

УДК 865/6

Г.И. КОСТЮК, А.В. МАТВЕЕВ, Е.А. ВОЛЯК

О ВОЗМОЖНОСТИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЭНЕРГИИ ОБРАЗОВАНИЯ ЗЕРНА ПРИ ПОЛУЧЕНИИ НАНОСТРУКТУР В СЛУЧАЕ ДЕЙСТВИЯ ИОНОВ РАЗЛИЧНЫХ СОРТОВ, ЗАРЯДОВ И ЭНЕРГИЙ НА КОНСТРУКЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ

В работе рассмотрена возможность оценки энергии, потребной на кристаллизацию, т.е. образование зерна при получении наноструктур в случае действия ионов различных сортов, энергий и зарядов. На основе квантово-механического подхода с учетом кулоновского отталкивания и ионной связи найдены энергии кристаллизации кластера. Число частиц в кластере рассчитано на основе решения совместной задачи теплопроводности и термоупругости. Показано, что, приняв энергию атомизации, равной энергии кристаллизации, для легких ионов – эта энергия близка к энергии действующих ионов, тогда как для тяжелых она незначительна и ее можно не учитывать.

Ключевые слова: энергия кристаллизации, наноструктуры, ионы, нанокластер.

Введение. В настоящее время есть достаточно много работ по экспериментальному изучению возможности получения наноструктур. Теоретических работ практически нет, за исключением работ [1, 2], но и они не позволяют учитывать энергию, затрачиваемую на образование нанозерна, которая в определенных условиях может быть значительной, что существенно снижает точность проводимых расчетов.

Приняв, что энергия образования зерна равна или несколько больше энергии атомизации зерна, ее можно рассчитать, используя методику работы [3]. Эта энергия может быть определена после первоначального нахождения числа частиц в нанокластере (НК) и определения, что частицы являются атомами или химическими соединениями. Тогда, определив долю атомов и химических соединений в зерне и зная энергию атомизации зерен каждого типа кластера (состоящего из атомов и химических соединений) и умножив на их количество, получим энергию, затрачиваемую на образование зерна, как сумму энергий образования кластера из атомов и химических соединений.

Работа выполнялась в рамках программы Министерства образования и науки Украины «Новые и ресурсосберегающие технологии в энергетике, промышленности и агропромышленном комплексе» (подсекция 13 «Аэрокосмическая техника и транспорт») и 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 свето-лучевых потоков на конструкционные материалы и РИ», хозяйственных работ и договоров о сотрудничестве.

Анализ последних исследований и литературы показал, что в настоящее время практически отсутствуют теоретические работы по определению размеров зерна и зон, где образуется нанозерно

[1–15]. Исключение составляют работы [1–2], но в них не учтена энергия кристаллизации. Все это говорит, что работа посвящена учету этого эффекта, она важна и актуальна.

Целью настоящих исследований было определить влияния энергии кристаллизации при действии ионов разных энергий, сортов и зарядов на процесс формирования наноструктур.

Постановка проблемы. Исследование выполняется в несколько этапов: проводится решение совместной задачи теплопроводности и термоупругости в зоне действия индивидуального иона соответствующей энергии, заряда и сорта, которая позволяет оценить на первом шаге возможное число частиц в НК, затем вычисляется энергия на атомизацию зерна из атомов и химических соединений. В дальнейшем с учетом этих энергий и количества атомов и химических соединений в зерне находим суммарную энергию атомизации зерна $E_{ат}$. Затем, приняв энергию образования зерна, как $E_z=1,1E_{ат}$, можем найти энергию, необходимую для образования зерна, с учетом которой определяем все характеристики в зоне действия иона: температуру, скорость нарастания температуры, температурные напряжения и скорость деформирования, размер зерна, объем нанокластера и глубины его залегания и истинное число частиц в НК.

Материалы исследований. В работе исследовалась энергия кристаллизации в зоне образования нанокластеров при действии легких ионов азота и кислорода и тяжелых ионов циркония и гафния (одно-, двух- и трехзарядных) на алюминиевый сплав D16T.

Расчет необходимых дополнительных энергий для получения НС с учетом энергии, затрачиваемой на образование нанокластера

Используя этот алгоритм, рассчитываем новые значения рассматриваемых величин, которые дадут возможность окончательно определить реальность получения наноструктур.

Определив число частиц в нанокластере, мы должны найти энергию атомизации частиц в кластере, которая может быть вычислена с учетом двух энергий: энергии кулоновского отталкивания E_k и энергии ионной связи $E_{и}$ по выражению

© Г.И. Костюк, А.В. Матвеев, Е.А. Воляк, 2015

$$E_{\text{св}} = E_{\text{и}} + E_{\text{к}} = \varepsilon^2 U + (1 - \varepsilon^2)^{\frac{1}{2}} D_0 N = -\frac{\varepsilon^2 k A \varepsilon^2 z^2 N}{R_0} \left(1 - \frac{\rho}{R_0}\right) + (1 - \varepsilon^2)^{\frac{1}{2}} D_0 N, \quad (1)$$

где ε – степень ионности; k – коэффициент пропорциональности, называемый электростатической постоянной, зависит от выбора единиц измерения, в Международной системе единиц, $k = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0} \approx 8,987742438 \cdot 10^9 \left[\frac{\text{Н}\cdot\text{м}^2}{\text{Кл}^2}\right]$; A – константа Моделунга; e – заряд электрона, $e = 1,6022 \cdot 10^{-19}$ [Кл]; z – заряд иона; N – количество частиц; R_0 – кратчайшее межатомное расстояние; ρ – степень отталкивания; D_0 – энергия диссоциации одной частицы вещества

Степень ионности ε для вещества АВ определяем по выражению

$$\varepsilon = \frac{I_A^V + F_A^V - I_B^V - F_B^V}{I_A^V - F_A^V + I_B^V - F_B^V}, \quad (2)$$

где I_A^V – потенциал ионизации для элемента А в валентном состоянии; F_A^V – сродство к электрону для материала А в валентном состоянии.

Эти величины обычно определяются экспериментально, значения их известны для небольшого числа элементов. Для упрощения вычисления можно использовать упрощенную формулу, дающую менее точное значение:

$$\varepsilon = \frac{X_A - X_B}{X_A + X_B}, \quad (3)$$

где X_A , X_B – степень окисления для элементов А и В по шкале Полиннга.

Константа Моделунга A , вычисляемая суммированием бесконечного ряда, имеет вид

$$A = \sum_j^N \frac{z_i z_j}{P_{ij}}, \quad (4)$$

где z_i , z_j – заряды взаимодействующих ионов

Энергия электростатического кулоновского взаимодействия

$$\varphi_{ij} = \frac{e^2 z_i z_j}{R_{ij}}, \quad (5)$$

где R_{ij} – расстояние между зарядами i и j , для удобства оно может быть представлено как $R_{ij} = P_{ij} \cdot R_0$.

Тогда энергия взаимодействия i иона со всеми остальными ионами (N) имеет вид

$$U = \frac{1}{2} \left(N \sum_i^N \frac{e^2 z_i z_j}{R_0} * \frac{1}{P_{ij}} + N \sum_j^N \frac{e^2 z_i z_j}{R_0} * \frac{1}{P_{ij}} \right) = \frac{N e^2}{R_0} \sum_j^N \frac{z_i z_j}{P_{ij}}. \quad (6)$$

В формуле множитель $\frac{1}{2}$ появляется, так как каждая взаимодействующая пара ионов должна учитываться один раз. Очевидно, что постоянная в выражении для электростатической энергии называется константой Моделунга.

Константу Моделунга A , получаем суммированием бесконечного ряда, зависящего от геометрического типа структуры (она не зависит от периода идентичности, то есть межатомных расстояний). Для структуры типа NaCl прямое суммирование с помощью ЭВМ в пределах куба, содержащего почти 70 000 ионов, дает $A = 1,747163$. Это значение еще

существенно уступает по точности лучшим значениям, полученным с помощью различных методов ускорения сходимости подобных рядов. Так, для структуры типа NaCl известна константа Моделунга с огромным количеством значащих цифр: $A = 1,747564946331822$. Расчеты с подобной точностью для простых структур и с меньшей точностью, но для сложных структур, возможны лишь с помощью различных способов ускорения сходимости рядов, разработанных Моделунгом, Борном, Эвальдом, Эвьеном, Берто и другими.

Степень отталкивания ρ зависит от величины и характера деформирования зерна

По мере увеличения сжатия сопротивление кристалла быстро растет, ионы отталкиваются друг от друга и силы отталкивания быстро возрастают по мере сближения ионов друг с другом. Поскольку отталкиваются электронные оболочки ионов, проникающие одна в другую, то правильное описание этих сил возможно только на основе квантовой механики. Однако эвристический (т. е. основанный на правильной догадке) подход был применен М. Борном и его сотрудниками еще до создания квантовой механики (1918). Они предложили две формы потенциала отталкивания: сначала обратную степенную $\frac{b}{R^n}$, а позже экспоненциальную $B e^{-\frac{R}{\rho}}$. Параметры b и n , B и ρ , входящие в эти выражения, могут быть определены с помощью экспериментальных данных, в частности по сжимаемости кристалла:

$$\frac{1}{\rho} = \frac{2}{R_0} + \frac{9V}{A\beta}, \quad (7)$$

где V – объем моля кристалла; A – константа Моделунга; β – сжимаемость кристалла.

Существует связь между показателем отталкивания и орбитальными экспонентами связывающих атомные орбитали. Для щелочных галогенидов имеется простая зависимость между $\frac{1}{\rho}$ и суммой орбитальных экспонент атомных орбиталей щелочного металла (М) и галогена (X):

$$\frac{1}{\rho} = 2(\xi_M + \xi_X). \quad (8)$$

Простую и достаточно точную оценку величины орбитальной экспоненты можно получить с помощью извлечения квадратного корня из первого потенциала ионизации, выраженного в ридбергах ($1Ry = 13,6 \text{ эВ} = 313 \text{ ккал}$):

$$\xi = \sqrt{I}. \quad (9)$$

Для оксидов и особенно халькогенидов эта зависимость будет другой, так как растёт влияние ковалентности химической связи. Приблизительно эта зависимость имеет вид

$$\frac{1}{\rho} \approx (1 + \varepsilon)(\xi_M + \xi_X). \quad (10)$$

Таким образом, энергию отталкивания атомов в кристалле довольно легко оценить, если нет возможности определить ее эмпирическим путем.

Межатомное расстояние R_0 может быть определено для вещества АВ как сумма ковалентных радиусов

$$R_0 = R_K(A) + R_K(B); \quad (11)$$

Экспериментальное значение, энергии диссоциации измерено для многих веществ.

Для избежания ограничений при оценке ковалентной энергии, для D_0 кристаллов применен обобщенный постулат Полинга о среднем арифметическом:

$$D_0 = \sum_{i=1}^m \Delta H_{\text{эф}}(i); \quad (12)$$

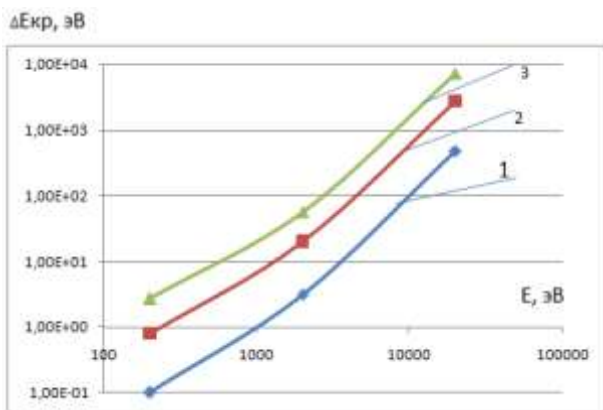
В результате расчетов мы получаем энергию атомизации для химических соединений при различных зарядовых числах, степенях отгалкивания и энергиях диссоциации. так, для ряда нитридов и карбидов они представлены в таблице 1:

Таблица 1 – Энергия атомизации для нитридов и карбидов металлов при различных зарядовых числах Z, степенях отгалкивания ρ и энергиях диссоциации D

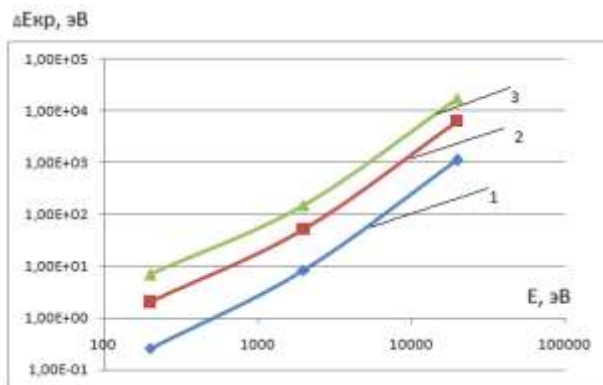
Материал покрытия	Степень отгалкивания $\rho, [\mu]$	Теория			Эксперимент		Энергия диссоциации D, эВ
		Z=1	Z=2	Z=3	Z=1	Z=2	
TiN	0,287 10 ⁻¹⁰	5,756	9,125	14,74		13,23	4,9035
TiN	0,854 10 ⁻¹⁰	5,3989	7,6966	11,526		13,23	4,9035
TiN	0,4326 10 ⁻¹⁰	5,664	8,7586	13,9156		13,23	4,9035
TiN	0,287 10 ⁻¹⁰	10,347	13,716	19,331		13,23	9,7622
TiN	0,854 10 ⁻¹⁰	9,9899	12,288	16,117		13,23	9,7622
TiN	0,4326 10 ⁻¹⁰	10,256	13,350	18,507		13,23	9,7622
ZrN	0,287 10 ⁻¹⁰	6,874	11,4427	19,0572		14,53	5,8148
ZrN	0,943 10 ⁻¹⁰	6,3518	9,3539	14,3574		14,53	5,8148
ZrN	0,4126 10 ⁻¹⁰	6,7741	11,0431	18,1574		14,53	5,8148
ZrN	0,287 10 ⁻¹⁰	11,760	16,328	23,943		14,53	11,124
ZrN	0,943 10 ⁻¹⁰	11,238	14,240	19,244		14,53	11,124
ZrN	0,4126 10 ⁻¹⁰	11,66	15,929	23,044		14,53	11,124
AlN	0,295 10 ⁻¹⁰	4,476	7,376	12,209		10,169	
AlN	0,851 10 ⁻¹⁰	4,153	6,084	9,304		10,169	
AlN	0,450 10 ⁻¹⁰	4,386	7,016	11,399		10,169	
HfN	0,282 10 ⁻¹⁰	6,740	9,4589	13,9889		16,09899	
HfN	0,806 10 ⁻¹⁰	6,4919	8,4629	11,7479		16,09899	
HfN	0,433 10 ⁻¹⁰	6,6699	9,1749	13,349		16,09899	
TiC	0,309 10 ⁻¹⁰	5,377	7,253	10,380		14,23	
TiC	0,820 10 ⁻¹⁰	5,197	6,536	8,766		14,23	
TiC	0,495 10 ⁻¹⁰	5,311	6,990	9,790		14,23	
CrN	0,288 10 ⁻¹⁰	4,897	7,766	12,547			
CrN	0,815 10 ⁻¹⁰	4,590	6,538	9,785			
CrN	0,445 10 ⁻¹⁰	4,806	7,390	11,724			
HfC	0,318 10 ⁻¹⁰	6,3631	9,444	14,580		16,4895	
HfC	0,943 10 ⁻¹⁰	6,024	8,087	11,526		16,4895	
HfC	0,481 10 ⁻¹⁰	6,275	9,091	13,785		16,4895	
TiO ₂	0,293 10 ⁻¹⁰	16,3935	29,052	50,1495			
TiO ₂	0,947 10 ⁻¹⁰	14,823	22,77	36,015			
TiO ₂	0,424 10 ⁻¹⁰	16,079	27,794	47,319			
TiO ₂	0,293 10 ⁻¹⁰	79,686	29,052	45,93			
TiO ₂	0,947 10 ⁻¹⁰	54,558	22,77	33,366			
TiO ₂	0,424 10 ⁻¹⁰	260,958	27,794	43,414			
CrC	0,310 10 ⁻¹⁰	11,757	13,212	15,637			
CrC	0,786 10 ⁻¹⁰	11,616	12,648	14,368			
CrC	0,511 10 ⁻¹⁰	12,009	14,22	17,905			
ZrC	0,309 10 ⁻¹⁰	13,9275	16,821	21,643		15,6217	
ZrC	0,902 10 ⁻¹⁰	13,628	15,624	18,950		15,6217	
ZrC	0,470 10 ⁻¹⁰	13,792	16,495	20,909		15,6217	

Используя значения энергии атомизации представленные в таблице, и зная число частиц в нанокластере, которое получаем, используя результаты рабо-

ты [1], получаем энергию необходимую для получения зерна.

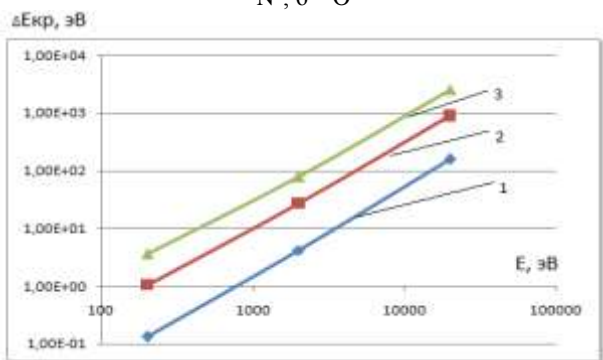


а

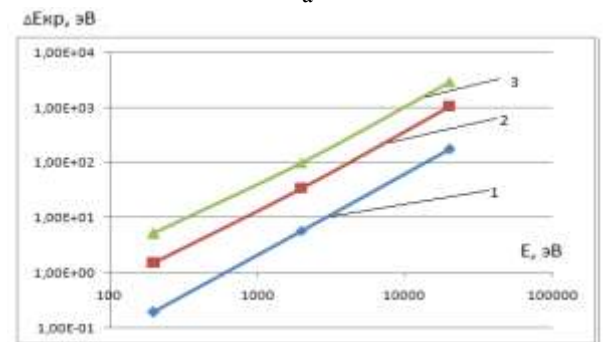


б

Рис. 1 – Зависимость дополнительной энергии кристаллизации от энергии ионов при разных зарядах иона (кривая 1-1, 2-2, 3-3), действующих на алюминиевый сплав Д16Т: а – N^+ ; б – O^+



а



б

Рис. 2 - Зависимость дополнительной энергии кристаллизации от энергии ионов при разных зарядах иона (кривая 1-1, 2-2, 3-3), действующих на алюминиевый сплав Д16Т: а – Zr^+ ; б – Hf^+

Для обеспечения большей вероятности его образования увеличиваем эту величину на 10% и используем в дальнейших расчетах. Так, результаты такого исследования представлены на рис. 1 и 2.

Так, на рис. 1 даны зависимости дополнительной энергии образования нанокластера от энергии ионов азота и кислорода при действии их на алюминиевый сплав. Очевидно, что в этом случае дополнительные энергии, затрачиваемые на кристаллизацию, соизмеримы с энергией ионов, действующих на материал, тогда как при переходе к ионам циркония и гафния (рис. 2 а, б) эта величина практически на порядок меньше энергии ионов (при энергиях $2 \cdot 10^4$ эВ) и в этом случае очевидно, что её можно не учитывать.

Всё это говорит о том, что энергия кристаллизации является важной величиной и в балансе энергий в зоне образования наноструктуры для ионов малых масс может оказывать существенное влияние. При переходе к ионам больших масс, например гафния, её практически можно не учитывать.

Выводы

1. Создана модель вероятности образования наноструктур, которая учитывает энергию получения НК, что позволяет существенно уточнить существующие модели.

2. Показано, что для небольших энергий ионов, энергия образования НК существенно влияет на характер теплообмена, а следовательно, и на характеристики, определяющие возможность получения наноструктур: температура, скорость нарастания температуры, температурные напряжения и скорость деформирования.

3. Полученная модель позволяет существенно уточнить проводимые расчеты основных величин, определяющих получение наноструктур, и найти более точно технологические параметры потоков ионов (энергия, заряд и сорт иона), при которых можно получать наноструктуры необходимых размеров, а следовательно, и прогнозировать их физико-механические характеристики, так как они зависят от размера зерна.

4. Показано определяющее влияние на энергообмен в зоне действия легких ионов (например, азот и кислород) энергии кристаллизации для кластеров. Для тяжелых ионов энергия кристаллизации не превышает 10% от энергии падающего иона (даже для энергии $2 \cdot 10^4$ эВ).

Библиографический список. 1. 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. 2. 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. 3. Костюк, Г.И. Физико-технические основы нанесения покрытий, ионной имплантации и ионного легирования, лазерной обработки и упрочнения, комбинированных технологий [Текст] / Г.И. Костюк. – К.: Изд-во аину, 2002.– Кн.1: Физические процессы плазменно-ионных, ионно-лучевых, плазменных, свето-

лучевых и комбинированных технологий. – 596 с. **4.** Костюк, Г.И. Физико-технические основы нанесения покрытий, ионной имплантации и ионного легирования, лазерной обработки и упрочнения, комбинированных технологий [Текст] / Г.И. Костюк. – К.: Изд-во аиу, 2002. – Кн. 2: Справочник для расчета основных физических и технологических параметров, оценки возможностей, выбора типа технологий и оборудования. – 482 с. **5.** Костюк, Г.И. Наноструктуры и нанопокрyтия: перспективы и реальность [Текст]: учеб. пособие / Г.И. Костюк. – Х.: Нац. аэрокосм. ун-т «Харьк. авиац. ин-т», 2009. – 406 с. **6.** Костюк, Г.И. Научные основы создания современных технологий [Текст]: учеб. пособие / Г.И. Костюк. – Х.: Нац. аэрокосм. ун-т «Харьк. авиац. ин-т», 2008. – 552 с. **7.** 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. **8.** Костюк, Г.И. Эффективный режущий инструмент с покрытием и упрочненным слоем [Текст]: справ. / Г.И. Костюк. – К.: Вид-во АИНУ, 2003. – 412 с. **9.** Костюк, Г.И. Физико-технические основы роботизированного производства [Текст]: учеб. пособие / Г.И. Костюк. – Х.: Нац. аэрокосм. ун-т «Харьк. авиац. ин-т», 2006. – 614 с. **10.** Гречихин, Л.И. Физика наночастиц и нанотехнологий [Текст] / Л.И. Гречихин. – М.: УП «Технопринт», 2004. – 397 с. **11.** Аксенов, И.И. Вакуумная дуга в эрозийных источниках плазмы [Текст] / И.И. Аксенов. – Х.: Изд-во НИИ «ХФТИ», 2005. – 211 с. **12.** Гусев, А.И. Наноматериалы, наноструктуры, нанотехнологии [Текст] / А.И. Гусев. – М.: Физматлит, 2005. – 416 с. **13.** Решетняк, Е.Н. Синтез упрочняющих наноструктурных покрытий [Текст] / Е.Н. Решетняк, А.И. Стрельницкий // Вопросы атомной науки и техники. – 2008. – № 2. – С. 119 – 130. **14.** Андриевский, Р.А. Наноматериалы: концепция и современные проблемы [Текст] / Р.А. Андриевский // Физика металлов и металловедение. – 2003. – Т. 91, № 1. – С. 50 – 56. **15.** Состав, структура и свойства наноструктурных пленок боридов тантала [Текст] / А.А. Гончаров, П.И. Игнатенко, В.В. Петухов и др. // ЖТФ. – 2006. – Т. 76, вып. 10. – С. 82 – 87.

Bibliography (transliterated): **1.** Kostyuk, G.I. Nanotekhnologii: vybor tekhnologicheskikh parametrov i ustanovok, proizvoditel'nost' obrabotki, fiziko-mekhanicheskiye kharakteristiki nanostruktur [Текст]: monogr. / G.I. Kostyuk. – Kiev: Izd. tsentr Mezhdunar. akademii nauk i innovatP. tekhnologiy, 2014. – 472 P. **2.** Kostyuk, G.I. Nanotekhnologii: teoriya, eksperiment, tekhnika, perspektivy [Текст]: monogr. / G.I. Kostyuk. – Kiev: Izd. tsentr Mezhdunar. akademii nauk i innovatP. tekhnologiy, 2012. – 648 P.

3. Kostyuk, G.I. Fiziko-tekhnicheskiye osnovy naneseniya pokrytiy, ionnoy implantatsii i ionnogo legirovaniya, lazernoy obrabotki i uprochneniya, kombinirovannykh tekhnologiy [Текст] / G.I. Kostyuk. – Kiev: Izd-vo ainu, 2002. – Кн.1: Fizicheskiye protsessy plazmenno-ionnykh, ionno-luchevykh, plazmennykh, svetoluchevykh i kombinirovannykh tekhnologiy. – 596 P. **4.** Kostyuk, G.I. Fiziko-tekhnicheskiye osnovy naneseniya pokrytiy, ionnoy implantatsii i ionnogo legirovaniya, lazer-noy obrabotki i uprochneniya, kombinirovannykh tekhnologiy [Текст] / G.I. Kostyuk. – Kiev: Izd-vo ainu, 2002. – Кн. 2: Spravochnik dlya rascheta osnovnykh fizicheskikh i tekhnologicheskikh parametrov, otsenki vozmozhnostey, vybora tipa tekhnologiy i oborudovaniya. – 482 P. **5.** Kostyuk, G.I. Nanostrukturny i nanopokrytiya: perspektivy i real'nost' [Текст]: ucheb.posobiye / G.I. Kostyuk. – Kharkov: NatP. aerokosm. un-t «Khark. aviatP. in-t», 2009. – 406 P. **6.** Kostyuk, G.I. Nauchnyye osnovy sozdaniya sovremennykh tekhnologiy [Текст]: ucheb.posobiye / G.I. Kostyuk. – Kharkov: NatP. aerokosm. un-t «Khark. aviatP. in-t», 2008. – 552 P. **7.** Kostyuk, G.I. Effektivnyy rezhushchiy instrument s pokrytiyem i uprochnennym sloyem [Текст]: monogr.-sprav. / G.I. Kostyuk. – Kharkov: NatP. aerokosm. un-t «Khar'k. aviatP. in-t», 2007. – 633 P. **8.** Kostyuk, G.I. Effektivnyy rezhushchiy instrument s pokrytiyem i uprochnennym sloyem [Текст]: sprav. / G.I. Kostyuk. – Kiev: Vid-vo AINU, 2003. – 412 P. **9.** Kostyuk, G.I. Fiziko-tekhnicheskiye osnovy robotizirovannogo proizvodstva [Текст]: ucheb.posobiye / G.I. Kostyuk. – Kharkov: NatP. aerokosm. un-t «Khar'k. aviatP. in-t», 2006. – 614 P. **10.** Grechikhin, L.I. Fizika nanochastits i nanotekhnologiy [Текст] / L.I. Grechikhin. – Moscow: UP «Tehnoprint», 2004. – 397 P. **11.** Aksekov, I.I. Vakuumnaya duga v erozionnykh istochnikakh plazmy [Текст] / I.I. Aksekov. – Kharkov: Izd-vo NIИ «KhFTI», 2005. – 211 P. **12.** Gusev, A.I. Nanomaterialy, nanostrukturnykh plenok boridov tantala [Текст] / A.A. Goncharov, P.I. Ignatenko, V.V. Petukhov i dr. // Zhhf. – 2006. – Vol. 76, No. 10. – PP. 82 – 87.

Поступила (received) 12.10.2015

Костюк Геннадий Игоревич – д-р техн. наук, проф., проф. Нац. аэрокосм. ун-т «ХАИ», тел.: (057)-788-42-06, e-mail: g.kostyuk206@yandex.ru;

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

Матвеев Александр Вадимович – аспирант, Нац. аэрокосм. ун-т «ХАИ», тел.: (057)-788-42-06;

Matveev Aleksandr Vadimovich – graduate student, National Aerospace University «KhAI», tel.: (057)-788-42-06;

Воляк Елена Александровна – канд. техн. наук, Нац. аэрокосм. ун-т «ХАИ», тел.: (057)-788-42-06;

Voliak Elena Aleksandrovna – Candidate of Technical Sciences, National Aerospace University «KhAI», tel.: (057)-788-42-06.