

# ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ОПРЕДЕЛЕНИЯ РАЗМЕРА ЗЕРНА НАНОСТРУКТУРЫ В ДЕТАЛИ ПРИ ДЕЙСТВИИ ИОНОВ РАЗЛИЧНЫХ СОРТОВ, ЗАРЯДОВ И ЭНЕРГИЙ

*Г.И. Костюк, А.Н. Костюк, О.О. Бруяка*

На основе решения совместной задачи теплопроводности и термоупругости получены поля температур и температурных напряжений, в которых выделены зоны, где образуются наноструктуры. Для большого числа различных ионов и их зарядов от 1 до 3 получены зависимости размера зерна от энергии и заряда ионов.

Ключевые слова: Наноструктура, температура, температурные напряжения, размер зерна.

На основі вирішення сумісної задачі теплопровідності та термопружності одержані поля температур та температурних напружень, у яких вилучені зони, де утворюються наноструктури. Для широкого кола різних іонів та їх зарядів від 1 до 3 одержані залежності розміру зерна, кількості від енергії та заряду іонів.

Ключові слова: наноструктура, температура, температурні напруження, розмір зерна.

## Введение

Для получения нанокристаллических структур на поверхности, как известно, необходимо создание определенных температур (или скорости ее нарастания), давлений в необходимом объеме и наличия атома металла, вокруг которого формируется наноструктура.

Как показано в работах [1–10], действие заряженных частиц на конструкционные материалы приводит к появлению на глубине довольно высоких температур при действии индивидуальных ионов разных сортов и в зоне теплового воздействия есть вероятность появления температурных напряжений значительной величины, что подтверждает возможность появления локальных зон, где достигаются условия появления наноструктур. Для того чтобы такие условия реализовались в значительном объеме: действие высоких температур и напряжений также необходимо обеспечить максимальное заполнение поля температур с повышенными температурами и в то же время сохранить зоны с максимальными градиентами температур, когда реализуются высокие значения температурных напряжений. Очевидно, простым увеличением плотностей ионного тока этого достичь будет нельзя, так как с ростом плотности тока градиенты температур в зоне действия соседних частиц снижаются, а, следовательно, снижаются величины температурных напряжений и условия

образования наноструктур не выполняются.

Работа выполнялась в рамках программы Министерства образования и науки, "Новые и ресурсосберегающие и технологии в энергетике, промышленности и агропромышленном комплексе "(подсекция 13) "Аэрокосмическая техника и транспорт" и по темам "Создание физико-технических основ повышения качества материала аэрокосмических конструкций" и "Разработка технологических основ интегрированных технологий плазменно-ионной обработки деталей аэрокосмической техники", и хозяйственных работ и договоров о сотрудничестве.

## **1. Состояние вопроса**

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

Поэтому, несколько модернизировав модель действия индивидуальных частиц на конструкционные материалы [1–10] получим модель, учитывающую необходимые факторы (в частности, в модели не учитывалась зарядность иона и характер их сложного взаимовлияния в довольно большом рассматриваемом объеме).

## **2. Постановка задачи исследования**

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

1. Модель взаимодействия потоков ионов разных сортов, энергий, зарядов и плотностей токов, которая позволяет:

1 получить диапазон глубин, на которых вероятно получение наноструктур для каждого из потоков отдельно и оценить действие всех потоков по глубине;

2 рассчитать распределение полей температур и температурных напряжений в объеме детали;

3 определить размер зерна;

4 организация подачи частиц таким образом, чтобы максимальный объем детали был заполнен полями температур и температурных напряжений (теоретически и технически);

5 теоретически определить число частиц в нанокластере, количество нанокластеров образующихся в единицу времени.

2. Теория взаимодействия нанокластеров (нанокристаллитов) их размера, их энергетической связи между ними и физико-механические характеристики наноструктур позволяет

1 рассчитать размер нанокластеров энергии связи с соседними нанокластерами (зернами) и физико-механические характеристики наноматериала;

2 получить теоретически зависимости физико-механических характеристик НС от размера зерна, характера их расположения и взаимодействия, полноты заполнения объема наноструктурами.

3. Экспериментально теоретическая модель связи размера зерна с ФМХ:

1 микротвердость;

2 коэффициент трения;

3 предел текучести;

4 предел прочности;

5 модуль упругости;

6 износостойкость;

7 стойкость режущего инструмента (РИ).

I Адгезионное взаимодействие нанопокртия с основным материалом детали (теория).

II Техническое решение: обеспечение старта потоков ионов разных сортов, энергий, зарядов и плотностей токов.

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. Теоретическая модель взаимодействия потоков ионов различной энергии, сорта, зарядности и плотности тока с конструкционными материалами.

### **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 плазموхимических, 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 как в балансе энергии в элементарном объеме металлической мишени, так 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  $V_n$  (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 композиционных материалов и ленц-джоулев нагрев за счет растекания ионного тока.

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

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, электронов или плазменного потока;

$\mu_{i,e}$  – 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.

Энергию деформирования единичного объема определим как:

$$W = G \left[ \varepsilon_{xx}^2 + \varepsilon_{yy}^2 + \varepsilon_{zz}^2 + 2(\varepsilon_{xy}^2 + \varepsilon_{yz}^2 + \varepsilon_{zx}^2) + \frac{\mu}{1-\mu} \ell^2 - \frac{2(1+\mu)\alpha_1}{1-2\mu} \ell(T(x, y, z, t) - T) \right] \quad (2)$$

где  $2\varepsilon_{ik} = 2\varepsilon_{ki} = \frac{\partial u_k}{\partial x_i} + \frac{\partial u_i}{\partial x_k}$  ( $k, i = x, y, z$ );  $\ell = \varepsilon_{xx} + \varepsilon_{yy} + \varepsilon_{zz}$ ,

$\varepsilon_{xx}, \varepsilon_{yy}, \varepsilon_{zz}$  – удлинения;

$\varepsilon_{xy}, \varepsilon_{yz}, \varepsilon_{zx}$  – сдвиги относительно соответствующих осей;

$u_x, u_y, u_z$  – перемещение относительно соответствующих осей,;

$\alpha_l$  – коэффициент линейного расширения материала мишени;

$\mu$  – коэффициент Пуассона (отношение поперечной деформации к продольной, значения  $\mu$  заключены между 0 и 0,5);

$G$  – модуль сдвига (модуль второго рода);

$T_n$  – начальная температура. Для железа  $G = 3,5...5,3 \cdot 10^{10}$  Н/м<sup>2</sup>,  $\mu = 0,23...0,31$ .

Деформация сдвигов  $\varepsilon_{ik}$  не могут задаваться произвольно, они связаны дифференциальными соотношениями - условиями совместности:

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 \varepsilon_{xx}}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \varepsilon_{yy}}{\partial x^2} &= 2 \frac{\partial^2 \varepsilon_{xy}}{\partial x \partial y}; & \frac{\partial^2 \varepsilon_{xx}}{\partial y \partial z} &= \frac{\partial}{\partial x} \left[ -\frac{\partial \varepsilon_{yz}}{\partial x} + \frac{\partial \varepsilon_{zx}}{\partial y} + \frac{\partial \varepsilon_{xy}}{\partial z} \right] \\ \frac{\partial^2 \varepsilon_{yy}}{\partial z^2} + \frac{\partial^2 \varepsilon_{zz}}{\partial y^2} &= 2 \frac{\partial^2 \varepsilon_{yz}}{\partial z \partial y}; & \frac{\partial^2 \varepsilon_{yy}}{\partial x \partial z} &= \frac{\partial}{\partial y} \left[ -\frac{\partial \varepsilon_{zx}}{\partial x} + \frac{\partial \varepsilon_{xy}}{\partial z} + \frac{\partial \varepsilon_{yz}}{\partial x} \right] \\ \frac{\partial^2 \varepsilon_{xx}}{\partial z^2} + \frac{\partial^2 \varepsilon_{zz}}{\partial x^2} &= 2 \frac{\partial^2 \varepsilon_{zx}}{\partial z \partial x}; & \frac{\partial^2 \varepsilon_{xx}}{\partial y \partial x} &= \frac{\partial}{\partial z} \left[ -\frac{\partial \varepsilon_{yz}}{\partial z} + \frac{\partial \varepsilon_{zx}}{\partial x} + \frac{\partial \varepsilon_{xy}}{\partial y} \right] \end{aligned} \quad (3)$$

Этими условиями проверяется правильность определения удлинений и сдвигов, а их корректировка – вводом дополнительных напряжений.

Для определения удлинений  $\varepsilon_{xx}, \varepsilon_{yy}, \varepsilon_{zz}$  и сдвигов  $\varepsilon_{xy}, \varepsilon_{yz}, \varepsilon_{zx}$  воспользуемся выражением термоупругого потенциала перемещений  $\Phi$ .

$$\Delta \Phi - \frac{1-2\mu}{2(1-\mu)} \cdot \frac{\gamma}{G} \cdot \frac{\partial^2 \Phi}{\partial t^2} = \frac{1+\mu}{1-\mu} \cdot \alpha_l \cdot [T(x, y, z, t) - T_n] \quad (4)$$

где  $\gamma$  – плотность материала мишени.

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 (4) становится незначительным, получим:

$$\Delta \Phi = \frac{1+\mu}{1-\mu} \cdot \alpha_l \cdot [T(x, y, z, t) - T_n] \quad (5)$$

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

$$\varepsilon_{ik} = \frac{\partial^2 \Phi}{\partial i \partial k}, \quad (i, k = x, y, z). \quad (6)$$

Величины температурных напряжений определим по выражению:

$$\sigma_{ik} = 2G \left( \frac{\partial^2 \Phi}{\partial x_i \partial x_k} - \Delta \Phi \cdot \delta_{ik} \right), \quad (7)$$

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:

$$m_a = M \cdot m_p, \quad (8)$$

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  $t \geq t_k$

$$\frac{dn_a}{dt} = \frac{j}{e \cdot z \cdot L_D}, \quad (9)$$

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:

$$K_{диф} = a_d \cdot d_s^2 \cdot V_0 \cdot \exp(-U/(kT)) \quad (10)$$

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

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

$V_0$  – величина порядка частоты атомных колебаний в кристалле ( $10^{12} - 10^{14} \text{ с}^{-1}$ );

$U$  – 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 электрона или 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):

$$-\lambda[T] \frac{\partial T(x, y, z, t)}{\partial x} = F_{i,e} - F_{расп} - F_{м.э.} - [F_{и.и.е} + F_{и.ф.э} + F_{и.э.э} + F_{киэ} + F_{х.рл} + F_{трл} + F_{пл}], \\ -F_{исп} - F_{пл} - \sigma \epsilon T^4(0, y, z, t) \pm F_{конд} + F_{пх} + \sigma \epsilon_c T_c^4, \quad (11)$$

где  $\sigma$  – постоянная Стефана-Больцмана;



Проводились расчеты полей температур и напряжений и вычислялась зона, в которой температуры превышали 700-1500 К, а температурные напряжения составляли величины  $10^7 \dots 10^{10}$  Па – предполагалось, что в этой зоне высокая вероятность образования наноструктур.

Определялся объем нанозерна, верхняя и нижняя границы глубин, на которых образуются кластеры, размер зерна и число частиц в кластере.

#### **4. Влияние сорта иона, его энергии и заряда на размер зерна и число частиц в нано-кластере**

Размер получаемого зерна определялся зоной материала, где температуры превышают 500-1500 К, скорости нарастания температуры более  $10^7$  К/с и величины давлений (температурных напряжений) порядка  $10^7 \dots 10^{10}$  Па. В полях температур, действующих к концу теплового действия иона выделялась зона, где температуры превышали необходимые, скорости роста температуры практически для всех исследованных сортов ионов, а величины температурных напряжений близки или превышают требуемые для плотностей токов меньших или равных первой критической (за время действия теплового источника - частицы не наблюдается наложение температурных полей от действия соседних частиц).

С учетом этих критериев получения наноструктур, были получены зависимости размера зерна от энергии ионов (энергии  $2 \cdot 10^2$ ,  $2 \cdot 10^3$  и  $2 \cdot 10^4$  эВ) при различных зарядах числа ионов ( $z = 1, 2$  и  $3$ ) и размера зерна от заряда ионов ( $z = 1, 2$  и  $3$ ) при различных энергиях ионов ( $2 \cdot 10^2$ ,  $2 \cdot 10^3$  и  $2 \cdot 10^4$  эВ) для групп ионов мало отличающихся по массе 1 - C, B, N; 2 - Al; 3 - Ti, V, Cr; 4 - Fe, Ni, Co; 5 - Y, Zr, Mo; 6 - Hf, Ta, W, Pt, которые представлены на рис. 1-12. Видно, что с ростом заряда иона размер зерна растет для всех исследованных сортов ионов, но абсолютная величина снижается при переходе от более легких ионов (N) к более тяжелым (Pt) (рис. 12).

Рост размера зерна с ростом заряда иона объясняется тем, что с ростом заряда увеличивается пробег иона, а значит и растет зона, в которой распространяются поле температур и напряжений, а следовательно и зоны, где они превышают критериальные значения для получения наноструктур. При росте энергии ионов растет размер зерна (кластера), что также связано увеличением пробега, а следовательно и размера зоны, в которой возможно получение наноструктур.

Зная размер зерна прогнозировать микротвердость, предел текучести, коэффициент трения, износостойкость и другие физико-механические и эксплуатационные характеристики. Так, например, на рис. 13 и рис. 14 даны обобщенные зависимости микротвердости и предела текучести от размера зерна, полученные из обзоров [Нано. 2012, Нано., 2005] или на рис. соответственно из работ [ ]. По этим значениям можно дать прогноз микротвердости и предела текучести. Воспользовались данными монографии [Нано., 2012].

для С, В, N

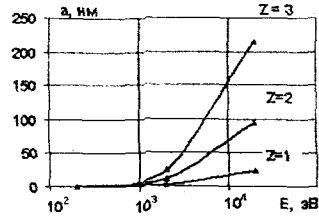
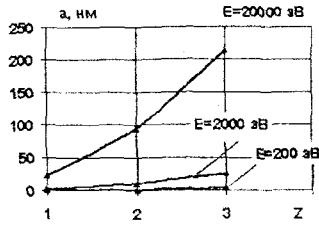
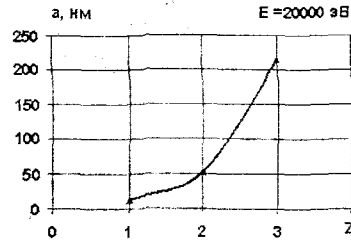
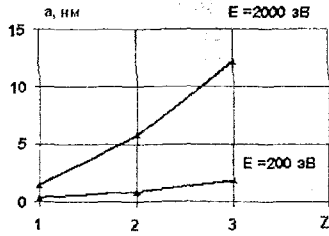


Рис. 1 Зависимость размера зерна от заряда ионов С, В, N при энергиях  $2 \cdot 10^2$ ,  $2 \cdot 10^3$  и  $2 \cdot 10^4$  эВ

Рис. 2 Зависимость размера зерна от энергии ионов С, В, N при зарядах 1,2 и 3

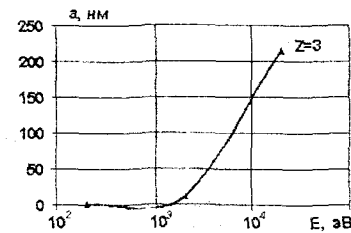
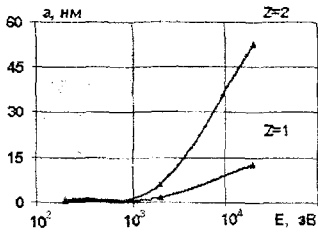
для Al



а)

б)

Рис. 3 Зависимость размера зерна от заряда ионов Al при энергиях  $2 \cdot 10^2$ ,  $2 \cdot 10^3$  (а) и  $2 \cdot 10^4$  эВ (б)

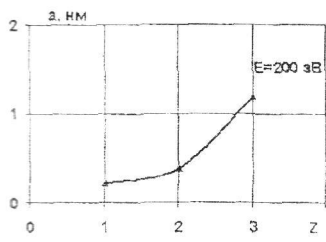


а)

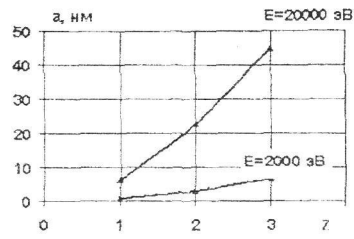
б)

Рис. 4 Зависимость размера зерна от энергии ионов Al при зарядах 1,2 (а) и 3(б)

для Ti, V, Cr



а)



б)

Рис. 5 Зависимость размера зерна от заряда ионов Ti, V, Cr при энергиях  $2 \cdot 10^2$  эВ (а) и  $2 \cdot 10^3$ ,  $2 \cdot 10^4$  эВ (б)

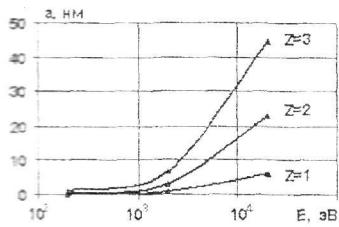


Рис. 6 Зависимость размера зерна от энергии ионов Ti, V, Cr при зарядах 1, 2 и 3

Fe, Ni, Co

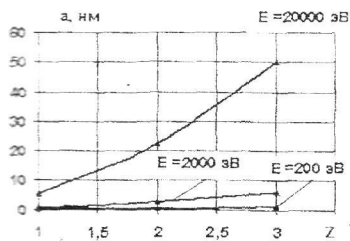


Рис. 7 Зависимость размера зерна от заряда ионов Fe, Ni, Co при энергиях

$2 \cdot 10^2$ ,  $2 \cdot 10^3$ ,  $2 \cdot 10^4$  эВ

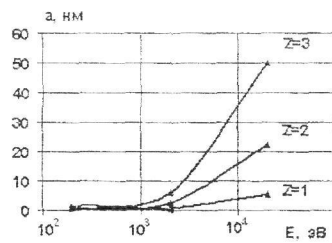


Рис. 8 Зависимость размера зерна от энергии ионов Fe, Ni, Co при зарядах

1, 2 и 3

для Y, Zr, Mo

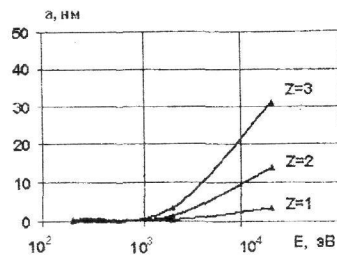
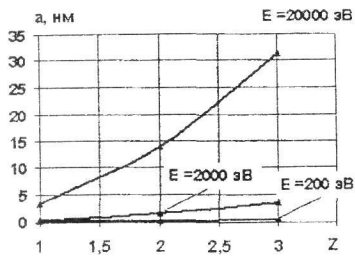
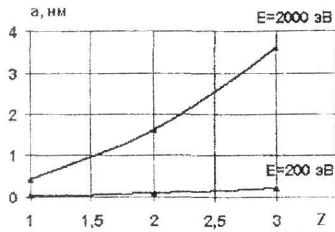


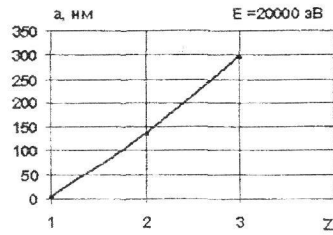
Рис. 9 Зависимость размера зерна от заряда ионов Y, Zr, Mo при энергиях  $2 \cdot 10^2$ ,  $2 \cdot 10^3$ ,  $2 \cdot 10^4$  эВ

Рис. 10 Зависимость размера зерна от энергии ионов Y, Zr, Mo при зарядах 1, 2 и 3

для Hf, Ta, W, Pt

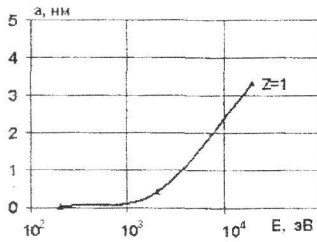


а)

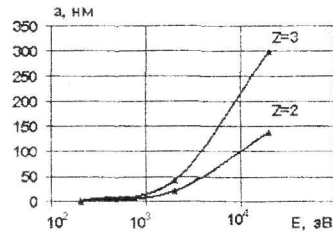


б)

Рис. 11 Зависимость размера зерна от заряда ионов Hf, Ta, W, Pt при энергиях  $2 \cdot 10^2$ ,  $2 \cdot 10^3$  (а) и  $2 \cdot 10^4$  эВ (б)



а)



б)

Рис. 12 Зависимость размера зерна от энергии ионов Hf, Ta, W, Pt при зарядах 1(а) и 2, 3(б)

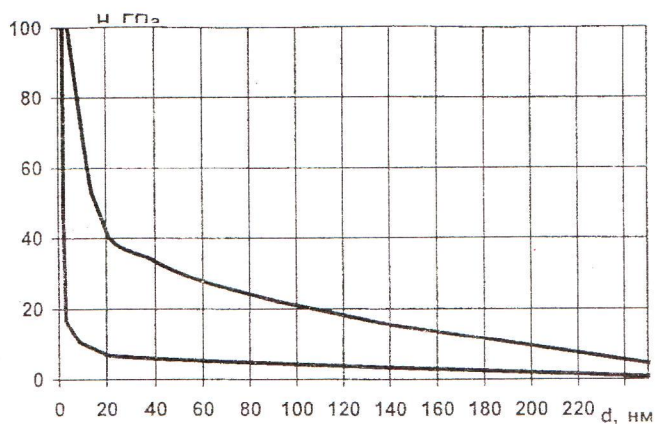


Рис. 13 Результаты обобщения зависимости микротвердости от размера зерна: 1 – максимальные значения; 2 – минимальные значения

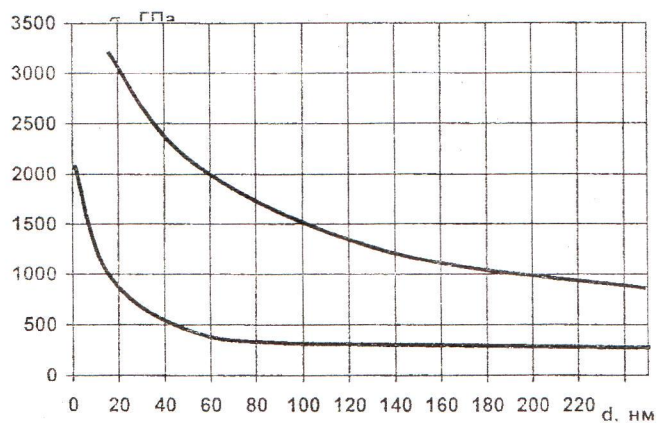


Рис. 14 Результаты обобщения зависимости предела текучести от размера зерна по работе 1

#### Библиографический список

1. Костюк Г.И. Нанотехнологии: теория, эксперимент, техника перспективы [Текст]: моногр./ Г.И. Костюк.-К.:Изд. ц. Межд. академ. наук и иннов. техн., 2012.-648 с.
2. Костюк Г.И. Физико-технические основы нанесения покрытий, ионной имплантации и ионного легирования, лазерной обработки и упрочнения комбинированных технологий (Харьков, изд-во АИНУ, 2002. - 1088 с.)

«Физические процессы плазменно-ионных, ионно-лучевых, плазменных, светолучевых и комбинированных технологий». - 596 с.

3. Костюк Г.И. Физико-технические основы нанесения покрытий, ионной имплантации и ионного легирования, лазерной обработки и упрочнения, комбинированных технологий (Харьков, изд-во АИНУ, 2002. - 1088 с) «Справочник для расчета основных физических и технологических параметров, оценки возможностей, выбора типа технологий и оборудования» . - 482 с.

4. Костюк Г.И. Наноструктуры и нанопокртыя: перспективы и реальность: 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: учеб. пособие / Г.И. Костюк. - Х.: НАКУ «ХАИ», 2008. - 552 с.

6. Костюк Г.И. Эффективный режущий инструмент с покрытием и упрочненным слоем. Монография-справочник. - Х.: НАКУ «ХАИ», 2007. - 633 с.

7. Костюк Г.И. Эффективный режущий инструмент с покрытием и упрочненным слоем: справ. / Г.И. Костюк. - К.: Вид-во АИНУ, 2003. - 412 с.

8. Костюк Г.И. Физико-технические основы роботизированного производства: учеб. пособие / Г.И. Костюк. -Х.: Нац. аэрокосм. ун-т «ХАИ», 2006. - 614 с.

9. Гречихин Л.И. Физика наночастиц и нанотехнологий. Минск, УП «Технопринт», 2004. 397 с.

10. Шнейдер П. Инженерные проблемы теплопроводности / П. Шнейдер. - М.: Иностр. лит-ра, 1960. - 488 с.

11. Аксенов И.И. Вакуумная дуга в эрозионных источниках плазмы / И.И. Аксенов. - Изд-во НИИ «ХФТИ», Харьков, 2005. - 211 с.

12. Хаякава С. Физика космических лучей. Кн. 2.: Ядерно-физический аспект / С. Хаякава. - М.: Мир, 1973. - 701 с.

13. Готт Ю.В. Взаимодействие частиц с веществом в плазменных исследованиях / Ю.В. Готт. - М.: Атомиздат, 1978. - 271 с.

14. Гусев А.И. Нанокристаллические материалы: методы получения и свойства / Изд-во РАН, Уральское отделение, Екатеринбург, 1998. - 302 с.

15. Гусев А.И. Наноматериалы наноструктуры, нанотехнологии. М: «Физматлит», 2005. - 416 с.

16. Решетняк Е.Н., Стрельницкий А.И. Синтез упрочняющих наноструктурных покрытий. Вопросы атомной науки и техники. 2008, №2. С. 119 - 130.

17. Андриевский Р.А. Наноматериалы: концепция и современные проблемы. Физика металлов и металловедение 2003 т. 91 № 1, 50-56

18. Гончаров А.А., Игнатенко П.И., Петухов В.В., Коновалов В.А., Волкова Г.К., Стулак В.А., Глазунова В.А. Состав, структура и свойства наноструктурных пленок боридов тантала. ЖТФ, 2006, т. 76, В10.