

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 хоздоговорных 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 модернизировав 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 ФМХ:

- 1) микротвердость;
- 2) коэффициент трения;

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

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

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

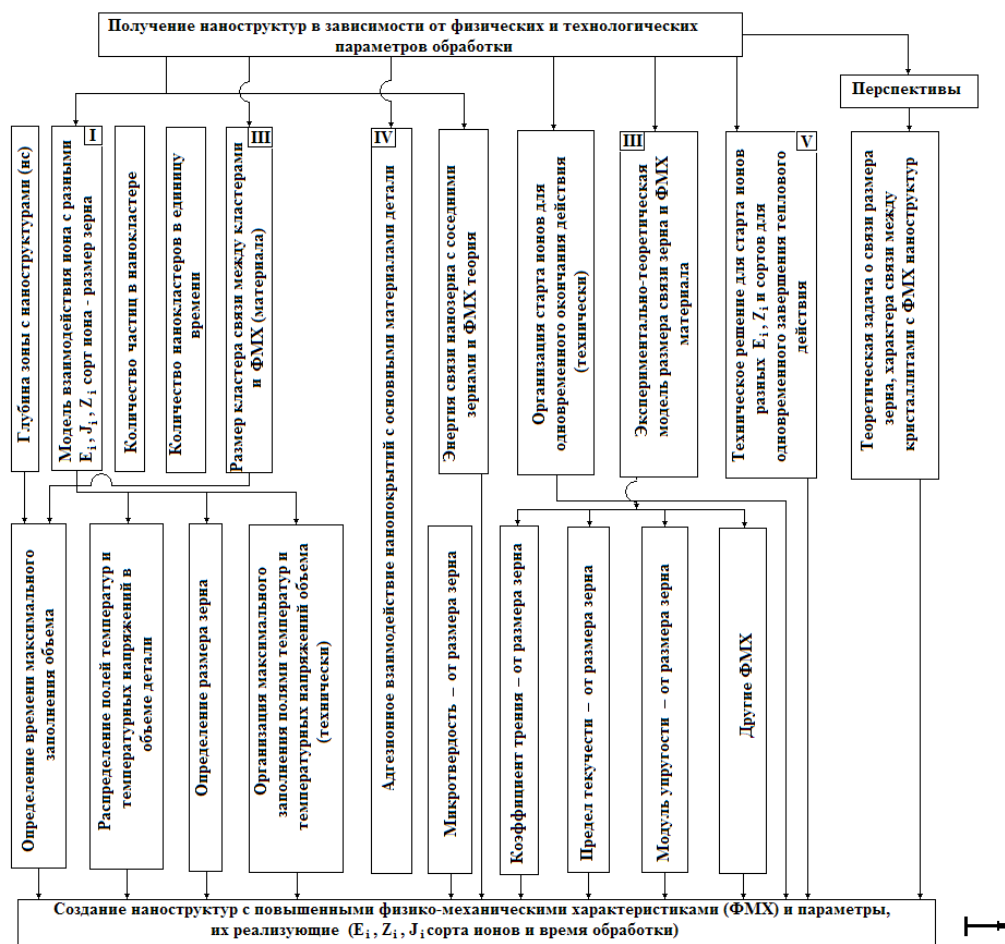


Рис. 1. Процессы, реализующиеся при образовании наноструктур с высокими физико-механическими характеристиками

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 плазмохимических, 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:

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

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 ;

$P_{Т,Х}(n_A, n_B, T, t_{B3})$ – 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

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

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

$\varepsilon_{xx}, \varepsilon_{yy}, \varepsilon_{zz}$ – 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_H – 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:

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

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 :

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

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:

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

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

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

Величины температурных напряжений определим по выражению

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

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

$$K_{\text{диф}} = a_d \cdot d_3^2 \cdot V_0 \cdot \exp(-U/(kT)), \quad (10)$$

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

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)):

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

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 - 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 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].

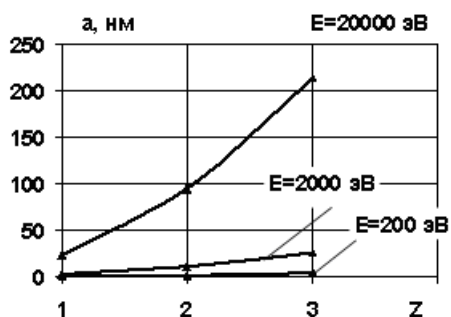


Рис. 1. Зависимость размера зерна от заряда ионов C, B, N при энергиях $2 \cdot 10^2$, $2 \cdot 10^3$ и $2 \cdot 10^4$ эВ

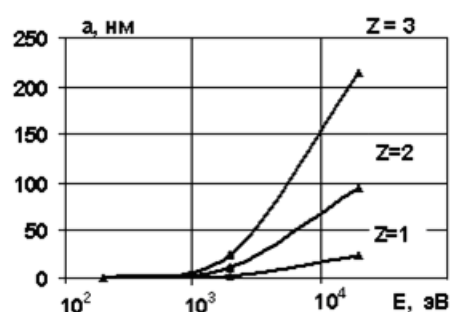


Рис. 2. Зависимость размера зерна от энергии ионов C, B, N при зарядах 1, 2 и 3

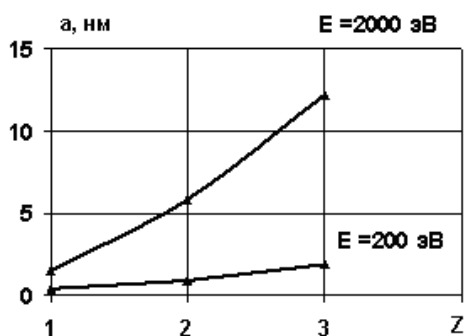


Рис. 3. Зависимость размера зерна от заряда ионов Al при энергиях $2 \cdot 10^2$, $2 \cdot 10^3$ (а) и $2 \cdot 10^4$ эВ (б)

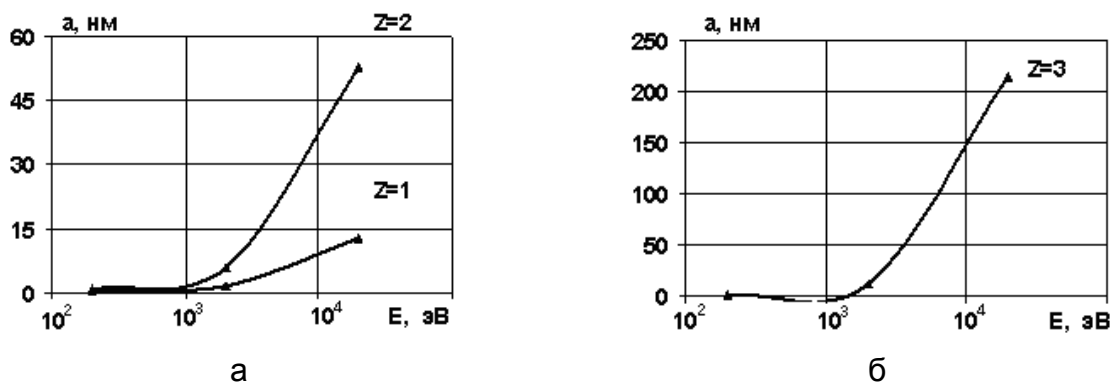


Рис. 4. Зависимость размера зерна от энергии ионов Al при зарядах 1, 2 (а) и 3(б)

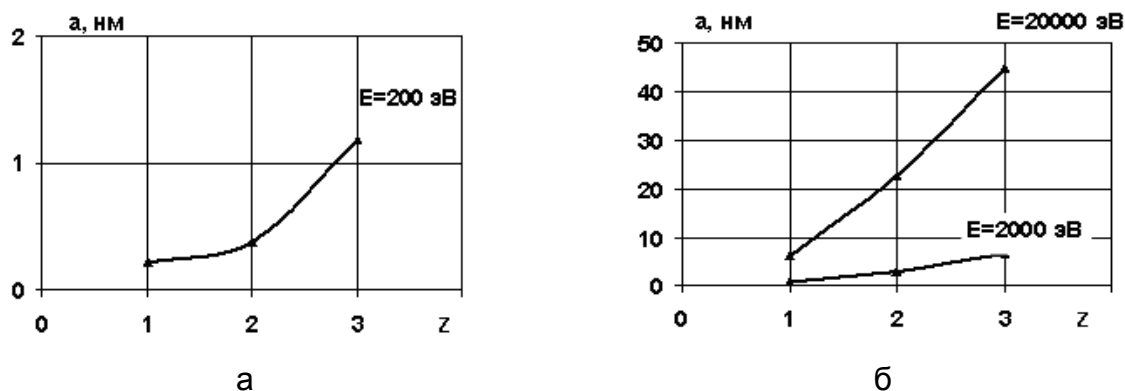


Рис. 5. Зависимость размера зерна от заряда ионов Ti, V, Cr при энергиях 2·10² эВ (а) и , 2·10³, 2·10⁴ эВ (б)

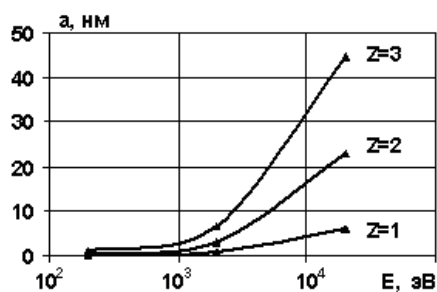


Рис. 6. Зависимость размера зерна от энергии ионов Ti, V, Cr при зарядах 1,2 и 3

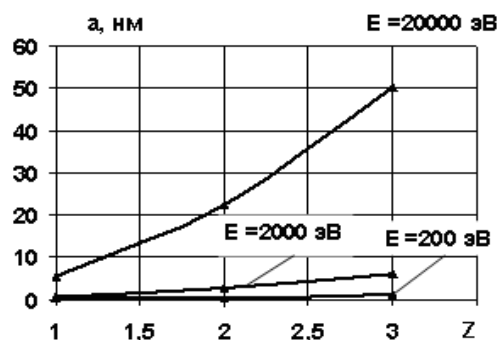


Рис. 7. Зависимость размера зерна от заряда ионов Fe, Ni, Co при энергиях 2·10², 2·10³, 2·10⁴ эВ

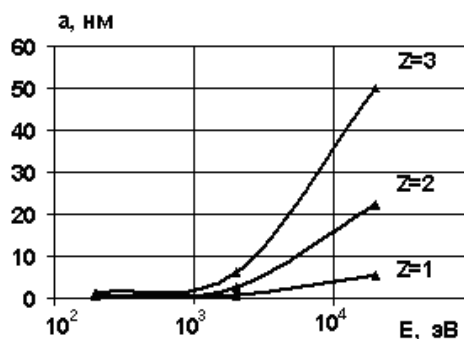


Рис. 8. Зависимость размера зерна от энергии ионов Fe, Ni, Co при зарядах 1,2 и 3

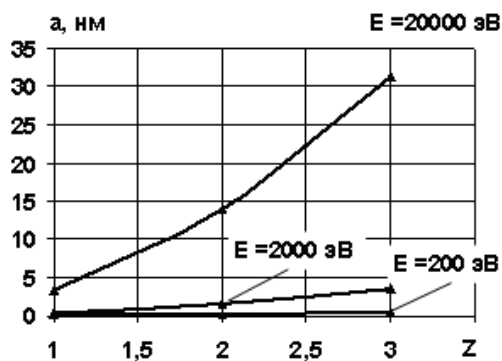


Рис. 9. Зависимость размера зерна от заряда ионов Y, Zr, Mo при энергиях $2 \cdot 10^2$, $2 \cdot 10^3$, $2 \cdot 10^4$ эВ

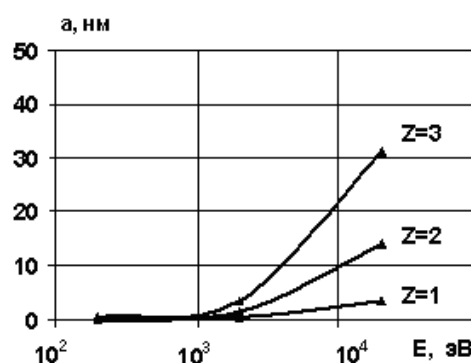


Рис. 10. Зависимость размера зерна от энергии ионов Y, Zr, Mo при зарядах 1, 2 и 3

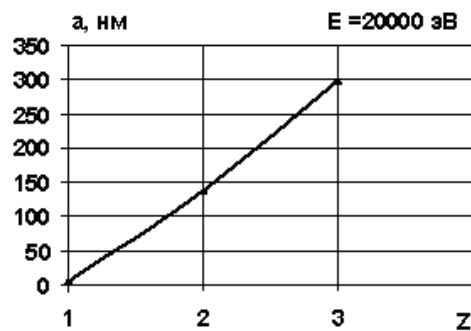
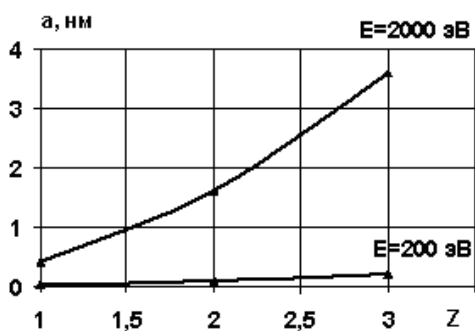


Рис. 11. Зависимость размера зерна от заряда ионов Hf, Ta, W, Pt при энергиях $2 \cdot 10^2$, $2 \cdot 10^3$ (а) и $2^4 \cdot 10$ эВ (б)

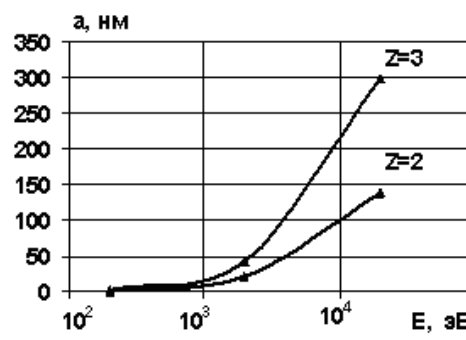
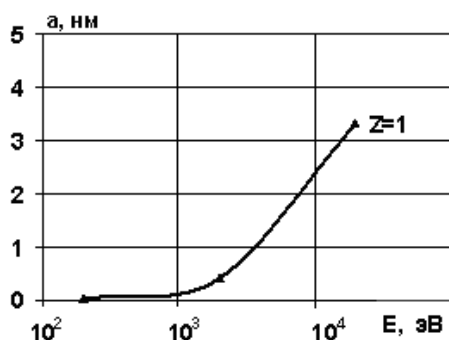


Рис. 12. Зависимость размера зерна от энергии ионов Hf, Ta, W, Pt при зарядах 1(а) и 2, 3(б)

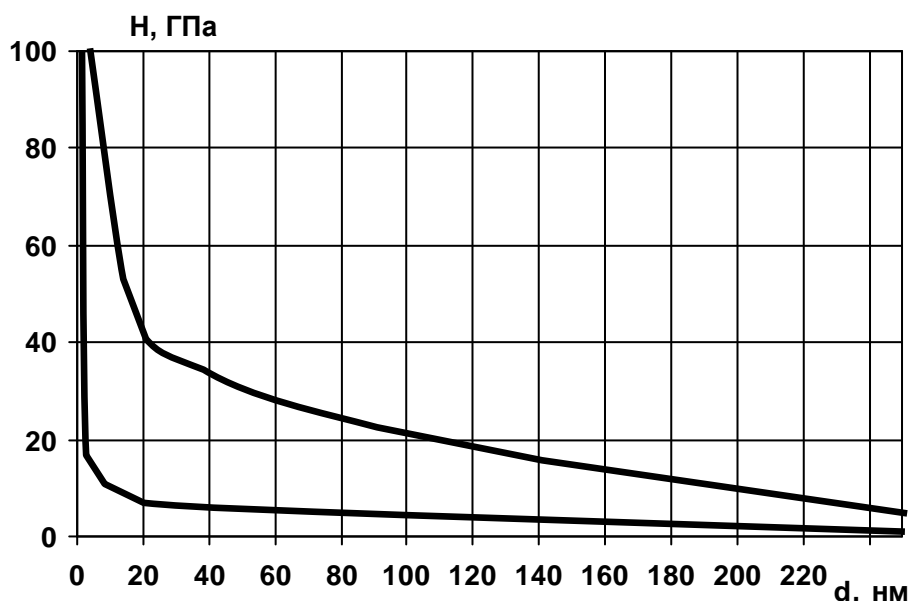


Рис. 13. Результаты обобщения зависимости микротвердости от размера зерна: 1 – максимальные значения; 2 – минимальные значения

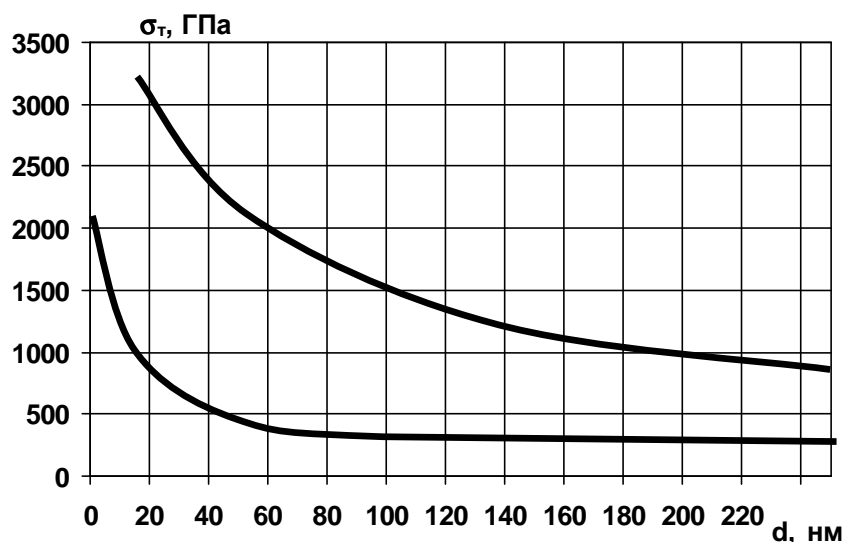


Рис. 14. Результаты обобщения зависимости предела текучести от размера зерна по работе [1]

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 нанопокрывтия: 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 отделение, 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.

Модель визначення розміру зерна наноструктур у деталі при дії іонів різних сортів, зарядів і енергій і фізико-механічні характеристики деталі

На основі вирішення сумісної задачі теплопровідності та термопружності одержано поля температур і температурних напружень, у яких виділено зони, де утворюються наноструктури. Для великої кількості різних іонів та їхніх зарядів від одного до трьох одержано залежності розміру зерна від енергії та заряду іонів і наведено оцінку фізико-механічних характеристик матеріалу деталі.

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

A model for determining the size of grain in detail nanostructures under the influence of ions of different varieties, charge and energy and physical and mechanical details

Based on joint problem solving heat conduction and thermoelasticity obtained temperature field and thermal stresses, which highlighted areas where the formation of nanostructures. For a large number of different ions and their charges from 1 to 3 were obtained according to grain size on the energy and charge of ions and provides an assessment of physical and mechanical properties of the material details.

Keywords: nanostructure, temperature, thermal stresses, the grain size.