

УДК 621.9.044

Г. И. КОСТЮК, И. В. КАНТЕМИР

*Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «ХАИ», Украина*

## НАУЧНЫЕ ОСНОВЫ СОЗДАНИЯ ВЫСОКОЭНТРОПИЙНЫХ КАРБИДНЫХ И ОКСИДНЫХ НАНОПОКРЫТИЙ НА СВЕРХТВЕРДОМ МАТЕРИАЛЕ КОРТИНИТ

*В работе была исследована возможность создания высокоэнтропийных карбидных и оксидных нанопокровтий на сверхтвёрдом материале Кортинит на основе гафния, циркония, молибдена, вольфрама, иттрия и никеля. Проведено исследование получения покрытий карбидов 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 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 углерода и кислорода.*

**Ключевые слова:** высокоэнтропийные покрытия, субмикроструктуры, наноструктуры, твёрдый раствор, интерметаллиды, карбиды, оксиды.

### Введение

Исследования высокоэнтропийных сплавов показали, что они, благодаря образованию твёрдых растворов, имеют высокую твёрдость и обладают другими высокими физико-механическими характеристиками [1–2]. Есть попытки создавать покрытия из высокоэнтропийных сплавов [3] и даже экспериментально получать нитриды на основе высокоэнтропийных сплавов, но теоретических работ в области создания слоёв из карбидных 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 деталей и режущего инструмента (РИ), но в них входят дорогостоящие составляющие: гафний, цирконий, вольфрам, молибден и другие редкоземельные металлы. Используя эти металлы, можно создавать карбидные 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 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 сверхвысокими физико-механическими характеристиками, так и образовывать интерметаллиды, которые обладают высокой пластичностью, при их малом количестве покрытия, которые будут эффективно противостоять ударным нагрузкам. Всё это говорит о своевременности и важности проводимых исследований. Учитывая адгезионные взаимодействия соответствующих карбидов 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 (НС) работоспособность и эффективность режущих инструментов.

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

учёт 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.

### Состояние вопроса

В настоящее время широко рассматривается 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 [1–4]. В то же 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 [5–10], нет.

Всё это говорит о том, что есть существенная необходимость в развитии работ по получению покрытий из карбидов и оксидов соединений в случае образования высокоэнтропийного покрытия. Вышеизложенное говорит о важности и актуальности проводимых теоретических исследований в направлении получения высокоэнтропийных карбидных и оксидных наноструктурных покрытий.

### Результаты расчётов и их обсуждение

Была исследована возможность создания высокоэнтропийных карбидных и оксидных покрытий на сверхтвёрдом материале (СТМ) Кортините, рассматривалась возможность нанесения карбидов 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 – углерода и кислорода.

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. 1 а), минимальной (рис. 1 б) и максимальной (рис. 1 в) глубины залегания позволяют получить пространственную картину образования зерна в зоне действия иона углерода. Видно, что нанозерно мо-

жет 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  $9,09 \cdot 10^{-10} \dots 8,79 \cdot 10^{-8}$  м, а максимальные –  $3,13 \cdot 10^{-9} \dots 9,64 \cdot 10^{-8}$  м (рис. 1). Видно, что в этом случае достигается максимальная глубина зоны, где образуется зерно, увеличивается практически до единиц микрометров, в последнем случае образует субмикрзерно.

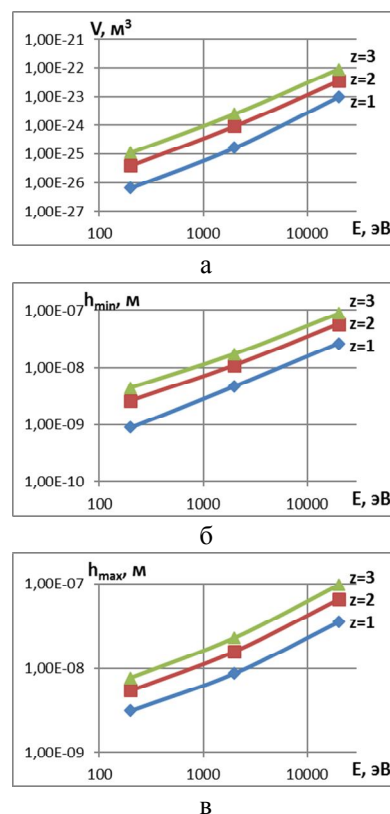


Рис. 1. Зависимости объёма НК (а), минимальной (б) и максимальной (в) глубины залегания НК при действии ионов углерода (С<sup>+</sup>) с различным зарядом (z = 1, z = 2, z = 3) для СТМ Кортинита

Переход к ионам кислорода (для образования оксидов) приводит к существенному снижению размера зерна до  $2,21 \cdot 10^{-9} \dots 4,68 \cdot 10^{-8}$  м, последнее значение уже соответствует субмикрзерну (рис. 2 а). Диапазон глубин залегания зерна:  $7,19 \cdot 10^{-10} \dots 6,95 \cdot 10^{-8}$  м – минимальные (рис. 2 б) и  $2,93 \cdot 10^{-9} \dots 7,75 \cdot 10^{-8}$  м – максимальные (рис. 2 в) значения.

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, что-

бы циркония было не более 30 %, а потом оцениваем скважность импульсов напряжения на испарителе с катодом ЦГ 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).

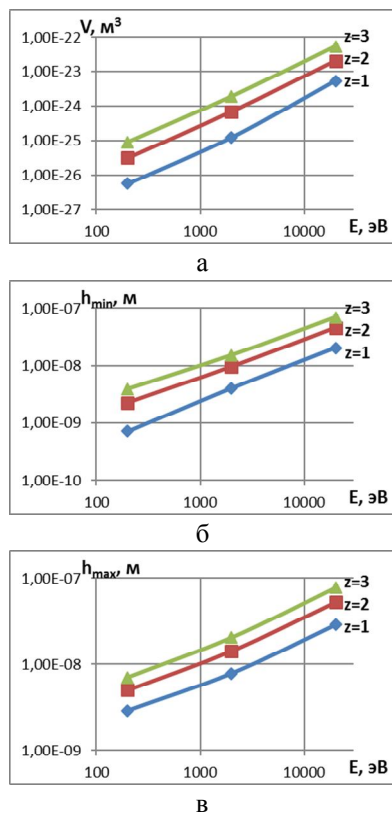


Рис. 2. Зависимости объёма НК (а), минимальной (б) и максимальной (в) глубины залегания НК при действии ионов кислорода (O+) с различным зарядом ( $z = 1, z = 2, z = 3$ ) для СТМ Кортинита

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 демфирующего деформацию первого слоя. Последующие слои могут быть из химических соединений.

На рис. 3 для ионов гафния представлены все три зависимости. Видно, что объём, соответствующий НС реализуется до энергии ионов порядка 700–

800 эВ и глубины: для минимальной  $7,44 \cdot 10^{-10} \dots 5,21 \cdot 10^{-8}$  м; для максимальной –  $2,96 \cdot 10^{-9} \dots 5,94 \cdot 10^{-8}$  м. Видно, что с ростом массы иона объёмы НС и глубины их залегания существенно уменьшаются. Эта тенденция прослеживается практически для всех рассмотренных ионов.

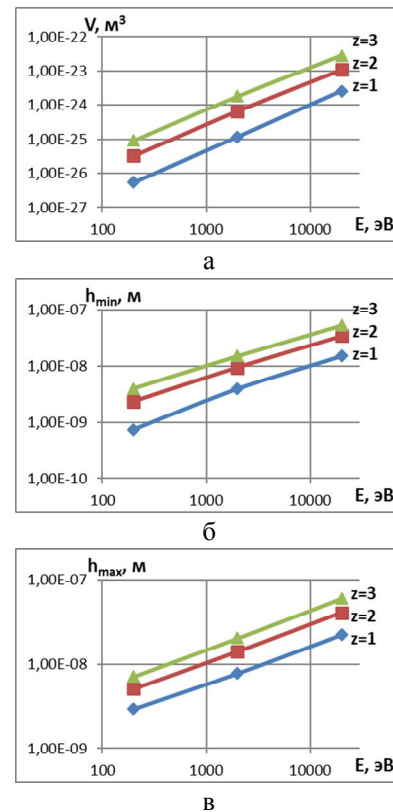


Рис. 3. Зависимости объёма НК (а), минимальной (б) и максимальной (в) глубины залегания НК при действии ионов гафния (Hf+) с различным зарядом ( $z = 1, z = 2, z = 3$ ) для СТМ Кортинита

Перейдя к зависимостям для циркония (Zr+) (рис. 4), получим, что практически для всех исследуемых энергий реализуются НС. Диапазоны глубины залегания составляют: минимальная –  $5,22 \cdot 10^{-10} \dots 4,6 \cdot 10^{-8}$  м (рис. 4 б); максимальная –  $2,72 \cdot 10^{-9} \dots 5,29 \cdot 10^{-8}$  м (рис. 4 в).

Для молибдена (Mo+) глубины залегания НС при энергии 200 эВ составляют: минимальная –  $5,32 \cdot 10^{-10} \dots 3,34 \cdot 10^{-9}$  м, максимальная –  $2,73 \cdot 10^{-9} \dots 6,45 \cdot 10^{-9}$  м. При энергии 2000 эВ: минимальная –  $3,32 \cdot 10^{-9} \dots 1,3 \cdot 10^{-8}$  м; максимальная –  $7,02 \cdot 10^{-9} \dots 1,81 \cdot 10^{-8}$  м. При 20 КэВ: минимальная –  $1,31 \cdot 10^{-8} \dots 4,62 \cdot 10^{-8}$  м; максимальная –  $2,00 \cdot 10^{-8} \dots 5,32 \cdot 10^{-8}$  м (рис. 5).

Для ионов вольфрама (W+) представлены аналогичные графики (рис. 6). Глубины залегания НС при энергии 200 эВ составляют: минимальная –  $7,56 \cdot 10^{-10} \dots 4,01 \cdot 10^{-9}$  м, максимальная –

$2,97 \cdot 10^{-9} \dots 7,16 \cdot 10^{-9}$  м. При энергии 2000 эВ: минимальная –  $3,98 \cdot 10^{-9} \dots 1,51 \cdot 10^{-8}$  м; максимальная –  $7,80 \cdot 10^{-9} \dots 2,03 \cdot 10^{-8}$  м. При 20 КэВ: минимальная –  $1,51 \cdot 10^{-8} \dots 5,24 \cdot 10^{-8}$  м; максимальная –  $2,23 \cdot 10^{-8} \dots 5,98 \cdot 10^{-8}$  м.

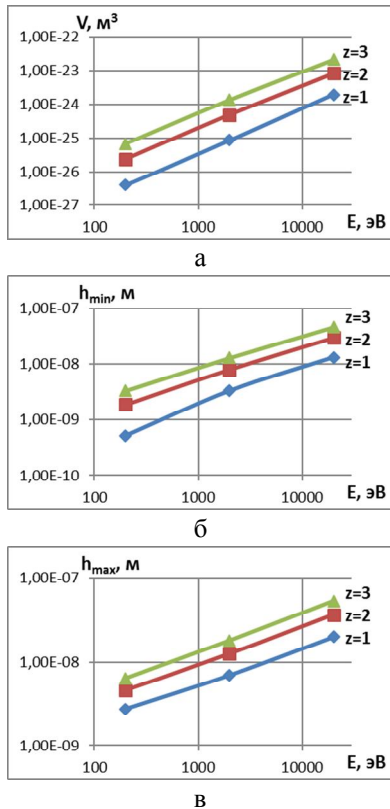


Рис. 4. Зависимости объёма НК (а), минимальной (б) и максимальной (в) глубины залегания НК при действии ионов циркония ( $Zr^+$ ) с различным зарядом ( $z = 1, z = 2, z = 3$ ) для СТМ кортинита

Для ионов иттрия ( $Y^+$ ) аналогичные зависимости представлены на рис. 7. Глубины залегания НС при энергии 200 эВ составляют: минимальная –  $5,18 \cdot 10^{-10} \dots 3,29 \cdot 10^{-9}$  м, максимальная –  $2,72 \cdot 10^{-9} \dots 6,42 \cdot 10^{-9}$  м. При энергии 2000 эВ: минимальная –  $3,27 \cdot 10^{-9} \dots 1,28 \cdot 10^{-8}$  м; максимальная –  $6,98 \cdot 10^{-9} \dots 1,79 \cdot 10^{-8}$  м. При 20 КэВ: минимальная –  $1,3 \cdot 10^{-8} \dots 4,58 \cdot 10^{-8}$  м; максимальная –  $1,99 \cdot 10^{-8} \dots 5,29 \cdot 10^{-8}$  м (рис. 6).

Для никеля ( $Ni^+$ ) зависимости объёма НС и минимальной и максимальной глубины залегания представлены на рис. 8. Глубины залегания НС при энергии 200 эВ составляют: минимальная –  $4,43 \cdot 10^{-10} \dots 3,06 \cdot 10^{-9}$  м, максимальная –  $2,63 \cdot 10^{-9} \dots 6,17 \cdot 10^{-9}$  м. При энергии 2000 эВ: минимальная –  $3,06 \cdot 10^{-9} \dots 1,21 \cdot 10^{-8}$  м; максимальная –  $6,71 \cdot 10^{-9} \dots 1,72 \cdot 10^{-8}$  м. При 20 КэВ: минимальная –  $1,25 \cdot 10^{-8} \dots 4,44 \cdot 10^{-8}$  м; максимальная –  $1,94 \cdot 10^{-8} \dots 5,13 \cdot 10^{-8}$  м.

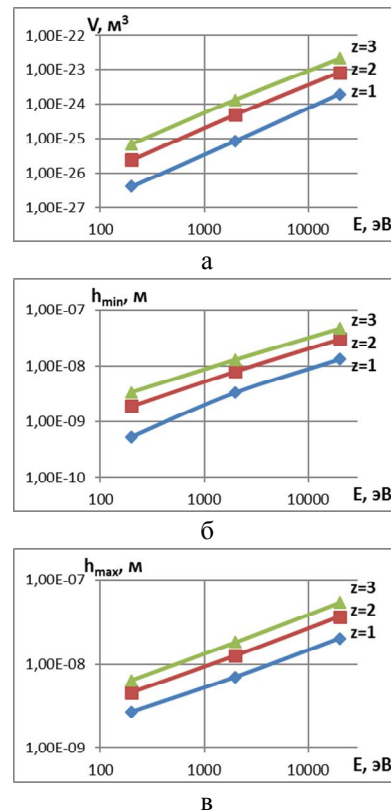


Рис. 5. Зависимости объёма НК (а), минимальной (б) и максимальной (в) глубины залегания НК при действии ионов молибдена ( $Mo^+$ ) с различным зарядом ( $z = 1, z = 2, z = 3$ ) для СТМ Кортинита

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, которые при наноструктурном зерне имеют 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 невысокие напряжения.

Мы рассмотрели возможность образования карбидов и оксидов с учётом пространственного характера действия основных металлов. Реализовать высокоэнтропийное покрытие с 6-ю 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% $Hf$ +80% $Zr$ ), для того чтобы обеспечить получение высокоэнтропийного покрытия необходимо, чтобы гафния было 7,5 %, а

циркония 30 % – максимально возможное количество одного компонента в высокоэнтропийном покрытии. Тогда расчёты показывают, что остальные элементы должны составлять 15,62 % как в 2-х однокомпонентных катодах, так и в 2х компонентном катоде.

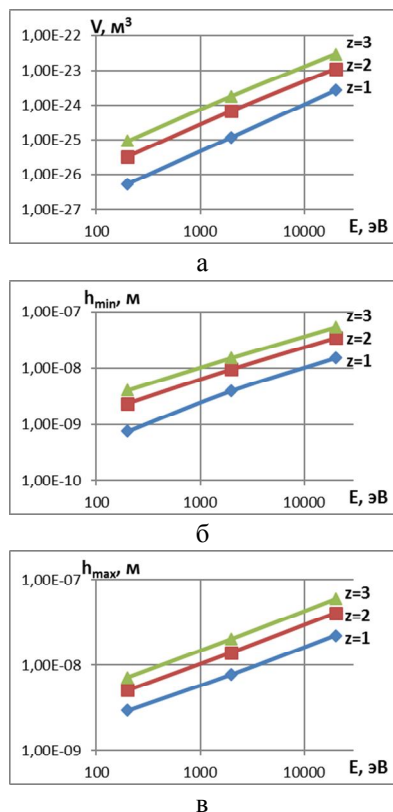


Рис. 6. Зависимости объёма НК (а), минимальной (б) и максимальной (в) глубины залегания НК при действии ионов вольфрама ( $W^+$ ) с различным зарядом ( $z = 1, z = 2, z = 3$ ) для СТМ Кортинита

Проведённые расчёты показывают, что время работы катода с материалом ЦГ20 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 соотношений компонентов в высокоэнтропийном карбидном 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.).

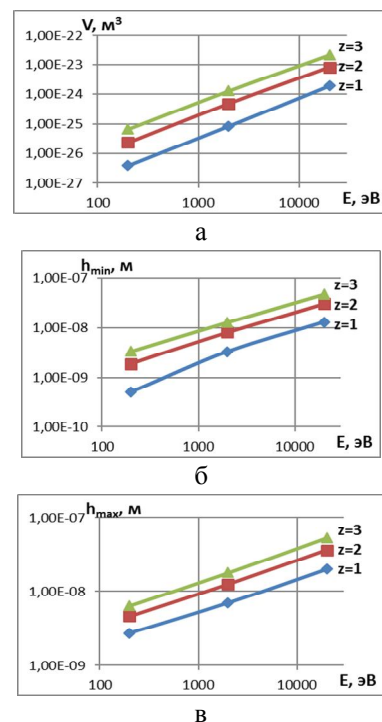


Рис. 7. Зависимости объёма НК (а), минимальной (б) и максимальной (в) глубины залегания НК при действии ионов иттрия ( $Y^+$ ) с различным зарядом ( $z = 1, z = 2, z = 3$ ) для СТМ кортинита

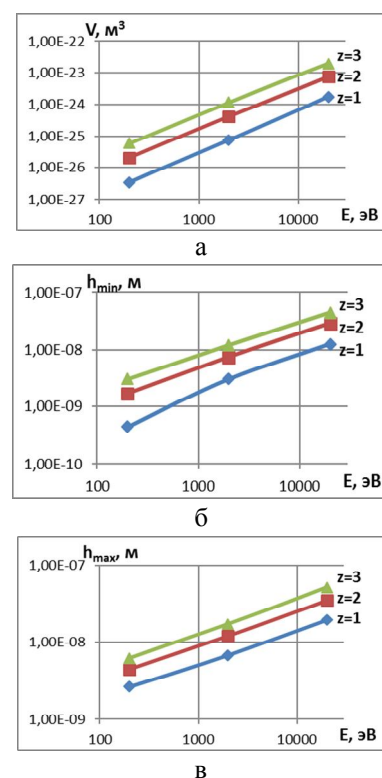


Рис. 8. Зависимости объёма НК (а), минимальной (б) и максимальной (в) глубины залегания НК при действии ионов никеля ( $Ni^+$ ) с различным зарядом ( $z = 1, z = 2, z = 3$ ) для СТМ кортинита

Алгоритм выбора режимов получения высокоэнтропийного карбидного и оксидного покрытия будет следующим:

1. Определив последовательность слоёв соединений по глубине и используя графики (рис. 1-8), выбираем энергии ионов углерода 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 цилиндрической геометрии зерна, для которого путём простейших геометрических преобразований получим время образования слоя

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

где  $e$  – заряд электрона;

$V_i$  – объём зерна;  $z$  – зарядовое число иона;

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

$j_{эф}$  – эффективная плотность тока, которая равна первой критической плотности  $j_{эф} = j_{кр}^I$  [11] или возможной для данной установки  $j_{эф} = j_{ву}$ .

В предположении сферической геометрии зерна, используя простые геометрические преобразования, получаем (схема представлена на рис. 9)

$$t_i = \sqrt[3]{\frac{16}{9 \cdot \pi \cdot V_i^2} \cdot \frac{e \cdot z}{j_{эф}}}. \quad (2)$$

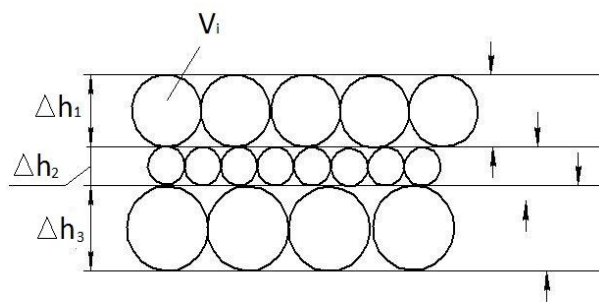


Рис. 9. Схема расположения слоёв по глубине в предположении сферической геометрии зерна

Обозначения аналогичны выражению 1.

3. Определив время получения каждого из слоёв, обеспечиваем в технологии эти режимы, в даль-

нейшем 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 с целью получения эффективных высокоэнтропийных карбидных и оксидных покрытий.

## Выводы

В результате совместного действия всех рассмотренных сортов ионов мы можем получить высокоэнтропийное покрытие, а с учётом действия ионов кислорода и углерода (выбрав соответствующую энергию ионов) получаем высокоэнтропийное карбидное и оксидное наноструктурное покрытие.

Благодаря созданию слоёв из высокоэнтропийных карбидных и оксидных наноструктурных покрытий и выбрав последовательность слоёв (первый на поверхности с учётом адгезионного взаимодействия с обрабатываемым материалом), мы можем конструировать эффективный режущий инструмент, обладающий высокой работоспособностью.

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

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

## Литература

1. *High-Entropy Alloys – A New Era of Exploitation [Text]* / J. W. Yeh, Y. L. Chen, S. J. Lin, S. K. Chen // *Materials Science Forum.* – 2007. – Vol. 560. – P. 1–9.
2. *Ивченко, М. В. Високоентропійні еквіатомні сплави AlCrFeCoNiCu: гіпотези і експериментальні факти [Текст]* / М. В. Ивченко, В. Г. Пушин, Н. Вандерка // *Журнал технічної фізики.* – 2014. – Т. 84, вип. 2. – С. 57–64.
3. *Фазовый состав и свойства износостойких Ti-Al-Cr-Zr-Nb-N покрытий, полученных методом физического осаждения из газовой фазы [Текст]* / И. В. Блинков, А. О. Волхонский, В. Н. Аникин, М. И. Петржик, Д. Е. Деревцова // *Физика и химия обработки материалов.* – 2010. – Т. 37. – С. 37–44.

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

5. Костюк, Г. И. Эффективный режущий инструмент с нанопокрываниями и наноструктурными модифицированными слоями [Текст] : монография-справочник : в 2 кн. / Г. И. Костюк. – Х. : «Планета-Принт», 2016. – Кн.1. – 735 с.

6. Костюк, Г. И. Эффективные покрытия и модифицированные упрочненные слои на режущих инструментах [Текст] : монография-справочник / Г. И. Костюк. – К. : Изд. центр Междунар. академии наук и инновац. технологий, 2012. – 728 с.

7. 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.

8. 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.

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

10. 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.

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

## References

1. Yeh, J. W., Chen, Y. L., Lin, S. J., Chen, S. K. *High-Entropy Alloys – A New Era of Exploitation*. Materials Science Forum. 2007, vol. 560, pp. 1–9.

2. Ivchenko, M. V., Pushin, V. G., Wanderka, N. Visokoentropijni ekvatomni splavi AlCrFeCoNiCu: gipotezi i eksperimental'ni fakti [Highly entropic equiatomic alloys AlCrFeCoNiCu: a hypothesis and experimental facts]. *Zhurnal tehnicnoi fiziki - Journal of Technical Physics*, 2014, vol. 84, no. 2, pp. 57–64.

3. Blinkov, I. V., Volhonskij, A. O., Anikin, V. N., Petrzhik, M. I., Derevcova, D. E. Fazovij sostav i svojstva iznosostoj-kih Ti-Al-Cr-Zr-Nb-N pokrytij,

poluchennyh meto-dom fizicheskogo osazhdenija iz gazovoj fazy [Phase composition and properties of wear-resistant coatings Ti-Al-Cr-Zr-Nb-N obtained by the method of physical deposition from the gas phase]. *Fizika i himija obrabotki materialov - Physics and chemistry of material processing*, 2010, vol. 37, pp. 37–44.

4. Pogrebnyak, A. D., Bagdasarjan, A. A., Jakushhenko, I. V., Beresnev, V. M. Struktura i svojstva vysokoentropijnih splavov i nitridnih pokrytij na ih osnov [Structure and properties of high-entropic alloys and nitride coatings based on them]. *Uspehi himii - Success of chemistry*, 2014, no. 83 (11), pp. 1027–1061.

5. Kostjuk, G. I. *Jeftektivnij rezhushhij instrument s nanopokrytijami i nanostrukturnymi modifitsirovannymi slojami: monografija-spravocnik* [Effective cutting tools with nanocoatings and nanostructured modified layers]. Kharkov, «Planeta-Print» Publ., 2016, book 1. 735 p.

6. Kostjuk, G. I. *Jeftektivnye pokrytija i modifitsirovannye uprochnennye sloi na rezhushhij instrumentah* [Effective coatings and modified reinforced layers on cutting tools]. Kiev, izd. centr Mezhdunar. akademii nauk i innovac. tehnologij Publ., 2012. 728 p.

7. Kostjuk, G. I. *Nanotehnologii: vybor tehnologicheskikh parametrov i ustanovok, proizvo-ditel'nost' obrabotki, fiziko-mehanicheckie ha-rakteristiki nano-struktur* [Nanotechnologies: selection of process parameters and plants, manufacturing efficiency, physical and mechanical properties of nanostructures]. Kiev, izd. centr Mezhdunar. akademii nauk i innovac. tehnologij Publ., 2014. 472 p.

8. Kostjuk, G. I. *Nanotehnologii: teorija, jeksperiment, tehnika, perspektivy* [Nanotechnologies: theory, experiment, technology, prospects]. Kiev, izd. centr Mezhdunar. akademii nauk i innovac. tehnologij Publ., 2012. 648 p.

9. Kostjuk, G. I. *Nanostrukturny i nano-pokrytija: perspektivy i real'nost'* [Nanostructures and nanocoating: prospects and reality]. Kharkov, Nats. Aerokosm. un-t «Khar'k. aviats. in-t» Publ., 2009. 406 p.

10. Kostjuk, G. I. *Jeftektivnij rezhushhij instrument s pokrytiem i uprochnennym sloem* [Efficient cutting tool with a coating and a reinforced layer]. Kharkov, Nats. Aerokosm. un-t «Khar'k. aviats. in-t» Publ., 2007. 633 p.

11. Kostjuk, G. I. *Fiziko-tehnicheckie os-novy nanesenija pokrytij, ionnoj implantacii i ionnogo legirovani, lazernoj obrabotki i uprochnenija, kombinirovannyh tehnologij* [Physical and technical basis of coating, ion implantation and ion doping, laser processing and hardening, combined technologies]. Kiev, AINU Publ., 2002, book 2. 1030 p.

**НАУКОВІ ОСНОВИ СТВОРЕННЯ ВИСОКОЕНТРОПІЙНИХ КАРБІДНИХ  
ТА ОКСИДНИХ НАНОПОКРИТТІВ НА НАДТВЕРДОМУ МАТЕРІАЛІ КОРТИНИТ**

*Г. І. Костюк, І. В. Кантемир*

В роботі було досліджено можливість створення високоентропійних карбідних і оксидних нанопокриттів на надтвердому матеріалі Кортинит на основі гафнію, цирконію, молібдену, вольфраму, ітрію і нікелю. Проведено дослідження отримання покриттів карбідів і оксидів безпосередньо в тілі матеріалу при енергіях іонів в діапазоні від 200 до  $2 \cdot 10^4$  eV з зарядовими числами від 1 до 3. Отримано важливі характеристики: об'єм зерна для всіх перерахованих іонів та глибини їх залягання, що дозволяє оцінити шари наноструктур із з'єднань і елементів або субмікроструктур, які можуть бути утворені цими високоентропійними покриттями. Показано, що є можливість уникнути отримання інтерметалідів завдяки високій рухливості іонів вуглецю і кисню.

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

**SCIENTIFIC FOUNDATIONS FOR THE CREATION OF HIGHLY ENTROPIC CARBIDE  
AND OXIDE NANOCOATINGS ON SUPERHARD MATERIAL CORTINITE**

*G. I. Kostjuk, I. V. Kantemyr*

The possibility of creating highly entropic carbide and oxide nanocoatings on superhard material Cortinitis 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.

**Костюк Геннадий Игоревич** – д-р техн. наук, профессор, профессор кафедры теоретической механики, машиноведения и роботомеханических систем, Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина.

**Кантемир Ирина Владимировна** – аспирант кафедры теоретической механики, машиноведения и роботомеханических систем, Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина, e-mail: i\_leona@rambler.ru.

**Kostyuk Gennady Igorevich** – Dr. of Tech. Sci., Professor, Professor of the Department of Theoretical Mechanics, Mechanical Engineering and Robotic-Mechanics Systems, National Aerospace University named by N. Ye. Zhukovsky "KhAI", Kharkov, Ukraine.

**Kantemyr Irina Vladimirovna** – post-graduate student of the Department of Theoretical Mechanics, Mechanical Engineering and Robotic-Mechanics Systems, National Aerospace University named by N. Ye. Zhukovsky "KhAI", Kharkov, Ukraine, e-mail: i\_leona@rambler.ru.