

УДК 621.9

Г.И. КОСТЮК**СОЗДАНИЕ ВЫСОКОЭНТРОПИЙНЫХ НИТРИДНЫХ НАНОПОКРЫТИЙ НА ТВЁРДОМ СПЛАВЕ T12A**

В роботі була досліджена можливість створення високоентропійних нітридних нанопокриттів на твердому сплаві T12A на основі гафнію, цирконію, молибдену, вольфраму, ітрію і нікелю. Проведено дослідження отримання нітридних покриттів і нітридів безпосередньо в тілі матеріалу при енергіях іонів в діапазоні від 200 до $2 \cdot 10^4$ eV з зарядовими числами від 1 до 3. Отримані важливі характеристики: об'єм зерна для всіх перерахованих іонів і іонів азоту і глибини їх залягання, що дозволяє оцінити шари наноструктур або субмікроструктур, у яких можуть бути створені ці високоентропійні покриття. Показано, що є можливість уникнути отримання інтерметаллідів завдяки високій рухливості іонів азоту.

Ключові слова: високоентропійні покриття, субмікроструктури, наноструктури, твердий розчин, інтерметалліди, нітрид.

В работе была исследована возможность создания высокоэнтропийных нитридных нанопокровтий на твёрдом сплаве T12A на основе гафния, циркония, молибдена, вольфрама, иттрия и никеля. Проведено исследование получения нитридных покрытий и нитридов 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 и ионов азота и глубины их залегания, что позволяет оценить слои наноструктур или субмикроструктур, которые могут быть образованы этими высокоэнтропийными покрытиями. Показано, что есть возможность избежать получения интерметаллидов благодаря высокой подвижности ионов азота.

Ключевые слова: высокоэнтропийные покрытия, субмикроструктуры, наноструктуры, твёрдый раствор, интерметаллиды, нитриды.

The possibility of creating highly entropic nitride nano-coats on a solid alloy T12A based on hafnium, zircon, molybdenum, tungsten, yttrium and nickel was investigated. An investigation was made of the production of nitride coatings and nitrides 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 were obtained: the grain volume for all the ions and nitrogen ions listed and their depth, which allows us to evaluate the layers of nanostructures or submicrostructures that can be formed by these high-entropy coatings. Moreover, it is shown that it is possible to avoid the production of intermetallic compounds due to the high mobility of nitrogen ions.

Keywords: high-entropy coatings, submicrostructures, nanostructures, solid solution, intermetallic compounds, nitrides.

Введение. В настоящее время проводятся исследования высокоэнтропийных сплавов, которые 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, к сожалению теоретических работ, в области создания нитридных 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 нитридные 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 карбидов, нитридов, оксидов и боридов. Причём одного элемента должно быть не более 30%. Очевидно у таких покрытий появляются 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 тоже при их малом количестве реализуются свойства покрытия, которое будет эффективно противостоять ударным нагрузкам. Всё это говорит о своевременности и важности проводимых исследований.

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 плазменной 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 будируется 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 во-

© Г.И. Костюк, 2017

прос получения НС как на высокоэнтропийных сплавах, так и в покрытиях из составляющих эти сплавы, 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 и других твердых соединений в случае образования высокоэнтропийного покрытия. Выше изложенное говорит о важности и актуальности проводимых теоретических исследований в направлении получения высокоэнтропийных нитридных наноструктурных покрытий

Поэтому была исследована возможность создания высокоэнтропийных нитридных покрытий на твердом сплаве Т12А, рассматривалась возможность нанесения нитридов гафния, циркония, молибдена, вольфрама, иттрия и никеля. Для этого на основе совместной задачи теплопроводности и термоупругости определялся объем зерна и глубины его залегания для рассмотренных элементов и азота, так для азота зависимости объема зерна максимальной и минимальной глубины залегания представлены на рис.1. Видно, что объем, но для малых энергий порядка 200 эВ, соответствует нанозерну, тогда как при больших энергиях он их превышает (рис.1а), глубины залегания объема 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).

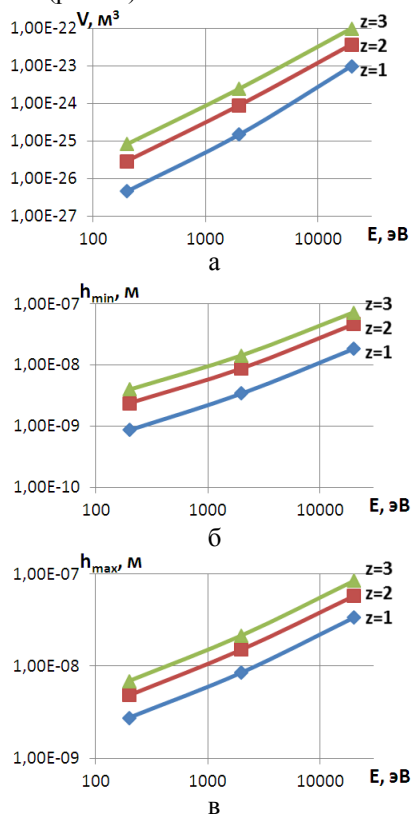


Рис.1 – Зависимости объема нанокластера (НК): а – зависимость общего объема, б – минимальной глубины залегания НК при действии ионов азота (N⁺) с различным зарядом (z=1, z=2, z=3) для Т12А; в – максимальной глубины залегания НК при действии ионов азота (N⁺) с различным зарядом (z=1, z=2, z=3) для Т12А

На рис.2 для ионов гафния представлены все 3 зависимости. Видно, что объем 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 объемы НС и глубины их залегания существенно уменьшаются. Эта тенденция прослеживается практически для всех рассмотренных ионов. Для того чтобы образовались нитриды, необходимо, чтобы заряд и энергия ионов азота были-таки, чтобы глубина его залегания была близка полученным для гафния (сравни рисунки 1 и 2).

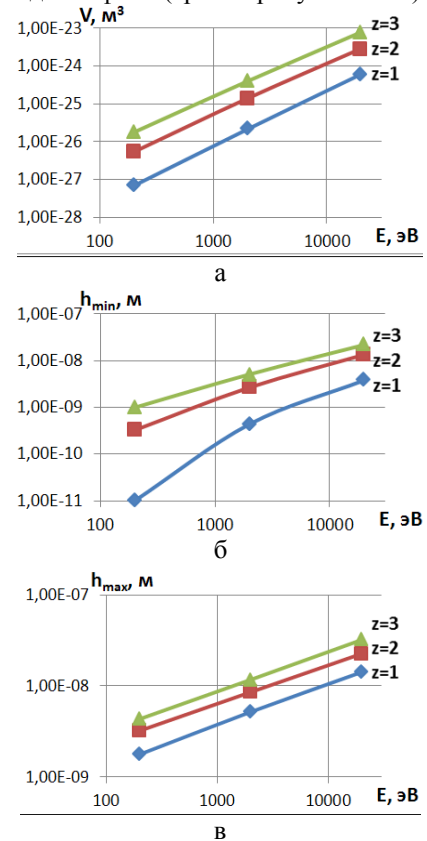


Рис.2 – Зависимости объема нанокластера (НК): а – зависимость общего объема; б – минимальной глубины залегания НК при действии ионов гафния (Hf⁺) с различным зарядом (z=1, z=2, z=3) для Т12А; в – максимальной глубины залегания НК при действии ионов гафния (Hf⁺) с различным зарядом (z=1, z=2, z=3) для Т12А

Перейдя к зависимостям для циркония Zr⁺ (рис. 3) 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.

Сравнение 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.

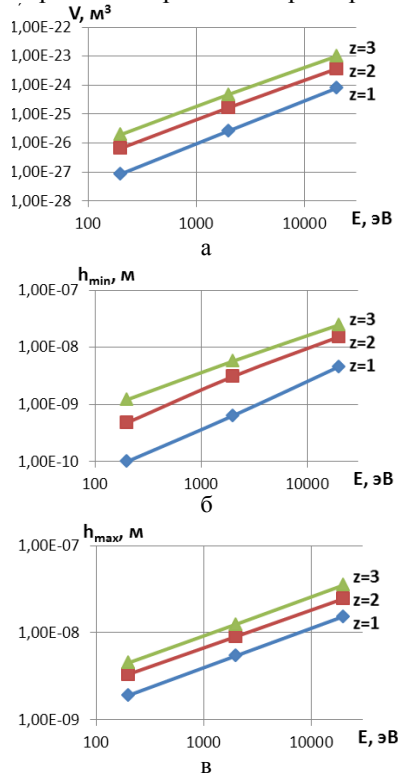


Рис.3 – Зависимости объема нанокластера (НК): а – зависимость общего объема; б – минимальной глубины залегания НК при действии ионов циркония Zr^+ с различным зарядом ($z=1, z=2, z=3$) для T12A; в – максимальной глубины залегания НК при действии ионов циркония Zr^+ с различным зарядом ($z=1, z=2, z=3$)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

Для ионов вольфрама (W^+) представлены аналогичные графики (рис.5). Глубины залегания НС при энергии 200 эВ составляют: минимальная – $0 - 9,89 \cdot 10^{-10}$ м, максимальная – $1,77 \cdot 10^{-9} - 4,33 \cdot 10^{-9}$ м. При энергии 2000 эВ: минимальная – $4,38 \cdot 10^{-10} - 5,1 \cdot 10^{-9}$ м; максимальная – $5,17 \cdot 10^{-9} - 1,17 \cdot 10^{-8}$ м. При 20 КэВ: минимальная – $3,79 \cdot 10^{-9} - 2,19 \cdot 10^{-8}$ м; максимальная – $1,42 \cdot 10^{-8} - 3,20 \cdot 10^{-8}$ м.

Видно, что глубины залегания наноструктур значительно отличаются от необходимых для ионов азота и нужно очень аккуратно выбирать энергии и заряды с целью получения нитридов на определённой глубине.

Для ионов иттрия (Y^+) аналогичные зависимости представлены на рис.6. Глубины залегания НС при энергии 200 эВ составляют: минимальная – $0 - 1,23 \cdot 10^{-9}$ м, максимальная – $1,92 \cdot 10^{-9} - 4,54 \cdot 10^{-9}$ м. При энергии 2000 эВ: минимальная – $6,53 \cdot 10^{-10} - 5,79 \cdot 10^{-9}$ м; максимальная – $5,45 \cdot 10^{-9} - 1,25 \cdot 10^{-8}$ м. При 20 КэВ: минимальная – $4,65 \cdot 10^{-9} - 2,49 \cdot 10^{-8}$ м; максимальная – $1,55 \cdot 10^{-8} - 3,55 \cdot 10^{-8}$ м.

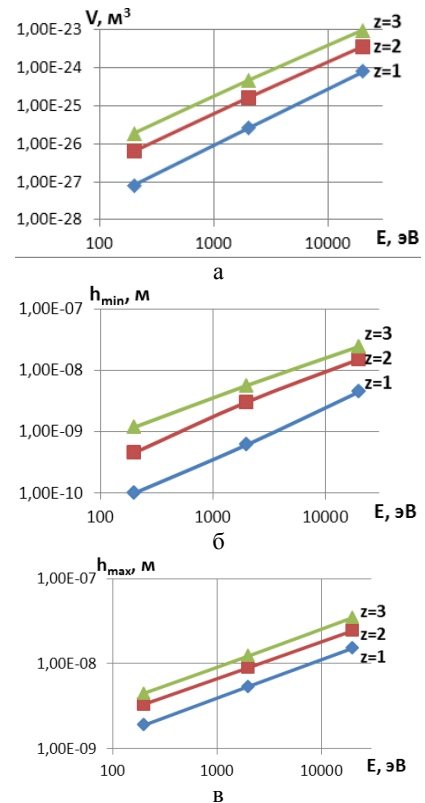


Рис.4 – Зависимости объема нанокластера (НК): а – зависимость общего объема; б – минимальной глубины залегания НК при действии ионов молибдена (Mo^+) с различным зарядом ($z=1, z=2, z=3$) для T12A; в – максимальной глубины залегания НК при действии ионов молибдена (Mo^+) с различным зарядом ($z=1, z=2, z=3$) для T12A

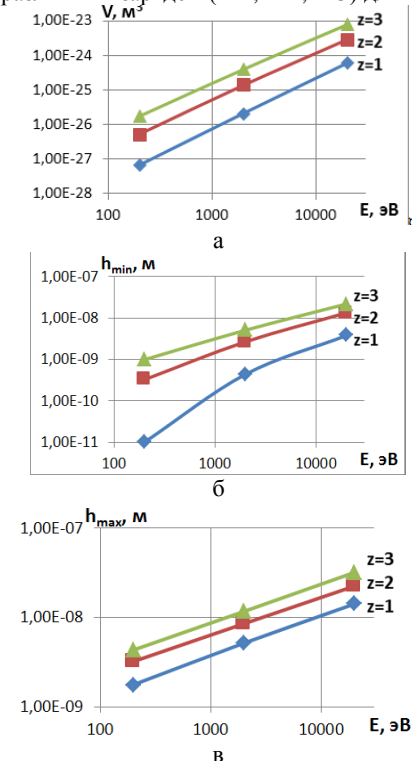


Рис.5 – Зависимости объема нанокластера (НК): а – зависимость общего объема; б – минимальной глубины залегания НК при действии ионов вольфрама (W^+) с различным зарядом ($z=1, z=2, z=3$) для T12A; в – максимальной глубины залегания НК при действии ионов вольфрама (W^+) с различным зарядом ($z=1, z=2, z=3$) для T12A

Видно, что в этом случае практически, для всех энергий глубины малы, исключение представляет только энергия 20 КэВ, которые далеко не всегда можно реализовать в данной установке, поскольку энергия азота намного меньше, при которой их глубины залегания соизмеримы.

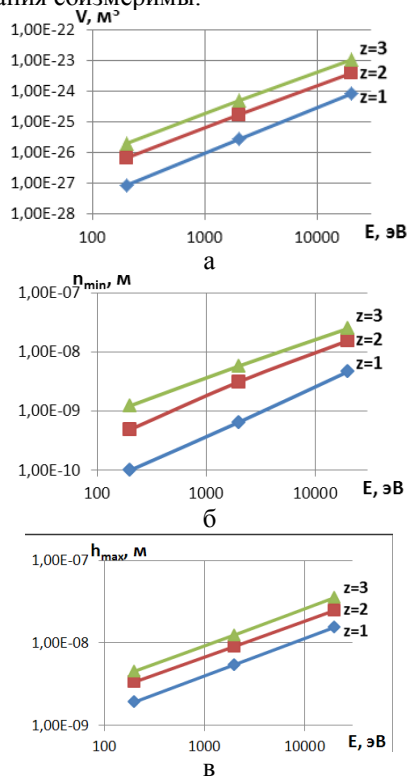


Рис.6 – Зависимости объема нанокластера (НК): а – зависимости общего объема; б – минимальной глубины залегания НК при действии ионов иттрия (Y^+) с различным зарядом ($z=1, z=2, z=3$) для Т12А; в – максимальной глубины залегания НК при действии ионов иттрия (Y^+) с различным зарядом ($z=1, z=2, z=3$) для Т12А

Для никеля (Ni^+) зависимости объема НС и минимальной и максимальной глубины залегания представлены на рисунке 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.

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 объемы зерна. Зона энергии, где возможно получение наноструктур, увеличивается, что положительно сказывается на физико-механических характеристиках покрытия, которое при наноструктурном зерне имеет большую микротвердость, 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.

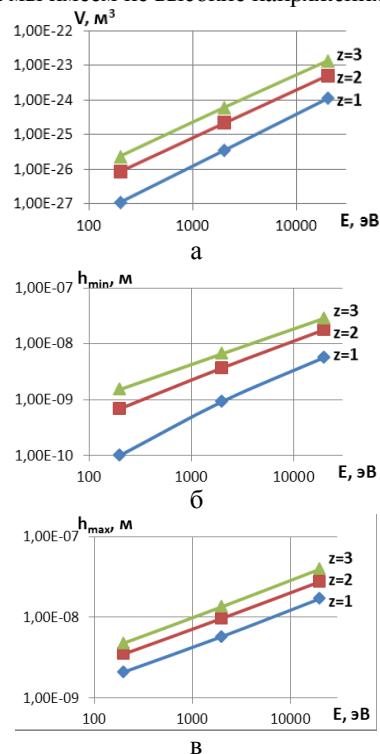


Рис.7 – Зависимости объема нанокластера (НК): а – зависимости общего объема; б – минимальной глубины залегания НК при действии ионов никеля (Ni^+) с различным зарядом ($z=1, z=2, z=3$) для Т12А; в – максимальной глубины залегания НК при действии ионов никеля (Ni^+) с различным зарядом ($z=1, z=2, z=3$) для Т12А

Мы рассмотрели возможность образования нитридов с учётом пространственного характера действия ионов азота и основных металлов. Реализовать высокоэнтропийное покрытие с 6 металлами можно в установке ВУ2-МБС, где есть четыре испарителя, в двух из которых будут находиться катоды из чистых металлов, а в остальных 2-х двухкомпонентные катоды. Вот так, например, если один из катодов будет из ЦГ20 (20%Нf+80%Zr) для того, чтобы обеспечить получение высокоэнтропийного покрытия необходимо, чтобы гафния было 7,5 %, а циркония 30% - максимально возможное количество одного компонента в высокоэнтропийном покрытии. Тогда расчёты показывают, что остальные элементы должны составлять 15,6225 % как в 2-х компонентном катоде, так и в 2х компонентных катодах.

Проведенные расчёты показывают, что время работы катода с материалом ЦГ 20 должно быть в 4 раза меньше, чем время действия работы остальных, что позволит обеспечить требуемое соотношение компонентов. Работа этого катода должна быть периодической, чтобы обеспечить получение соответствующих соотношения компонентов в высокоэнтропийном нитридном покрытии с минимальным количеством интерметаллидов и аморфной фазы.

Видно, что необходимо обеспечить пространственно-временной закон распределения ионов в материале детали с целью получения эффективных высокоэнтропийных нитридных 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 наноструктурное покрытие.

В заключение можно отметить, что благодаря созданию слоёв из высокоэнтропийных нитридных наноструктурных покрытий 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 ионов в материале детали.

Список литературы

1. J. W. Yeh, Y. L. Chen, S. J. Lin, S. K. Chen, "High-Entropy Alloys – A New Era of Exploitation", Materials Science Forum, Vol. 560, pp. 1-9, 2007
2. Yong Zhang, Ting Ting Zuo, Zhi Tang, Michael C. Gao, Karin A. Dahmen, Peter K. Liaw, Zhao Ping Lu, Microstructures and properties of high-entropy alloys, Pages 1-93, 2014
3. М.В. Ивченко, В.Г. Пушин, N. Wanderka Високоентропийні еквіатомні сплави AlCrFeCoNiCu: гіпотези і експериментальні факти, Журнал технічної фізики, 2014, том 84, вип. 2/ стр.57-64
4. И.В.Блинков, А.О.Волхонский, В.Н.Аникин, М.И.Петржиц, Д.Е.Деревцова Фазовый состав и свойства износостойких Ti-Al-Cr-Zr-Nb-N покрытий, полученных методом физического осаждения из газовой фазы, Физика и химия обработки материалов, 2010, том 37, стр. 37-44
5. А.Д. Погребняк, А.А. Багдасарян, И.В. Якушенко, В.М. Береснев Структура и свойства высокоэнтропийных сплавов и нитридных покрытий на их основе, Успехи химии 83 (11) стр.1027-1061 (2014 г.)
6. І.Костюк Г. І., Ефективний режущий інструмент с нанопокриттями і наноструктурними модифікованими шарами: Монографія-справочник: в 2 кн./Г.І. Костюк – Х.: «Планета-Принт», 2016. – Кн.1. Плазменно-ионные и ионно-лучевые технологии. – 735 с.
7. Костюк, Г.І. Ефективний інструмент з нанопокриттям і наноструктурних Модифікаційний шарами [Текст]: моногр.-довід. : в 2 кн. /Г.І. Костюк. Х.: Вид-во. Планета-принт. Кн. 2. Лазерні технології, 2017. 507 с.
8. 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.
9. 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.

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Створення високоентропійних нитридних нанопокриттів на твердому сплаві T12A / Г.І. Костюк // Вісник НТУ «ХП». Серія: Технології в машинобудуванні. – Х. : НТУ «ХП», 2017. – № 26 (1248). – С. 14–18. – Бібліогр.: 11 назв. – ISSN 2079-004X.

Создание высокоэнтропийных нитридных нанопокритий на твердом сплаве T12A / Г.И. Костюк // Вісник НТУ «ХП». Серія: Технології в машинобудуванні. – Харків : НТУ «ХП», 2017. – № 26 (1248). – С. 14–18. – Библиогр.: 11 назв. – ISSN 2079-004X.

Creation of highly entropic nitride nanocoats on a solid T12A alloy / G. Kostyuk // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Techniques in a machine industry. – Kharkov : NTU "KhPI", 2017. – No. 26 (1248). – P14–18. – Bibliogr.: 11. – ISSN 2079-004X.

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Костюк Геннадій Ігорович – доктор технічних наук, професор, професор Національного аерокосмічного університету «Харківський авіаційний інститут», тел.: (057)-788-42-06, e-mail: g.kostyuk206@yandex.ru;

Костюк Геннадий Игоревич – доктор технических наук, профессор, профессор Национального аерокосмического университета «Харьковский авиационный институт», тел.: (057)-788-42-06, e-mail: g.kostyuk206@yandex.ru;

Kostyuk Gennadiy Igorevich – Doctor of Technical Sciences, Full Professor, National Aerospace University Zhukovskiy, tel.: (057)-788-42-06, e-mail: g.kostyuk206@yandex.ru.

10. 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.
11. 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.

Bibliography (transliterated)

1. J. W. Yeh, Y. L. Chen, S. J. Lin, S. K. Chen, "High-Entropy Alloys – A New Era of Exploitation", Materials Science Forum, Vol. 560, pp. 1-9, 2007
2. Yong Zhang, Ting Ting Zuo, Zhi Tang, Michael C. Gao, Karin A. Dahmen, Peter K. Liaw, Zhao Ping Lu, Microstructures and properties of high-entropy alloys, Pages 1-93, 2014
3. M.V Ivchenko, V.G Pushin, N. Wanderka Visokoentropijni ekvatomni splavi AlCrFeCoNiCu: gipotezi i eksperimental'ni fakti, Zhurnal tekhnichnoi fiziki, 2014, vol 84, essue. 2/ pp.57-64.
4. I.V.Blinkov, A.O.Volhonskij, V.N.Anikin, M.I.Petrzhik, D.E.Derevcova Fazovyy sostav i svojstva iznosostojkih Ti-Al-Cr-Zr-Nb-N pokrytij, poluchennyh me-todom fizicheskogo osazhdeniya iz gazovoj fazy, Fizika i himiya obrabotki materialov, 2010, vol 37, pp. 37-44
5. A.D. Pogrebnyak, A.A. Bagdasaryan, I.V. YAkushchenko, V.M. Beresnev Struktura i svoj-stva vysokoentropijnih splavov i nitridnih pokrytij na ih osnove, Uspekhi himii 83 (11) str.1027-1061 (2014 g.)
6. Kostyuk, G. I. *Effektivnyy rezhushchiy instrument s pokrytiyem i uprochnennym sloyem: sprav* [Effective cutting tool coated with a layer of reinforced] – Kiev, Planeta print, 2016. 735 p.
7. Kostyuk, G. I. *Effektivnyy rezhushchiy instrument s pokrytiyem i uprochnennym sloyem: sprav* [Effective cutting tool coated with a layer of reinforced] – Kharkov, Planeta print, 2017. 507 p.
8. Kostyuk, G. I. *Nanotekhnologii: vybor tekhnologicheskikh parametrov i ustanovok, proizvoditel'nost' obrabotki, fiziko-mekhanicheskiye kharakteristiki nanostruktur: monogr* [Nanotechnology: the choice of process parameters and settings, processing performance, physical and mechanical properties of nanostructures] – Kiev, Izd. tsentr Mezhdunar. akademii nauk i innovats. tekhnologiy, 2014. 472 p.
9. Kostyuk, G. I. *Nanotekhnologii: teoriya, eksperiment, tekhnika, perspektivy: monogr* [Nanotechnology: theory, experiment, technology and prospects] – Kiev, Izd. tsentr Mezhdunar. akademii nauk i innovats. tekhnologiy, 2012. 648 p.
10. Kostyuk, G. I. *Nanostruktury i nanopokrytiya: perspektivy i real'nost' ucheb.posobiye* [Nanostructures and nanocoating: Prospects and Reality] – Kharkiv, Nats. aerokosm. un-t «Khar'k. aviats. in-t », 2009. 406 p.
11. Kostyuk, G. I. *Effektivnyy rezhushchiy instrument s pokrytiyem i uprochnennym sloyem: monogr.-sprav* [Effective cutting tool coated with a layer of reinforced] – Kharkiv, Nats. aerokosm. un-t «Khar'k. aviats. in-t », 2007. 633 p.

Поступила (received) 15.04.2017