

## **Проверка адекватности теоретического определения размера зерна при нанесении многокомпонентного покрытия на режущий твердосплавный инструмент**

*Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «ХАИ»  
АДИ при ДонНТУ*

Проведено сопоставление теории и эксперимента по определению размера зерна в многокомпонентном покрытии  $0,2 \text{ HfN} + 0,8 \text{ ZrN}$  на твердом сплаве ВК-8. Показана возможность прогнозирования размера зерна при учете дополнительного нагрева в процессе нанесения покрытия и очистки.

**Ключевые слова:** размер зерна, ионно-плазменная обработка, многокомпонентное покрытие.

### **Введение**

В настоящее время есть значительное число теоретических работ позволяющих оценить размер зерна получаемый в зависимости от технологических и физических параметров потока ионов [1–10], но в то же время практически отсутствуют экспериментальные значения размера зерна при конкретных технологических и физических параметрах потока, что не позволяет оценить адекватность предлагаемой модели описания получения наноструктур.

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», «Концепция создания наноструктур, нано- и традиционных покрытий с учетом влияния адгезии на эффективность и работоспособность деталей АТ, АД и РИ», хоздоговорных работ и договоров о сотрудничестве.

### **1. Состояние вопроса**

Значительное число монографий и обзорных статей [1–12] посвящены теоретическому [1–7] и экспериментальному [8–12] изучению и получению наноструктурных слоев, но несмотря на попытки систематизации и обобщения экспериментальных данных по размеру зерна и влиянию на него параметров потока и тем более сопоставление результатов расчета и эксперимента в настоящее время нет.

За счет действия ионов различных сортов, энергий, зарядности, плотностей токов есть возможность сохранения достаточных температур (за счет соответствующего распределения температур температурного поля по глубине обеспечивается высокая средняя температура), в то же время, выбирая расположение поля по глубине (варьируя энергии, зарядности и сорта частиц), обеспечиваем высокие градиенты температур. Следовательно, в довольно большом объеме материала будут действовать значительные по величине напряжения, т.е. будут выполняться условия для получения нанокристаллических структур.

Поэтому, несколько модернизировав модель действия индивидуальных частиц на конструкционные материалы [1–10], получим модель, учитывающую необходимые факторы (ранее, в модели не учитывались зарядность иона и характер их сложного взаимовлияния в довольно большом рассматриваемом объеме, а также энергия образования НС и др.).

Выше изложенное говорит об актуальности и своевременности предлагаемой статьи.

## **2. Постановка задачи исследования**

Приняв в качестве критериев получения наноструктур требуемый диапазон температур, скоростей нарастания температур, давлений (температурных напряжений) и наличие катализатора [1], можем рассмотреть возможность получения наноструктур в зависимости от физических и технологических параметров потоков при обработке, для чего проанализируем ряд теоретических и технических задач.

Решение этих задач позволит найти физические и технологические параметры потоков ионов, которые обеспечат требуемые физико-механические характеристики наноструктур и наноматериалов.

Теперь рассмотрим реальные возможности реализации этих задач.

## **3. Модель действия индивидуального иона на конструкционный материал**

Взаимодействие потоков заряженных частиц и плазменных потоков с конструкционными материалами связано с реализацией широкого круга процессов: столкновительных, теплофизических, термомеханических термоусталостных, диффузионных, термохимических и плазмохимических, но в настоящее время отсутствуют работы, учитывающие эти факторы и тем более их взаимосвязь. Все эти процессы влияют как на характер теплообмена в объеме мишени, так и на поверхности, поэтому учет этих процессов необходим и в балансе энергии в элементарном объеме металлической мишени, и в теплообмене на поверхности мишени, т.е. в граничных условиях.

### **3.1. Баланс тепла в элементарном объеме детали**

Изменение количества тепла в единичном объеме (первое слагаемое в левой части равенства) реализуется за счет: перемещения потока частиц вдоль обрабатываемой поверхности или перемещения мишени относительно потока плазмы со скоростью  $V_p$  (второе слагаемое), теплофизических процессов: влияние на теплообмен конечной скорости распространения тепла (третье слагаемое), теплопроводности (первое слагаемое справа), смещения фронта испарения (второе слагаемое), плавления (третье слагаемое); столкновительных процессов: объемного источника тепла за счет действия частицы (четвертое слагаемое), затраты энергии на смещение атомов (пятое слагаемое); термоупругих, термопластических и термоусталостных процессов, определяющих энергию деформирования материала элементарного объема (шестое слагаемое); диффузионных процессов, определяющих теплоперенос диффундирующим материалом (седьмое слагаемое); термохимических процессов, связанных с реализацией химических реакций между материалом мишени и бомбардирующими ионами или же между компонентами сплавов и композитных материалов и ленц-джоулев нагрев (восьмое сла-

гаемое) за счет растекания ионного тока и энергия образования кристалла (девятое слагаемое).

$$\begin{aligned}
 & C[T] \cdot \gamma[T] \frac{dT(x, y, z, t)}{dt} + C[T] \cdot \gamma[T] \frac{\partial T(x, y, z, t)}{\partial y} \cdot V_n + C[T] \cdot \gamma[T] \cdot \tau_p \frac{d^2 T(x, y, z, t)}{dt^2} = \\
 & \nabla \lambda [T \cdot \nabla T](x, y, z, t) + C[T] \cdot \gamma[T] \cdot V_{tm} \frac{\partial T(x, y, z, t)}{\partial x} - A \cdot L_v \cdot \gamma[T] \frac{dV_v}{dt} + \\
 & + B \cdot j_{i,e} \cdot \mu_{i,e} \frac{\partial E_{i,e}}{\partial x} - E_{cm} \cdot S_{cm} \frac{j_{i,e}}{\lambda_{cpi,e}} \pm D \frac{dW(x, y, z, t)}{dt} \pm m_a \cdot C_a [T_a] \frac{dn_a}{dt} (T_a - T(x, y, z, t)) \pm \\
 & \pm P_{T,x} (n_A, n_B, T, t_e) \frac{dn_{A(B)}}{dt} L_{T,x,p} + \rho [T] \cdot j^2(x, y, z, t) + E_{kp}
 \end{aligned} \tag{1}$$

где  $C[T]$  и  $\gamma[T]$  – теплоемкость и плотность материала мишени, соответствующие температуре  $T$ ;

$\tau_p$  – время релаксации температуры на один Кельвин;

$V_n$  – скорость перемещения ионного потока или мишени относительно него;

$L_{пл}$  и  $L_{T,x,p}$  – удельные теплота плавления и термохимической реакции;

$V_{ф}[T]$  – скорость смещения фронта испарения;

$V_{пл}$  – объем расплавленного металла;

$j_{i,e}$  – плотность тока ионов;

$\mu_{i,e}$  – коэффициент аккомодации иона и электрона;

$\frac{\partial E_{i,e}}{\partial x}$  – потери энергии иона и электрона на глубине мишени;

$E_{см}$  – энергия смещения атомов;

$S_{см}$  – число смещенных атомов в результате действия иона или электрона;

$\lambda_{ср i,e}$  – средняя линейная длина свободного пробега ионов и электронов в материале мишени;

$W(x, y, z, t)$  – энергия деформирования единичного объема мишени;

$m_a$  – масса диффундирующего атома;

$C_a [T_a]$  – теплоемкость диффундирующего материала при температуре  $T_a$ ;

$P_{T,x}(n_A, n_B, T, t_{вз})$  – вероятность термохимической реакции, зависящая от концентрации реагентов  $n_A$  и  $n_B$ , температуры  $T$  и времени взаимодействия  $t_{вз}$ ;

$n_A$  и  $n_B$  – концентрация реагента, определяющего возможность реакции;

$\rho [T]$  – удельное электрическое сопротивление при температуре  $T$ ;

$j(x, y, z, t)$  – плотность тока с учетом растекания тока;

$E_{кр}$  – удельная энергия образования кристалла.

Определить число атомов, находящихся на границе вблизи атомов другого зерна и взаимодействующих энергетически, можно оценить приняв зерно виде сферы радиусом  $R$ , тогда площадь поверхности определим как  $4\pi R^2$ , а число атомов на единице поверхности в монослое можно определить используя зависимость числа атомов –  $N_M$  в монослое от атомного номера (рис. 4.2 из [19]), тогда число атомов одного зерна, взаимодействующих с атомами соседних зерен  $N_{вз}$ , определим так:

$$N_{вз} = 4\pi R^2 \cdot N_{мон} \tag{2}$$

Зная число взаимодействующих атомов и приняв, что существуют только взаимодействия между пограничными атомами соседних зерен, можно оценить энергию образования наноструктуры, которая должна быть равна или больше этой энергии.

Энергию связи кристалла можно определить при квантовомеханическом подходе как:

$$E_{ce} = \frac{1}{2} \sum_{i=j} q_i q_j \frac{1}{H_{ij}} - \sum_i q_i \int \frac{\rho(\bar{r})}{|\bar{R}_i - \bar{r}|} d\bar{r} + \frac{1}{2} \int \frac{\rho(\bar{r}_1) \cdot \rho(\bar{r}_2)}{r_{12}} - \sum_i q_i \int \frac{\rho_i^0(\bar{r})}{|\bar{R}_i - \bar{r}|} d\bar{r} - \frac{1}{2} \int \frac{\rho_i^0(\bar{r}_1) \cdot \rho_i^0(\bar{r}_2)}{r_{12}} d\bar{r}_1 d\bar{r}_2 \quad (3)$$

где  $R_{ij} = |\bar{R}_i - \bar{R}_j|$  – межатомное расстояние;

$r_{12} = |\bar{r}_1 - \bar{r}_2|$  – расстояние между электронами;

$R_i$  и  $q_i$  – радиус-вектор и заряд  $i$ - атомного остова;

$\rho$  – плотность валентных электронов в кристалле;

$\rho_i^0$  – распределение валентной электронной плотности  $i$ -нейтрального атома.

Первый член описывает отталкивание остовов, второй – притяжение электронного облака  $\rho$  к атомным остовам, третий взаимное отталкивание электронов, четвертый – притяжение валентных электронов и нейтральных атомов, пятый – отталкивание электронов в нейтральном атоме.

Решением уравнения (3) можно определить энергию образования кристалла, которая должна быть больше суммарной энергии связи кристалла в материале. Все это позволяет после оценки числа частиц в нанокластере оценить энергию образования кристалла, которая рассматривается в балансе тепла и после оценки зоны вероятного образования наноструктуры пересчитываются все величины: температура, скорости нарастания температур, температурные напряжения, размеры зерна и места их образования и уточняется число частиц в нанокластере. С учетом этого эффекта и энергии деформирования были проведены расчеты.

Энергию деформирования единичного объема определим по методике [1].

Учитывая, что решение задачи проводится в подвижной системе координат и при выходе на стационарный или близкий к нему режим, второе слагаемое в левой части уравнения для термоупругого потенциала перемещений [1] становится незначительным, получим

$$\Delta\Phi = \frac{1+\mu}{1-\mu} \cdot \alpha_1 \cdot [T(x, y, z, t) - T]. \quad (4)$$

По величине термоупругого потенциала перемещений и по известным соотношениям находим величины удлинений и сдвигов:

$$\varepsilon_{ik} = \frac{\partial^2 \Phi}{\partial i \partial k}, \quad (i, k = x, y, z). \quad (5)$$

Величины температурных напряжений определим по выражению

$$\sigma_{ik} = 2G \left( \frac{\partial^2 \Phi}{\partial i \partial k} - \Delta\Phi \cdot \delta_{ik} \right), \quad (6)$$

где  $\delta_{ik}$  подчиняется условиям:  $\delta_{ik} = 0$  при  $i \neq k$  ( $i, k = x, y, z$ )  $\delta_{ik} = 1$  при  $i = k$ .

В седьмом слагаемом формулы (1), учитывающем теплоперенос диффундирующим материалом, масса диффундирующего атома определяется как:

$$m_a = M \cdot m_p, \quad (7)$$

где  $M$  – атомный вес наносимого материала;

$m_p$  – масса протона.

Изменение концентрации диффундирующих атомов в единицу времени можно при  $t < t_k$  определить как

$$\frac{dn_a}{dt} = \frac{j}{e \cdot z \cdot \sqrt{\alpha t}}$$

При  $t \geq t_k$

$$\frac{dn_a}{dt} = \frac{j}{e \cdot z \cdot L_D}, \quad (8)$$

где  $j$  – плотность тока;

$e$  – заряд электрона;

$z$  – зарядовое число наносимого материала;

$L_D$  – толщина детали;

$t_k$  – время, за которое деталь прогреется на всю толщину,  $t_k = L_D^2/\alpha$ ;

$\alpha$  – коэффициент температуропроводности.

Формула для расчета коэффициента диффузии:

$$K_{\text{диф}} = a_d \cdot d_3^2 \cdot V_0 \cdot \exp(-U/(kT)) \quad (9)$$

где  $a_d$  – множитель порядка 0,1, определяемый типом кристаллической решетки;

$d_3$  – расстояние между ближайшими эквивалентными положениями вакансий в кристалле;

$V_0$  – величина порядка частоты атомных колебаний в кристалле ( $10^{12}$ – $10^{14}$  с<sup>-1</sup>);

$U$  – потенциальный барьер, который необходимо преодолеть вакансии при смещении в соседнее положение;

$k$  – постоянная Больцмана;

$T$  – абсолютная температура.

### 3.2. Теплообмен на поверхности детали

Тепловой поток на поверхности мишени создается за счет:

1. Столкновительных процессов: тепла, выделяемого на поверхности вследствие действия иона (первое слагаемое справа), отводится тепловой поток с распыленными частицами (второе слагаемое), с термоэлектронами (третье слагаемое), для ионов - отводится тепловой поток с ионно-ионной эмиссией или вторичной ионной эмиссией (пятое слагаемое), потенциальной ионно-электронной эмиссией (шестое слагаемое), кинетической ионно-электронной эмиссией (седьмое слагаемое), характеристическим рентгеновским излучением (восьмое слагаемое), тормозным рентгеновским излучением (девятое слагаемое), переходным излучением (десятое слагаемое).

2. Теплофизических процессов: отводится тепловой поток с испаренным материалом (одиннадцатое слагаемое), с ушедшим материалом в жидкой фазе, если создаются условия для его выброса (двенадцатое слагаемое), с тепловым излучением нагретой поверхности (тринадцатое слагаемое) и с конденсированными атомами, ранее испаренными (четырнадцатое слагаемое).

3. Плазмохимических процессов, реализующихся за счет реакций потока плазмы или потока ионов с распыленным и испаренным материалом мишени или с адсорбированными газами (пятнадцатое слагаемое), эта энергия передается излучением.

Передача энергии также осуществляется за счет излучения потока ионов, электронов или плазмы (последнее слагаемое):

$$-\lambda[T] \frac{\partial T(x, y, z, t)}{\partial x} = F_{i,e} - F_{расп} - F_{м.э.} - [F_{и.и.е} + F_{и.ф.э} + F_{и.э.э} + F_{киэ} + F_{х.ру} + F_{тпу} + F_{пу}]_j - F_{исп} - F_{пл} - \sigma \varepsilon T^*(0, y, z, t) \pm F_{конд} + F_{пх} + \sigma \varepsilon_c T_c^*, \quad (10)$$

где  $\sigma$  – постоянная Стефана-Больцмана;

Для решения вопроса эффективного заполнения объема наноструктурами необходимо определить энергии, заряды и сорта ионов, при которых это условие выполняется. Оно должно выполняться для каждого из потоков ионов, причем желательно, чтобы диапазоны глубин, где реализуются наноструктуры, дополняли друг друга.

#### 4. Влияние энергии ионов на размер зерна наноструктуры. Сопоставление результатов расчетов и экспериментов

Проводилось сопоставление результатов расчетов и экспериментов по изучению влияния энергии ионов на размер зерна в покрытии.

Эксперименты проводились на модернизированной установке «Булат-6» для нанесения равнотолщинных покрытий, получали покрытие 0,2 HfN + 0,8 ZrN с толщиной 10 мкм на пластины ВК8 производства СССР при потенциале подложки 110, 250, 350 и 500 В в течение 30 мин, очистка проводилась в основном ионами азота в течение 5 мин при потенциале подложки 1200 В. Обработка производилась на технологической оснастке, где места установки пластин расположены по оси потока и на 7,5 см выше и ниже, исследовались образцы установленные во всех трех вариантах.

Исследование размера зерна проводилось на электронном микроскопе РЭМ-106. Так, например, микрофотография покрытие при  $U = 250$  В представлена на рис. 1, а для  $U = 500$  В на рис. 2.

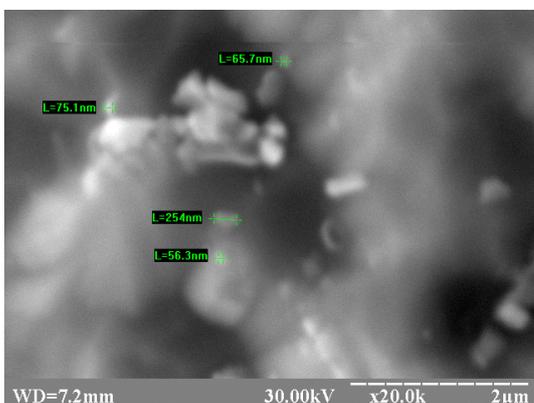


Рис. 1. Микрофотография покрытия 0,2 HfN + 0,8 ZrN на пластине ВК8 (производства СССР) при потенциале на подложке 250 В (пластины расположены по оси подложки)

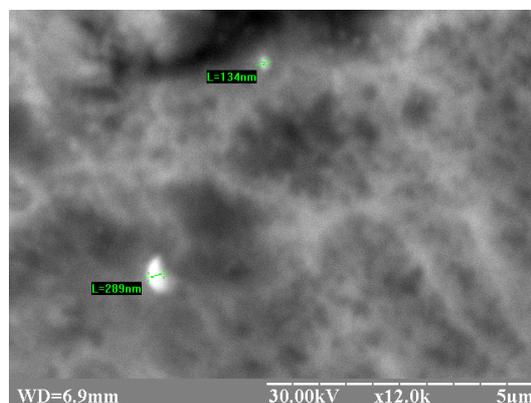


Рис. 2. Микрофотография покрытия 0,2 HfN + 0,8 ZrN на пластине ВК8 (производства СССР) при потенциале на подложке 500 В (пластины расположены по оси подложки)

Обработка аналогичных фотографий позволило получить зависимость размера зерна от потенциала на подложке (рис. 3). Видно, что максимальный размер зерна реализуется для случая, когда пластины расположены по оси ионного потока, плотность тока для такого расположения несколько выше, чем для положений 1 и 2, где пластины расположены ниже (2) и выше (1) оси потока. При этом с уве-

личением потенциала на подложке наблюдается рост размера зерна. Так как потенциал на подложке составляет основную долю в энергии иона, потому что дополнительная энергия, полученная ионом при столкновениях в плазме порядка десятков эВ. Все это позволяет считать энергию иона равной потенциалу подложки.

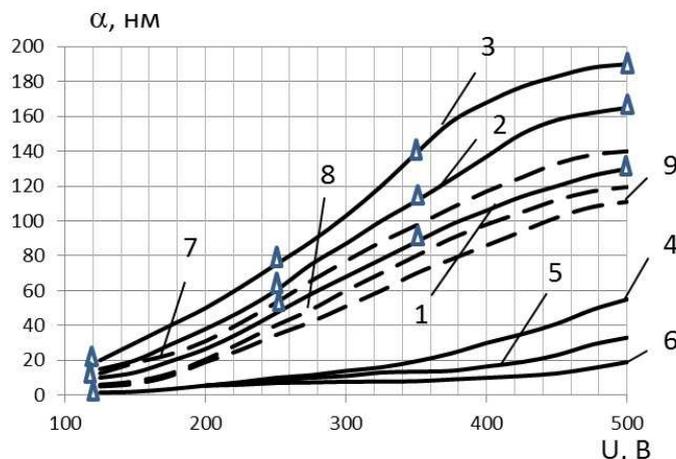


Рис. 3. Зависимость размера зерна от потенциала подложки для покрытия  $0,2 \text{ HfN} + 0,8 \text{ ZrN}$  на твердом сплаве ВК8 (СССР) (эксперимент: 1 – пластины при напылении расположены выше оси потока на 7,5 см; 2 – пластины при напылении расположены ниже на 7,5 см; 3 – пластины при напылении расположены по оси потока; теория: 4 – размер зерна в зоне иона N; 5 – размер зерна в зоне иона Zr; 6 – размер зерна в зоне иона Hf; 7 – размер зерна в зоне иона азота с учетом роста зерна за счет подогрева ( $t_n = 30$  мин); 8 – размер зерна в зоне иона Zr с учетом роста размера зерна за счет подогрева при нанесении покрытия ( $t_n = 30$  мин); 9 – размер зерна в зоне иона Hf с учетом роста зерна за счет подогрева при нанесении покрытия ( $t_n = 30$  м))

Был проведен расчет размера зерна для ионов, участвующих в образовании покрытия  $\text{N}^+$ ,  $\text{Zr}^+$  и  $\text{Hf}^+$ . Зависимости размера зерна от энергии иона (потенциала подложки) представлены на кривых 4, 5 и 6 соответственно. Видно, что характер кривых 1, 2 и 3 и 4, 5 и 6 похож, но величины существенно отличаются, так как в эксперименте температура нанесения покрытия составила величину порядка  $500^\circ\text{C}$ , а в расчетах температура принималась равной  $20^\circ\text{C}$ , рассматривался случай нанесения наноструктурного покрытия. Для приближения результатов расчета к реальным условиям была рассмотрена задача с учетом нагрева пластины в процессе нанесения покрытия, т.е. на каждом последующем шаге в модели [1] учитывался нагрев пластины до  $500^\circ\text{C}$  в течении 30 минут (время нанесения покрытия), это кривые 7, 8 и 9 ( $\text{N}^+$ ,  $\text{Zr}^+$  и  $\text{Hf}^+$  соответственно).

Видно, что теоретические результаты существенно приблизились к экспериментальным, но более низкие, так как основной подогрев пластины реализуется еще в процессе ее очистки, т.е. температура влияет на рост зерна практически с начала нанесения покрытия, что не учтено в теории и рост зерна более значительный в эксперименте, чем в моделируемом теоретически процессе.

Проведенные результаты сопоставления теории и эксперимента дают удовлетворительное согласие, а значит теория позволяет прогнозировать размер зерна при нанесении покрытия значительной толщины ( $h_n \approx 10$  мкм).

## Выводы

1. Экспериментально доказано наличие наноструктур в покрытии  $0,2 \text{ HfN} + 0,8 \text{ ZrN}$ .
2. Показана возможность прогнозирования размера зерна в покрытии при учете его роста в зависимости от температуры при нанесении покрытия.
3. Для уточнения теоретического прогнозирования размера зерна необходимо учитывать нагрев пластин в процессе нанесения покрытий, а также дополнительное образование наноструктур при ионной очистке.
4. Необходимо учитывать влияние образования химических соединений в покрытии на размер зерна, что так же должно увеличивать размер зерна.

## Список литературы

1. 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.
2. Костюк, Г.И. Физико-технические основы нанесения покрытий, ионной имплантации и ионного легирования, лазерной обработки и упрочнения, комбинированных технологий [Текст] Кн.1: Физические процессы плазменно-ионных, ионно-лучевых, плазменных, светолучевых и комбинированных технологий / Г.И. Костюк. – К.: Изд-во АИНУ, 2002. — 596 с.
3. Костюк, Г.И. Физико-технические основы нанесения покрытий, ионной имплантации и ионного легирования, лазерной обработки и упрочнения, комбинированных технологий [Текст] Кн. 2: Справочник для расчета основных физических и технологических параметров, оценки возможностей, выбора типа технологий и оборудования / Г.И. Костюк. – К.: Изд-во АИНУ, 2002. — 482 с.
4. 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.
5. 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.
6. 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.
7. Костюк, Г.И. Эффективный режущий инструмент с покрытием и упрочненным слоем [Текст]: справ. / Г.И. Костюк. – К.: Вид-во АИНУ, 2003. – 412 с.
8. 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.
9. Гречихин, Л.И. Физика наночастиц и нанотехнологий [Текст] /Л.И. Гречихин. –М.: УП «Технопринт», 2004. – 397 с.
10. Шнейдер, П. Инженерные проблемы теплопроводности [Текст] / П. Шнейдер. – М.: Иностран. лит.- 1960. – 488 с.
11. Аксенов, И.И. Вакуумная дуга в эрозионных источниках плазмы [Текст] / И.И. Аксенов. – Х.: Изд-во НИИ «ХФТИ», 2005. – 211 с.

12. Хаякава, С. Ядерно-физический аспект [Текст] в 2 кн. / С. Хаякава. – М.: Мир, 1973. – Кн. 2. – 701 с.
13. Готт, Ю.В. Взаимодействие частиц с веществом в плазменных исследованиях [Текст] / Ю.В. Готт. – М.: Атомиздат, 1978. – 271 с.
14. Гусев, А.И. Нанокристаллические материалы: методы получения и свойства [Текст] / А.И. Гусев. – Екатеринбург: Изд-во РАН, Уральское отд-ние, 1998. – 302 с.
15. Гусев, А.И. Наноматериалы наноструктуры, нанотехнологии [Текст] / А.И. Гусев. – М.: Физматлит, 2005. – 416 с.
16. Решетняк, Е.Н. Синтез упрочняющих наноструктурных покрытий [Текст] / Е.Н. Решетняк, А.И. Стрельницкий // Вопросы атомной науки и техники.– 2008.– № 2. – С. 119 – 130.
17. Андриевский, Р.А. Наноматериалы: концепция и современные проблемы [Текст] / Р.А. Андриевский// Физика металлов и металловедение.- 2003. – Т. 91, № 1. – С.50 – 56.
18. 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.
19. Коваленко, В.Ф. Теплофизические процессы и электровакуумные приборы [Текст] / В.Ф. Коваленко. – М.: Сов. Радио, 1976. – 216 с.

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. зав. каф. Долматов А.И., Национальный аэрокосмический университет «ХАИ» им. Н.Е. Жуковского, Харьков

Поступила в редакцию 11.06.2014

## **Перевірка адекватності теоретичного визначення розміру зерна при нанесенні багатокomпонентного покриття на різальний твердосплавний інструмент**

Проведено співставлення теорії й експерименту з одержанням розміру зерна у багатокomпонентному покритті 0,2 HfN + 0,8 ZrN на твердому сплаві ВК-8. Доведено можливість прогнозування розміру зерна при врахуванні додаткового нагріву у процесі нанесення покриття і очищенні.

**Ключові слова:** розмір зерна, іонно-плазмова обробка, багатокomпонентне покриття.

## **Checking the adequacy of the theoretical definition of grain size when applied multi-coating in carbide cutting tool**

Comparison of theory and experiment for obtaining the size of the-PHA in multicomponent coating 0,2 HfN + 0,8 ZrN on hard alloy VK-8. Are shown the ability to predict grain size taking into account the additional heating-tion in the coating and purification ionic cleaning.

**Keywords:** grain size, ion-plasma treatment, a multi component coating.