

Г.И. КОСТЮК, В. В. ПОПОВ

ПОВЫШЕНИЕ РЕСУРСА И НАДЁЖНОСТИ ДЕТАЛЕЙ ИЗ ЦИРКОНИЕВЫХ СПЛАВОВ ЗА СЧЁТ НАНЕСЕНИЯ НАНОПОКРЫТИЙ И ОБРАЗОВАНИЯ НАНОСТРУКТУР

В статье рассмотрена возможность повышения работоспособности и надёжности конструкции деталей из циркониевых сплавов за счёт нанесения нанопокрывтий и образования наноструктур при бомбардировке ионами B^+ , C^+ , N^+ , Si^+ , Al^+ , V^+ , Cr^+ , O^+ , Fe^+ , Ni^+ , Co^+ , Y^+ , Zr^+ , Mo^+ , Hf^+ , Ta^+ , W^+ , Pt^+ (с зарядовыми числами 1, 2, 3) энергиями 200, 2000, 20000 эВ. Определены объёмы зёрен, минимальная и максимальная глубины их залегания. Это позволяет проектировать сложную структуру по глубине в зависимости от требований к упрочнённому слою. Получено, что практически для всех сортов ионов, кроме бора и углерода, в рассмотренном диапазоне энергий зарядовых чисел образуются наноструктуры.

Ключевые слова: циркониевый сплав, надёжность, ресурс, наноструктуры, нанопокрывтия, ионы.

Г. І. КОСТЮК, В. В. ПОПОВ

ПІДВИЩЕННЯ РЕСУРСУ І НАДІЙНОСТІ ДЕТАЛЕЙ З ЦИРКОНІЄВОГО СПЛАВУ ЗА РАХУНОК НАНЕСЕННЯ НАНОПОКРИТТІВ І СТВОРЕННЯ НАНОСТРУКТУР

У статті розглянуто можливість підвищення працездатності і надійності конструкції деталей з цирконієвих сплавів за рахунок нанесення нанопокриттів і створення наноструктур при бомбардуванні іонами B^+ , C^+ , N^+ , Si^+ , Al^+ , V^+ , Cr^+ , O^+ , Fe^+ , Ni^+ , Co^+ , Y^+ , Zr^+ , Mo^+ , Hf^+ , Ta^+ , W^+ , Pt^+ (з зарядовими числами 1, 2, 3) енергіями 200, 2000., 20000 еВ. Визначено об'єми зерен, мінімальна і максимальна глибини їх залягання. Це дозволяє проектувати складну структуру по глибині залежно від вимог до зміцненого шару. Отримано, що практично для всіх сортів іонів, крім бору і вуглецю, в розглянутому діапазоні енергій зарядових чисел утворюються наноструктури.

Ключові слова: цирконієвий сплав, надійність, ресурс, наноструктури, нанопокриття, іони.

G. KOSTYUK, V. POPOV

IMPROVING THE RESOURCE AND RELIABILITY OF DETAILS FROM ZIRCONIUM ALLOYS DURING THE APPLICATION OF NANOCOATING AND FORMATION OF NANOSTRUCTURES

The article considers the possibility of improving the performance and reliability of the design of parts made of zirconium alloys due to the application of nano-coatings and the formation of nanostructures during ion bombardment B^+ , C^+ , N^+ , Si^+ , Al^+ , V^+ , Cr^+ , O^+ , Fe^+ , Ni^+ , Co^+ , Y^+ , Zr^+ , Mo^+ , Hf^+ , Ta^+ , W^+ , Pt^+ (with charge numbers 1, 2, 3) with energies of 200, 2000, 20,000 eV. The volume of grains and the minimum and a maximum depth of their occurrence are determined. This allows you to design a complex structure in-depth, depending on the requirements for the reinforced layer. It is found that nanostructures are formed practically for all types of ions, except for boron and carbon, in the considered range of charge-number energies.

Keywords: zirconium alloy, reliability, resource, nanostructures, nanocoatings, ions.

Введение. В настоящее время основными материалами для тепловыделяющего элемента используют циркониевые сплавы. В случае аварии и включения пассивного охлаждения активная зона реактора выделяет тепло, в результате чего вода будет преобразована в пар, окисление циркониевых сплавов ускоряется, а значит, будет образовываться взрывоопасный кислород, а также соединения Z_2O_2 , который также при разложении будет выделять тепло, что интенсифицирует процесс, а значит, повышается вероятность взрыва.

Можно предложить новые материалы для их создание, но и опробование займет не менее 10 лет.

В настоящее время создание наноструктур и нанопокрывтий на циркониевом сплаве могут решить эти вопросы достаточно быстро, что говорит о реальности применения наноструктур и нанопокрывтий.

Состояние вопроса. В настоящее время есть значительное число работ по исследованию наноструктур и их получению, обзоры которых даны в монографиях [1–10]. Но работ, посвящённых исследованию получения наноструктур на циркониевых сплавах, практически нет, так как попытки получить на них ряд покрывтий уже проводились [11–12]. Всё это говорит об актуальности и своевременности рассмотрения вопроса о нанесении нанопокрывтий и создания наноструктур на элементах конструкций атомных реакторов.

Модель взаимодействия ионов с конструкционными материалами. Решалась совместная задача теплопроводности и термоупругости [3], что позволяет получить поле температур и температурных напряжений, по которым находились зоны материала, где реализуются критерии образования наноструктур: требуемый диапазон температур (500–1500К), достижение скорости роста температуры, большей 10^7 К/с, и наличие температурных напряжений в диапазоне 10^7 – 10^9 Н/м², ускоряющих их образование, или 10^{10} Н/м², позволяющих образовывать непосредственно наноструктуры.

Результаты и их обсуждения. Рассматривалось действие ионов B^+ , C^+ , N^+ , Si^+ , Al^+ , V^+ , Cr^+ , O^+ , Fe^+ , Ni^+ , Co^+ , Y^+ , Zr^+ , Mo^+ , Hf^+ , Ta^+ , Pt^+ с зарядовыми числами 1, 2, 3 и энергиями 200, 2000, 20000 эВ, рассчитывались поля температур, скоростей их нарастания и температурные напряжений, по которым выбирались зоны материала, где реализовывались критерии образования наноструктур: температуры лежат в диапазоне 500 – 1500К, скорости их роста превышают 10^7 К/с или температурные напряжения превышают 10^{10} Н/м² и вычислялись объёмы зерна V_i , минимальная h_{min} и максимальная h_{max} глубины его залегания. Результаты представлены на рис. 1–18 для циркониевого сплава Zr1Nb.

© Г.И. Костюк, В.В. Попов, 2019

Так, для случая действия ионов бора имеем диапазон объемов зерна $1,57 \cdot 10^{-27}$ до $10,8 \cdot 10^{-22}$ м³ с минимальной глубиной залегания от $1,35 \cdot 10^{-9}$ до $6,39 \cdot 10^{-8}$ и максимальной от $1,9 \cdot 10^{-9}$ до $8,47 \cdot 10^{-8}$ м, а температурные напряжения от $8,1 \cdot 10^6$ до $1,3 \cdot 10^6$ м (рис.1).

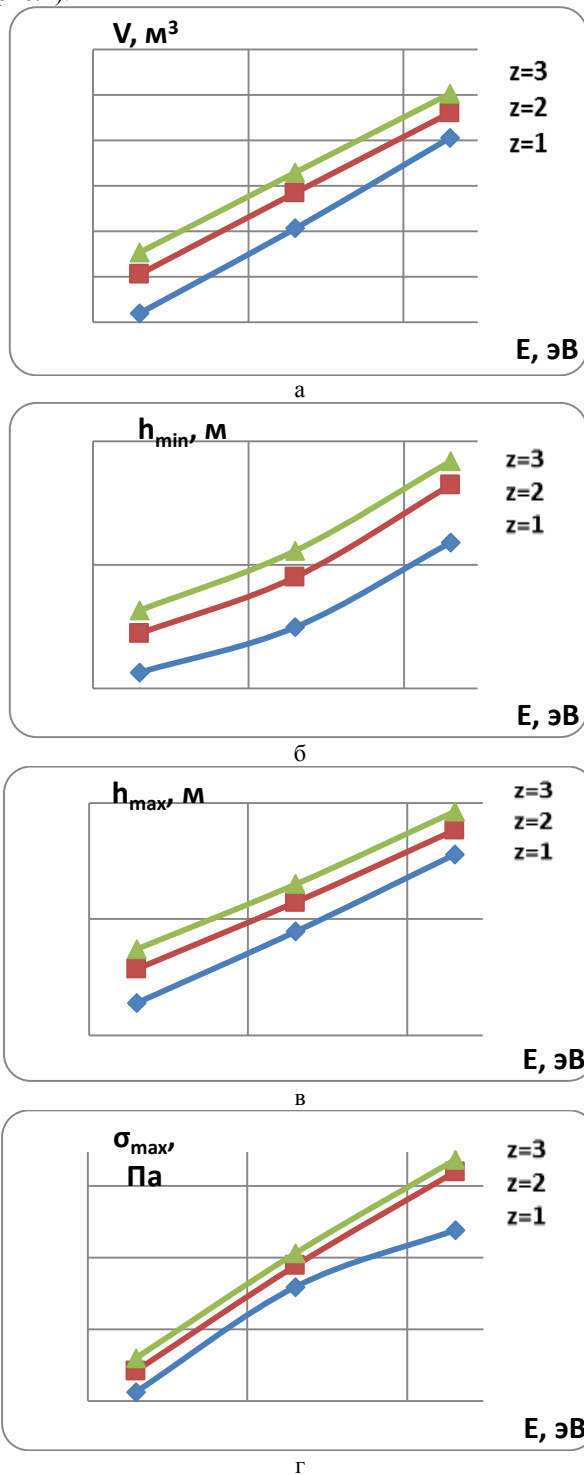


Рисунок 1 - Зависимости объема нанокластера (НК) (а), минимальной (б) и максимальной (в) глубины залегания НК, максимальных температурных напряжений (г) при действии ионов бора (В⁺) с различным зарядом (z = 1, z = 2, z = 3) на циркониевый сплав Zr1Nb

Для ионов углерода (С⁺) на рис. 2 имеем изменение объема НК от $1,58 \cdot 10^{-27}$ до $7,9 \cdot 10^{-23}$ м³, а глубины залегания: минимальная от $1,16 \cdot 10^{-9}$ до $5,94 \cdot 10^{-8}$ и максимальная от $1,81 \cdot 10^{-9}$ до $7,47 \cdot 10^{-8}$ м, и σ от $1,6 \cdot 10^7$ до $1,2 \cdot 10^9$ Па (рис. 2)

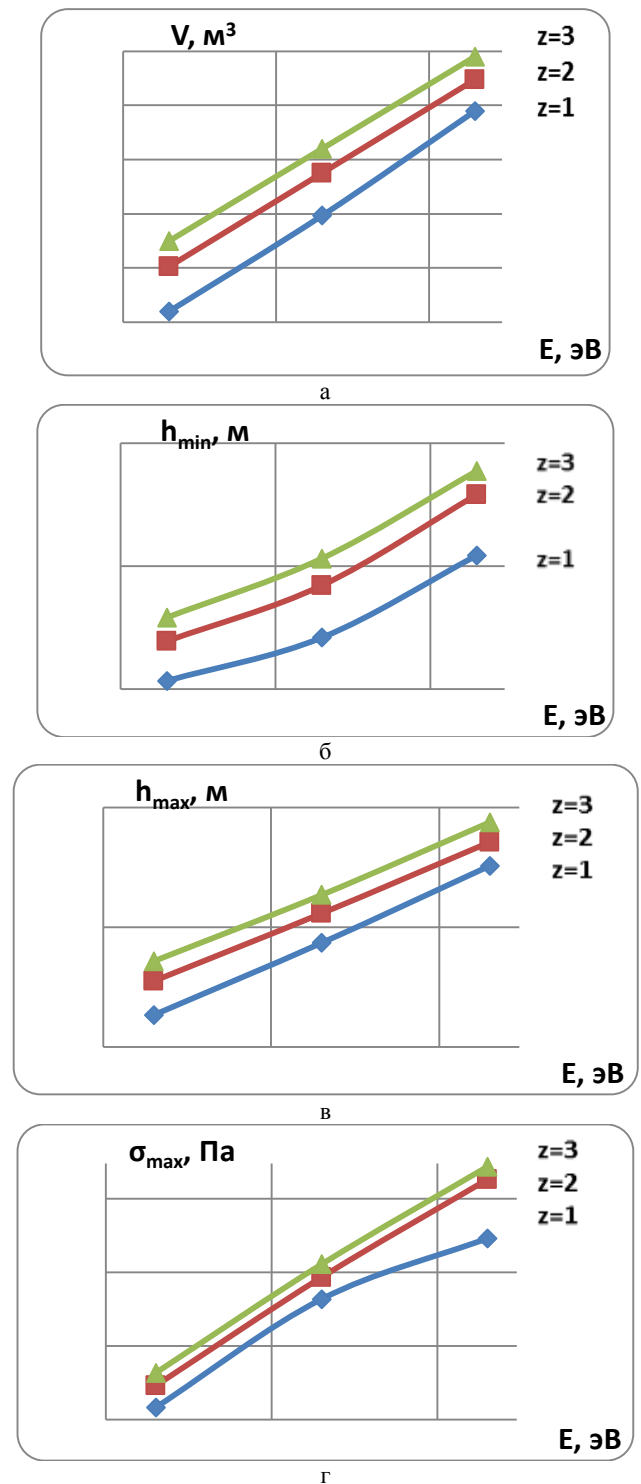


Рисунок 2 – Зависимости объема нанокластера (НК) (а), минимальной (б) и максимальной (в) глубины залегания НК, максимальных температурных напряжений (г) при действии ионов углерода (С⁺) с различным зарядом (z = 1, z = 2, z = 3) для циркониевого сплава Zr1Nb

Для ионов N^+ имеем диапазон объемов зерна от $1,51 \cdot 10^{-27}$ до $6,24 \cdot 10^{-23}$ м³, а напряжение от $\sigma_T = 7,14 \cdot 10^7$ до $4,8 \cdot 10^8$. Так же, как и для ионов бора и углерода, с ростом энергии или увеличением зарядового числа объем НС увеличивается темпеатурные напряжения (рис. 3).

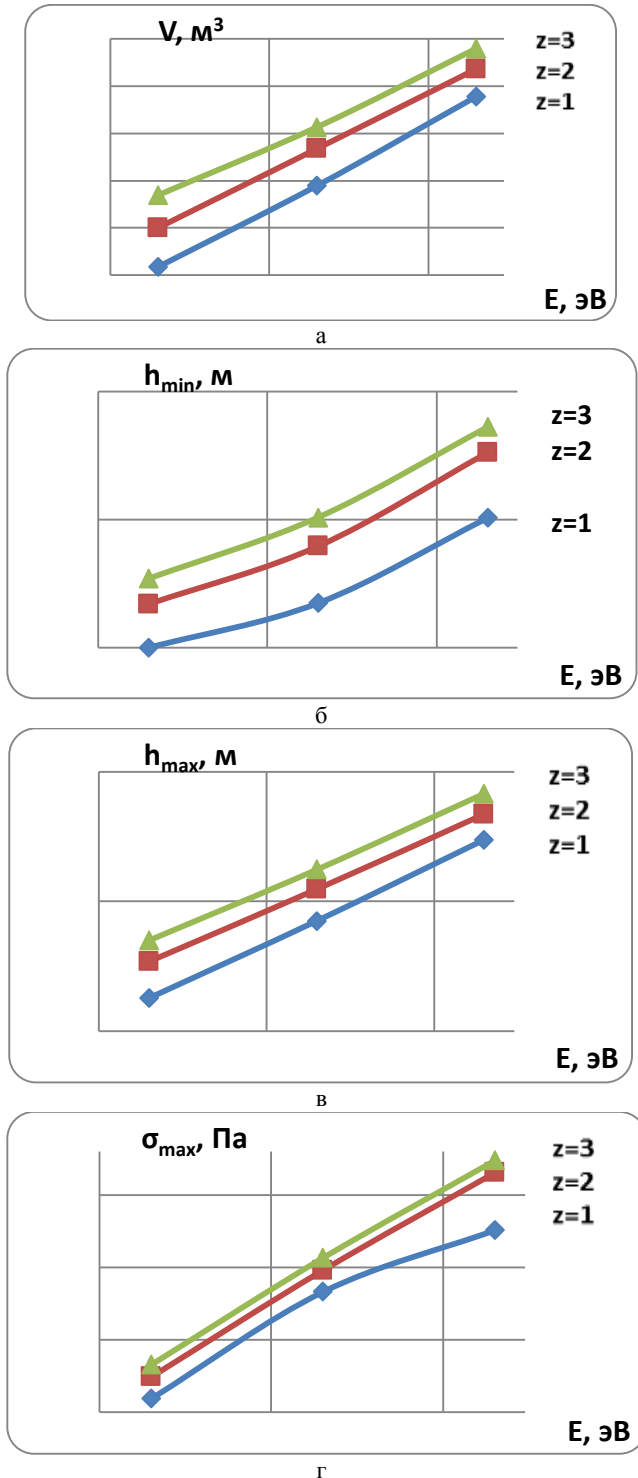


Рисунок 3 – Зависимости объема нанокластера (НК) (а), минимальной (б) и максимальной (в) глубины залегания НК, максимальных температурных напряжений (г) при действии ионов азота (N^+) с различным зарядом ($z = 1, z = 2, z = 3$) для циркониевого сплава Zr1Nb

Видно, что с ростом энергии, заряда и величины температурных напряжений объем существенно растет.

Переход к ионам алюминия (Al^+ , рис. 4) величины объемов НС лежат в пределах $1,4 \cdot 10^{-27}$ до $5,8 \cdot 10^{-2}$ до $4 \cdot 10^{-23}$ м³, а глубины залегания от $7,5 \cdot 10^{-10}$ до $4 \cdot 10^{-9}$ м минимальные и от $1,7 \cdot 10^{-10}$ до $5,2 \cdot 10^{-8}$ м (рис. 4)

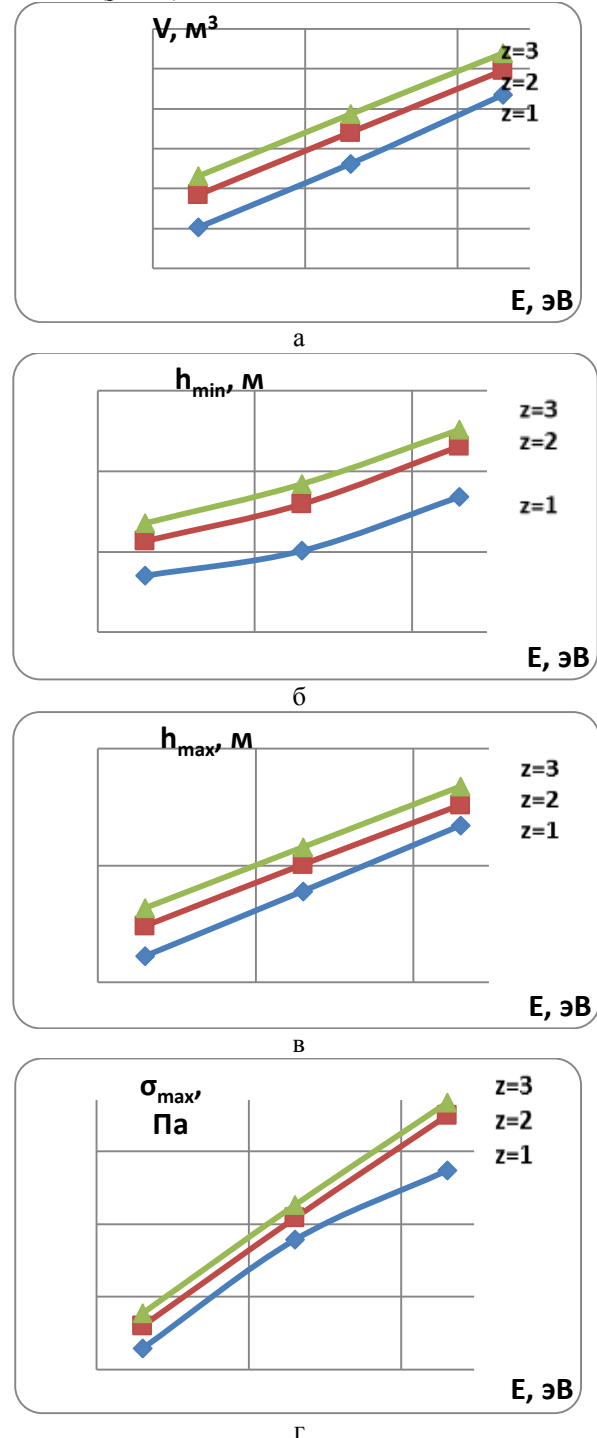


Рисунок 4 – Зависимости объема нанокластера (НК) (а), минимальной (б) и максимальной (в) глубины залегания НК, максимальных температурных напряжений (г) при действии ионов алюминия (Al^+) с различным зарядом ($z = 1, z = 2, z = 3$) для циркониевого сплава Zr1Nb

Рост объема НС, температурных напряжений и глубин залегания от энергии иона и его заряда сохраняется (рис. 4).

Для иона алюминия (рис. 5, Al^+) значения объемов лежат в пределах $1,06 \cdot 10^{-27}$ до $2,45 \cdot 10^{-23} \text{ м}^3$, а глубины залегания его: минимальная $5,02 \cdot 10^{-10}$ – $3,29 \cdot 10^{-8} \text{ м}$, максимальная $1,69 \cdot 10^{-9}$ – $4,72 \cdot 10^{-8} \text{ м}$, а $\sigma_T = 6,77 \cdot 10^6$ – $7 \cdot 10^7 \text{ Па}$. Сохраняется рост этих величин с увеличением энергии и заряда иона. Рост V от массы иона значительно снижается.

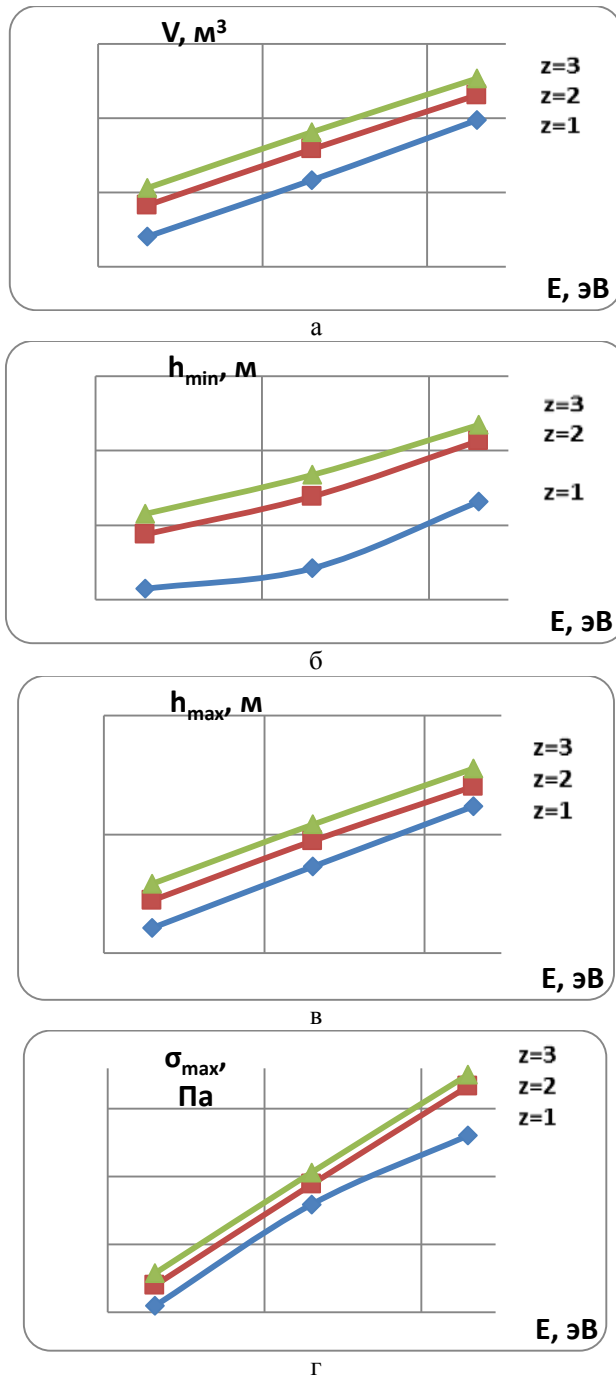


Рисунок 5 – Зависимости объема нанокластера (НК) (а), минимальной (б) и максимальной (в) глубины залегания НК, максимальных температурных напряжений (г) при действии ионов ванадия (V^+) с различным зарядом ($z = 1, z = 2, z = 3$) для циркониевого сплава $Zr1Nb$

Аналогичные особенности для иона хрома (Cr^+ , рис. 6) показывают, что объем НС лежит в пределах $6,25 \cdot 10^{-28}$ до $1,14 \cdot 10^{-23} \text{ м}^3$, а глубины залегания $1,41 \cdot 10^{-10}$ – $2,23 \cdot 10^{-8} \text{ м}$ и $1,6 \cdot 10^{-9}$ – $3,58 \cdot 10^{-8} \text{ м}$, соответственно минимальная и максимальная, а $\sigma_T = 1,48 \cdot 10^7$ – $7,69 \cdot 10^7 \text{ Па}$.

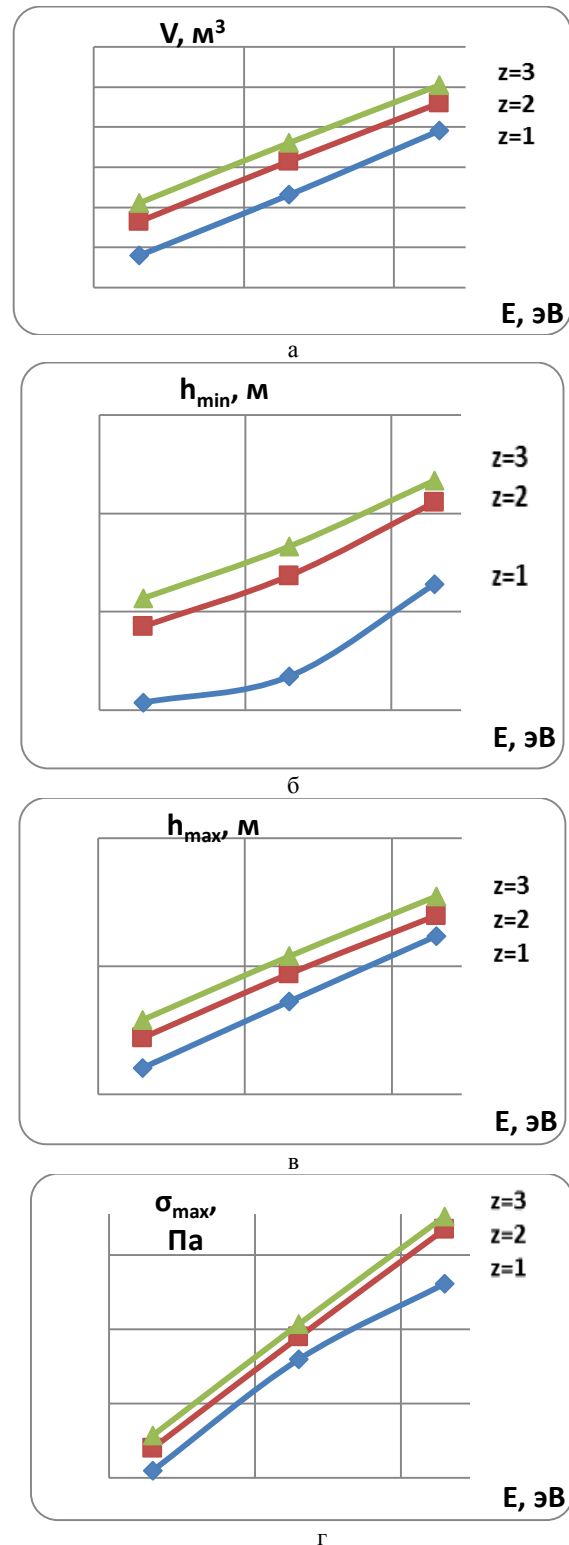


Рисунок 6 – Зависимости объема нанокластера (НК) (а), минимальной (б) и максимальной (в) глубины залегания НК, максимальных температурных напряжений (г) при действии ионов хрома (Cr^+) с различным зарядом ($z = 1, z = 2, z = 3$) для циркониевого сплава $Zr1Nb$

Характер зависимости сохранился.

При переходе к ионам кислорода диапазон объемов НС лежит в пределах $6,25 \cdot 10^{-28}$ до $1,09 \cdot 10^{-23} \text{ м}^3$, а глубины залегания в пределах $1,3 \cdot 10^{-10}$ – $2,18 \cdot 10^{-8} \text{ м}$ и $1,61 \cdot 10^{-9}$ – $3,52 \cdot 10^{-8} \text{ м}$, а $\sigma_T = 4,7 \cdot 10^6$ – $7,5 \cdot 10^7 \text{ Па}$ соответственно (рис.7).

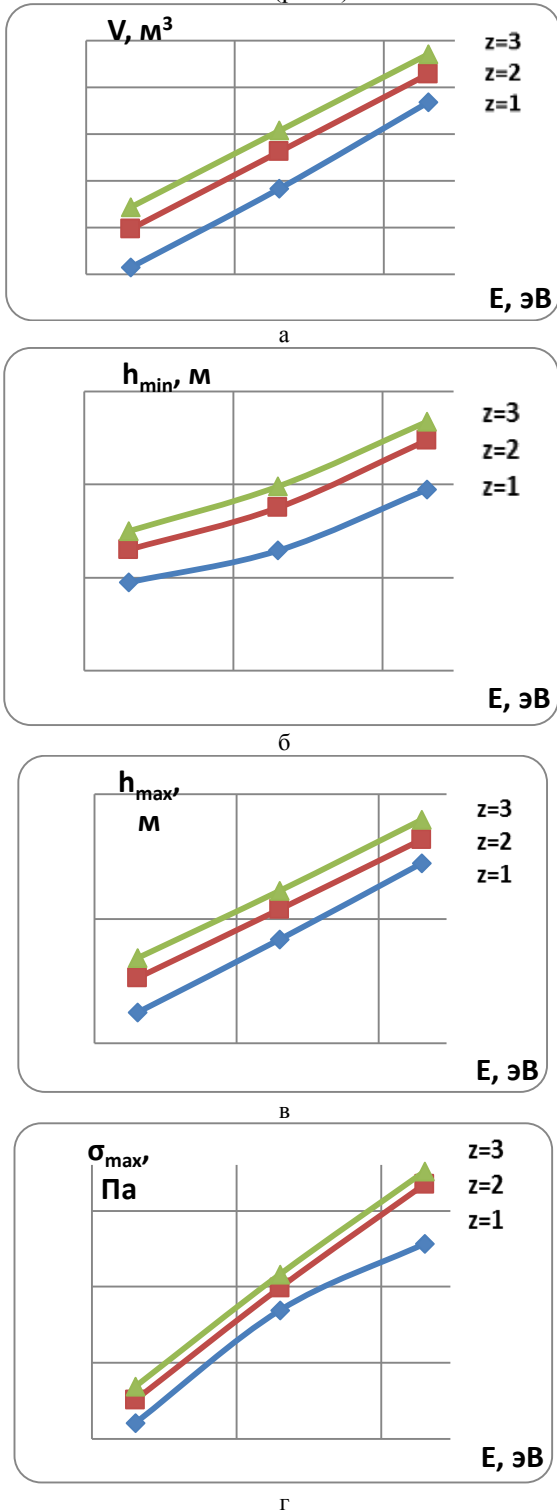


Рисунок 7 – Зависимости объема нанокластера (НК) (а), минимальной (б) и максимальной (в) глубины залегания НК, максимальных температурных напряжений (г) при действии ионов кислорода (O^+) с различным зарядом ($z = 1, z = 2, z = 3$) для циркониевого сплава $Zr1Nb$

Для иона железа (Fe^+ , рис. 8) объёмы НС лежат в диапазоне $1,43 \cdot 10^{-27}$ до $5,13 \cdot 10^{-23} \text{ м}^3$, а глубины залегания $8,9 \cdot 10^{-10}$ – $1,7 \cdot 10^{-8} \text{ м}$ и $1,78 \cdot 10^{-9}$ – $6,25 \cdot 10^{-8} \text{ м}$, а $\sigma_T = 1,47 \cdot 10^7$ – $1,07 \cdot 10^8 \text{ Па}$ соответственно. Величины колерируют с массой иона: чем больше масса, тем меньше значение (рис. 8).

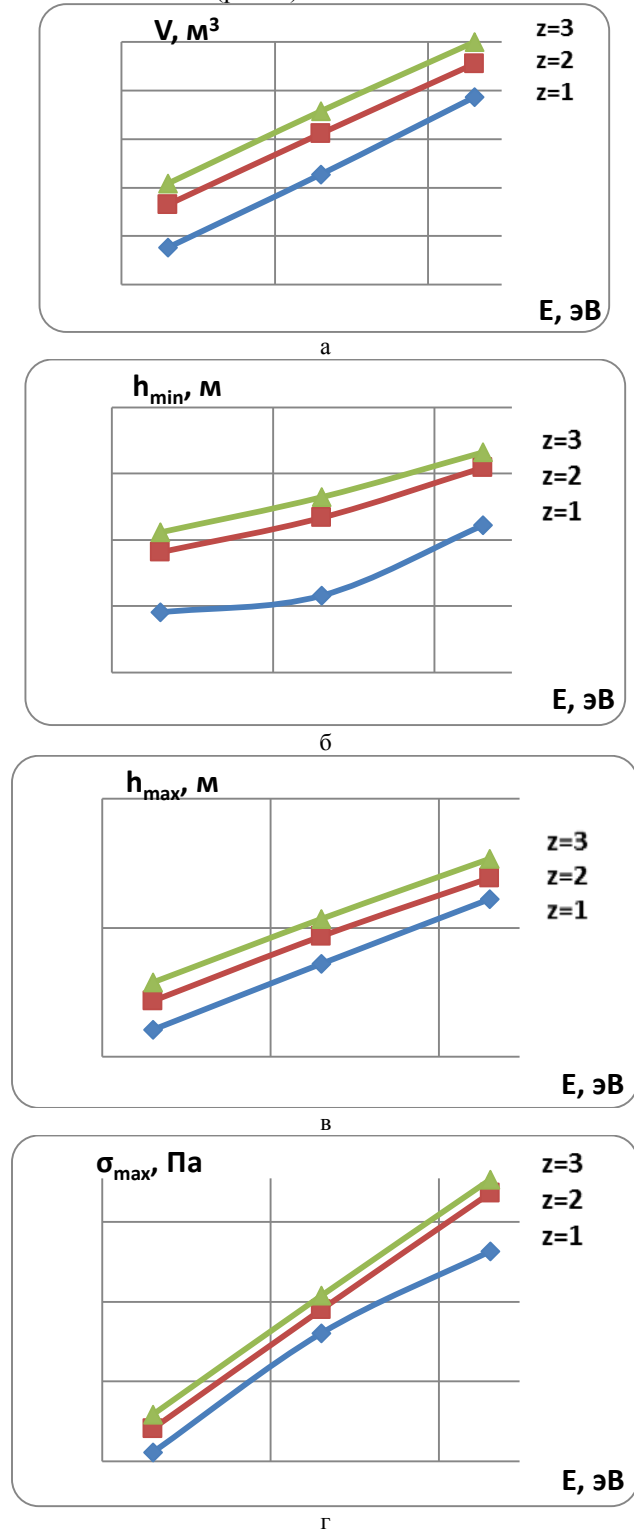
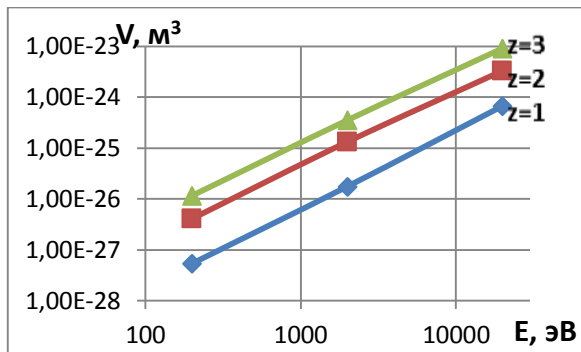


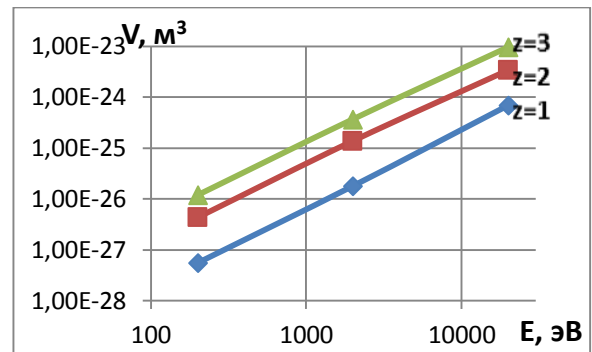
Рисунок 8 – Зависимости объема нанокластера (НК) (а), минимальной (б) и максимальной (в) глубины залегания НК, максимальных температурных напряжений (г) при действии ионов железа (Fe^+) с различным зарядом ($z = 1, z = 2, z = 3$) для циркониевого сплава $Zr1Nb$

Объём НК для случая действия ионов железа (Fe^+ , рис. 9) составляет величины $5,8 \cdot 10^{-28} \text{ м}^3$, а глубины залегания $8,09 \cdot 10^{-11}$ – $2,98 \cdot 10^{-8} \text{ м}^3$ и $1,61 \cdot 10^{-9}$ – $3,4 \cdot 10^{-8} \text{ м}$, а $\sigma_T = 4,64 \cdot 10^6$ – $7,28 \cdot 10^7 \text{ Па}$ соответственно.

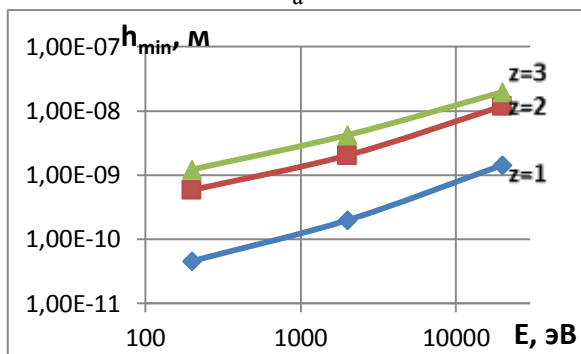
Для иона кобальта (Co^+ , рис. 10) объёмы лежат в пределах $5,42 \cdot 10^{-28}$ – $9,28 \cdot 10^{-24} \text{ м}^3$, а глубины залегания $4,61 \cdot 10^{-10}$ – $1,99 \cdot 10^{-8} \text{ м}$ и $5,45 \cdot 10^{-9}$ – $3,32 \cdot 10^{-8} \text{ м}$, $\sigma_T = 4,54 \cdot 10^6$ – $7,2 \cdot 10^7 \text{ Па}$ соответственно.



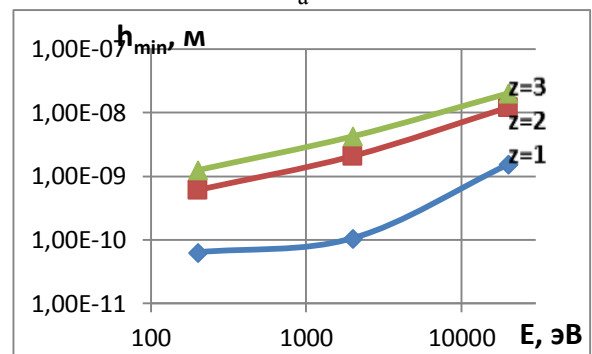
а



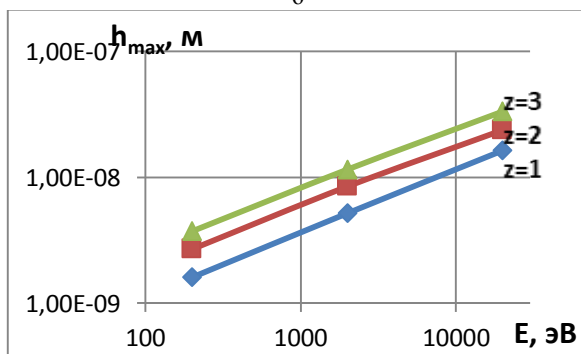
а



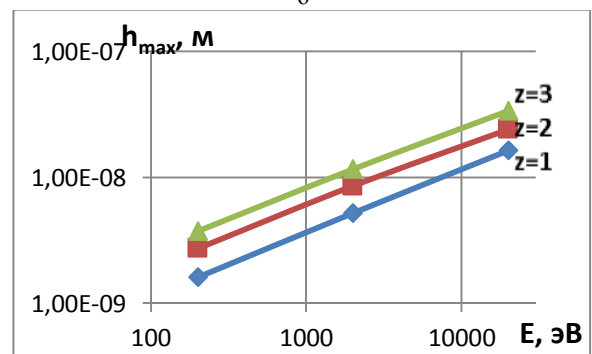
б



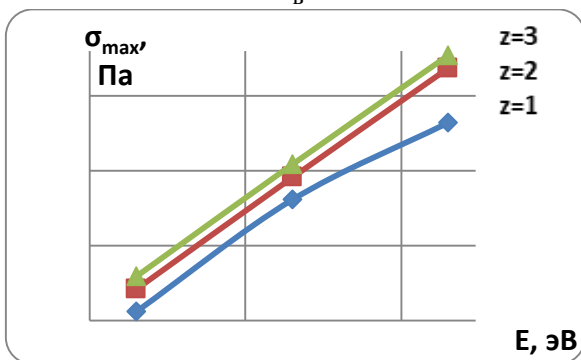
б



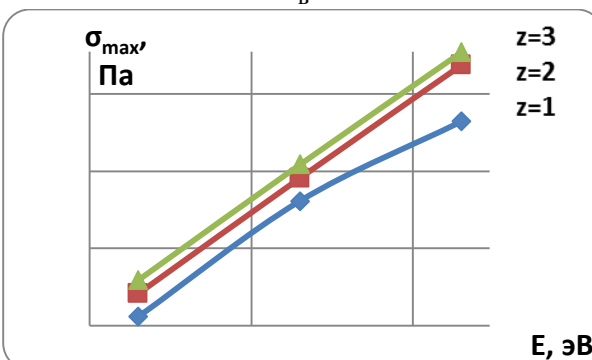
в



в



г



г

Рисунок 9 – Зависимости объема нанокластера (НК) (а), минимальной (б) и максимальной (в) глубины залегания НК, максимальных температурных напряжений (г) при действии ионов никеля (Ni^+) с различным зарядом ($z = 1, z = 2, z = 3$) для циркониевого сплава $Zr1Nb$

Рисунок 10 – Зависимости объема нанокластера (НК) (а), минимальной (б) и максимальной (в) глубины залегания НК, максимальных температурных напряжений (г) при действии ионов кобальта (Co^+) с различным зарядом ($z = 1, z = 2, z = 3$) для циркониевого сплава $Zr1Nb$

Аналогичные зависимости для иона кобальта (Co^+ , рис. 11) дают значения объема НС $5,1 \cdot 10^{-28} - 9,59 \cdot 10^{-24} \text{ м}^3$, а глубины залегания $6,33 \cdot 10^{-10} - 2,04 \cdot 10^{-8} \text{ м}$ и $4,16 \cdot 10^{-9} - 3,36 \cdot 10^{-8} \text{ м}$, $\sigma_T = 4,59 \cdot 10^6 - 7,41 \cdot 10^7 \text{ Па}$ соответственно.

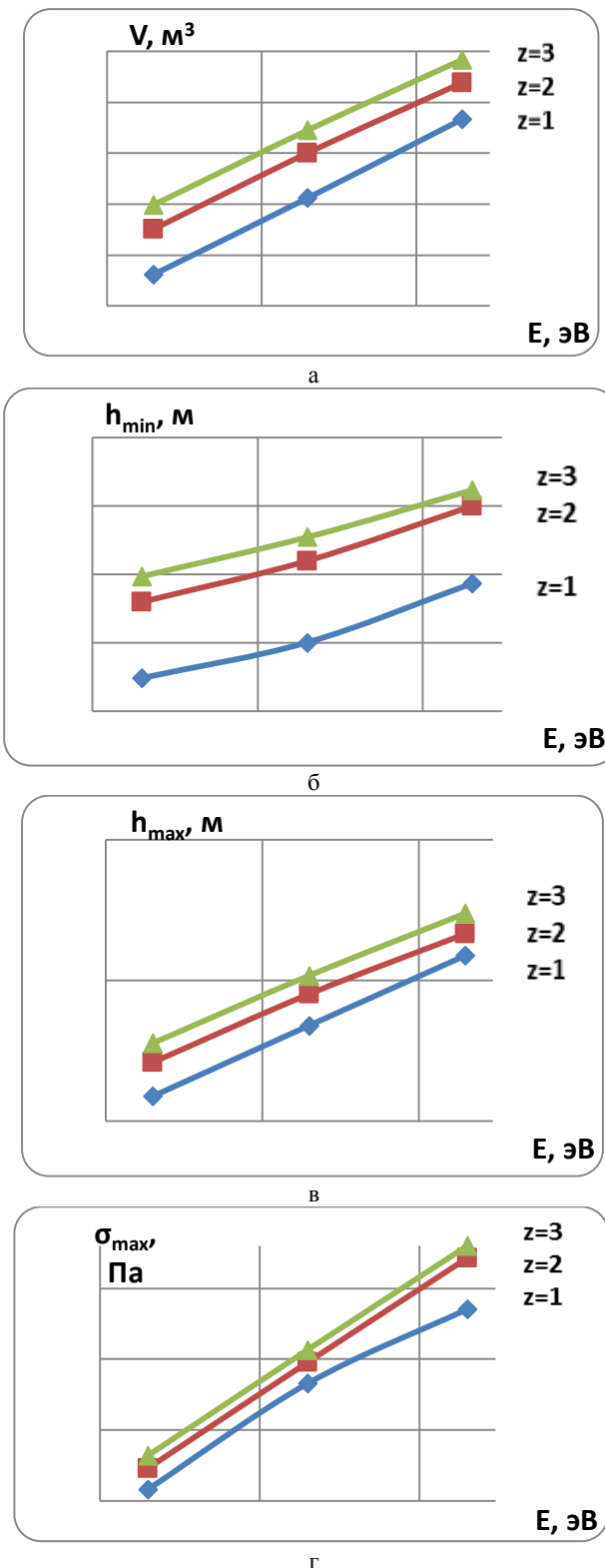


Рисунок 11 – Зависимости объема нанокластера (НК) (а), минимальной (б) и максимальной (в) глубины залегания НК, максимальных температурных напряжений (г) при действии ионов иттрия (Y^+) с различным зарядом ($z = 1, z = 2, z = 3$) для циркониевого сплава Zr1Nb

Применение ионов циркония приводит к изменению объема зерна НС $V = 4,15 \cdot 10^{-28} \text{ м}^3 - 6,9 \cdot 10^{-24} \text{ м}^3$, $\sigma_T = 4,8 \cdot 10^6 - 6,69 \cdot 10^6 \text{ Па}$, т. е. тенденция сохраняется (рис. 12).

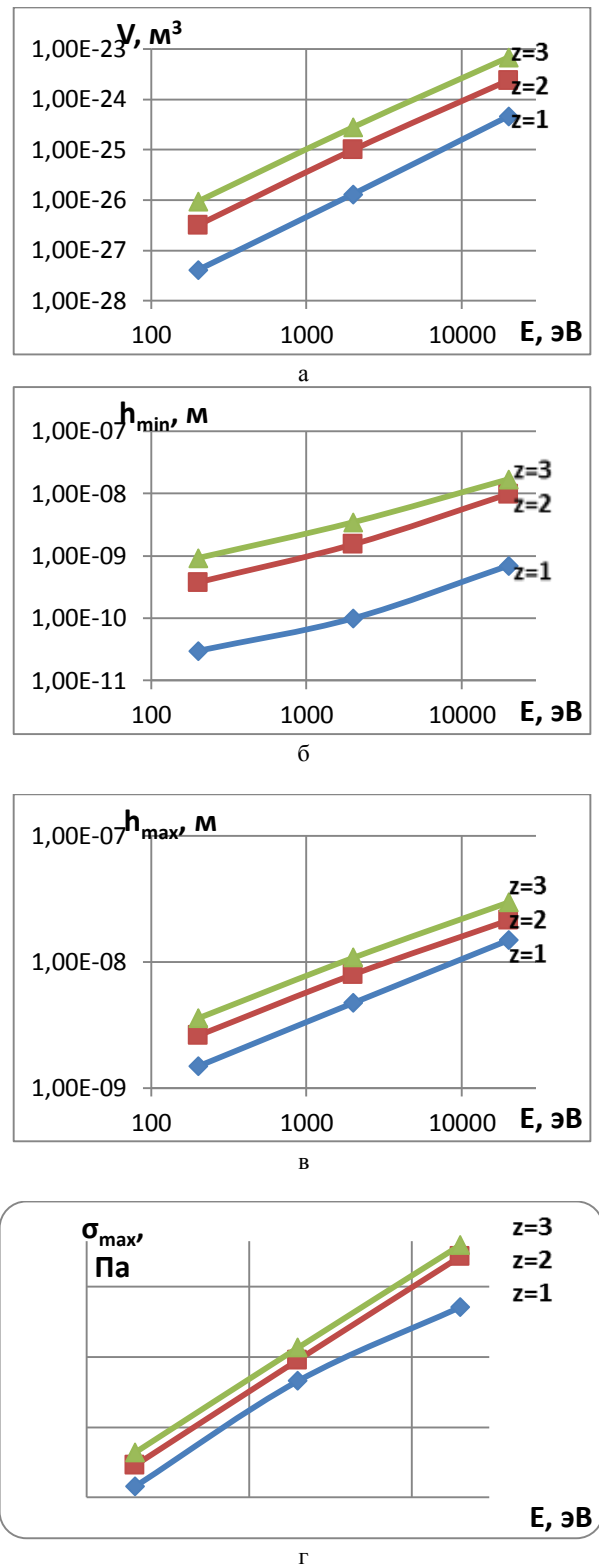
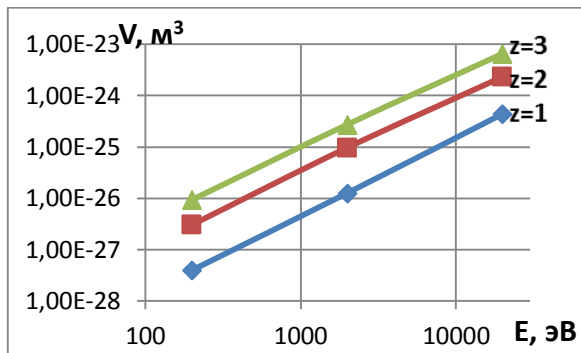


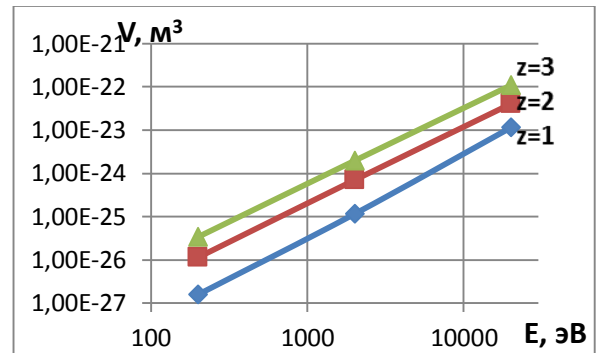
Рисунок 12 – Зависимости объема нанокластера (НК) (а), минимальной (б) и максимальной (в) глубины залегания НК, максимальных температурных напряжений (г) при действии ионов циркония (Y^+) с различным зарядом ($z = 1, z = 2, z = 3$) для циркониевого сплава Zr1Nb

Для ионов молибдена имеем $V = 4,48 \cdot 10^{-28} - 6,7 \cdot 10^{-24} \text{ м}^3$. $\sigma_T = 4,4 \cdot 10^6 - 6,88 \cdot 10^7 \text{ Па}$ (рис. 13).

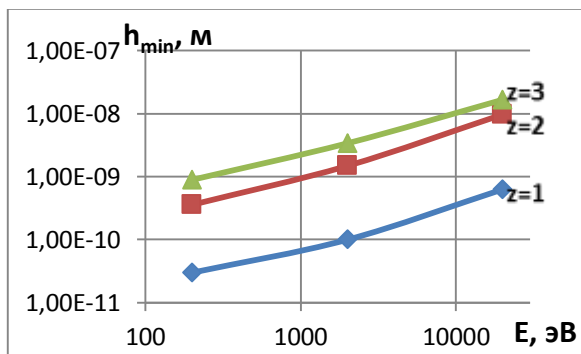
Переход к ионам гафния даёт объём НС $V = 3,24 \cdot 10^{-28} - 5,22 \cdot 10^{-24} \text{ м}^3$ $\sigma_T = 3,15 \cdot 10^7 - 6,48 \cdot 10^7 \text{ Па}$.



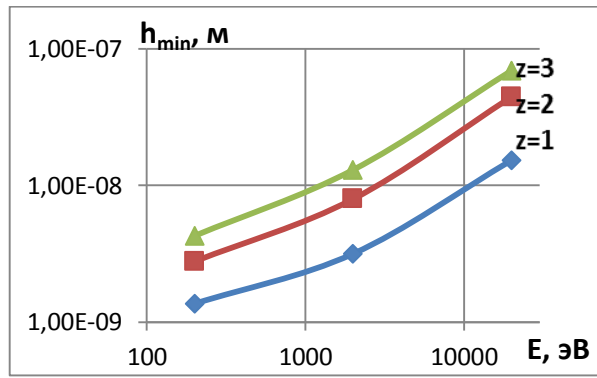
а



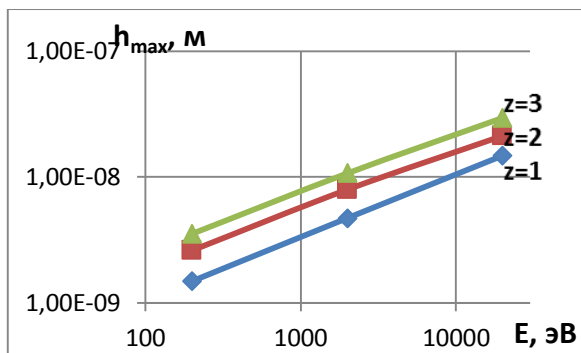
а



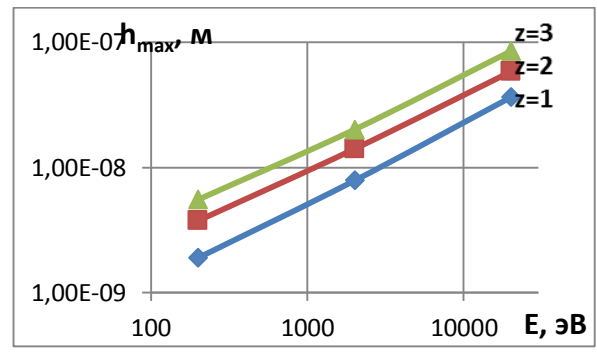
б



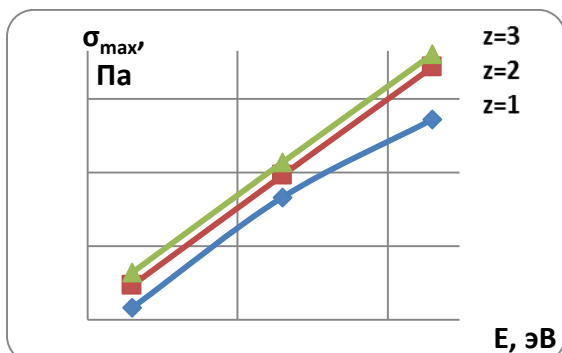
б



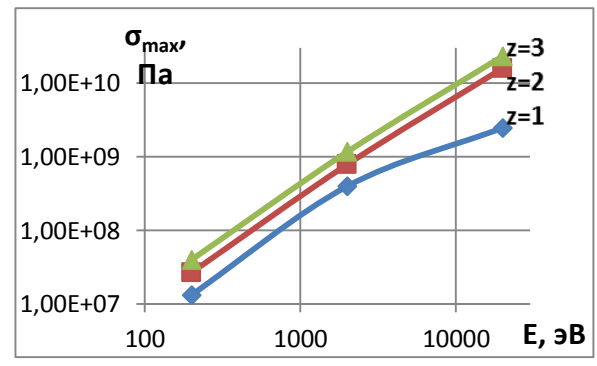
в



в



г

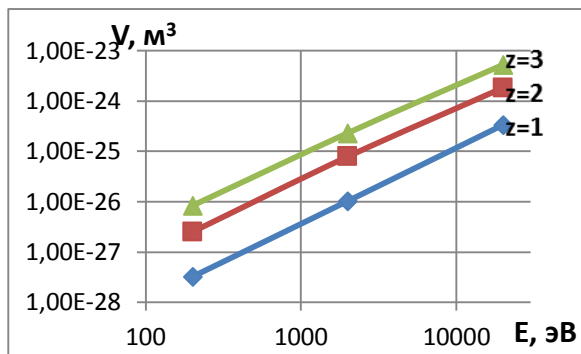


г

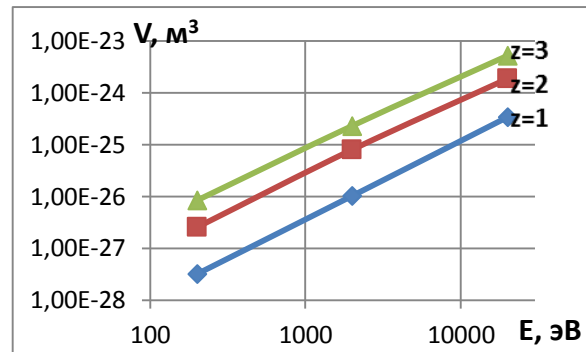
Рисунок 13 – Зависимости объема нанокластера (НК) (а), минимальной (б) и максимальной (в) глубины залегания НК, максимальных температурных напряжений (г) при действии ионов молибдена (Mo^+) с различным зарядом ($z = 1, z = 2, z = 3$) для циркониевого сплава Zr1Nb

Рисунок 14 – Зависимости объема нанокластера (НК) (а), минимальной (б) и максимальной (в) глубины залегания НК, максимальных температурных напряжений (г) ионов бора (B^+) с различным зарядом ($z = 1, z = 2, z = 3$) для циркония и его сплава Zr1Nb

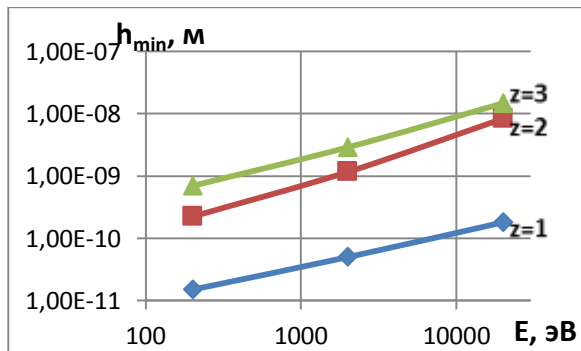
Для ионов тантала, вольфрама и платины имеем близкое значение (рис. 15, 16, 17).



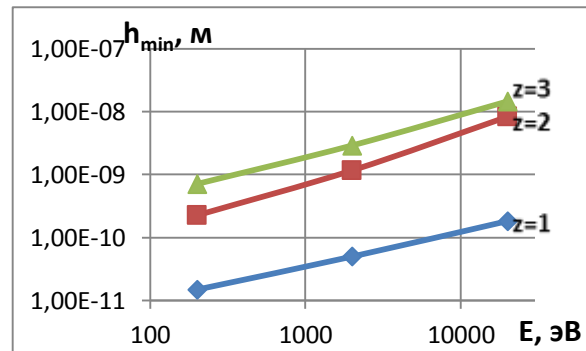
а



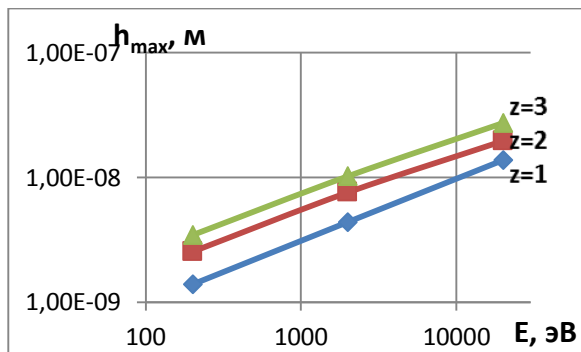
а



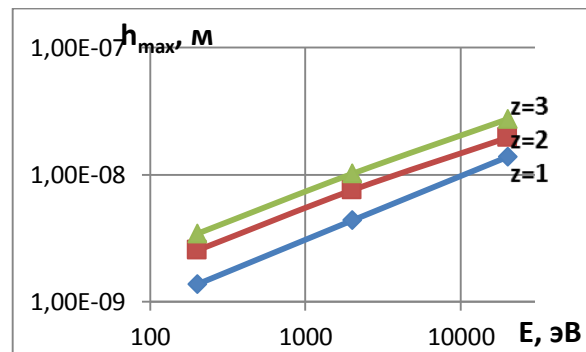
б



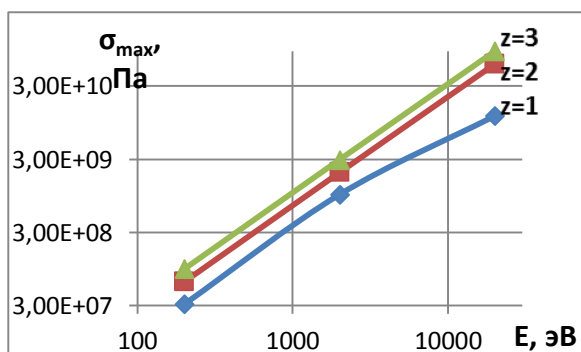
б



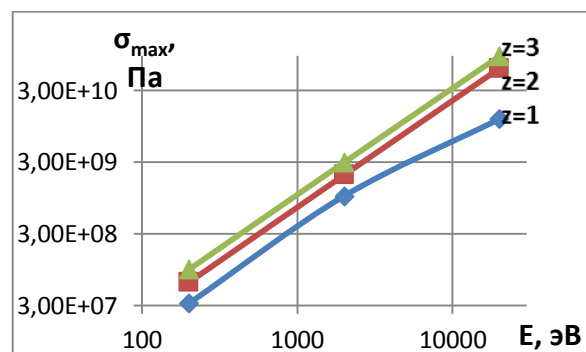
в



в



г



г

Рисунок 15 – Зависимости объема нанокластера (НК) (а), минимальной (б) и максимальной (в) глубины залегания НК, максимальных температурных напряжений (г) при действии ионов тантала (Ta^+) с различным зарядом ($z = 1, z = 2, z = 3$) для циркониевого сплава $Zr1Nb$

Рисунок 16 – Зависимости объема нанокластера (НК) (а), минимальной (б) и максимальной (в) глубины залегания НК, максимальных температурных напряжений (г) при действии ионов вольфрама (W^+) с различным зарядом ($z = 1, z = 2, z = 3$) для циркониевого сплава $Zr1Nb$

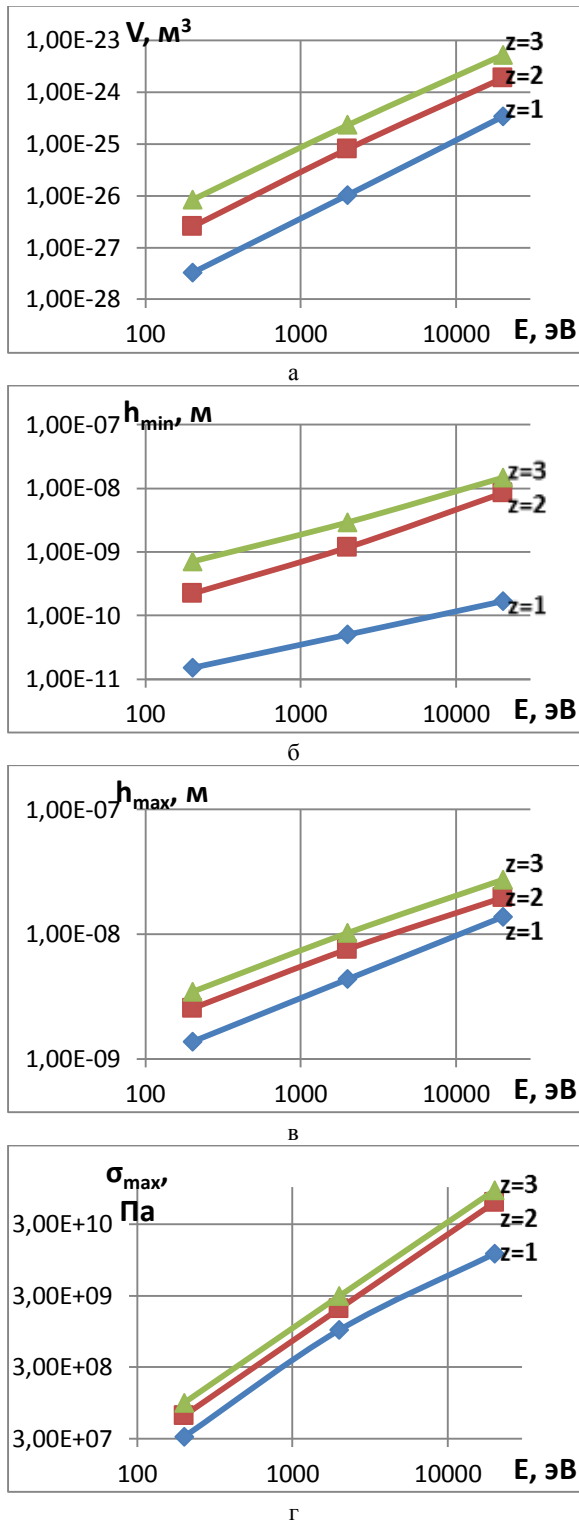


Рисунок 17 – Зависимости объема нанокластера (НК) (а), минимальной (б) и максимальной (в) глубины залегания НК, максимальных температурных напряжений (г) при действии ионов платины (Pt+) с различным зарядом ($z = 1, z = 2, z = 3$) для циркониевого сплава Zr1Nb

Выводы

Показана возможность получения слоёв наноструктур достаточной величины до 0,1 мм за счёт варьирования энергии ионов, их сортов и зарядов.

Для уменьшения вероятности прохождения ненужных реакций можно использовать ионы

циркония и ниобия, которые присутствуют в циркониевом сплаве Zr1Nb.

Учитывая нейтральность материалов к воде, кислороду и другим реагентам можно выбирать наиболее дешёвые ионы из тяжёлых металлов для обработки циркониевых сплавов.

Список литературы

1. Костюк Г. И. *Эффективный режущий инструмент с нанопокровками и наноструктурными модифицированными слоями: монография-справ.* в 2 кн. Кн.1. *Плазменно-ионные и ионно-лучевые технологии.* Харьков: «Планета-Принт», 2016. 735 с.
2. Костюк Г. И. *Нанотехнологии: выбор технологических параметров и установок, производительность обработки, физико-механические характеристики наноструктур: монография.* Киев: Изд. центр Междунар. академии наук и инновац. технологий, 2014. 472 с.
3. Костюк Г. И. *Нанотехнологии: теория, эксперимент, техника, перспективы: монография.* Киев: Изд. центр Междунар. академии наук и инновац. технологий, 2012. 648 с.
4. Костюк Г. И. *Наноструктуры и нанопокровки: перспективы и реальность: учеб. пособ.* Харьков: Нац. аэрокосм. ун-т «Харьк. авиац. ин-т», 2009. 406 с.
5. Костюк Г. И. *Научные основы создания современных технологий: учеб. пособ.* Харьков: Нац. аэрокосм. ун-т «Харьк. авиац. ин-т», 2008. – 552 с.
6. Костюк Г. И. *Эффективный режущий инструмент с покрытием и упрочненным слоем: монография-справочник.* Харьков: Нац. аэрокосм. ун-т «Харьк. авиац. ин-т», 2007. 633 с.
7. Костюк Г. И. *Эффективный режущий инструмент с покрытием и упрочненным слоем: справочник.* Киев.: Вид-во АНУ, 2003. 412 с.
8. Гречихин Л. И. *Физика наночастиц и нанотехнологий* Москва: УП «Технопринт», 2004. 397 с.
9. Гусев А. И. *Наноматериалы, наноструктуры, нанотехнологии.* Москва: Физматлит, 2005. 416 с.
10. Андриевский Р. А., Рагуля А. В. *Наноструктурные материалы.* – Москва: Издательский центр «Академия», 2005. – 117 с.
11. Карасева Е. В., Соколенко В. И., Белоус В. А., Носов Г. И. Ползучесть сплава Zr1Nb, модифицированного облучением ионами молибдена IX Межд. Семинар «Структурные основы модификации материалов методами нетрадиционных технологий» (МНТ-ХІ), Тез. докл. (Обнинск, 12–16 июля, 2007 г.). Обнинск, 2007. С.120, 121.
12. Неклюдов И. М., Ажажа В. М., Белоус В. А. и др. Влияния деформации структур, сформированных в Zr и Zr1Nb при пластической деформации ковкой, на профиль залегания имплантированного Ag Тр. 18 Межд. конф. по физ. радиац. явлений и радиац. Материаловедению (Алушта, Украина. 8 – 13 сент., 2008). Алушта, 2008. С. 154, 155

References (transliterated)

1. Kostyuk G. I. *Effective cutting tool with nanocoatings and nanoscale modified layers: monograph-reference.* in 2 books. Book 1. *Plasma-ion and ion-beam technologies.* Kharkov: "Planet-Print", 2016. 735 p.
2. Kostyuk G. I. *Nanotechnologies: selection of technological parameters and installations, processing capacity, physical and mechanical characteristics of nanostructures: monograph.* Kiev: Publ. center of Intern. Academy of Sciences and Innovation. technologies, 2014. 472 p.
3. Kostyuk G. I. *Nanotechnology: theory, experiment, technology, perspectives: monograph.* Kiev: Publ. center of Intern. Academy of Sciences and Innovation. technologies, 2012. 648 p.
4. Kostyuk G. I. *Nanostructures and nanocoatings: perspectives and reality: Proc. Help.* Kharkov: The national. aerospace. University of «Kharkov. aviats. in-t», 2009. 406 p.
5. Kostyuk G. I. *Scientific foundations of the creation of modern technologies: Textbook. Help.* Kharkov: Nats. aerospace. University of Kharkov. aviats. in-t », 2008. 552 p.

6. Kostyuk G. I. *Effective cutting tool with a coating and a reinforced layer*: a monograph-reference book. Kharkov: Nats. aerospace. University of Kharkov. aviats. in-t », 2007. 633 p.
7. Kostyuk G. I. *Effective cutting tool with a coating and a reinforced layer*: a reference book. Kiev: View of AINU, 2003. 412 p.
8. Grechikhin L. I. *Physics of Nanoparticles and Nanotechnologies*. Moscow: UP "Technoprint", 2004. 397 p.
9. Gusev A. I. *Nanomaterials, nanostructures, nanotechnologies*. Moscow: Fizmatlit, 2005. 416 p.
- Andriyevskiy R. A., Ragulya A. V. Nanostrukturnyye materialy [Nanostructured Materials]. Moskva: Izdatel'skiy tsentr «Akademiya», 2005. – 117 p.
- Karaseva Ye. V., Sokolenko V. I., Belous V. A., Nosov G. I. Polzuchest' osnashchena Zr1Nb, modifitsirovannym oblucheniyem ionami molibdena [Creep is equipped with Zr1Nb modified by irradiation with molybdenum ions] IKH Mezhd. Seminar «Strukturnyye osnovy modifikatsiy materialov metodov netraditsionnykh tekhnologiy» [IKH int. Seminar «Structural bases of materials modification methods of non-traditional technologies»] (MNT-KHÍ), Tez. dokl. (Obninsk, 12–16 iyulya, 2007 g.). – Obninsk, 2007. – p.p. 120, 121.
- Neklyudov I. M., Azhazha V. M., Belous V. A. i dr. Vliyaniya deformatsii strukturnykh, sformirovannykh v Zr i Zr1Nb pri plasticheskoy deformatsii kovkoy, na profil' zaleganiya implantirovannogo Ar [Effects of structural deformation, formed in Zr and Zr1Nb during plastic deformation by forging, on the profile of occurrence of implanted Ar] // Tr. 18 Mezhd. konf. po fiz. radiats. yavleniy i radiats. Materialovedeniyu (Alushta, Ukraina. 8–13 sentyabrya., 2008). Alushta, 2008. – p.p. 154, 155.

Поступила (received) 17.04.2019

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Костюк Геннадій Ігорович (Костюк Геннадий Игоревич, Gennady Kostyuk) – доктор технічних наук, професор, професор кафедри теоретичної механіки, машинознавства та роботомеханічних систем, Національний аерокосмічний університет ім. М.С. Жуковського «ХАІ», м. Харків, Україна, тел.: (057)-788-42-06, e-mail: gennadiykostyuk206@gmail.com.

Попов Віктор Васильович (Попов Віктор Васильевич, Viktor V Popov) – кандидат технічних наук, ПАО «ФЭД»; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9189-6882>; e-mail: vvpopov123@gmail.com