

**Исследование влияния энергии образования  
нанокластера на его объем и глубину его залегания  
при действии ионов различных сортов,  
зарядов и энергий на твердый сплав ВК-8**

*Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского  
«Харьковский авиационный институт»  
Украинская инженерно-педагогическая академия, г. Харьков*

Исследовано влияние энергии образования нанокластера при действии ионов  $V^+$ ,  $N^+$ ,  $C^+$ ,  $V^+$ ,  $Cr^+$ ,  $Al^+$ ,  $O^+$ ,  $Ni^+$ ,  $Zr^+$ ,  $Mo^+$ ,  $Hf^+$ ,  $W^+$ ,  $Ta^+$  (одно-, двух- и трехзарядных) на объем нанокластера и глубины его залегания. Приведены зависимости объема нанокластера и глубин его залегания от энергии действующего одно-, двух- и трехзарядного иона. Показано, что необходимо затратить дополнительную энергию. Получены зависимости объема нанокластера и глубин его залегания от массы иона, причем при малых массах иона  $V^+$ ,  $N^+$ ,  $O^+$  исследованные величины смещаются в сторону больших энергий, тогда как для тяжелых ионов это смещение незначительно.

**Ключевые слова:** ион, объем нанокластера, глубины залегания нанокластера, твердый сплав, заряд иона, энергия иона.

### **Введение**

В работах [1–3] были рассмотрены особенности влияния энергии и заряда ионов ( $V^+$ ,  $N^+$ ,  $C^+$ ,  $Al^+$ ,  $V^+$ ,  $Cr^+$ ,  $O^+$ ,  $Ni^+$ ,  $Zr^+$ ,  $Mo^+$ ,  $Hf^+$ ,  $W^+$ ,  $Ta^+$ ,  $Pt^+$ ) на объем нанокластера и глубины его залегания нанокластера, но не была учтена энергия на образование кристалла, что не позволяет с высокой достоверностью говорить о полученных зависимостях. В то же время объем нанокластера и глубины его залегания определяют зону образования наноструктур, а следовательно, и область, где физико-механические характеристики соответствуют наноструктурированному слою материала. Поэтому точность определения технологических параметров потока ионов для получения требуемых свойств поверхностного слоя напрямую зависит от точности выявления значений технологических параметров: энергии, заряда и сорта иона. Всё это свидетельствует о том, что предлагаемое исследование влияния энергии, затрачиваемой на образование зерна в наноструктуре, на объем нанокластера и глубины его залегания является своевременным и актуальным, так как имеет большое практическое значение.

Работа выполнена 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 светолучевых потоков на конструкционные материалы и РИ», хозяйственных работ и договоров о сотрудничестве.

## 1. Состояние вопроса

Исследованию наноструктур посвящено значительное число оригинальных работ, результаты которых обобщены в монографиях [1–10]. К сожалению, работ по теоретическому рассмотрению образования наноструктур при действии потоков заряженных частиц относительно немного, а среди монографий можно отметить только [1, 2]. Всё это не позволяет оценить возможность реализации наноструктур при тех или иных технологических параметрах потоков. Следует провести полномасштабный эксперимент по выявлению влияния технологических параметров на объем нанокластера и глубины его залегания и, в конечном счете, на физико-механические характеристики слоя с наноструктурами. Очевидно, необходимо повышать точность расчетов, что возможно при учете тех факторов, которые ранее в работах [1–3] не были учтены. К таким факторам относится энергия, затрачиваемая на образование зерна.

В предлагаемой работе на основе квантово-механической теории рассмотрена величина энергии, затрачиваемой на образование кристалла, которую необходимо учитывать в балансе тепла в элементарном объеме материала. Это свидетельствует о том, что дополнительная энергия на образование зерна может существенно повлиять на характер зависимости объем нанокластера и глубины его залегания от энергии и величины заряда иона.

### Постановка задачи

Решена совместная задача теплопроводности и термоупругости в зоне действия индивидуальных ионов с учетом повышения температуры под влиянием интегрального нагрева всей детали. При решении задачи рассмотрены процессы в объеме материала (теплопроводность, смещение фронта испарения, действие иона как объемного источника тепла, объемный источник тепла под действием джоулева нагрева, энергия, затрачиваемая на термоупругое и термопластическое деформирование, энергия, затрачиваемая на плавление). На поверхности детали рассмотрен источник тепла, возникающий под действием иона (доля, выделяемая на поверхности); эмиссионное охлаждение с уходящими электронами; тепло, поступающее и удаляемое с поверхности под действием взаимооблучения плазмы и поверхности тела; теплообмен под влиянием конденсации частиц, а также целого ряда видов излучений и испарения [1].

Решение этой задачи дает возможность получить поля температур и температурных напряжений, которые позволят выявить зоны материала, где реализуются критерии, необходимые для образования наноструктур: требуемые температуры 500...1500K; скорости нарастания температур более  $10^7$  K/c и, желательно, наличие напряжений (давлений порядка  $10^7$ ... $10^9$  Па). Последнее ускорит появление наноструктур. Очевидно, также может повлиять скорость деформирования. Указанные величины могут быть рассчитаны при решении этой задачи, а значит, можно выделить объем материала, в котором будут реализованы наноструктуры.

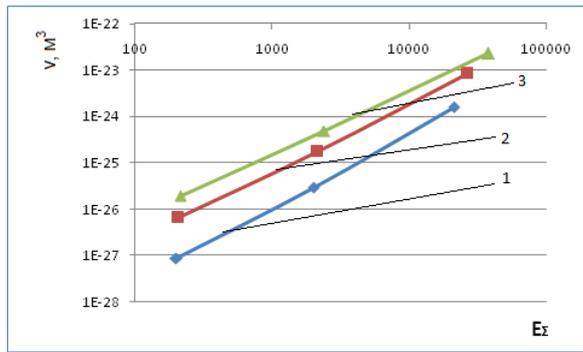
### Результаты исследований

Проведены расчеты объема нанокластера –  $V$ , минимальной –  $h_{\min}$  и максимальной –  $h_{\max}$  глубины его залегания по модели, описанной в работах [1–3].

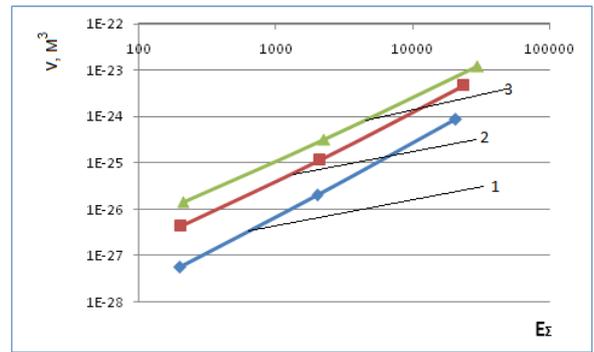
Так, для случая действия ионов бора зависимости объема нанокластера и глубин его залегания показаны на рис. 1 в случае действия ионов бора на твердый

сплав ВК-8. Видно, что величины требуемой энергии для получения такого же объема, как и ранее, без учета энергии кристаллизации существенно увеличались, причем, увеличение энергии практически одного порядка с энергией бомбардирующего иона (особенно для энергии  $2 \cdot 10^4$  эВ). Видно, что с ростом энергии растут как объем, так и глубины залегания.

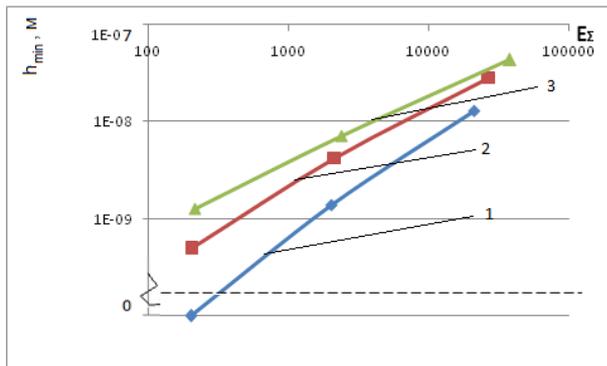
Переход к ионам азота уменьшает влияние энергии кристаллизации на величину объема нанокластера и глубины его залегания. Как энергия иона, так и его заряд существенно влияют на исследуемые величины (рис. 2).



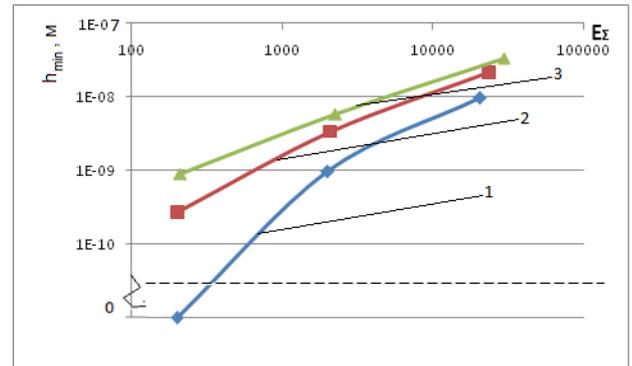
а



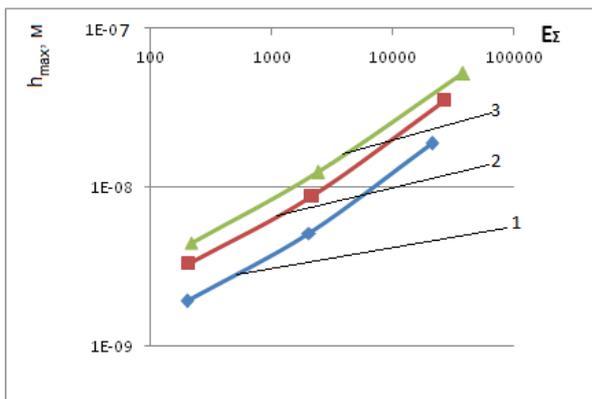
а



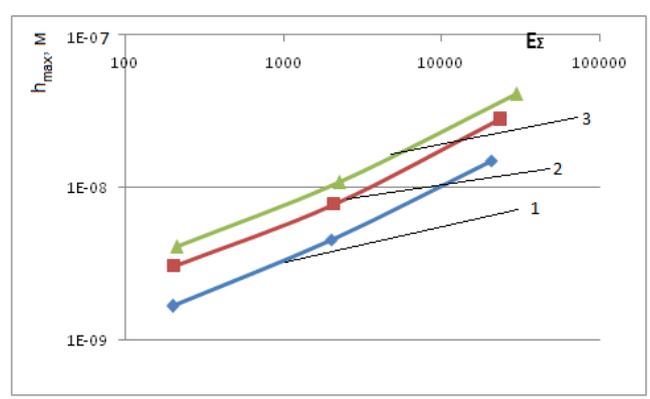
б



б



в



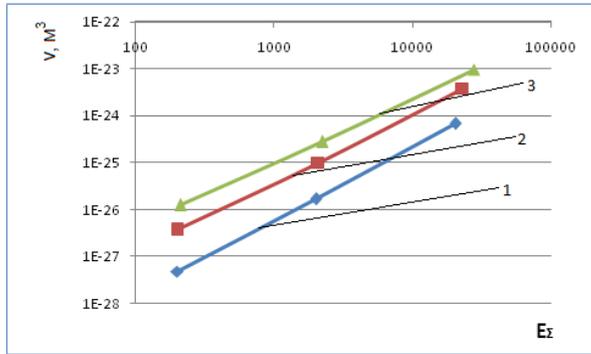
в

Рис. 1. Зависимость объема нанокластера (а), минимальной (б) и максимальной (в) глубины его залегания от энергии иона  $V^+$  (1 –  $z = 1$ ; 2 –  $z = 2$  и 3 –  $z = 3$ ) при действии его на твердый сплав ВК8

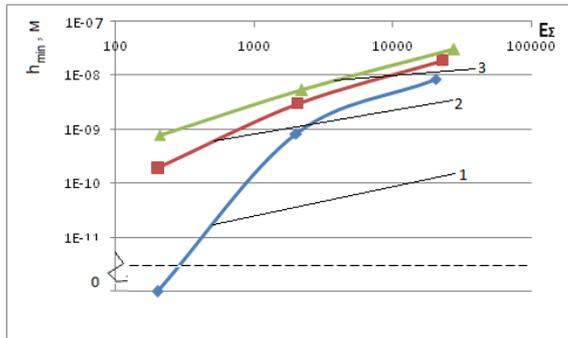
Рис. 2. Зависимость объема нанокластера (а), минимальной (б) и максимальной (в) глубины его залегания от энергии иона  $N^+$  (1 –  $z = 1$ ; 2 –  $z = 2$  и 3 –  $z = 3$ ) при действии его на твердый сплав ВК8

Так, для случая действия иона кислорода это увеличение также уменьшается (для объема НК и глубин его залегания) (рис. 3).

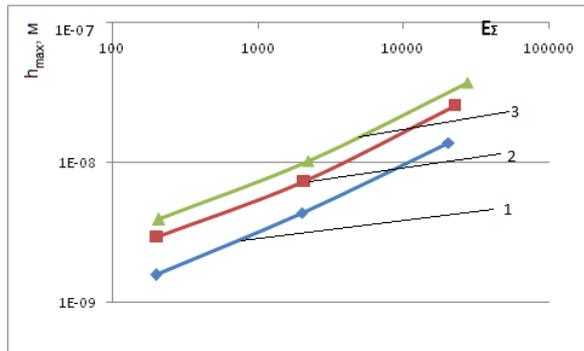
В случае существенного увеличения массы иона исследуют действие иона иттрия на твердый сплав ВК-8, влияние энергии кристаллизации составляет до 10% и менее. Всё это свидетельствует о том, что с ростом массы иона точность расчетов может быть практически сохранена без учета энергии кристаллизации (рис. 4).



а

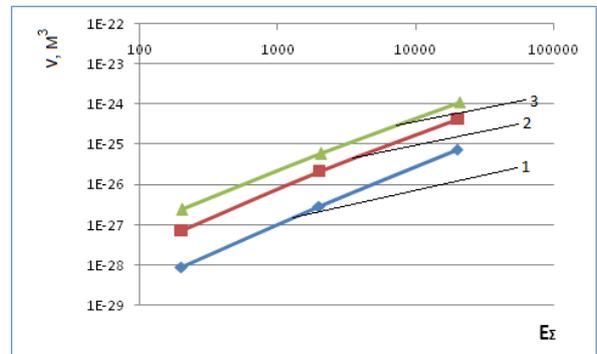


б

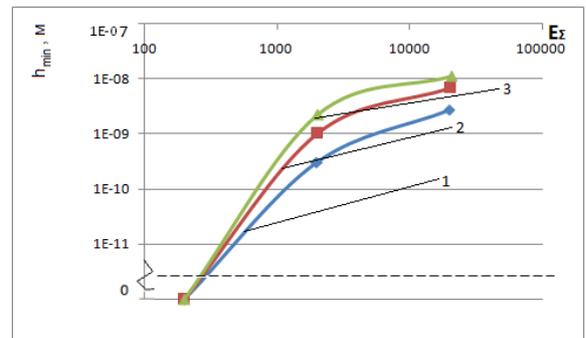


в

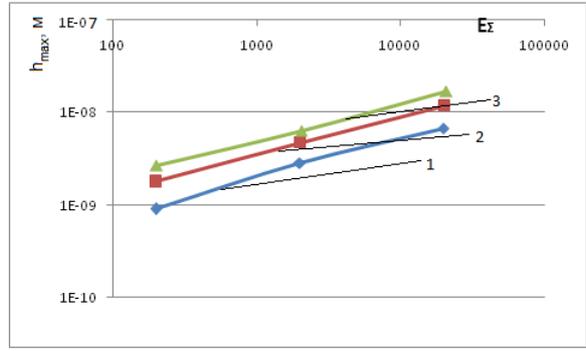
Рис. 3. Зависимость объема нанокластера (а), минимальной (б) и максимальной (в) глубины его залегания от энергии иона  $O^+$  (1 –  $z = 1$ ; 2 –  $z = 2$  и 3 –  $z = 3$ ) при действии его на твердый сплав ВК8



а



б

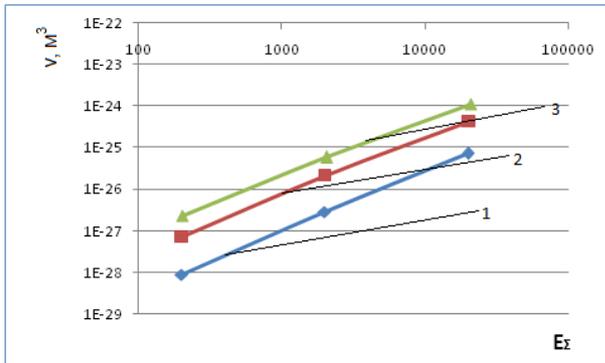


в

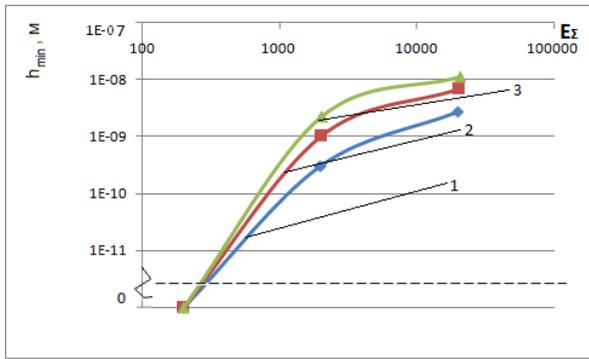
Рис. 4. Зависимость объема нанокластера (а), минимальной (б) и максимальной (в) глубины его залегания от энергии иона  $Y^+$  (1 –  $z = 1$ ; 2 –  $z = 2$  и 3 –  $z = 3$ ) при действии его на твердый сплав ВК8

Такая же зависимость объема НК и глубин его залегания от энергии наблюдается при действии ионов циркония, т.е. с ростом энергии и заряда иона объем НК и глубины его залегания растут (рис. 5).

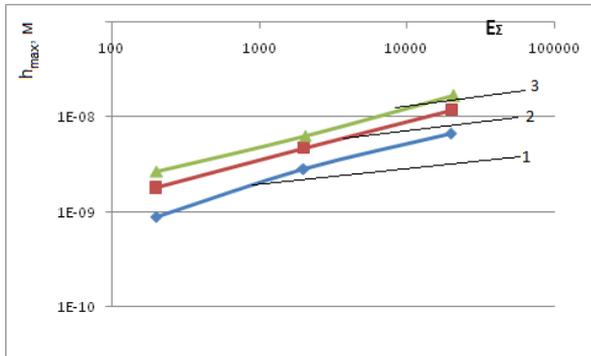
Использование иона вольфрама также приводит к малому влиянию энергии кристаллизации на характер протекания процессов в зоне взаимодействия ионов с твердым сплавом ВК-8, что позволяет в этом случае (при малых энергиях кристаллизации) не учитывать затраты энергии на кристаллизацию (рис. 6).



а

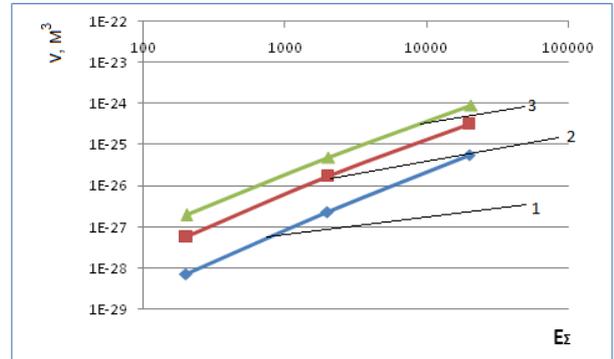


б

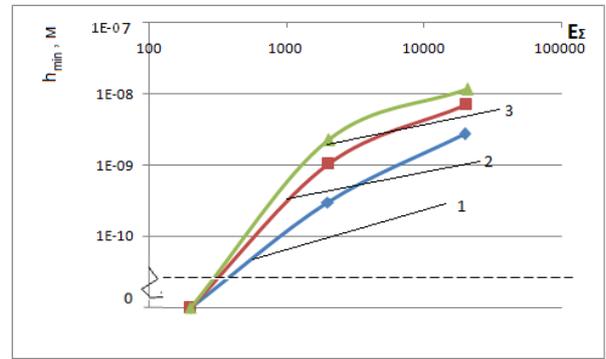


в

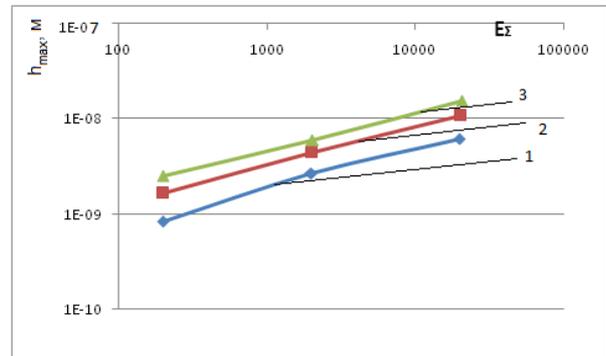
Рис. 5. Зависимость объема нанокластера (а), минимальной (б) и максимальной (в) глубины его залегания от энергии иона  $Zr^+$  (1 –  $z = 1$ ; 2 –  $z = 2$  и 3 –  $z = 3$ ) при действии его на твердый сплав ВК8



а



б



в

Рис. 6. Зависимость объема нанокластера (а), минимальной (б) и максимальной (в) глубины его залегания от энергии иона  $W^+$  (1 –  $z = 1$ ; 2 –  $z = 2$  и 3 –  $z = 3$ ) при действии его на твердый сплав ВК8

Проведенные исследования позволили выявить влияние энергии кристаллизации на объем нанокластера и глубины его залегания при действии ионов различных масс, энергий и зарядов. Показано, что при малых массах ионов влияние энергии кристаллизации является существенным, тогда как энергия кристаллизации практически не влияет на результаты расчетов для тяжелых ионов (например,  $Zr$  и  $W$ ).

## Выводы

1. Проведенные исследования показали существенное и даже определяющее влияние энергии кристаллизации на характер протекания процессов для случая действия легких ионов бора, азота и кислорода.

2. Увеличение массы иона приводит к существенному снижению влияния энергии кристаллизации на величину объема нанокластера и глубины его залегания.

## Список литературы

1. 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.

2. 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.

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 нанопокрывтия: 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. Эффективные покрытия и модифицированные упрочненные слои на режущих инструментах [Текст]: моногр.-справ. / Г. И. Костюк. – К.: Изд. центр Междунар. академии наук и инновац. технологий, 2012. – 728 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. Гречихин, Л. И. Физика наночастиц и нанотехнологий [Текст] / Л. И. Гречихин. – М.: УП «Технопринт», 2004. – 397 с.

10. Гусев, А. И. Нанокристаллические материалы: методы получения и свойства [Текст] / А. И. Гусев. – Екатеринбург: Изд-во РАН, Уральское отд-ние, 1998. – 302 с.

11. Гусев, А. И. Наноматериалы, наноструктуры, нанотехнологии [Текст] / А. И. Гусев. – М.: Физматлит, 2005. – 416 с.

12. Андриевский, Р. А. Наноматериалы: концепция и современные проблемы [Текст] / Р. А. Андриевский // Физика металлов и металловедение. – 2003. – Т. 91, № 1. – С. 50 – 56.

Поступила в редакцию 12.05.2015

## **Дослідження впливу енергії утворення нанокластера на його об'єм і глибину його залягання при дії іонів різних сортів, зарядів і енергій на твердий сплав ВК-8**

Досліджено вплив енергії утворення нанокластера при дії іонів  $B^+$ ,  $N^+$ ,  $C^+$ ,  $V^+$ ,  $Cr^+$ ,  $Al^+$ ,  $O^+$ ,  $Ni^+$ ,  $Zr^+$ ,  $Mo^+$ ,  $Hf^+$ ,  $W^+$ ,  $Ta^+$  (одно-, дво- і тризарядних) на об'єм нанокластера та глибини його залягання. Наведено залежності об'єму нанокластера та глибини його залягання від енергії діючого одно-, дво- і тризарядного іону. Показано, що необхідно витратити додаткову енергію. Одержано залежності об'єму нанокластера та глибини його залягання від маси іона, крім того, при малих масах іонів  $B^+$ ,  $N^+$ ,  $O^+$  досліджені величини зміщуються у сторону більших енергій, тоді як для важких іонів це зміщення незначне.

**Ключові слова:** іон, об'єм нанокластера, глибини залягання нанокластера, твердий сплав, заряд іона, енергія іона.

## **Investigation of the effect of energy education nanocluster its scope and its depth the action of the ions of different varieties, charge and energy on hard alloy**

The influence of the energy of formation of nanoclusters under the action of the ions in the  $B^+$ ,  $N^+$ ,  $C^+$ ,  $V^+$ ,  $Cr^+$ ,  $Al^+$ ,  $O^+$ ,  $Ni^+$ ,  $Zr^+$ ,  $Mo^+$ ,  $Hf^+$ ,  $W^+$ ,  $Ta^+$  (single, double and triply charged) by the volume of the nanocluster and depth its occurrence. Powered depending of the volume of the nanocluster and its depth from the active energy single, double and triply charged ion. Showing the need to spend more energy, and depending on the volume of nanoklaster and its depth from the ion mass, and at the small mass of the ion  $B^+$ ,  $N^+$ ,  $O^+$  is follow magnitude shifted toward higher energies, while heavy ions is offset slightly.

**Keywords:** ion volume nanocluster nanocluster depth, tungsten carbide, ion charge, the ion energy.