

Научные основы создания высокоэнтропийных нитридных, карбидных, боридных и оксидных нанопокровтий на твёрдом сплаве T12A

*Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского
«Харьковский авиационный институт»*

Исследована возможность создания высокоэнтропийных нитридных, карбидных, боридных и оксидных нанопокровтий на твёрдом сплаве T12A на основе гафния, циркония, молибдена, вольфрама, иттрия и никеля. Проведено исследование получения покровтий и 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 и ионов азота и глубины их залегания, что позволяет оценить слои наноструктур из соединений и элементов или субмикроструктур, которые могут быть образованы этими высокоэнтропийными покровтиями. Показано, что есть возможность избежать получения интерметаллидов благодаря высокой подвижности ионов азота, углерода, бора и кислорода.

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

Введение

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

Всё это свидетельствует об актуальности и своевременности создания теории получения наноструктурных высокоэнтропийных покровтий на материале режущих инструментов.

Появление нового класса материалов – высокоэнтропийных сплавов, их применение может существенно улучшить физико-механические характеристики деталей и режущего инструмента (РИ), но в них входят дорогостоящие составляющие: гафний, цирконий, вольфрам, молибден и другие редкоземельные металлы. Используя эти металлы, можно создавать нитридные, карбидные, боридные и оксидные покровтия на поверхности РИ, и их характеристики могут быть такими же или даже выше, чем у высокоэнтропийных сплавов.

Необходимо, чтобы в составе высокоэнтропийных сплавов было минимум пять 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, для таких покровтий появляются новые возможности, о которых мы ещё и не подозреваем, так как они могут создавать твёрдые растворы, обладающие сверхвысокими физико-механическими характеристиками, и образовывать интерметаллиды, обладающие высокой пластичностью, что при их малом количестве способствуют реализации свойства покровтий, которые будут эффективно противостоять удар-

ным нагрузкам. Всё это свидетельствует о своевременности и важности проводимых исследований. Учитывая адгезионные взаимодействия соответствующих 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. Это повысит с учётом образования наноструктур (НС) работоспособность и эффективность режущих инструментов.

Работа выполнена в рамках программы Министерства образования и науки Украины «Новые 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 учётом 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», хоздоговорных работ и договоров о сотрудничестве.

1. Состояние вопроса

В настоящее время широко рассматривается вопрос о создании высокоэнтропийных сплавов, которые могут найти применение в технике благодаря высокой твёрдости, прочности при значительных температурах, существенно меньшей ползучести по сравнению с традиционными конструкционными материалами, что тоже является важной характеристикой [1–5]. В то же время вопрос получения НС как в высокоэнтропийных сплавах, так и в покрытиях из составляющих этих сплавов, даже экспериментально практически не изучен (существуют отрывочные данные о возможности получения НС), а теоретических работ по получению НС, за исключением наших [6–11], нет.

Всё это свидетельствует о том, что есть существенная необходимость в развитии работ по получению покрытий из нитридов, карбидов, боридов, оксидов и других твёрдых соединений в случае образования высокоэнтропийного покрытия.

2. Результаты расчётов и их обсуждение

Была исследована возможность создания высокоэнтропийных нитридных, карбидных, боридных и оксидных покрытий на твёрдом сплаве Т12А, рассмотрена возможность нанесения нитридов, карбидов, боридов и оксидов гафния, циркония, молибдена, вольфрама, иттрия и никеля. Для этого на основе совместной задачи теплопроводности и термоупругости определяли 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 показаны на рис. 1. Видно, что объём для малых энергий порядка 200 эВ соответствует нанозерну, тогда как при больших энергиях он их превышает (рис. 1, а), глубины залегания объёма в первом случае лежат в диапазоне

$8,6 \cdot 10^{-10} \dots 3,9 \cdot 10^{-9}$ м – минимальные (рис.1, б) и $2,7 \cdot 10^{-9} \dots 6,8 \cdot 10^{-9}$ м – максимальные (рис.1, в).

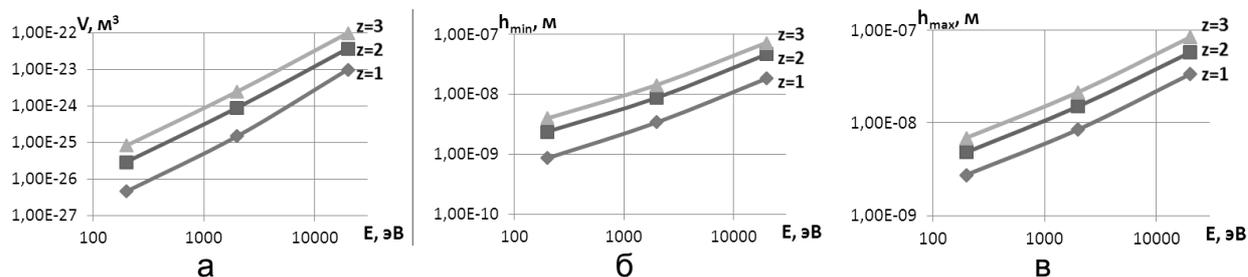


Рис. 1. Зависимости объема нанокластера (НК) (а), минимальной (б) и максимальной (в) глубины залегания НК при действии ионов азота (N^+) с различным зарядом ($z = 1, z = 2, z = 3$) для T12A

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

Для углерода зависимости объема зерна (рис. 2, а), минимальной (рис. 2, б) и максимальной (рис. 2, в) глубин 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, тогда как вблизи 20 КэВ вероятность его образования невысока, а при зарядовых числах 2 и 3 вообще невозможна. Диапазон минимальных глубин залегания составляет величины $1,2 \cdot 10^{-9} \dots 9,29 \cdot 10^{-8}$ м, а максимальные – $2,94 \cdot 10^{-9} \dots 1,07 \cdot 10^{-7}$ 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 субмикрозерно.

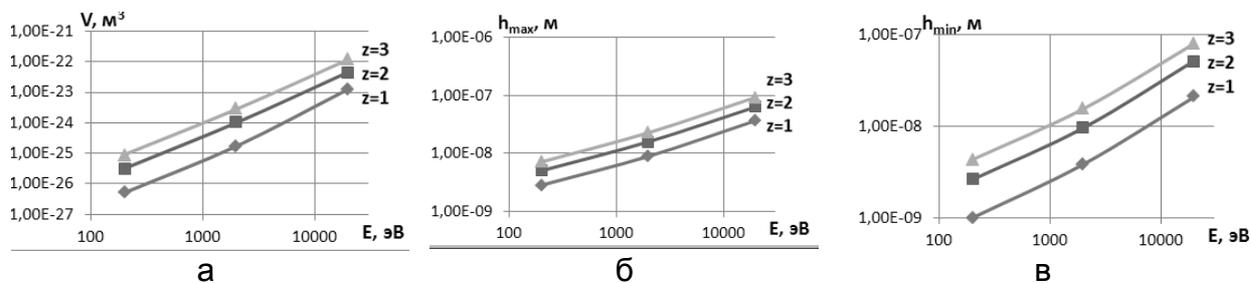


Рис. 2. Зависимости объема НК (а), минимальной (б) и максимальной (в) глубины залегания НК при действии ионов углерода (C^+) с различным зарядом ($z = 1, z = 2, z = 3$) для T12A

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

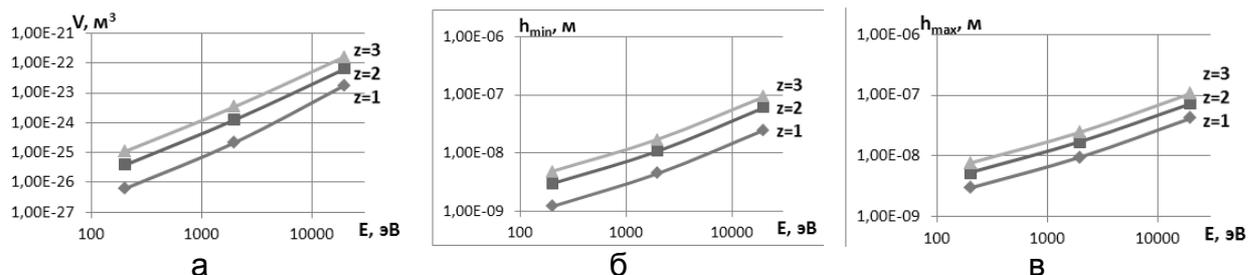


Рис. 3. Зависимости объёма НК (а), минимальной (б) и максимальной (в) глубины залегания НК при действии ионов бора (B^+) с различным зарядом ($z = 1, z = 2, z = 3$) для Т12А

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

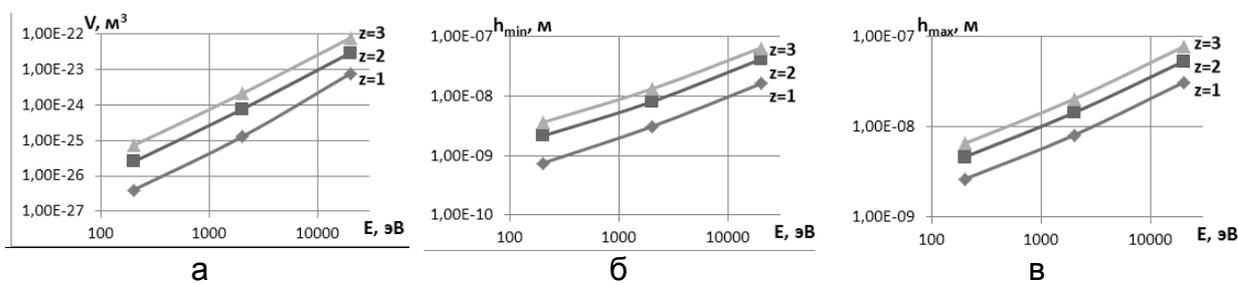


Рис. 4. Зависимости объёма НК (а), минимальной (б) и максимальной (в) глубины залегания НК при действии ионов кислорода (O^+) с различным зарядом ($z = 1, z = 2, z = 3$) для Т12А

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 %. Потом оцениваем скважность 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 будет слой из соединений, элементов или 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 показаны все три зависимости. Видно, что объём, соответствующий НС, реализуется до энергии ионов порядка 700...800 эВ и

глубины: для минимальной $0 \dots 2,2 \cdot 10^{-8}$ м; для максимальной – $1,8 \cdot 10^{-9} \dots 3,2 \cdot 10^{-8}$ м. Видно, что с ростом массы иона объёмы НС и глубины их залегания существенно уменьшаются. Эта тенденция прослеживается практически для всех рассмотренных ионов. Для того, чтобы образовались нитриды, необходимо, чтобы заряд и энергия ионов азота были такими, а глубина его залегания была близка полученным для гафния (ср. рис. 1 и 5).

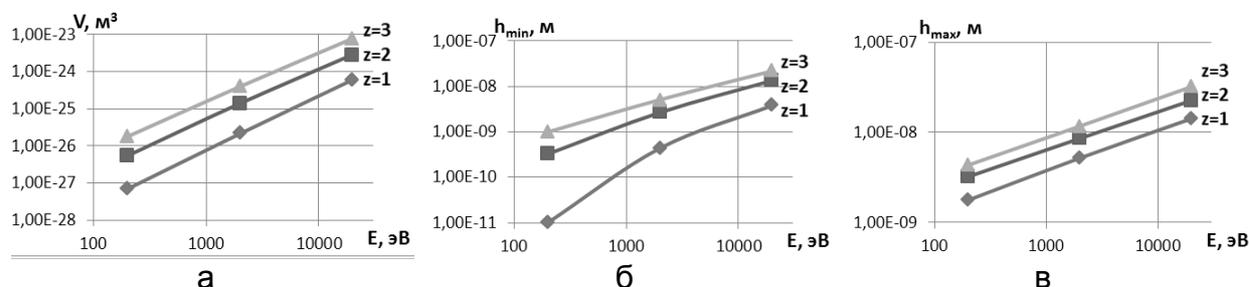


Рис. 5. Зависимости объёма НК (а), минимальной (б) и максимальной (в) глубины залегания НК при действии ионов гафния (Hf^+) с различным зарядом ($z = 1, z = 2, z = 3$) для Т12А

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 – $0 \dots 6,3 \cdot 10^{-10}$ м; максимальная – $3,34 \cdot 10^{-9} \dots 5,43 \cdot 10^{-9}$ м. При 2000 эВ минимальные – $6,37 \cdot 10^{-10} \dots 5,37 \cdot 10^{-9}$ м; максимальные – $5,4 \cdot 10^{-9} \dots 1,25 \cdot 10^{-8}$ м. Для 20 КэВ минимальная глубина залегания – $4,6 \cdot 10^{-9} \dots 2,48 \cdot 10^{-8}$ м; максимальная – $1,54 \cdot 10^{-8} \dots 3,52 \cdot 10^{-8}$ м.

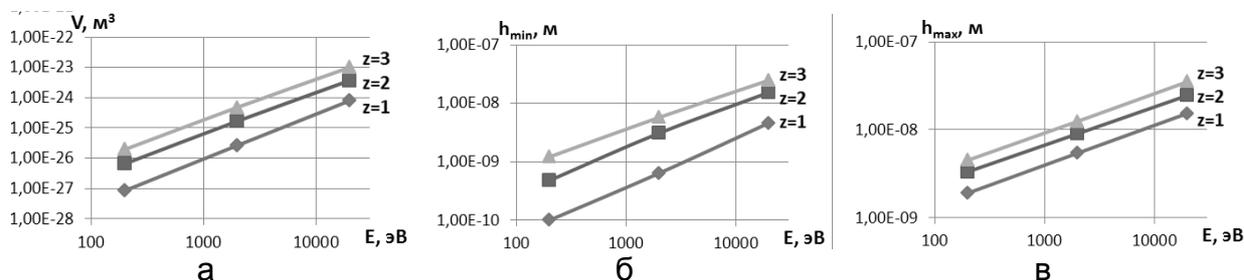


Рис. 6. Зависимости объёма НК (а), минимальной (б) и максимальной (в) глубины залегания НК при действии ионов циркония (Zr^+) с различным зарядом ($z = 1, z = 2, z = 3$) для Т12А

Из сравнения глубин залегания НС для ионов гафния и циркония с проникновением ионов азота видим, что многие энергии азота не могут быть использованы, так как глубина их проникновения больше, и во многих из режимов не будут образовываться нитриды, карбиды, бориды и оксиды, 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 высокоэнтропийных нитридных покрытий с хорошими характеристиками.

Для молибдена (Mo^+) глубины залегания НС при энергии 200 эВ составляют: минимальная – $0 \dots 1,18 \cdot 10^{-9}$ м, максимальная – $1,89 \cdot 10^{-9} \dots 4,49 \cdot 10^{-9}$ м. При энергии 2000 эВ: минимальная – $6,12 \cdot 10^{-10} \dots 5,65 \cdot 10^{-9}$ 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).

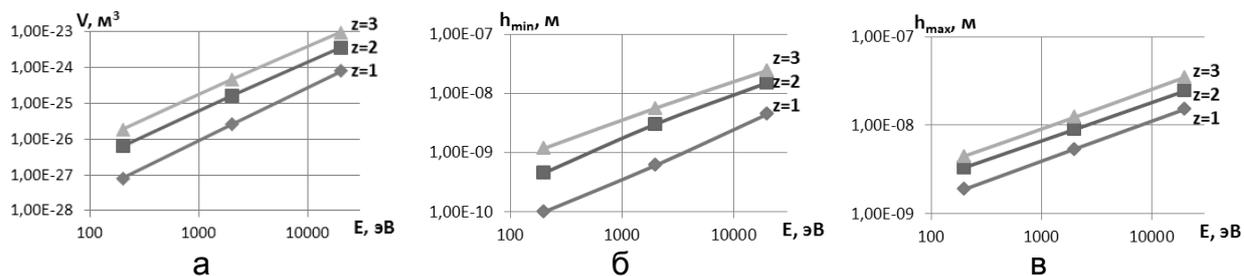


Рис. 7. Зависимости объёма НК (а), минимальной (б) и максимальной (в) глубины залегания НК при действии ионов молибдена (Mo^+) с различным зарядом ($z = 1, z = 2, z = 3$) для T12A

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

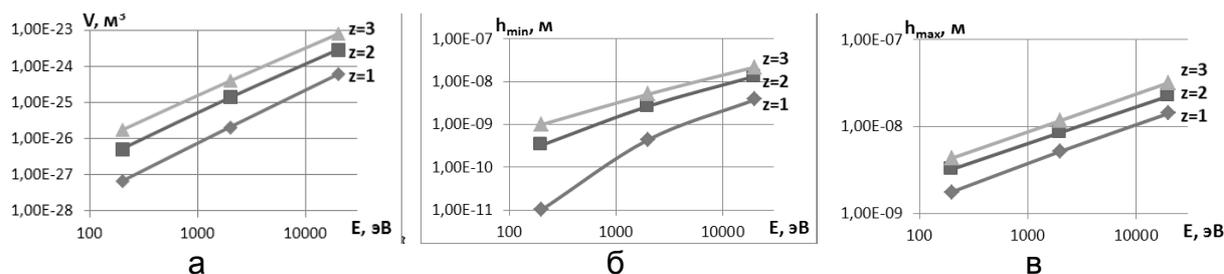


Рис. 8. Зависимости объёма НК (а), минимальной (б) и максимальной (в) глубины залегания НК при действии ионов вольфрама (W^+) с различным зарядом ($z = 1, z = 2, z = 3$) для T12A

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

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

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

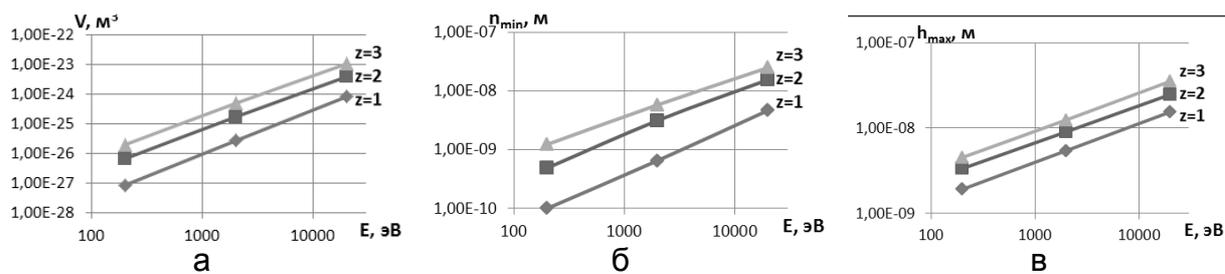


Рис. 9. Зависимости объёма НК (а), минимальной (б) и максимальной (в) глубины залегания НК при действии ионов иттрия (Y^+) с различным зарядом ($z = 1, z = 2, z = 3$) для T12A

Для никеля (Ni^+) зависимости объёма НС и минимальной и максимальной глубины залегания показаны на рис. 10. Глубины залегания НС при энергии 200 эВ составляют: минимальная – $0 \dots 1,52 \cdot 10^{-9}$ м, максимальная – $2,1 \cdot 10^{-9} \dots 4,79 \cdot 10^{-9}$ м. При энергии 2000 эВ : минимальная – $9,24 \cdot 10^{-10} \dots 6,63 \cdot 10^{-9}$ м; максимальная – $5,77 \cdot 10^{-9} \dots 1,35 \cdot 10^{-8}$ м. При 20 КэВ : минимальная – $5,7 \cdot 10^{-9} \dots 2,87 \cdot 10^{-8}$ м; максимальная – $1,7 \cdot 10^{-8} \dots 3,95 \cdot 10^{-8}$ м.

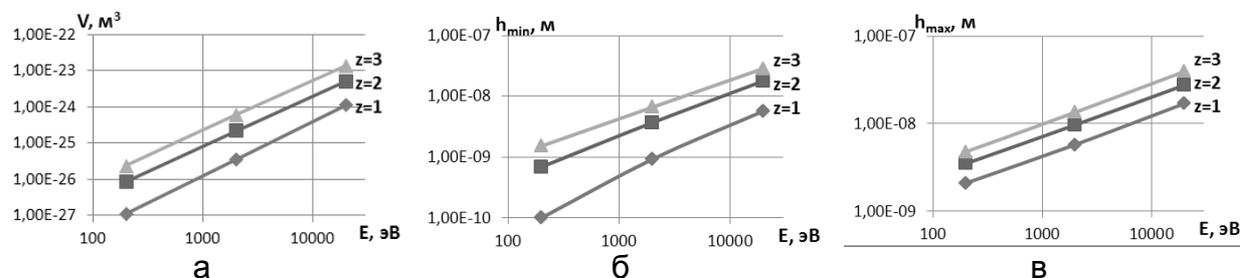


Рис. 10. Зависимости объёма НК (а), минимальной (б) и максимальной (в) глубины залегания НК при действии ионов никеля (Ni^+) с различным зарядом ($z = 1, z = 2, z = 3$) для T12A

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 незначительно 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 вследствие снижения модуля упругости. Это позволяет выдерживать высокие нагрузки в зоне упругости, т. е. при больших деформациях мы имеем невысокие напряжения.

Была рассмотрена возможность образования нитридов с учётом пространственного характера действия ионов азота и основных металлов. Реализовать высокоэнтропийное покрытие с шестью металлами можно в установке ВУ2-МБС, где есть четыре испарителя, в двух из которых будут находиться катоды из чистых металлов, а в остальных двух — двухкомпонентные катоды. Так, например, если один из катодов будет из ЦГ20 (20% Hf +80% Zr), для того, чтобы обеспечить получение высокоэнтропийного покрытия, необходимо, чтобы гафния было 7,5 %, а циркония 30 % – максимально возможное количество одного компонента в высо-

коэнтропийном покрытии. Тогда расчёты показывают, что остальные элементы должны составлять 15,6225 % как в двух однокомпонентных катодах, так и в двух компонентном катоде.

Проведённые расчёты показывают, что время работы катода с материалом ЦГ20 должно быть в четыре раза меньше, чем время действия работы остальных, что позволит обеспечить требуемое соотношение компонентов. Работа этого катода должна быть периодической, чтобы обеспечить получение соответствующих соотношений компонентов в высокоэнтропийном нитридном, карбидном, боридном и оксидном покрытии с минимальным количеством интерметаллидов и аморфной фазы.

Проведя эти расчёты, выберем последовательность слоёв: на поверхности должен быть слой из соединения, имеющего минимум адгезионного взаимодействия с обрабатываемым материалом [7]. Остальные слои располагаются с учётом требуемого режима работы РИ (обработка высокопрочных и закалённых сталей; характер резания – непрерывный, прерывистый и др.).

Алгоритм выбора режимов получения высокоэнтропийного нитридного, карбидного, боридного и оксидного покрытий будет следующим:

1. Определив последовательность слоёв соединений по глубине и используя графики (рис. 1–10), выбираем энергии ионов азота, углерода, бора и кислорода и соответствующие им энергии ионов гафния, циркония, молибдена, вольфрама, иттрия и никеля, при которых глубины их залегания будут близки для получения соединений на необходимой глубине.

2. Оцениваем толщины слоёв для соответствующих энергий и зарядового числа, например, для случая справедливости сферической геометрии зерна (схема показана на рис. 11), для которого путём простейших геометрических преобразований получим время образования слоя

$$t_i = \frac{e}{V_i} \cdot \frac{(h_i - h_{i-1})}{j_{\text{эф}}}, \quad (1)$$

где e – заряд электрона;

V_i – объём зерна;

h_i и h_{i-1} – координаты окончания и начала слоя;

$j_{\text{эф}}$ – эффективная плотность тока, которая равна первой критической

плотности $j_{\text{эф}} = j_{\text{кр}}^{\text{I}}$ [12] или возможной для данной установки $j_{\text{эф}} = j_{\text{ву}}$.

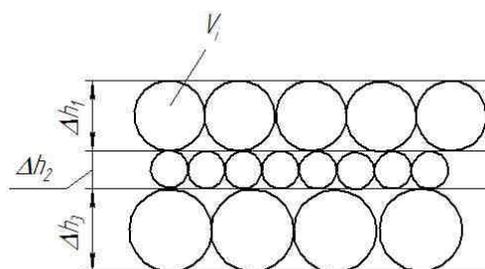


Рис. 11. Схема расположения слоёв по глубине в предположении сферической геометрии зерна

В предположении цилиндрической геометрии зерна, используя простые геометрические преобразования, получаем

$$t_i = \frac{16 \cdot \pi \cdot e}{9 \cdot V_i^{2/3} \cdot j_{\text{Эф}}} \quad (2)$$

Обозначения аналогичны обозначениям выражения 1.

3. Определив время получения каждого из слоёв, обеспечиваем в технологии эти режимы, в дальнейшем замыкаем цепь, необходимую для реализации технологии: энергия ионов всех сортов, их заряд, необходимая плотность тока для ионов каждого сорта и время работы соответствующего источника ионов. В конечном счёте получаем пространственно-временную картину технологического процесса с рассчитанными параметрами зерна.

Видно, что необходимо обеспечить пространственно-временной закон распределения ионов в материале детали в целях получения эффективных высокоэнтропийных нитридных, карбидных, боридных и оксидных покрытий.

Выводы

В результате совместного действия всех рассмотренных видов ионов мы можем получить высокоэнтропийное покрытие, а с учётом действия ионов азота (выбрав соответствующую энергию ионов) — высокоэнтропийное нитридное, карбидное, боридное, оксидное наноструктурное покрытие.

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 путем управления установкой обеспечить соответствующий пространственно-временной закон распределения подачи ионов в материал РИ.

Предложен алгоритм выбора технологических режимов получения высокоэнтропийного нитридного, карбидного, боридного и оксидного нанопокрывтия с чередующимися слоями с учётом адгезионного взаимодействия поверхностного слоя с обрабатываемым материалом.

Список литературы

1. High-Entropy Alloys – A New Era of Exploitation / J. W. Yeh, Y. L. Chen, S. J. Lin, S. K. Chen // Materials Science Forum. – 2007. – Vol. 560. – P. 1–9.
2. Microstructures and properties of high-entropy alloys / Yong Zhang, Ting Ting Zuo, Zhi Tang, Michael C. Gao, Karin A. Dahmen, Peter K. Liaw, Zhao Ping Lu. – 2014. – P. 1–93.
3. Ивченко, М. В. Високоентропійні еквіатомні сплави AlCrFeCoNiCu: гіпотези и експериментальні факти / М. В. Ивченко, В. Г. Пушин, N. Wanderka // Журнал технічної фізики. – 2014. – Т. 84, вип. 2. – С.57–64.
4. Фазовый состав и свойства износостойких Ti-Al-Cr-Zr-Nb-N покрытий, полученных методом физического осаждения из газовой фазы / И. В. Блинков,

А. О. Волхонский, В. Н. Аникин и др.// Физика и химия обработки материалов. – 2010. – Т. 37.– С. 37–44.

5. Структура и свойства высокоэнтропийных сплавов и нитридных покрытий на их основе / А. Д. Погребняк, А. А. Багдасарян, И. В. Якущенко, В. М. Береснев // Успехи химии. – 2014. – № 83 (11). – С.1027–1061.

6. Костюк, Г. И. Эффективный режущий инструмент с нанопокрывтиями и наноструктурными модифицированными слоями : моногр.-справ. : в 2 кн. /

7. Г. И. Костюк. – Х. : «Планета-Принт», 2016. – Кн.1. Плазменно-ионные и ионно-лучевые технологии. – 735 с.

8. Костюк, Г. И. Эффективные покрытия и модифицированные упрочненные слои на режущих инструментах : моногр.-справ. / Г. И. Костюк. – К. : Изд. центр Междунар. академии наук и инновац. технологий, 2012. – 728 с.

9. Костюк, Г. И. Нанотехнологии: выбор технологических параметров и установок, производительность обработки, физико-механические характеристики наноструктур : моногр. / Г. И. Костюк. – К. : Изд. центр Междунар. академии наук и инновац. технологий, 2014. – 472 с.

10. Костюк, Г. И. Нанотехнологии: теория, эксперимент, техника, перспективы: моногр. / Г. И. Костюк. – К. : Изд. центр Междунар. академии наук и инновац. технологий, 2012. – 648 с.

11. Костюк, Г. И. Наноструктуры и нанопокрывтия: перспективы и реальность: учеб.пособие / Г. И. Костюк. – Х. : Нац. аэрокосм. ун-т «Харьк. авиац. ин-т», 2009. – 406 с.

12. Костюк, Г. И. Эффективный режущий инструмент с покрытием и упрочненным слоем : моногр.-справ. / Г. И. Костюк. – Х. : Нац. аэрокосм. ун-т «Харьк. авиац. ин-т», 2007. – 633 с.

13. Костюк, Г. И. Физико-технические основы нанесения покрытий, ионной имплантации и ионного легирования, лазерной обработки и упрочнения, комбинированных технологий : моногр. : в 2 кн. / Г. И. Костюк. – К. : АИНУ, 2002. – 1030 с.

Поступила в редакцию 16.03.2017

Наукові основи створення високоентропійних нітридних, карбідних, боридних та оксидних нанопокриттів на твердому сплаві T12A

Було досліджено можливість створення високоентропійних нітридних, карбідних, боридних та оксидних нанопокриттів на твердому сплаві T12A на основі гафнію, цирконію, молібдену, вольфраму, ітрію і нікелю. Проведено дослідження отримання нітридних, карбідних, боридних та оксидних покриттів і нітридів, карбідів, боридів, оксидів безпосередньо в тілі матеріалу при енергіях іонів у діапазоні від 200 до $2 \cdot 10^4$ eV із зарядовими числами від 1 до 3. Отримано важливі характеристики: об'єм зерна для всіх перерахованих іонів та іонів азоту, вуглецю, бору та кисню 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 інтерметалідів завдяки високій рухливості іонів азоту.

Ключові слова: високоентропійні покриття, субмікроструктури, наноструктури, твердий розчин, інтерметаліди, нітриди, бориди, карбіди, оксиди.

Scientific Foundations for the Creation of Highly Entropic Nitride, Carbide, Boride and Oxide Nanocoatings on Solid Alloy T12A

The possibility of creating highly entropic nitride, carbide, boride and oxide nanocoatings 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, carbide, boride and oxide coatings and 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 were obtained: the grain volume for all the ions and nitrogen, carbon, boron and oxygen 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, carbides, borides and oxides.

Сведения об авторах

Костюк Геннадий Игоревич – профессор, д-р техн. наук, профессор Национального аэрокосмического университета им. Н. Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт», Харьков, Украина.

Сысоев Юрий Александрович – с.н.с., д-р техн. наук, профессор Национального аэрокосмического университета им. Н. Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт», Харьков, Украина.

Мелкозерова Ольга Михайловна – канд. техн. наук, старший преподаватель Национального аэрокосмического университета им. Н.Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт», Харьков, Украина.