

Модель определения размера зерна наноструктуры в детали при действии ионов различных сортов, зарядов и энергий и физико-механические характеристики детали

Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ»

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 и дана оценка физико-механических характеристик материала детали.

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

Введение

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

Как показано в работах [1–10], действие заряженных частиц на конструкционные материалы приводит к появлению в материале 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 возникновения 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, молодежи и спорта Украины "Новые 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", а также в рамках 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 температурного поля по глубине обеспечивается высокая средняя температура), в то же время, выбирая расположение поля 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 модернизовав модель действия индивидуальных частиц на конструкционные материалы [1–10], получим модель, учитывающую необходимые факторы (в частности, в модели не учитывались 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 проанализируем ряд теоретических и технических задач (рис. 1):

I. 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) организовать подачу частиц таким образом, чтобы максимальный объем детали был заполнен полями температур и температурных напряжений (теоретически и технически);

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

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

III. Экспериментально-теоретическая модель связи размера зерна с $\Phi M X$:

1) микротвердость;

2) коэффициент трения;

- 3) предел текучести;
- 4) предел прочности;
- 5) модуль упругости;
- 6) износостойкость;
- 7) стойкость режущего инструмента (РИ).

IV. Адгезионное взаимодействие нанопокрывтия с основным материалом детали (теория).

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

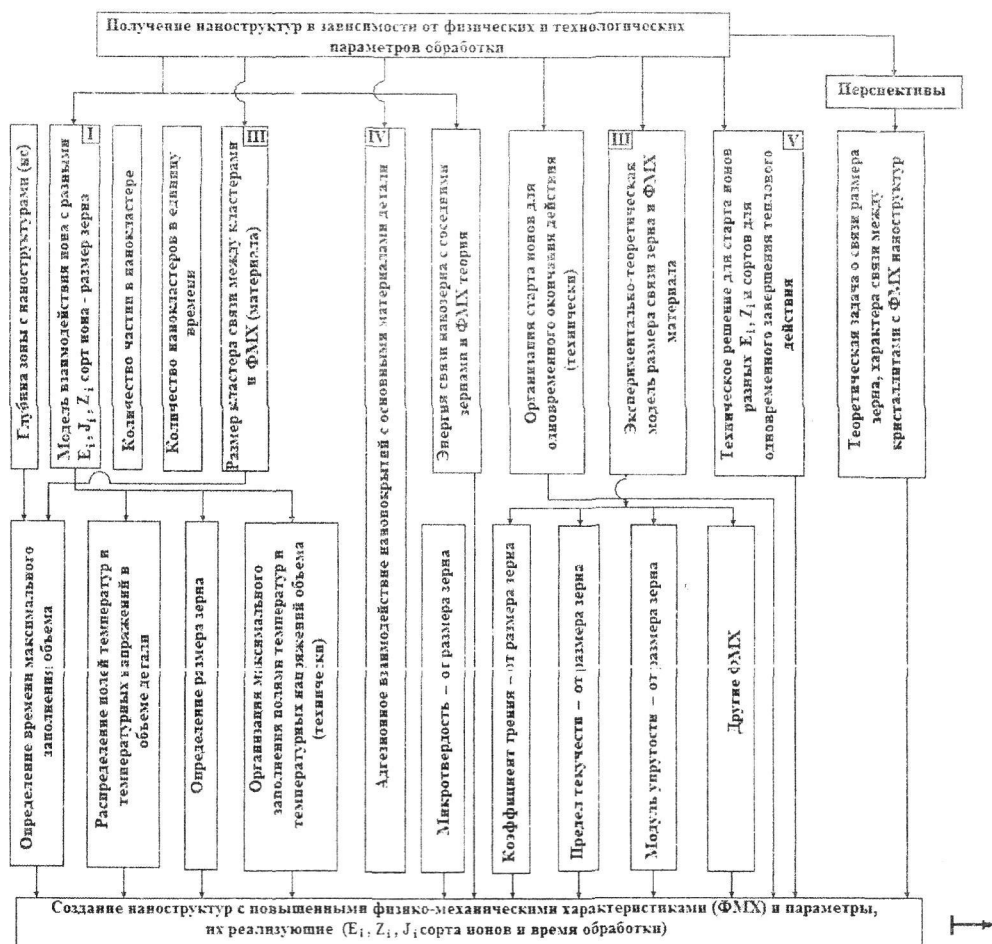


Рис. 1. Процессы, реализующиеся при образовании наноструктур с высокими физико-механическими характеристиками

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 плазموхимических, но в настоящее время отсутствуют работы, учитывающие эти факторы и тем более их взаимосвязь. Все эти процессы влияют на характер теплообмена как 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 (1)) реализуется за счет перемещения потока частиц вдоль обрабатываемой поверхности или перемещения мишени относительно потока плазмы со скоростью V_n (второе слагаемое), теплофизических процессов: влияния 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), затрат 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 за счет растекания ионного тока:

$$\begin{aligned}
 C[T] \cdot \gamma[T] \frac{dT(x,y,z,t)}{dt} + C[T] \cdot \gamma[T] \frac{\partial T(x,y,z,t)}{\partial y} \cdot V_n + C[T] \cdot \gamma[T] \cdot \tau_p \frac{d^2 T(x,y,z,t)}{dt^2} = \\
 = \nabla \lambda [T \cdot \nabla T](x,y,z,t) + C[T] \cdot \gamma[T] \cdot V_{\text{тм}} \frac{\partial T(x,y,z,t)}{\partial x} - A \cdot L_{\text{пл}} \cdot \gamma[T] \frac{dV_{\text{ф}}}{dt} + \\
 + B \cdot j_{i,e} \cdot \mu_{i,e} \frac{\partial E_{i,e}}{\partial x} - E_{\text{см}} \cdot S_{\text{см}} \frac{j_{i,e}}{\lambda_{\text{спие}}} \pm D \frac{dW(x,y,z,t)}{dt} \pm m_a \cdot C_a [T_a] \frac{dn_a}{dt} (T_a - T(x,y,z,t)) \pm \\
 \pm P_{T,X} (n_A, n_B, T, t_e) \frac{dn_{A(B)}}{dt} L_{T,X,P} + \rho [T] \cdot j^2(x,y,z,t),
 \end{aligned} \quad (1)$$

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

τ_p – время релаксации температуры на один Кельвин;

V_n – скорость перемещения ионного потока или мишени относительно него;

$L_{\text{пл}}$ и $L_{T,X,P}$ – удельная теплота плавления и термохимической реакции;

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

$V_{\text{пл}}$ – 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;

$E_{\text{см}}$ – энергия смещения атомов;

$S_{см}$ – количество 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 ;

$P_{T,x}(n_A, n_B, T, t_{B3})$ – вероятность термохимической реакции, зависящая от концентрации реагентов n_A и n_B , температуры T и времени взаимодействия t_{B3} ;

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

$$W = G \left[\varepsilon_{xx}^2 + \varepsilon_{yy}^2 + \varepsilon_{zz}^2 + 2(\varepsilon_{xy}^2 + \varepsilon_{yz}^2 + \varepsilon_{zx}^2) + \frac{\mu}{1-\mu} \ell^2 - \frac{2(1+\mu)\alpha_1}{1-2\mu} \ell(T(x, y, z, t) - T_0) \right], \quad (2)$$

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 – перемещения относительно соответствующих осей;

α_1 – коэффициент линейного расширения материала мишени;

μ – коэффициент Пуассона (отношение поперечной деформации к продольной, значения μ находятся в диапазоне 0 и 0,5);

G – модуль сдвига (модуль второго рода);

T_0 – начальная температура. Для железа $G = 3,5 \dots 5,3 \cdot 10^{10}$ Н/м², $\mu = 0,23 \dots 0,31$.

Деформации сдвигов ε_{ik} не могут задаваться произвольно, они связаны дифференциальными соотношениями - условиями совместности:

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

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 Φ :

$$\Delta \Phi - \frac{1-2\mu}{2(1-\mu)} \cdot \frac{\gamma}{G} \cdot \frac{\partial^2 \Phi}{\partial x^2} = \frac{1+\mu}{1-\mu} \cdot \alpha_1 \cdot [T(x, y, z, t) - T_0], \quad (4)$$

где γ – 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, получаем:

$$\Delta\Phi = \frac{1+\mu}{1-\mu} \cdot \alpha_1 \cdot [T(x,y,z,t) - T] \quad (5)$$

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

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

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

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

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, $t_k = L_D^2/\alpha$;

α – коэффициент температуропроводности.

Формула для расчета коэффициента диффузии имеет вид

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

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 ($10^{12} \dots 10^{14} \text{ с}^{-1}$);

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: тепло, выделяемое на поверхности вследствие действия электрона или иона (первое слагаемое справа), отводится с

распыленными частицами (второе слагаемое), с термоэлектронами (третье слагаемое), для ионов – тепловой поток отводится с ионо-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: тепловой поток отводится 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 в выражении (11)):

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

где σ – 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.

Определялись 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 нанокластере

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 наложения 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 - С, В, 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 увеличением 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 увеличением заряда иона объясняется тем, что с увеличением 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 увеличивается размер зерна (кластера), что также связано с увеличением пробега, а следовательно и размера зоны, в которой возможно получение наноструктур.

Зная размер зерна, можно прогнозировать микротвердость, предел текучести, коэффициент трения, износостойкость и другие физико-механические и эксплуатационные характеристики. Так, например, на рис. 13 и 14 приведены обобщенные зависимости микротвердости и предела текучести от размера зерна. По этим значениям можно дать прогноз микротвердости и предела текучести. Воспользовались данными монографии [1].

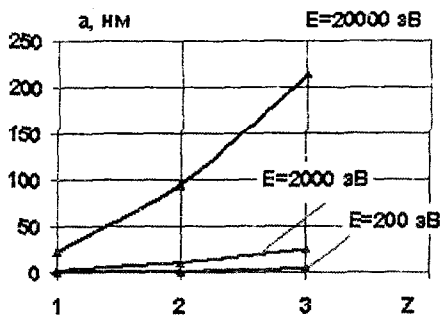


Рис. 1. Зависимость размера зерна от заряда ионов С, В, N при энергиях $2 \cdot 10^2$, $2 \cdot 10^3$ и $2 \cdot 10^4$ эВ

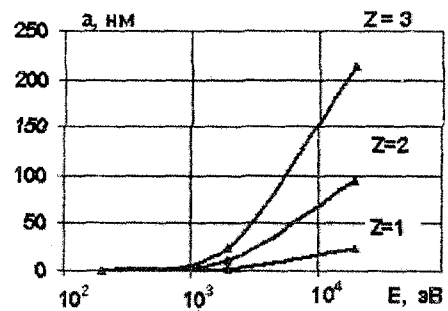


Рис. 2. Зависимость размера зерна от энергии ионов С, В, N при зарядах 1,2 и 3

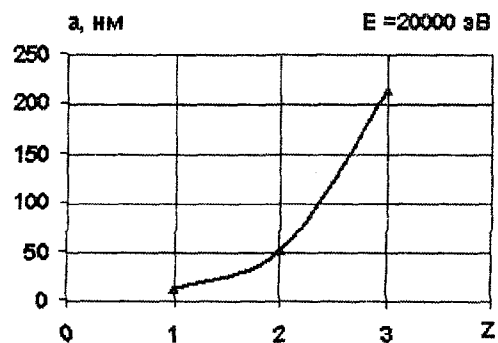
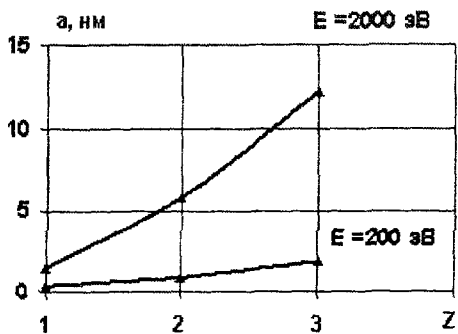
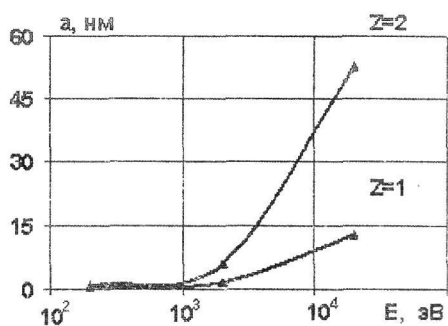
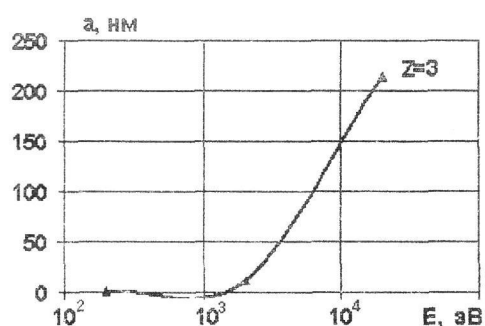


Рис. 3. Зависимость размера зерна от заряда ионов Al при энергиях $2 \cdot 10^2$, $2 \cdot 10^3$ (а) и $2 \cdot 10^4$ эВ (б)

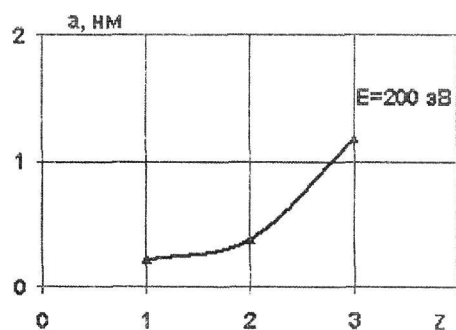


а

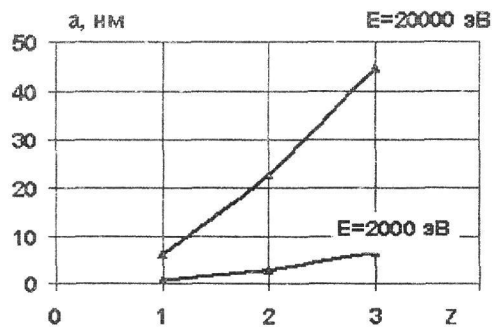


б

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



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)

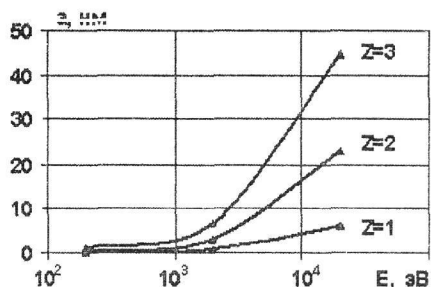


Рис. 6. Зависимость размера зерна от энергии ионов Ti, V, Cr при зарядах 1,2 и 3

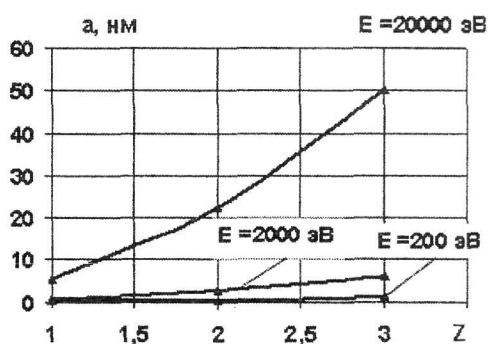


Рис. 7. Зависимость размера зерна от заряда ионов Fe, Ni, Co при энергиях $2 \cdot 10^2$, $2 \cdot 10^3$, $2 \cdot 10^4$ эВ

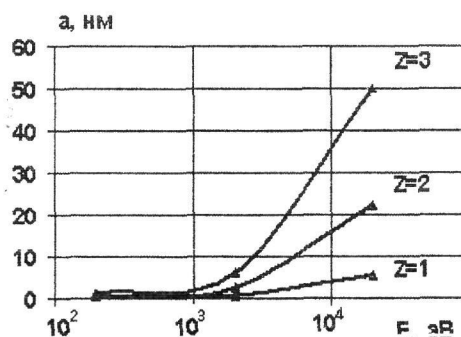


Рис. 8. Зависимость размера зерна от энергии ионов Fe, Ni, Co при зарядах 1,2 и 3

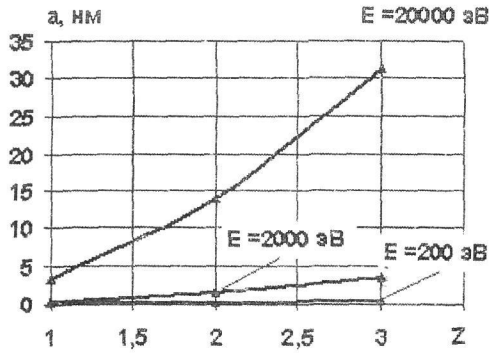


Рис. 9. Зависимость размера зерна от заряда ионов Y, Zr, Mo при энергиях $2 \cdot 10^2$, $2 \cdot 10^3$, $2 \cdot 10^4$ эВ

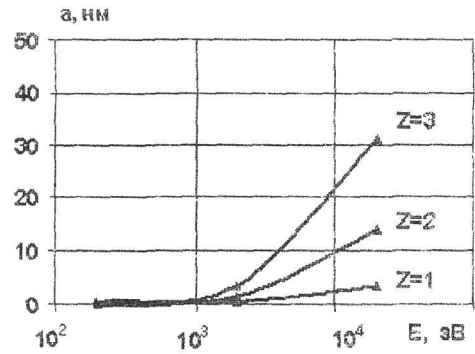


Рис. 10. Зависимость размера зерна от энергии ионов Y, Zr, Mo при зарядах 1, 2 и 3

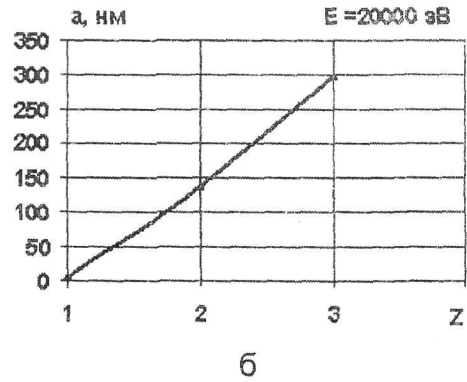
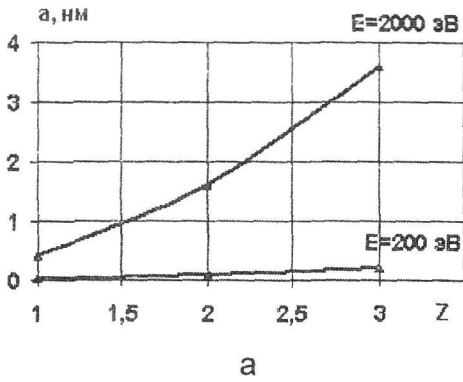


Рис. 11. Зависимость размера зерна от заряда ионов Hf, Ta, W, Pt при энергиях $2 \cdot 10^2$, $2 \cdot 10^3$ (а) и $2^4 \cdot 10$ эВ (б)

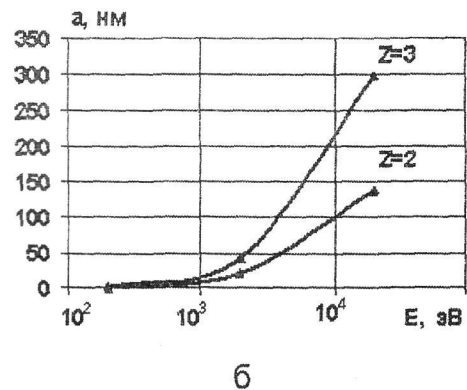
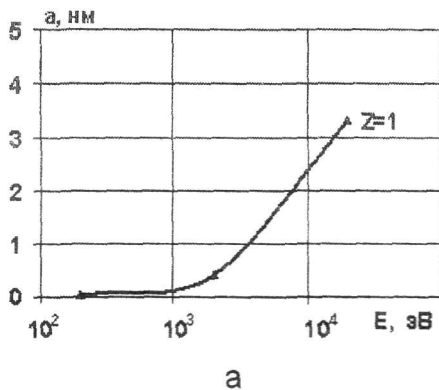


Рис. 12. Зависимость размера зерна от энергии ионов Hf, Ta, W, Pt при зарядах 1(а) и 2, 3(б)

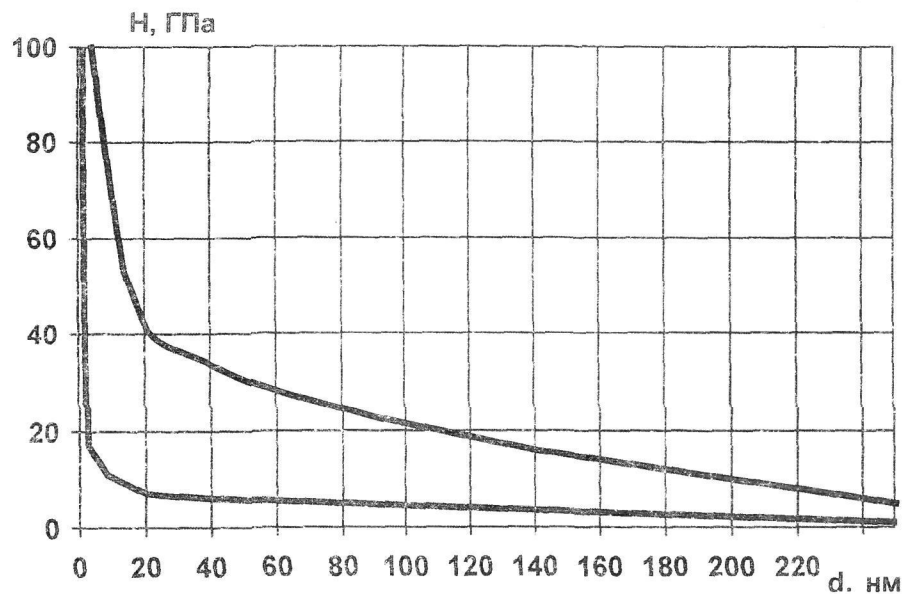


Рис. 13. Результаты обобщения зависимости микротвердости от размера зерна: 1 – максимальные значения; 2 – минимальные значения

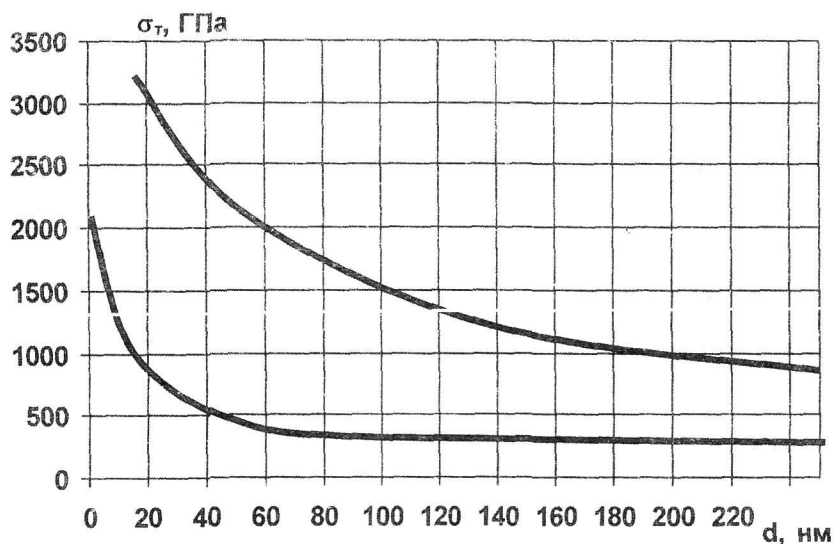


Рис. 14. Результаты обобщения зависимости предела текучести от размера зерна по работе [1]

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] / Г.И. Костюк. – 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.

Рецензент: д-р техн. наук, проф., А.И. Долматов,
Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского
«Харьковский авиационный институт», Харьков, Украина.

Поступила в редакцию 21.07.12.