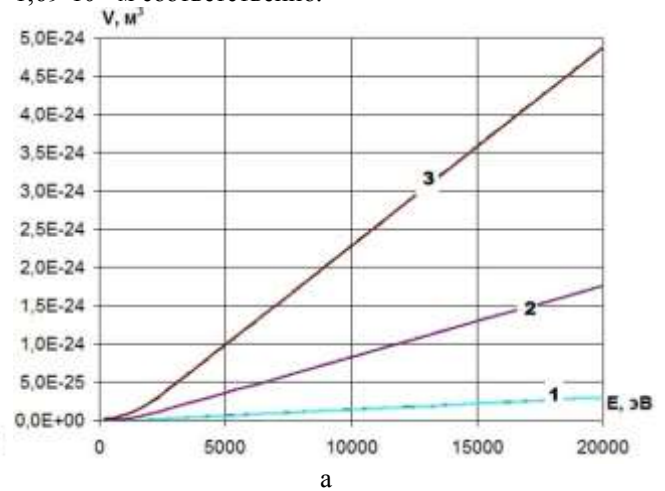


в

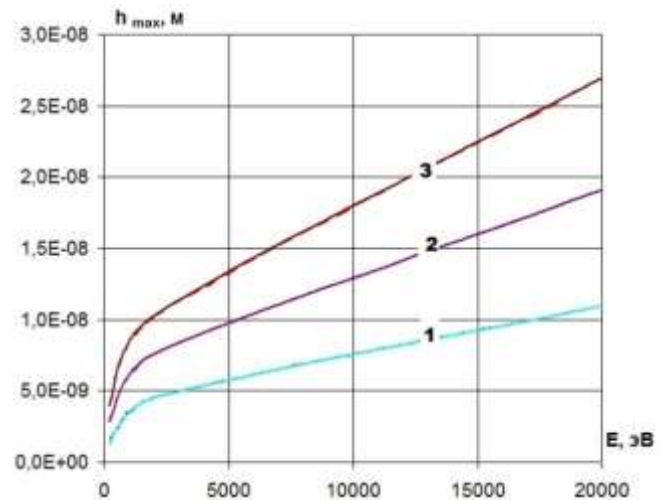
Рис. 7 – Объем нанокластера V , максимальная $h_{\max}$ и минимальная h глубина его залегания в зависимости от энергии ионов молибдена (--) и гафния (–) на титановый сплав (1 – $Z = 1$, 2 – $Z = 2$, 3 – $Z = 3$): а – бъем нанокластера; б – максимальная глубина залегания нанокластера; в – минимальная глубина залегания нанокластера

Для случая действия тантала и вольфрама влияние сорта иона практически отсутствует, а замечено определяющее влияние энергии и заряда иона (рис. 8).

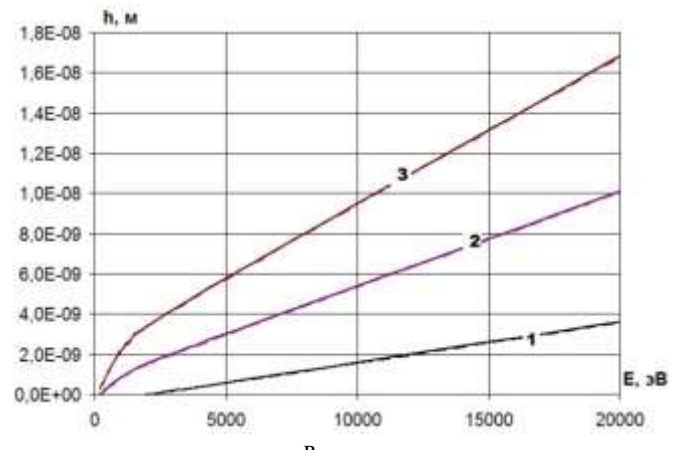
Максимальный объем НК – $4,38 \cdot 10^{-24} \text{ м}^3$, а максимальная и минимальная глубина его залегания – $2,69 \cdot 10^{-8}$ и $1,69 \cdot 10^{-8} \text{ м}$ соответственно.



а



б



в

Рис. 8 – Объем нанокластера V , максимальная $h_{\max}$ и минимальная h глубина его залегания в зависимости от энергии ионов тантала (--) и вольфрама (–) на титановый сплав (1 – $Z = 1$, 2 – $Z = 2$, 3 – $Z = 3$): а – бъем нанокластера; б – максимальная глубина залегания нанокластера; в – минимальная глубина залегания нанокластера

При действии платины на титановый сплав также отмечается высокое влияние энергии и заряда иона на величины объема и глубины его залегания (рис. 9).

В этом случае объем НК – $4,97 \cdot 10^{-24} \text{ м}^3$ и глубина залегания составляет $h_{\max} = 2,71 \cdot 10^{-8} \text{ м}$, $h_{\min} = 1,7 \cdot 10^{-8} \text{ м}$.

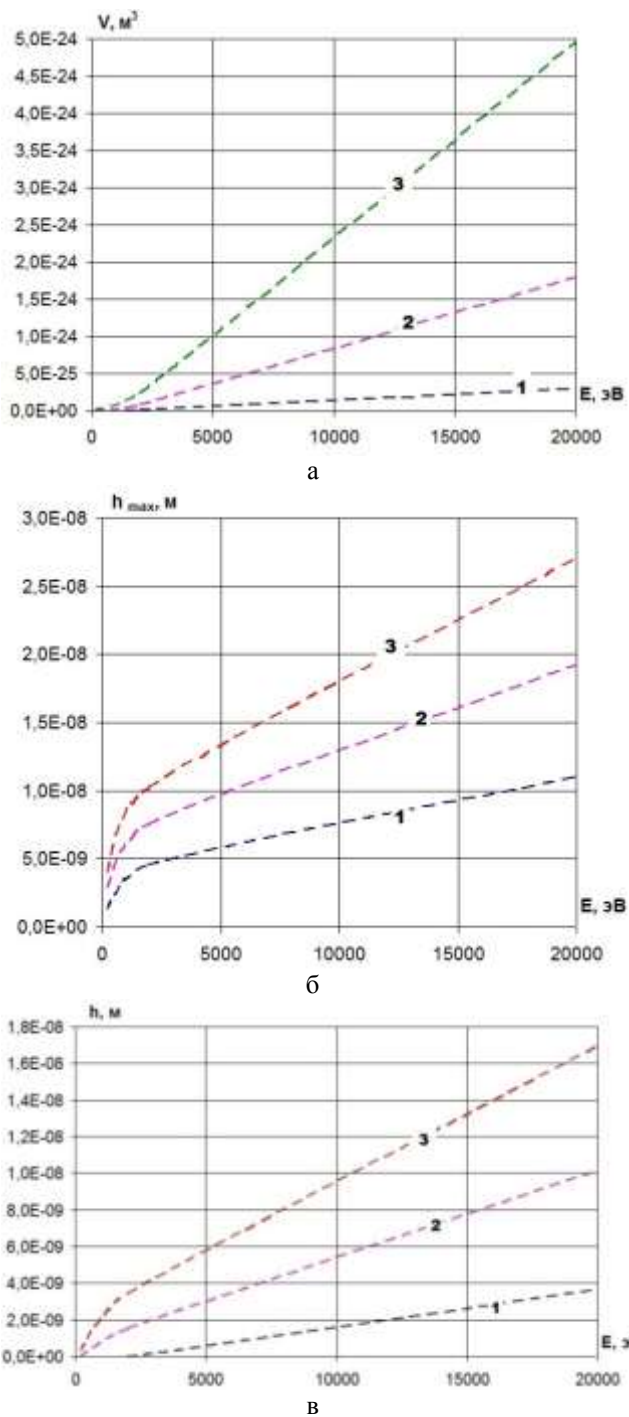


Рис. 9 – Объем нанокластера V , максимальная $h_{\max}$ и минимальная h глубина его залегания в зависимости от энергии ионов платины (---) на титановый сплав (1 – $Z = 1$, 2 – $Z = 2$, 3 – $Z = 3$): а – бъем нанокластера; б – максимальная глубина залегания нанокластера; в – минимальная глубина залегания нанокластера

Полученные зависимости будут необходимы для определения потребной плотности тока соответствующего сорта, заряда и энергии для полного заполнения слоя наноструктурами, а выбрав необходимые

энергии, заряды и сорта ионов для получения наноструктур в основном требуемой толщины, аналогично проводим оценки требуемых плотностей токов в каждом слое.

Зная объем, занимаемый наноструктурой при соответствующих энергиях, сортах и зарядах ионов и диапазон глубин, на которых этот объем находится, очевидно можно оценить плотность ионного тока.

Тогда по известным диапазонам глубин залегания зон, где образуются наноструктуры, выбираем энергии, сорта и зарядности ионов для полного заполнения объема по глубине, т.е. так, чтобы они дополняли друг друга. Далее определяем плотность тока каждого из сортов иона и заряда, чтобы максимально заполнить необходимый объем поверхностного слоя детали наноструктурами (желательно, чтобы окончание первого слоя было началом второго, окончание второго – началом третьего слоя, и так далее). Тогда для любого i -го слоя плотность тока определяется как

$$j_i = \frac{h_{i2} - h_{i1}}{V_{HCl}} z_i e,$$

где h_{i1} и h_{i2} – начальная и конечная координаты зоны, где реализуются наноструктуры для i -го иона; V_{HCl} – объем зоны, где образуются наноструктуры; z_i – зарядовое число i -го иона; e – заряд электрона.

Зная j_i , V_{HCl} , h_{i1} , h_{i2} и z_i и выбрав E_i , мы можем сформировать необходимое количество потоков ионов, позволяющих получить наноструктурированный слой требуемой толщины, а с учетом технической задачи формирования немоноэнергетичных разнотипных потоков ионов можно решить задачу по технологическим параметрам ионной обработки.

Выводы.

1. Показана принципиальная возможность конструирования поверхностного слоя в титановом сплаве за счет создания наноструктур различного состава и физико-механических характеристик

2. Очевидно, что определяющее влияние на объем нанокластера оказывают энергия иона и его заряд, в то же время влияет и масса иона, правда, не так существенно.

3. Глубина залегания нанокластера достигает десятых долей микрометра, то есть слой материала, испытывающего существенные изменения, довольно значительный, а если учесть и возможность диффузии ионов и даже аномальной диффузии, то можно получить слои с измененными характеристиками уже в пределах нескольких микрометров.

4. Очевидно, что для ряда пар ионов (при действии их на магниевый сплав) зависимости объема нанокластера и глубины его залегания от энергии и заряда одинаковы. Такими парами являются: «ванадий-хром», «никель-кобальт», «иттрий - цирконий», «тантал-вольфрам» и «молибден-гафний».

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] / Г.И. Костюк. – К.: Изд-во АИНУ, 2002. – Кн.1: Физические процессы плазменно-ионных, ионно-лучевых, плазменных, светолучевых и комбинированных технологий. – 596 с. 4. Костюк, Г.И. Физико-технические основы нанесения покрытий, ионной имплантации и ионного легирования, лазерной обработки и упрочнения, комбинированных технологий [Текст] / Г.И. Костюк. – К.: Изд-во АИНУ, 2002. – Кн. 2: Справочник для расчета основных физических и технологических параметров, оценки возможностей, выбора типа технологий и оборудования. – 482 с. 5. Костюк, Г.И. Наноструктуры и нанопокртия: перспективы и реальность [Текст]: учеб. пособие / Г.И. Костюк. – Х.: Нац. аэрокосм. ун-т «Харьк. авиац. ин-т», 2009. – 406 с. 6. 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. 7. 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. 8. Костюк, Г.И. Эффективный режущий инструмент с покрытием и упрочненным слоем [Текст]: справ. / Г.И. Костюк. – К.: Вид-во АИНУ, 2003. – 412 с. 9. 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. 10. Гречихин, Л.И. Физика наночастиц и нанотехнологий [Текст] / Л.И. Гречихин. – М.: УП «Технопринт», 2004. – 397 с. 11. Аксенов, И.И. Вакуумная дуга в эрозийных источниках плазмы [Текст] / И.И. Аксенов. – Х.: Изд-во НИИ «ХФТИ», 2005. – 211 с. 12. Хаякава, С. Ядерно-физический аспект: в 2 кн. [Текст] / С. Хаякава. – М.: Мир, 1973. – Кн. 2. – 701 с. 13. Готт, Ю.В. Взаимодействие частиц с веществом в плазменных исследованиях [Текст] / Ю.В. Готт. – М.: Атомиздат, 1978. – 271 с. 14. Гусев, А.И. Нанокристаллические материалы: методы получения и свойства [Текст] / А.И. Гусев. – Екатеринбург: Изд-во РАН, Уральское отд-ние, 1998. – 302 с. 15. Гусев, А.И. Наноматериалы, наноструктуры, нанотехнологии [Текст] / А.И. Гусев. – М.: Физматлит, 2005. – 416 с. 16. Решетняк, Е.Н. Синтез упрочняющих наноструктурных покрытий [Текст] / Е.Н. Решетняк, А.И. Стрельникий // Вопросы атомной науки и техники. – 2008. – № 2. – С. 119 – 130. 17. Андриевский, Р.А. Наноматериалы: концепция и современные проблемы [Текст] / Р.А. Андриевский // Физика металлов и металловедение. – 2003. – Т. 91, № 1. – С. 50 – 56. 18. Состав, структура и свойства наноструктурных пленок боридов тантала [Текст] / А.А. Гончаров, П.И. Игнатенко, В.В. Петухов и др. // ЖТФ. – 2006. – Т. 76, № 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. tekhnologiy, 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. tekhnologiy, 2012. – 648 P. 3. Kostyuk, G.I. Fiziko-tekhnicheskiye osnovy naneseniya pokrytiy, ionnoy implantatsii i ionnogo legirovaniya, lazernoy obrabotki i uprochneniya, kombinirovannykh tekhnologiy [Текст] / G.I. Kostyuk. – Kiev: Izd-vo AINU, 2002. Kn.1: Fizicheskiye protsessy plazmenno-ionnykh, ionno-luchevykh, plazmennyykh, svetoluchevykh i kombinirovannykh tekhnologiy. – 596 P. 4. Kostyuk, G.I. Fiziko-tekhnicheskiye osnovy naneseniya pokrytiy, ionnoy implantatsii i ionnogo legirovaniya, lazernoy obrabotki i uprochneniya, kombinirovannykh tekhnologiy [Текст] / G.I. Kostyuk. – Kiev: Izd-vo AINU, 2002. – Kn. 2: Spravochnik dlya rascheta osnovnykh fizicheskikh i tekhnologicheskikh parametrov, otsenki vozmozhnostey, vybora tipa tekhnologiy i oborudovaniya. – 482 P. 5. 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. 6. Kostyuk, G.I. Nauchnyye osnovy sozdaniya sovremennykh tekhnologiy [Текст]: ucheb.posobiye / G.I. Kostyuk. – Kharkov.: NatP. aerokosm. un-t «Khark. aviatP. in-t », 2008. – 552 P. 7. Kostyuk, G.I. Effektivnyy rezhushchiy instrument s pokrytiyem i uprochnennym sloyem [Текст]: monogr.-sprav. / G.I. Kostyuk. – Kharkov: NatP. aerokosm. un-t «Khark. aviatP. in-t », 2007. – 633 P. 8. Kostyuk, G.I. Effektivnyy rezhushchiy instrument s pokrytiyem i uprochnennym sloyem [Текст]: sprav. / G.I. Kostyuk. – Kiev: Vid-vo AINU, 2003. – 412 P. 9. 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. 10. Grechikhin, L.I. Fizika nanochastits i nanote-khnologii [Текст] / L.I. Grechikhin. – Moscow: UP «Tekhnoprint», 2004. – 397 P. 11. Aksenov, I.I. Vakuumnaya duga v erozionnykh istochnikakh plazmy [Текст] / I.I. Aksenov. – Kharkov: Izd-vo NII «KHFTI», 2005. – 211 P. 12. Khayakava, P. Yaderno-fizicheskiy aspekt: v 2 kn. [Текст] / P. Khayakava. – Moscow: Mir, 1973. – Kn. 2. – 701 P. 13. Gott, YU.V. Vzaimodeystviye chastits s veshchestvom v plazmennyykh issledovaniyakh [Текст] / YU.V. Gott. – Moscow: Atomizdat, 1978. – 271 P. 14. Gusev, A.I. Nanokristallicheskiye materialy: metody polucheniya i svoystva [Текст] / A.I. Gusev. – Yekaterinburg: Izd-vo RAN, Ural'skoye otd-niye, 1998. – 302 P. 15. Gusev, A.I. Nanomaterialy, nanostrukturny, nanotekhnologii [Текст] / A.I. Gusev. – Moscow: Fizmatlit, 2005. – 416 P. 16. Reshetnyak, Ye.N. Sintez uprochnyayushchikh nanostrukturnykh pokrytiy [Текст] / Ye.N. Reshetnyak, A.I. Strel'nitskiy // Voprosy atomnoy nauki i tekhniki. – 2008. – No 2. – PP. 119 – 130. 17. Andriyevskiy, R.A. Nanomaterialy: kontseptsiya i sovremennyye problemy [Текст] / R.A. Andriyevskiy // Fizika metallov i metallovedeniye. – 2003. – Vol. 91, No 1. – PP. 50 – 56. 18. 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. – PP. 82 – 87.

Поступила (received) 09.09.2015

Костюк Геннадий Игоревич – док. техн. наук, проф. НАУ «ХАИ», тел.: (057)-788-42-06, e-mail: 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;

Постельник Татьяна Александровна – аспирант НАУ «ХАИ», тел.: (057)-788-42-06; e-mail: tanya_postelnik@mail.ru;

Postelnyk Tatiana Aleksandrovna – graduate student, National Aerospace University «KhAI», tel.: (057)-788-42-06, e-mail: tanya_postelnik@mail.ru;

Мелкозерова Ольга Михайловна – канд. техн. наук, ассист. НАУ «ХАИ», тел.: (057)-788-42-06, e-mail: Olja.mex@gmail.com;

Melkozerova Olha Mykhailovna – Candidate of Technical Sciences, assistant, National Aerospace University «KhAI», tel.: (057)-788-42-06, e-mail: Olja.mex@gmail.com.