

Г. И. КОСТЮК

ПЕРСПЕКТИВЫ СОЗДАНИЯ ВЫСОКОЭНТРОПИЙНЫХ СИЛИЦИДНЫХ, НИТРИДНЫХ, КАРБИДНЫХ, БОРИДНЫХ И ОКСИДНЫХ НАНОПОКРЫТИЙ НА ТВЁРДОМ СПЛАВЕ T12A

В работе была исследована возможность создания высокоэнтروпийных нитридных, карбидных, боридных и оксидных в нанопокрытии на твёрдом сплаве T12A на основе гафния, циркония, молибдена, вольфрама, иттрия и никеля. Проведено исследование получения покрытий из силицидов, нитридов, карбидов, боридов и оксидов непосредственно в теле материала при энергиях ионов в диапазоне от 200 до $2 \cdot 10^4$ эВ с зарядовыми числами от 1 до 3. Получены важные характеристики: объём зерна для всех перечисленных ионов кремния, ионов азота, углерода и кислорода и глубины их залегания, что позволяет оценить слои наноструктур из соединений и элементов или субмикроструктур, которые могут быть образованы этими высокоэнтропийными покрытиями. Показано, что есть возможность избежать получения интерметаллидов благодаря высокой подвижности ионов азота, углерода, бора и кислорода.

Ключевые слова: высокоэнтропийные покрытия, субмикроструктуры, наноструктуры, твёрдый раствор, интерметаллиды, силициды, нитриды, карбиды, бориды, оксиды.

Г. І. КОСТЮК

ПЕРСПЕКТИВИ СТВОРЕННЯ ВИСОКОЕНТРОПІЙНИХ СИЛІЦИДНИХ, НІТРИДНАЯ, КАРБІДНИХ, БОРИДНИХ І ОКСИДНИХ НАНОПОКРИТТІВ НА ТВЕРДОМУ СПЛАВІ T12A

В роботі була досліджена можливість створення високоентропійних нитридних, карбідних, боридних і оксидних в нанопокриттях на твердому сплаві T12A на основі гафнію, цирконію, молибдену, вольфраму, ітрію і нікелю. Проведено дослідження отримання покриттів з сіцидів, нітридів, карбідів, боридів і оксидів безпосередньо в тілі матеріалу при енергіях іонів в діапазоні від 200 до $2 \cdot 10^4$ еВ з зарядовими числами від 1 до 3. Отримані важливі характеристики: обсяг зерна для всіх перерахованих іонів кремнію, іонів азоту, вуглецю і кисню і глибини їх залягання, що дозволяє оцінити шари наноструктур із з'єднань і елементів або субмікроструктур, які можуть бути освічені цими високоентропійними покриттями. Показано, що є можливість уникнути отримання интерме-таллидов завдяки високій рухливості іонів азоту, вуглецю, бору і кисню.

Ключові слова: високоентропійні покриття, субмікроструктури, наноструктури, твердий розчин, інте-рметаліди, силіциди, нітриди, карбіди, бориди, оксиди.

G. I. KOSTYUK

PROSPECTS OF CREATION OF HIGH-ENTROPIC SILICIDES, NITRIDE, CARBIDE, BORIDE AND OXIDE NANO-COATINGS ON THE SOLID T12A ALLOY

The possibility of creating high-entropic nitride, carbide, boride and oxide in a nanocoating on a solid T12A alloy based on hafnium, zirconium, molybdenum, tungsten, yttrium and nickel was investigated. The study of obtaining coatings from silicides, nitrides, carbides, borides and oxides directly in the body of the material at ion energies in the range from 200 to $2 \cdot 10^4$ eV with charge numbers from 1 to 3. Important characteristics are obtained: the grain volume for all the silicon ions listed, ions of nitrogen, carbon and oxygen and the depth of their bedding, which allows us to evaluate the layers of nanostructures from the compounds and elements or submicrostructures that can be formed by these high-entropy alloy coatings. It is shown that it is possible to avoid the production of intermetallics due to the high mobility of nitrogen, carbon, boron and oxygen ions.

Keywords: high-entropy coatings, submicrostructures, nanostructures, solid solution, intermetallics, silicides, nitrides, carbides, borides, oxides.

Введение. Исследования высокоэнтропийных сплавов, что они благодаря образованию твёрдых растворов имеют высокую твёрдость и обладают другими высокими физико-механическими характеристиками [1-3]. Есть попытки создавать покрытия из высокоэнтропийных сплавов [4] и даже экспериментально получать нитриды на основе высокоэнтропийных сплавов, но, теоретических работ, в области создания слоёв из нитридных, карбидных, боридных, силицидных и оксидных высокоэнтропийных покрытий нет.

Всё вышеизложенное говорит об актуальности и своевременности создания теории получения наноструктурных высокоэнтропийных покрытий на материале режущих инструментов.

Появление нового класса материалов высокоэнтропийных сплавов, их применение может существенно улучшить физико-механические характеристики (ФМХ) деталей и режущего инструмента, но в них входят дорогостоящие

составляющие: гафний, цирконий, вольфрам, молибден и другие редкоземельные металлы. Используя эти металлы можно создавать силицидные, нитридные, карбидные, боридные и оксидные покрытия на поверхности РИ и их характеристики могут быть такими же или даже выше, чем у высокоэнтропийных сплавов.

Высокоэнтропийные сплавы требуют, чтобы в их составе было минимум 5 различных элементов, с увеличением числа элементов энтропия растёт, очевидно, то же самое будет и с увеличением числа силицидов, карбидов, нитридов, оксидов и боридов. Причём одного элемента должно быть не более 30%. Очевидно у таких покрытий появятся новые возможности, о которых мы ещё и не подозреваем, так как они могут создавать твёрдые растворы, которые могут обладать сверх высокими ФМХ так и образовывать интерметаллиды, которые обладают высокой пластичностью, что при их малом количестве реализуются свойства покрытия, которые будут

© Г.И. Костюк, 2018

эффективно противостоять ударным нагрузкам. Всё это говорит о своевременности и важности проводимых исследований. Учитывая адгезионные взаимодействия соответствующих силицидов, нитридов, карбидов, боридов и оксидов с обрабатываемым материалом можно выбирать поверхностные слои с минимальным адгезионным взаимодействием, что существенно уменьшит адгезионный износ покрытия на РИ и снизит силы резания, что повысит с учётом образования наноструктур работоспособность и эффективность режущих инструментов. Можно также эффективно использовать силициды, которые выдерживают высокие температуры, а значит для конструкций, работающих при высоких температурах.

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») 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.

Состояние вопроса. В настоящее время широко обсуждается вопрос о создании высокоэнтропийных сплавов, которые могут найти широкое применение в технике за счёт высокой твёрдости, высокой прочности при значительных температурах, существенно снижается ползучесть по сравнению с традиционными конструкционными материалами, что тоже является важной характеристикой [1-5]. В тоже время вопрос получения НС как на высокоэнтропийных сплавах так и в покрытиях из составляющих этих сплавов, даже экспериментально практически не изучен (существуют отрывочные данные о возможности получения НС), а работ в теоретическом плане по получению НС за исключением наших [6-11] нет.

Всё это говорит о том, что есть существенная необходимость в развитии работ по получению покрытий из нитридов, карбидов, боридов, оксидов, силицидов и других твердых соединений в случае образования высокоэнтропийного покрытия. Выше изложенное говорит о важности и актуальности проводимых теоретических исследований в направлении получения высокоэнтропийных нитридных карбидных, боридных, силицидных и оксидных наноструктурных покрытий.

Результаты и их обсуждение. Была исследована возможность создания высокоэнтропийных нитридных

покрытий на твёрдом сплаве Т12А (Япония), рассматривалась возможность нанесения нитридов, силицидов, карбидов, боридов и оксидов гафния, циркония, молибдена, вольфрама, иттрия и никеля. Для этого на основе совместной задачи теплопроводности и термоупругости определялся объём зерна и глубины его залегания для рассмотренных элементов, а также азота, углерода, бора и кислорода. Для азота зависимости объёма зерна максимальной и минимальной глубины залегания представлены на рис.1. Видно, что объём для малых энергий порядка 200 эВ, соответствует нанозерну, тогда как при больших энергиях он их превышает (рис.1а), глубины залегания объёма в первом случае лежат в диапазоне $8,6 \cdot 10^{-10}$ – $3,9 \cdot 10^{-9}$ м — минимальные (рис.1в) и $2,7 \cdot 10^{-9}$ – $6,8 \cdot 10^{-9}$ м — максимальные (рис.1в).

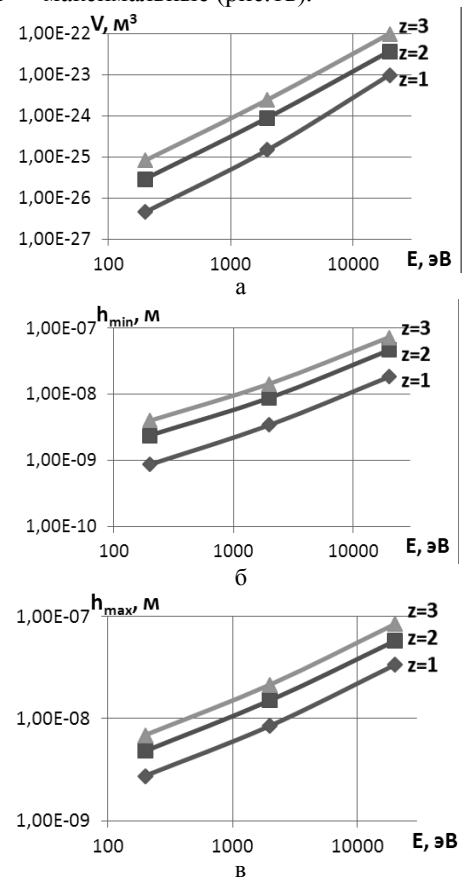


Рис.1 – Зависимости объёма нанокластера (НК) (а), минимальной (б) и максимальной (в) глубины залегания НК при действии ионов азота (N^+) с различным зарядом ($z=1$, $z=2$, $z=3$) для Т12А

Получение карбидов требует подачи ионов углерода, которые можно получать непосредственно из углеродного электрода при использовании магнетрона или из газов, содержащих углерод.

Для углерода зависимости объёма зерна (рис. 2, а), минимальной (рис. 2, б) и максимальной (рис.2в) глубины залегания позволяют получить пространственную картину образования зерна в зоне действия иона углерода. Видно, что нанозерно может быть получено при энергиях ионов от 200 до 2000 эВ, когда как вблизи 20 КэВ вероятность его образования не высока, а при зарядовых числах 2 и 3 вообще не возможна. Диапазон

минимальных глубин залегания составляет величины $1,2 \cdot 10^{-9}$ – $9,29 \cdot 10^{-8}$ м, а максимальные $2,94 \cdot 10^{-9}$ – $1,07 \cdot 10^{-7}$ м (рис. 2). Видно, что в этом случае достигается максимальная глубина зоны, где образуется зерно увеличивается практически до десятка микрометров, что в последнем случае образует субмикрзерно.

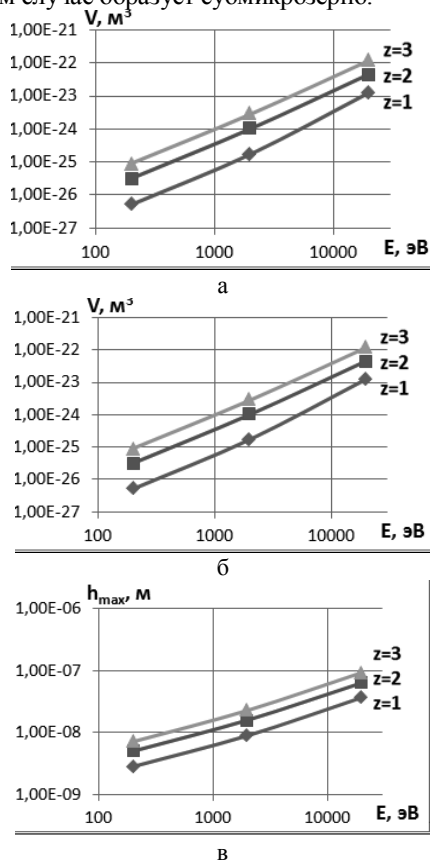


Рис.2 – Зависимости объема нанокластера (НК) (а), минимальной (б) и максимальной (в) глубины залегания НК при действии ионов углерода (C^+) с различным зарядом ($z=1, z=2, z=3$) для T12A

Для случая действия ионов бора (рис.3) размер зерна увеличивается: лежат в пределах $4,4 \cdot 10^{-9}$ – $1,364 \cdot 10^{-7}$ м. Так в последнем случае мы имеем дело с субмикрзерном, глубины его залегания: минимальная лежит в диапазоне $1,2 \cdot 10^{-9}$ – $9,29 \cdot 10^{-8}$ м, а максимальная $2,9 \cdot 10^{-9}$ – $1,07 \cdot 10^{-7}$ м. В этом случае глубины залегания превышают все предыдущие, как и размер зерна (рис.3).

Переход к ионам кислорода (для образования оксидов) приводит к существенному снижению размера зерна до $3,94 \cdot 10^{-9}$ – $1,04 \cdot 10^{-7}$ м, последнее значение уже соответствует субмикро зерну (рис. 4, а). Диапазон глубин залегания зерна: $7,49 \cdot 10^{-9}$ – $6,4 \cdot 10^{-8}$ м – минимальные (рис.4б) и $2,65 \cdot 10^{-9}$ – $7,7 \cdot 10^{-8}$ м – максимальные (рис. 4, в) значения.

Аналогично для ионов кремния зависимости объема зерна (рис. 5а) минимальной (рис. 5б) и максимальной (рис. 5в) глубин залегания, видно, что нанозерно получаем при энергиях 200 и 2000 КэВ, тогда как вблизи энергии 20 КэВ вероятность его образования не высока, а при зарядовых числах 2 и 3 вообще невозможна.

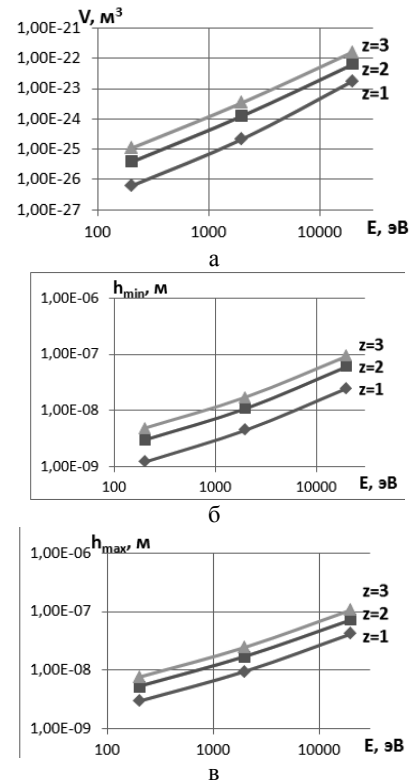


Рис.3 – Зависимости объема нанокластера (НК) (а), минимальной (б) и максимальной (в) глубины залегания НК при действии ионов бора (B^+) с различным зарядом ($z=1, z=2, z=3$) для T12A

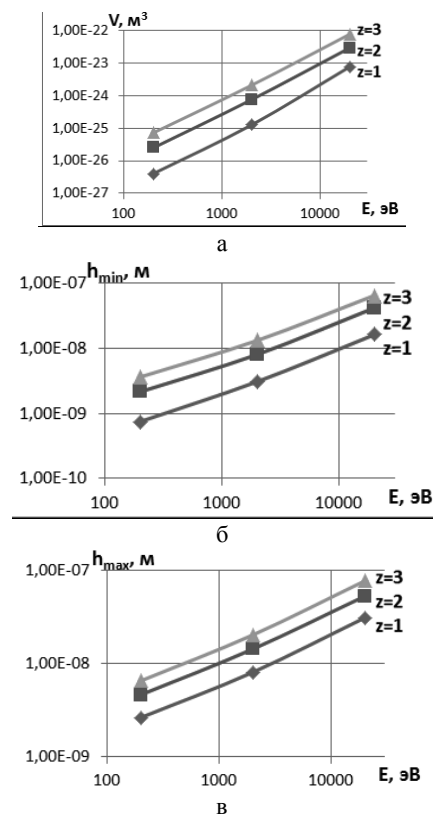


Рис.4 – Зависимости объема нанокластера (НК) (а), минимальной (б) и максимальной (в) глубины залегания НК при действии ионов кислорода (O^+) с различным зарядом ($z=1, z=2, z=3$) для T12A

Минимальные глубины залегания НК 0,6 на 10^{-9} –4,2 на 10^{-8} , а максимальное 1,5 на 10^{-9} –5,2 на 10^{-8} м, зона с нанозерном увеличивается до долей микрометра, а в остальных случаях образуется субмикрзерно.

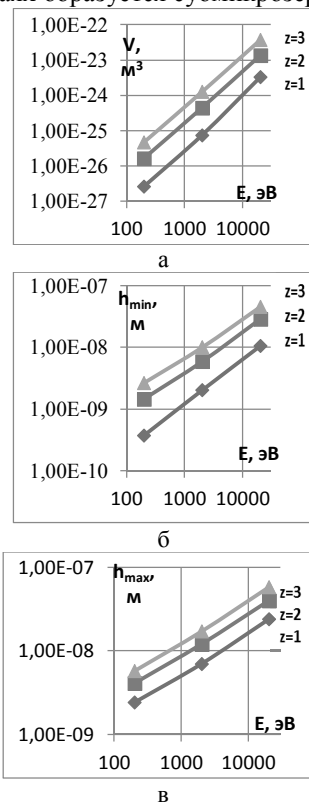


Рис. 5 – Зависимости максимальной температуры (а), объема нанокластера (НК) (б), максимальной (в) глубины залегания НК, при действии ионов алюминия (Al^+) с различным зарядом ($z=1, z=2, z=3$) для T12A

В дальнейшем в зависимости от того какую последовательность слоёв мы хотим получить исходя из адгезионных [2] и прочностных [3] характеристик покрытия мы выбираем поверхностный слой покрытия и их чередование. Для выполнения условия высокоэнтропийности определяем долю гафния участвующего в процессе с учётом требования, чтобы циркония было не более 30%, а потом оцениваем скажность импульсов напряжения на испарители с катодом СЦГ 20 и долю остальных компонентов для которых необходимо иметь один катод двухкомпонентный, с соотношением компонентов 50%/50% и два испарителя с однокомпонентными катодами (причём объединяя в двухкомпонентном катоде элементы с близкими парциальными давлениями при одинаковых температурах). Далее рассматриваем (в зависимости от выбранной последовательности слоёв, первый слой наружный для него выбираем диапазон глубин: минимальный и максимальный, а также размер зерна. Вторым по глубине бут слой из соединения или элементов 9 интерметаллидов) в зависимости от характера работы РИ: если РИ работает с ударной нагрузкой, то второй слой должен быть из чистого металла (интерметаллидный) или соединения демпфирующего информацию первого слоя. Последующие слои могут быть из химических соединений.

На рис.5 для ионов гафния представлены все 3 зависимости. Видно, что объём соответствующий наноструктурам (НС) реализуется до энергии ионов порядка 700–800 эВ и глубины: для минимальной 0 – $2,2 \cdot 10^{-8}$ м; для максимальной — $1,8 \cdot 10^{-9}$ – $3,2 \cdot 10^{-8}$ м. Видно, что с ростом массы иона объёмы НС и глубины их залегания существенно уменьшаются. Эта тенденция прослеживается практически для всех рассмотренных ионов. Для образования нитридов, необходимо, чтобы заряд и энергия ионов азота были такие, чтобы глубина его залегания была близка полученным для гафния (сравни рисунки 1 и 5).

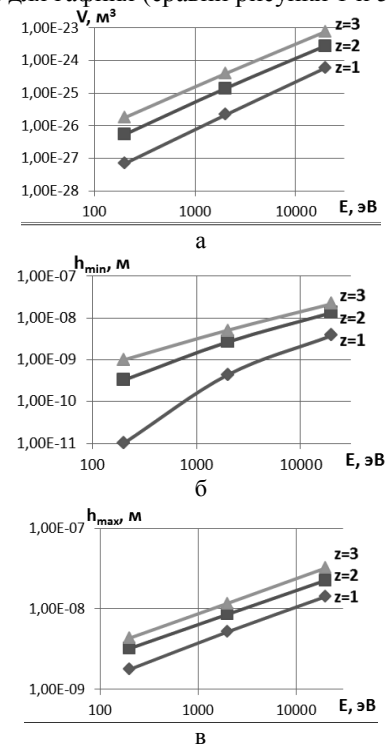


Рис.6 – Зависимости объема нанокластера (НК) (а), минимальной (б) и максимальной (в) глубины залегания НК при действии ионов гафния (Hf^+) с различным зарядом ($z=1, z=2, z=3$) для T12A

Перейдя к зависимостям для циркония Zr^+ (рис. 6) получим, что практически для всех исследуемых энергий реализуются НС. Причём при 200 эВ глубины залегания составляют: минимальная – $0 - 6,3 \cdot 10^{-10}$ м; максимальная – $3,34 \cdot 10^{-9} - 5,43 \cdot 10^{-9}$ м. При 2000 эВ минимальные – $6,37 \cdot 10^{-10} - 5,37 \cdot 10^{-9}$ м; максимальные – $5,4 \cdot 10^{-9} - 1,25 \cdot 10^{-8}$ м. Для 20 КэВ для минимальной глубины залегания – $4,6 \cdot 10^{-9} - 2,48 \cdot 10^{-8}$ м; для максимальной – $1,54 \cdot 10^{-8} - 3,52 \cdot 10^{-8}$ м.

Сравнения глубин залегания НС для ионов гафния и циркония с проникновением ионов азота видим, что многие энергии азота не могут быть использованы так как их глубина проникновения больше и во многих из режимов не будут образовываться нитриды, а будет довольно большое количество интерметаллидов, которые обладают малыми физико-механическими характеристиками, а следовательно будут зоны в материале с пониженными свойствами, что не обеспечит появление высоко энтропийных нитридных покрытий с хорошими характеристиками.

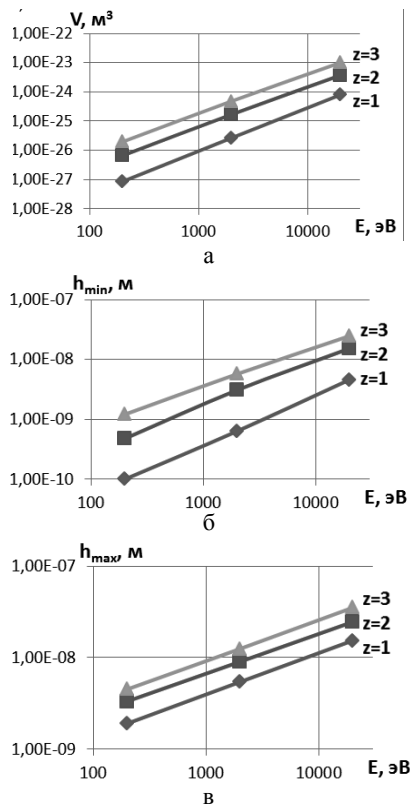


Рис. 7 – Зависимости объема нанокластера (НК) (а), минимальной (б) и максимальной (в) глубины залегания НК при действии ионов циркония Zr^+ с различным зарядом ($z=1, z=2, z=3$) для T12A

Для молибдена (Mo^+) глубины залегания НС при энергии 200 эВ составляют: минимальная – $0 - 1,18 \cdot 10^{-9}$ м, максимальная – $1,89 \cdot 10^{-9} - 4,49 \cdot 10^{-9}$ м. При энергии 2000 эВ: минимальная – $6,12 \cdot 10^{-10} - 5,65 \cdot 10^{-9}$ м; максимальная – $5,59 \cdot 10^{-9} - 1,23 \cdot 10^{-8}$ м. При 20 КэВ: минимальная – $4,47 \cdot 10^{-9} - 2,44 \cdot 10^{-8}$ м; максимальная – $1,52 \cdot 10^{-8} - 3,48 \cdot 10^{-8}$ м (рис.7).

Глубины залегания НС при энергии 200 эВ составляют: минимальная – $0 - 1,52 \cdot 10^{-9}$ м, максимальная – $2,1 \cdot 10^{-9} - 4,79 \cdot 10^{-9}$ м. При энергии 2000 эВ: минимальная – $9,24 \cdot 10^{-10} - 6,63 \cdot 10^{-9}$ м; максимальная – $5,77 \cdot 10^{-9} - 1,35 \cdot 10^{-8}$ м. При 20 КэВ: минимальная – $5,7 \cdot 10^{-9} - 2,87 \cdot 10^{-8}$ м; максимальная – $1,7 \cdot 10^{-8} - 3,95 \cdot 10^{-8}$ м (рис.9).

Для никеля глубины залегания ближе к глубинам залегания азота, что способствует эффективному образованию НС из нитридов.

Уменьшаются минимальная и максимальная глубины залегания зерна с увеличением массы иона, а также не значительно уменьшаются объёмы зерна.

Зона энергии, где возможно получение наноструктур, увеличивается, что положительно сказывается на физико-механических характеристиках покрытия, которое при наноструктурном зерне имеет большую микротвёрдость, предел текучести, предел прочности, повышается также коррозионная стойкость при этом увеличивается способность воспринимать ударные нагрузки за счёт снижения модуля упругости. Это позволяет выдерживать высокие нагрузки в зоне упругости, то есть при больших деформациях мы имеем не высокие напряжения.

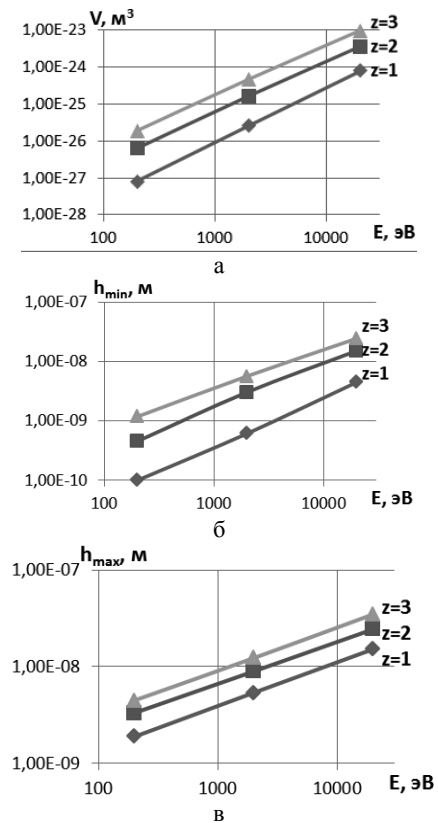


Рис. 8 – Зависимости объема нанокластера (НК) (а), минимальной (б) и максимальной (в) глубины залегания НК при действии ионов молибдена (Mo^+) с различным зарядом ($z=1, z=2, z=3$) для T12A

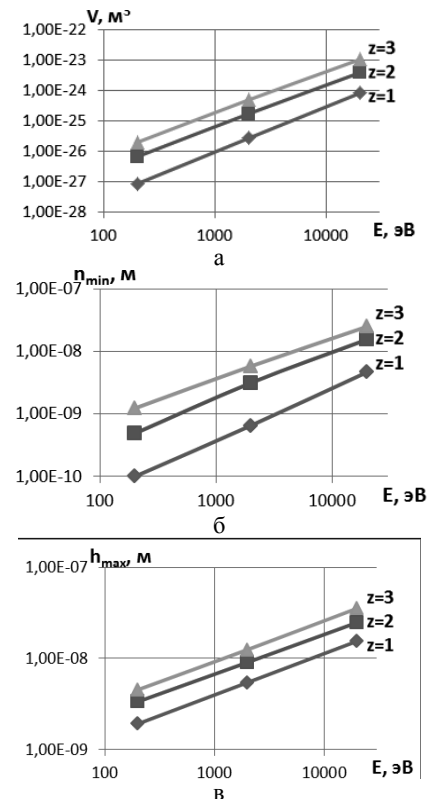


Рис. 9 – Зависимости объема нанокластера (НК) (а), минимальной (б) и максимальной (в) глубины залегания НК при действии ионов иттрия (Y^+) с различным зарядом ($z=1, z=2, z=3$) для T12A

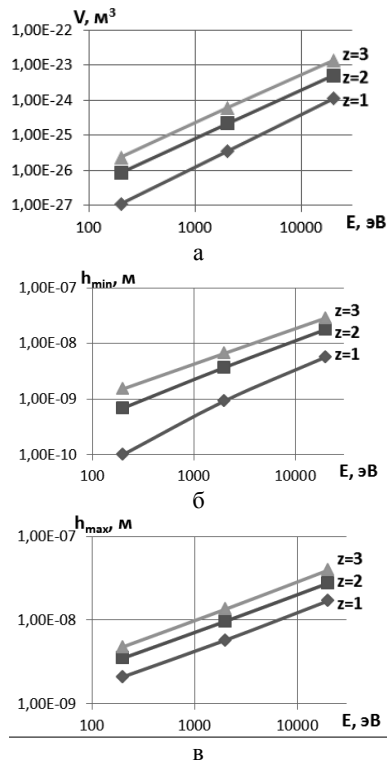


Рис. 10 – Зависимости объема нанокластера (НК) (а), минимальной (б) и максимальной (в) глубины залегания НК при действии ионов никеля (Ni^+) с различным зарядом ($z=1, z=2, z=3$) для T12A

Необходимо также обеспечить пространственно-временной закон распределения ионов в материале детали с целью получения эффективных высокоэнтропийных нитридных, силицидных, карбидных, боридных и оксидных покрытий.

Выводы. В результате совместного действия всех рассмотренных сортов ионов мы можем получить высокоэнтропийное покрытие, а с учётом действия ионов азота (выбрав соответствующую энергию ионов) получаем высокоэнтропийное нитридное, силицидное и карбидное наноструктурное покрытие.

В заключение можно отметить, что благодаря созданию слоёв из высокоэнтропийных нитридных, карбидных, боридных и оксидных наноструктурных покрытий и выбрав последовательность слоёв (первый на поверхности с учётом адгезионного взаимодействия с обрабатываемым материалом) мы можем конструировать эффективный режущий инструмент высокой работоспособности.

Показано, что для получения эффективных высокоэнтропийных покрытий необходимо за счёт управления установкой обеспечить соответствующий пространственно-временной закон распределения подачи ионов в материале РИ.

Предложен алгоритм выбора технологических режимов получения высокоэнтропийного нитридного,

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Костюк Геннадій Ігорович (Костюк Геннадий Игоревич, Kostyuk Gennady Igorovich) – 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.

карбидного, боридного и оксидного нанопокрyтия с чередующимися слоями и с учётом адгезионного взаимодействия поверхностного слоя с обрабатываемым материалом.

Список литературы

1. *Костюк, Г. И.* Эффективный режущий инструмент с нанопокрyтиями и наноструктурными модифицированными слоями: монография-справ. в 2 кн. Кн.1. Плазменно-ионные и ионно-лучевые технологии / Г.И. Костюк – Харьков: «Планета-Принт», 2016. — 735 с.
2. *Костюк, Г. И.* Нанотехнологии: выбор технологических параметров и установок, производительность обработки, физико-механические характеристики наноструктур: монография / Г. И. Костюк. – Киев: Изд. центр Междунар. академии наук и инновац. технологий, 2014. – 472 с.
3. *Костюк, Г. И.* Нанотехнологии: теория, эксперимент, техника, перспективы: монография / Г. И. Костюк. – Киев: Изд. центр Междунар. академии наук и инновац. технологий, 2012. – 648 с.
4. *Костюк, Г. И.* Наноструктуры и нанопокрyтия: перспективы и реальность: учеб. пособ. / Г. И. Костюк. – Харьков: Нац. аэрокосм. ун-т «Харьк. авиац. ин-т», 2009. – 406 с.
5. *Костюк, Г. И.* Научные основы создания современных технологий: учеб. пособ. / Г. И. Костюк. – 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 / Г. И. Костюк. – Х.: Нац. аэрокосм. ун-т «Харьк. авиац. ин-т», 2007. – 633 с.
7. *Костюк, Г. И.* Эффективный режущий инструмент с покрытием и упрочненным слоем: справочник / Г. И. Костюк. – Киев: Вид-во АІНУ, 2003. – 412 с.
8. *Гречихин, Л. И.* Физика наночастиц и нанотехнологий / Л. И. Гречихин. – Москва: УП «Технопринт», 2004. – 397 с.
9. *Аксенов, И. И.* Вакуумная дуга в эрозионных источниках плазмы / И. И. Аксенов. – Харьков: Изд-во НИИ «ХФТИ», 2005. – 211 с.
10. *Гусев, А. И.* Наноматериалы, наноструктуры, нанотехнологии / А. И. Гусев. – Москва: Физматлит, 2005. – 416 с.

Bibliography (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.
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 АІНУ, 2003. 412 p.
8. *Grechikhin, L.I.* Physics of Nanoparticles and Nanotechnologies. Moscow: UP "Technoprint", 2004. 397 p.
9. *Aksenov, I.I.* Vacuum arc in erosive plasma sources. Publishing house of scientific research institute "Kharkov Institute of Physics and Technology", 2005. 211 p.
10. *Gusev, A.I.* Nanomaterials, nanostructures, nanotechnologies. Moscow: Fizmatlit, 2005. 416 p.

Поступила (received) 05.02.2018