

*Г.И. Костюк, Е.В. Миргородская, О.М. Мелкозёрова*

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВЕЛИЧИНЫ ОБЪЕМА НАНОКЛАСТЕРА И ГЛУБИН ЕГО ЗАЛЕГАНИЯ ПРИ ДЕЙСТВИИ ИОНОВ РАЗНЫХ ЭНЕРГИЙ, СОРТОВ И ЗАРЯДОВ НА МАГНИЕВЫЕ СПЛАВЫ

Приведены особенности обработки отверстий комбинированным осевым инструментом. Предложен алгоритм выбора структуры комбинированного осевого инструмента для реализации технологического процесса обработки совокупности отверстий, основанный на анализе их конструктивно-технологических характеристик и увеличении концентрации технологических переходов. Предложена математическая модель, позволяющая описать структуру комбинированного осевого инструмента и принцип работы его ступеней.

**Ключевые слова:** обработка отверстий, комбинированный осевой инструмент, технологический процесс, концентрация операций.

**Введение.** Применение магниевых 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), ударной и усталостной прочностью, а также коррозионной стойкостью, (что связано с необходимостью получения высоких физико-механических характеристик поверхностного слоя). При реализации НС в достаточно большом слое и при соответствующем выборе плотности ионного тока для каждого сорта, что позволит прогнозировать глубину слоя и эксплуатационные характеристики детали. Всё это позволит обеспечить детали авиационной техники из магниевых сплавов высокими прочностными свойствами 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. Видно, что имея возможность создавать слои из наноструктур требуемых физико-механических характеристик и на необходимой глубине может 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 характеристик 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 возможности соответствующих слоев наноструктур.

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

**Постановка проблемы.** Проведенный анализ исследований по получению наноструктур в конструкционных материалах, результаты которых приведены в обзорах работ [1–18]. Показано, 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 с целью 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 объ-

ема и плотность тока выбрана равной первой критической [3].

**Результаты исследований.** В настоящей статье рассматривается 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 магниевый сплав дает возможность прогнозировать требуемую плотность ионного тока в потоке для полного заполнения слоя, где возможно образование для этого иона соответствующего сорта, энергии и заряда. Так, на рис. 1–9 представлены зависимости объема нанокластера и глубин его залегания от зарядового числа  $z$  и энергии  $E$  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.

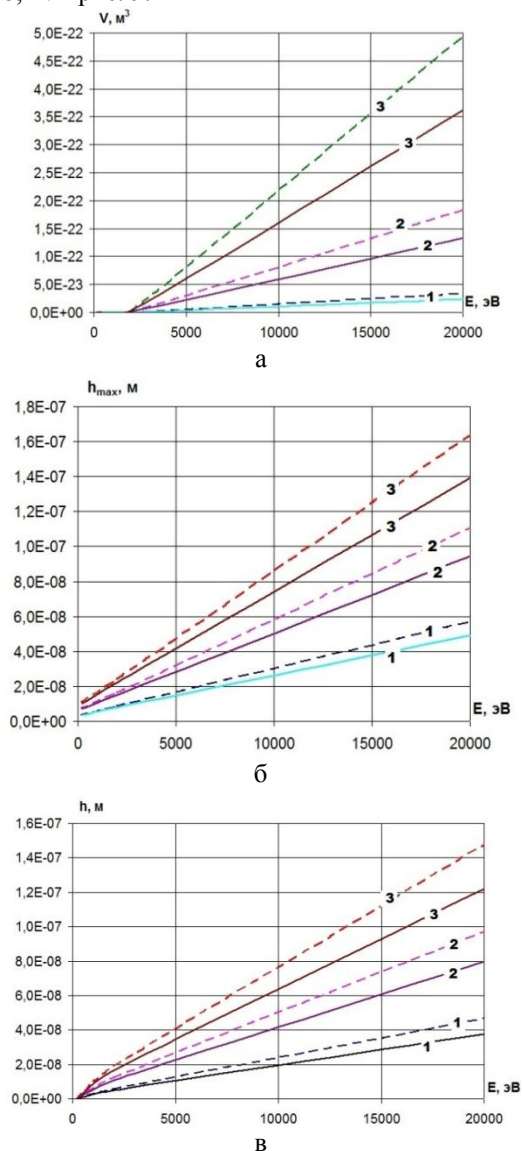


Рис. 1 – Объем нанокластера –  $V$  (а), максимальная –  $h_{\max}$  (б) и минимальная –  $h$  (в) глубина его залегания в зависимости от энергии ионов бора (–) и углерода (–) на магниевый сплав (1- $Z=1$ , 2- $Z=2$ , 3- $Z=3$ )

Видно, что с ростом энергии ионов и их зарядов реализуется существенный рост объемов, также влия-

ет и заряд для ионов бора и углерода (рис. 1а) и на глубину залегания объемов НС (рис 1б, в).

Для случая действия ионов азота и алюминия на магниевый сплав определяющее влияние оказывает энергия и заряд иона (рис. 2а), причем глубина его залегания растет существенно с ростом энергии и заряда ионов. Максимальная глубина на которой существует нанокластер составляет  $1,2 \cdot 10^{-7}$  м, тогда как минимальная  $2,32 \cdot 10^{-9}$ .

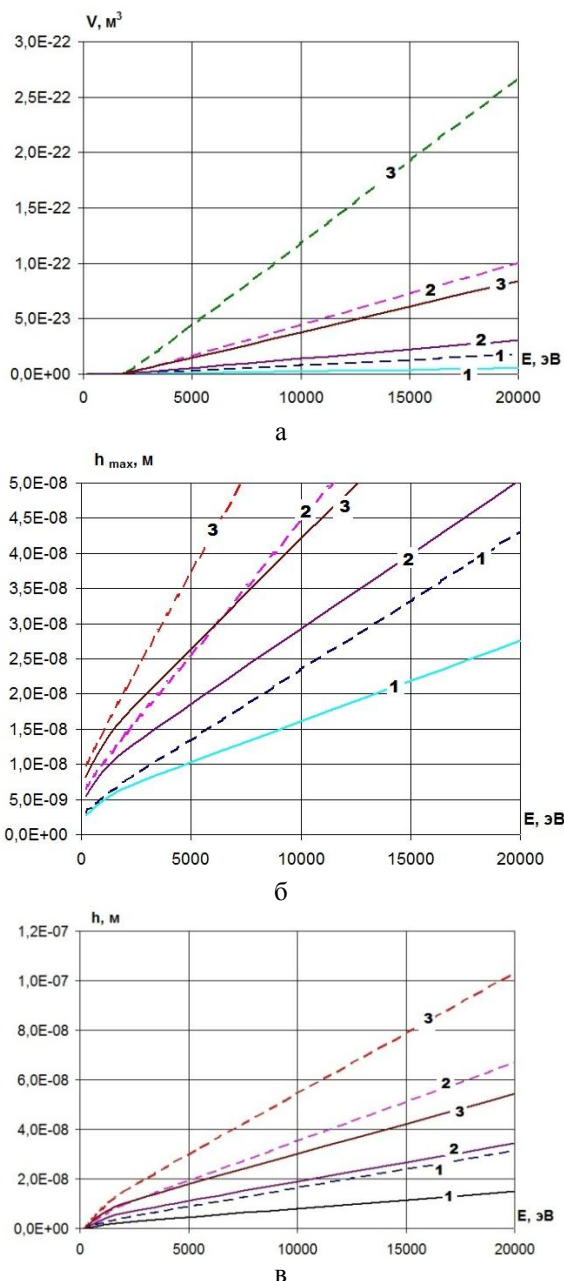


Рис. 2 – Объем нанокластера –  $V$  (а), максимальная –  $h_{\max}$  (б) и минимальная –  $h$  (в) глубина его залегания в зависимости от энергии ионов азота (–) и алюминия (–) на магниевый сплав (1- $Z=1$ , 2- $Z=2$ , 3- $Z=3$ )

Аналогичные зависимости для случая действия ионов ванадия и хрома представлены на рисунке 3. Видно, что энергия, также и заряд иона влияют существенно (рис. 3а), тогда как переход от ванадия к хрому прак-

тически не изменил характера и численного значения величин.

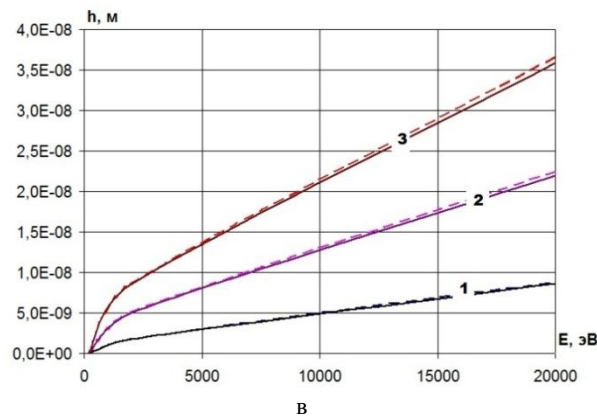
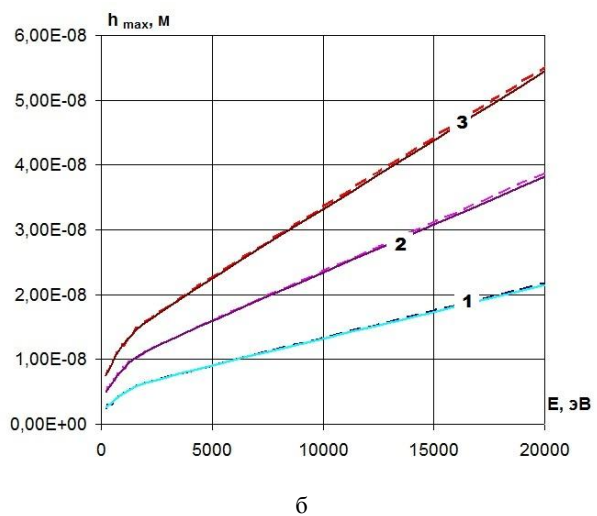
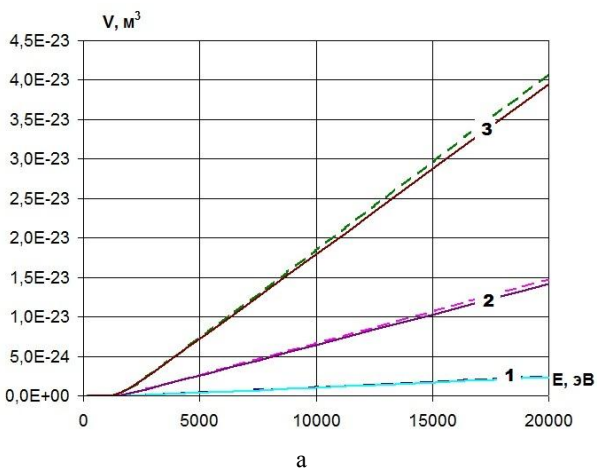


Рис. 3 – Объем нанокластера –  $V$  (а), максимальная –  $h_{\max}$  (б) и минимальная –  $h$  (в) глубина его залегания в зависимости от энергии иона ванадия (---) и хрома (—) на магниевый сплав (1- $Z=1$ , 2- $Z=2$ , 3- $Z=3$ )

То же самое наблюдается и для глубин залегания НК, причем на глубину залегания существенно влияет энергия и заряд иона. В случае действия ионов кислорода и железа объем нанокластера также существенно зависит от энергии и заряда (рис. 4а), и глубины залегания нанокластера (максимальная и минимальная) – (рис. 4б,в).

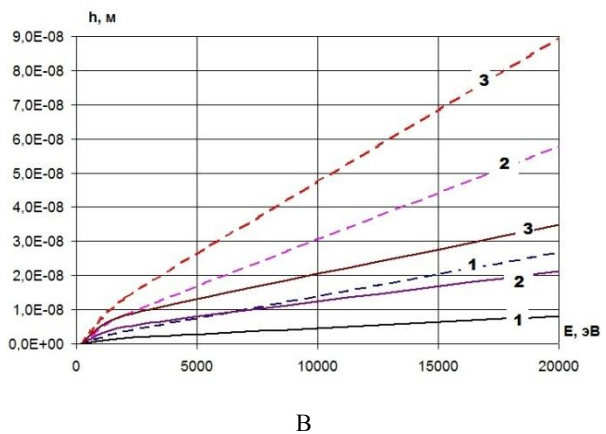
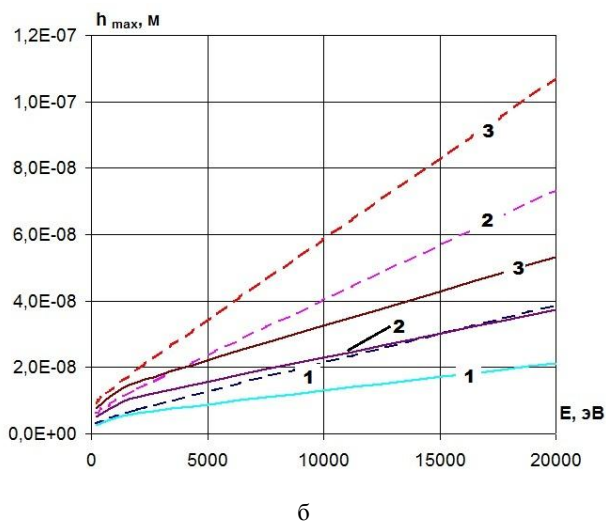
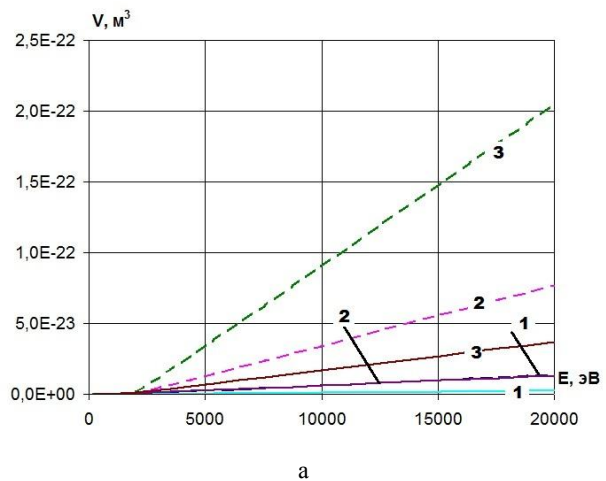
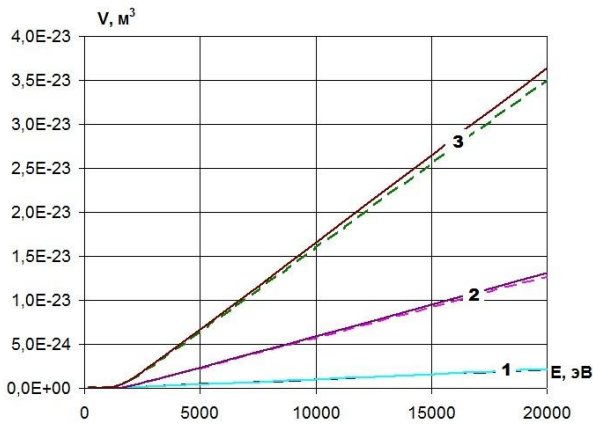
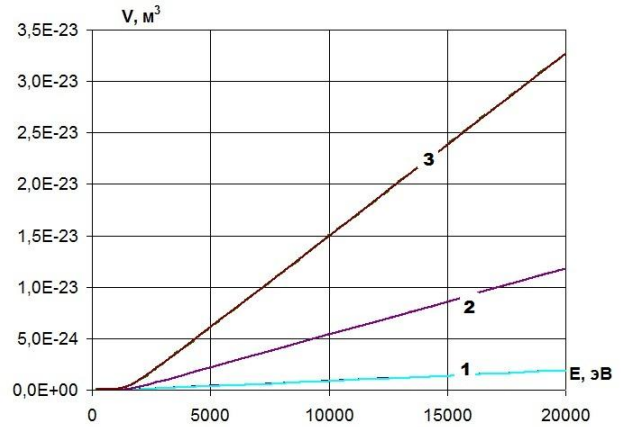


Рис. 4 – Объем нанокластера –  $V$  (а), максимальная –  $h_{\max}$  (б) и минимальная –  $h$  (в) глубина его залегания в зависимости от энергии иона кислорода (---) и железа (—) на магниевый сплав (1- $Z=1$ , 2- $Z=2$ , 3- $Z=3$ )

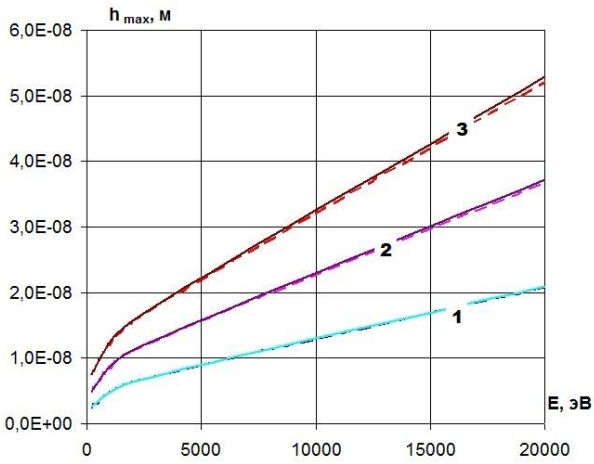
Действие ионов никеля и кобальта позволяет получать нанокластеры довольно значительных размеров, причем их величина существенно зависит от энергии и заряда иона. Такое же влияние испытывают и максимальная и минимальная глубины залегания НК (рис. 5б, в), но переход от никеля к кобальту практически не меняет ни объема нанокластера, ни глубины его залегания.



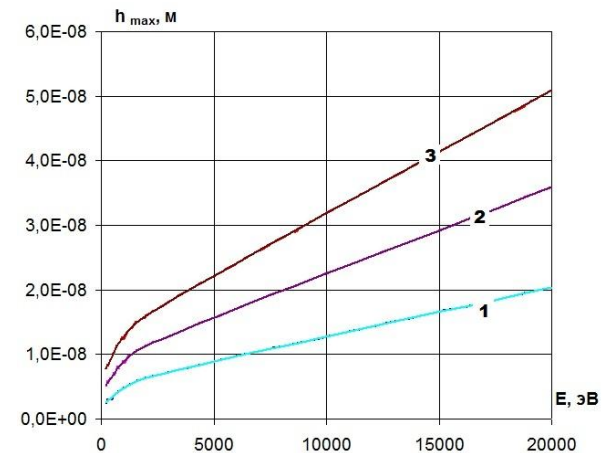
а



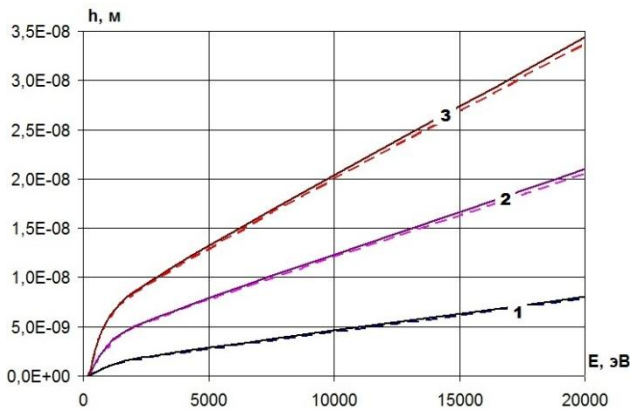
а



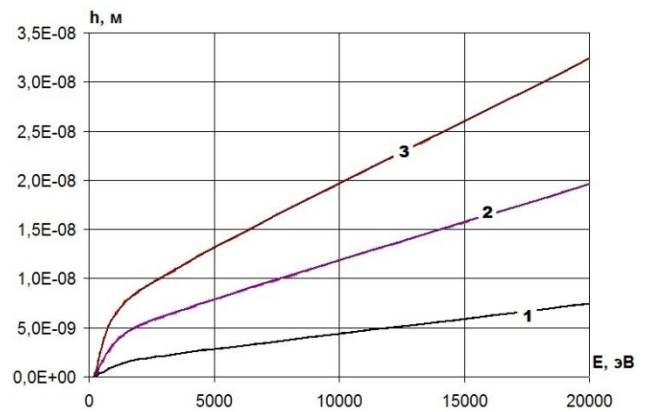
б



б



в



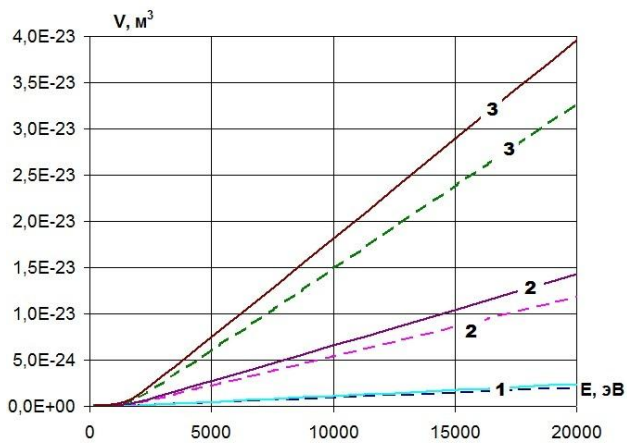
в

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

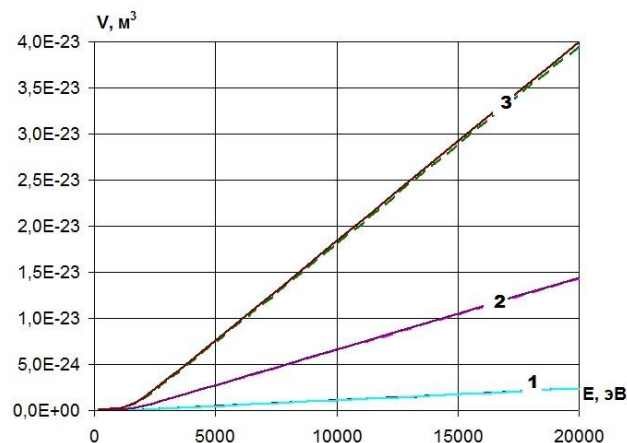
Рис. 6 – Объем нанокластера –  $V$  (а), максимальная –  $h_{\max}$ (б) и минимальная –  $h$  (в) глубина его залегания в зависимости от энергии иона иттрия (--)и циркония (–) на магниевый сплав (1- $Z=1$ ,2- $Z=2$ ,3- $Z=3$ )

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

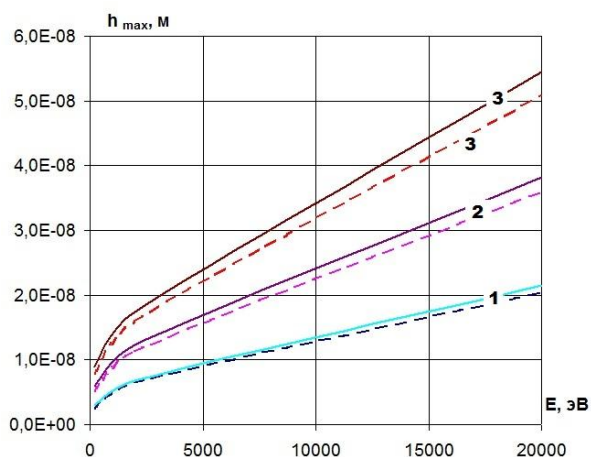
В случае действия ионов молибдена и гафния на магниевый сплав объем (рис. 7а) и глубина залегания (рис. 7б, в) нанокластера существенно зависят от энергии и заряда иона. В этом случае для этих ионов величины разные.



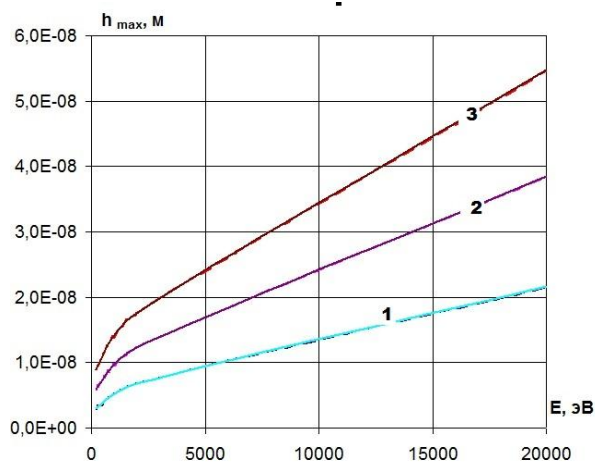
а



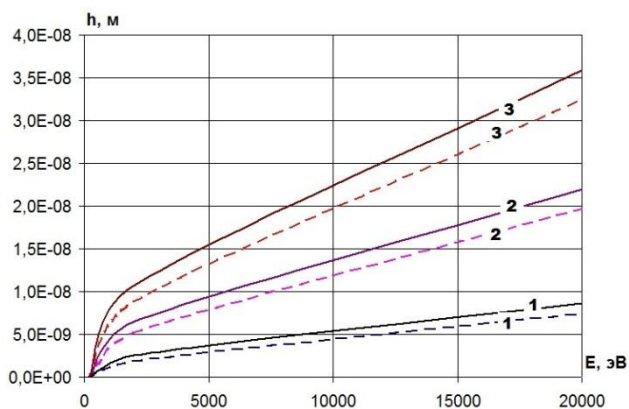
а



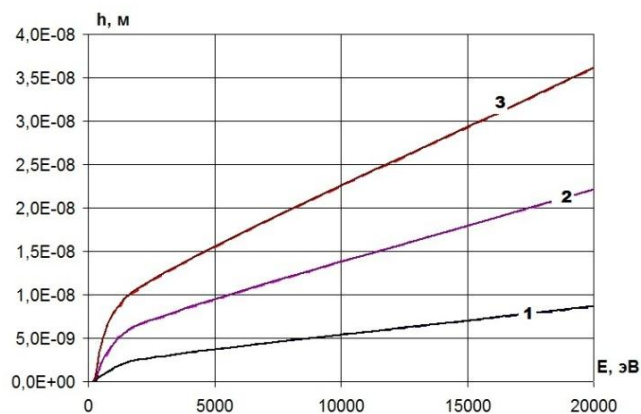
б



б



в



в

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

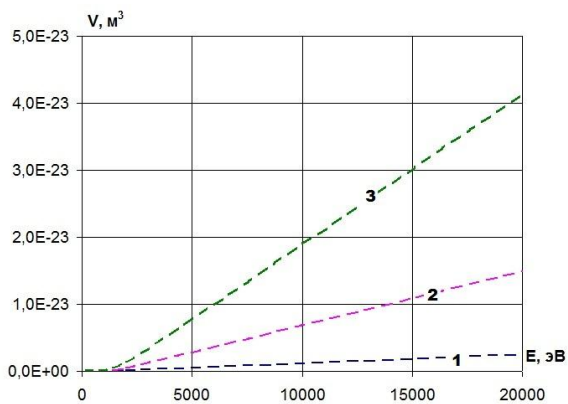
Рис. 8 – Объем нанокластера –  $V$  (а), максимальная –  $h_{\max}$  (б) и минимальная –  $h$  (в) глубина его залегания в зависимости от энергии ионов тантала (--) и вольфрама (--) на магниевый сплав (1-Z=1, 2-Z=2, 3-Z=3)

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

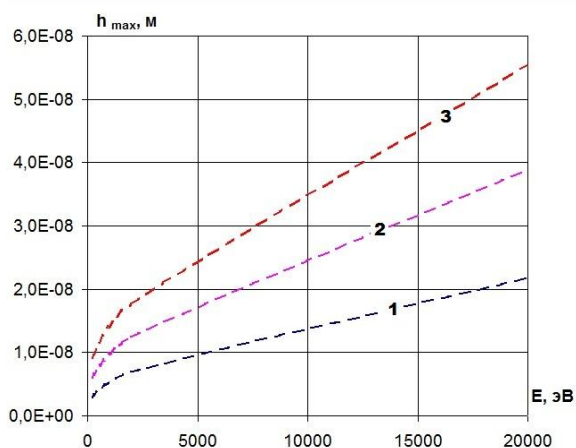
При действии платины на магниевый сплав также отмечается высокое влияние энергии и заряда иона на величины объема и глубины его залегания (рис. 9).

Полученные зависимости будут необходимы для определения потребной плотности тока соот-

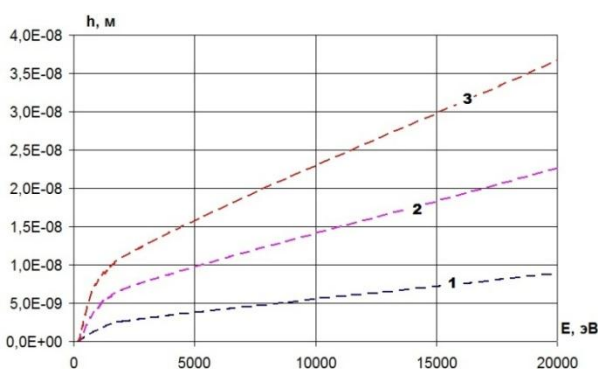
ветствующего сорта, заряда и энергии для полного заполнения слоя наноструктурами, а, выбрав необходимые энергии, заряды и сорта ионов для получения наноструктур в основном требуемой толщины, аналогично проводим оценки требуемых плотностей токов в каждом слое.



а



б



в

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

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

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

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

Зная  $j_i$ ,  $V_{HCi}$ ,  $h_{i1}$ ,  $h_{i2}$  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 немонотонных разноразрядовых потоков ионов можно решить задачу по технологическим параметрам ионной обработки.

#### Выводы.

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

2. Видно, что определяющее влияние на объем нанокластера оказывает 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. Видно, что для ряда пар ионов при действии на магниевый сплав сорт иона не оказывает влияние на зависимости объема нанокластера и глубины его залегания от энергии и заряда. Такими парами являются: «ванадий-хром», «никель-кобальт», «иттрий - цирконий», «тантал-вольфрам».

**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 эрозионных 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. Стрельницкий // Вопросы атомной науки и техники. – 2008. – No 2. – С. 119 – 130. **17.** Андриевский, Р.А. Наноматериалы: концепция и современные проблемы [Текст] / Р.А. Андриевский // Физика металлов и металловедение. – 2003. – Т. 91, No 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, вып. 10. – С. 82 – 87.

**Bibliography (transliterated):** 1. Kostyuk, G.I. *Nanotekhnologii: vybor tekhnologicheskikh parametrov i ustanovok, proizvoditel'nost' obrabotki, fiziko-mekhanicheskkiye kharakteristiki nanostruktur [Tekst]: monogr.* G.I. Kostyuk. - Kiev: Izd. tsentr Mezhdunar. akademii nauk i innovats. tekhnologiy, 2014. - 472 p. Print. 2. Kostyuk, G.I. *Nanotekhnologii: teoriya, eksperiment, tekhnika, perspektivy [Tekst]: monogr.* G.I. Kostyuk. - Kiev: Izd. tsentr Mezhdunar. akademii nauk i innovats. tekhnologiy, 2012. - 648 p. Print. 3. Kostyuk, G.I. *Fiziko-tekhnicheskkiye osnovy naneseniya pokrytiy, ionnoy implantatsii i ionnogo legirovaniya, lazernoy obrabotki i uprochneniya, kombinirovannykh tekhnologiy [Tekst]* G.I. Kostyuk. - Kiev: Izd-vo AINU, 2002. - Kn.1: Fizicheskiye protsessy plazmenno-ionnykh, ionno-luchevykh, plazmennyykh, svetoluchevykh i kombinirovannykh tekhnologiy. - 596 p. Print. 4. Kostyuk, G.I. *Fiziko-tekhnicheskkiye osnovy naneseniya pokrytiy, ionnoy implantatsii i ionnogo legirovaniya, lazernoy obrabotki i uprochneniya, kombinirovannykh tekhnologiy [Tekst]* 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. Print. 5. Kostyuk, G.I. *Nanostruktury i nanopokrytiya: perspektivy i real'nost' [Tekst]: ucheb.posobiye* G.I. Kostyuk. - Kharkov. : Nats. aerokosm. un-t «Khar'k. aviats. in-t », 2009. - 406 p. Print. 6. Kostyuk, G.I. *Nauchnyye osnovy sozdaniya sovremennykh tekhnologiy [Tekst]: ucheb.posobiye* G.I. Kostyuk. - Kharkov. : Nats. aerokosm. un-t «Khar'k. aviats. in-t », 2008. - 552 p. Print. 7. Kostyuk, G.I. *Effektivnyy rezhushchiy instrument s pokrytiyem i uprochnennym sloyem [Tekst]: monogr.-sprav.* G.I. Kostyuk. - Kharkov. : Nats. aerokosm. un-t «Khar'k. aviats. in-t », 2007. - 633 p. Print. 8. Kostyuk, G.I. *Effektivnyy rezhushchiy instrument s pokrytiyem i uprochnennym sloyem [Tekst]: sprav.* G.I. Kostyuk. - Kiev: Vid-vo AINU, 2003. - 412 p. Print. 9. Kostyuk, G.I. *Fiziko-tekhnicheskkiye osnovy robotizirovannogo proizvodstva [Tekst]: ucheb.posobiye* / G.I. Kostyuk. - Kharkov. : Nats. aerokosm. un-t «Khar'k. aviats. in-t », 2006. - 614 p. Print. 10. Grechikhin, L.I. *Fizika nanochastits i nanote-khnologiy [Tekst]* L.I. Grechikhin. - Moscow: UP «Tekhnoprint», 2004. - 397 s. Print. 11. Akse-nov, I.I. *Vakuumnaya duga v erozionnykh istochnikakh plazmy [Tekst]* / I.I. Akse-nov. - X.: Izd-vo NII «XFТИ», 2005. - 211 s. Print. 12. Khayakava, S. *Yaderno-fizicheskiy aspekt: v 2 kn. [Tekst]* / S. Khayakava. - Moscow: Mir, 1973. - Kn. 2. - 701 p. Print. 13. Gott, YU.V. *Vzaimodeystviye chastits s veshchestvom v plazmennyykh issledovaniyakh [Tekst]* / YU.V. Gott. - Moscow: Atomizdat, 1978. - 271 p. Print. 14. Gusev, A.I. *Nanokristallicheskiye materialy: metody polucheniya i svoystva [Tekst]* / A.I. Gusev. - Yekaterinburg: Izd-vo RAN, Ural'skoye otd-niye, 1998. - 302 p. Print. 15. Gusev, A.I. *Nanomaterialy, nanostruktury, nanotekhnologii [Tekst]* / A.I. Gusev. - Moscow: Fizmatlit, 2005. - 416 p. Print. 16. Reshetnyak, Ye.N. *Sintez uprochnyayushchikh nanostruk-turnykh pokrytiy [Tekst]* / Ye.N. Reshetnyak, A.I. Strel'ni-tskiy // Voprosy atomnoy nauki i tekhniki. - 2008. - No 2. - pp. 119 - 130. Print. 17. Andriyevskiy, R.A. *Nanomaterialy: kontseptsiya i sovremennyye problemy [Tekst]* / R.A. Andriyevskiy // Fizika metallov i metallovedeniye. - 2003. - Vol. 91, No 1. - pp.50 - 56. Print. 18. *Sostav, struktura i svoystva nanostrukturnykh plenok boridov tanala [Tekst]* / A.A Goncharov, P.I. Ignatenko, V.V. Petukhov i dr. ZHTF. -2006. - Vol. 76, Publ. 10. - pp. 82 - 87. Print.

Поступила (received) 30.03.15

**Костюк Геннадий Игоревич** – док. техн. наук, проф. НАУ «ХАИ», тел.: (057)-788-42-06, e-mail: g.kostyuk206@yandex.ru;

**Миргородская Екатерина Викторовна** – инженер НАУ «ХАИ», тел.: (057)-788-42-06; e-mail: g.kostyuk206@yandex.ru;

**Мелкозерова Ольга Михайловна** – канд. техн. наук, ассист. НАУ «ХАИ», тел.: (057)-788-42-06, e-mail: g.kostyuk206@yandex.ru.