

Определение температурных напряжений и скорости деформирования при действии ионов на алюминиевые сплавы и наноструктуры

*Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского
«Харьковский авиационный институт»*

Для широкого круга ионов B^+ , N^+ , C^+ , Al^+ , V^+ , Cr^+ , O^+ , Ni^+ , Zr^+ , Mo^+ , Hf^+ , W^+ , Ta^+ , Pt^+ получены температурные напряжения и скорости их роста при действии этих ионов с зарядом от одного до трех и действии на алюминиевый сплав Д16Т. Получены диапазоны температурных напряжений, которые лежат в пределах от 10^7 до $2,6 \cdot 10^9$ Па. Скорости их роста изменяются от $5 \cdot 10^{18}$ до $1,3 \cdot 10^{22}$ Па/с, причем показано, что с ростом энергии и заряда ионов эти величины растут; и, несмотря на то, что величины напряжений еще недостаточны для самостоятельного образования наноструктур, скорости деформирования позволяют предполагать возможность их образования.

Ключевые слова: температурные напряжения, скорости деформирования, наноструктуры, алюминиевые сплавы.

Введение

В настоящее время широко используются алюминиевые сплавы при изготовлении деталей аэрокосмической техники, что связано с их малым удельным весом и довольно высокими удельными прочностными характеристиками, но поверхностный слой их не обладает достаточной износостойкостью, ударной и усталостной прочностью, а также микротвердость их довольно невысока. Всё это не позволяет широко использовать их в авиационной и космической технике. Но создание наноструктурных слоев в их поверхностном слое может существенно повысить микротвердость, следовательно, и износостойкость и контактную прочность, а существенное уменьшение размера зерна позволит обеспечить коррозионную и усталостную прочность.

Работа выполнена в рамках программы Министерства образования и науки Украины «Новые ресурсосберегающие технологии в энергетике, промышленности и агропромышленном комплексе» (подсекция 13 «Аэрокосмическая техника и транспорт») и по темам: «Создание физико-технических основ повышения качества материалов аэрокосмических конструкций» и «Разработка технологических основ интегрированных технологий плазменно-ионной обработки деталей аэрокосмической техники» (подсекция 6 «Физико-технические проблемы материаловедения»), «Концепция создания наноструктур, нано- и традиционных покрытий с учетом влияния адгезии на эффективность и работоспособность деталей АТ, АД и РИ», хоздоговорных работ и договоров о сотрудничестве.

1. Состояние вопроса

Несмотря на то, что в настоящее время исследованию наноструктур уделяется большое внимание, к сожалению, теоретических работ в этом плане практически нет. Экспериментальные работы ведутся спонтанно, без четкого плана проводимых исследований, что не позволяет оценить влияние технологических параметров на размер зерна, а следовательно, и на физико-механические характеристики получаемых наноструктурных слоев. Всё это привело к тому, что есть неко-

торые зависимости физико-механических характеристик от размера зерна (полученных экспериментально), но работ, которые связали бы технологические параметры и размер зерна для различных наноструктур, очень мало, и в них рассмотрены эти зависимости в узком диапазоне технологических параметров. Поэтому теоретические исследования влияния технологических параметров на размер зерна являются актуальной и своевременной задачей, которой посвящена настоящая работа. В ней исследовано влияние технологических и физических параметров на размер зерна при действии ионов различных энергий и зарядов, что в конечном счете позволит выявить эффективные условия получения наноструктур.

Температурные напряжения создают давления на обрабатываемый материал, что позволяет получать наноструктуры при напряжениях порядка 10^{10} Па. Кроме того, скорости изменения температурных напряжений, а значит, и скорости деформирования влияют на возможность создания нанокластеров, что свидетельствует о необходимости исследования зависимостей температурных напряжений и скоростей их изменения от энергии, сорта и заряда иона.

2. Постановка задачи

Рассмотрена совместная задача теплопроводности и термоупругости, учитывающая энергию на образование зерна, принимаемую несколько большей, чем энергия атомизации зерна, с учетом которой рассчитывают температуры, скорости их нарастания, температурные напряжения и скорости деформирования, объем и размер нанозерна, глубины его залегания, а также число частиц в нанокластере в первом приближении. После этого рассчитывают энергию образования зерна (нанокластера), которую принимают большей или равной энергии атомизации зерна, после чего пересчитывают все исследуемые величины, включая и число частиц в нанокластере, затем переходят к следующему шагу [2].

Приняв в качестве критериев образования наноструктур: необходимые температуры (500...1500 К), скорости их нарастания (более 10^7 К/с), желательно обеспечить наличие давлений (температурных напряжений $10^7...10^9$ Па), нанокатализатора и достаточное заполнение объема материала наноструктурами (НС).

В дальнейшем рассматриваем модель действия индивидуального иона, которая включает в себя:

- баланс тепла в элементарном объеме [3];
- граничные и начальные условия на различных поверхностях [2];
- расчет (предварительный) числа частиц в нанокластере [2];
- расчет энергий образования нанокластера [1].

Расчет повторяют и рассчитывают все основные параметры: число частиц в нанокластере (окончательное), по которому определяют энергию образования зерна, поля температур и диапазон скоростей роста температуры, температурные напряжения и скорости деформирования, объем нанокластера и глубину его залегания, размер зерна.

Проводят расчеты температурных напряжений и скорости их роста.

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, в которых учтены эти факторы и тем более их взаимосвязь. Все эти процессы влияют как на характер теплообмена в объеме мишени, так и на поверхности, поэтому учет таких процессов необходим и в балансе энергии в элементарном объеме металлической мишени, и в теплообмене на поверхности мишени, т.е. в граничных условиях.

Задача подробно описана в нашей работе [1].

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 композитных материалов и ленц-джоулевым нагревом (восьмое слагаемое) за счет растекания ионного тока и энергии образования кристалла (девятое слагаемое).

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

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 $L_{T,x,p}$ – удельные теплота плавления и термохимической реакции; $V_{\phi}[T]$ – 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; $S_{\text{см}}$ – число смещенных атомов в результате действия иона или электрона; $\lambda_{\text{ср},i,e}$ – 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; $E_{кр}$ – удельная энергия образования кристалла.

Определить число атомов, находящихся на границе вблизи атомов другого зерна и взаимодействующих энергетически можно, приняв зерно в виде сферы радиусом R . Тогда площадь поверхности определим как $4\pi R^2$, а число атомов на единице поверхности в монослое можно вычислить, 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 $N_{э3}$, определим так:

$$N_{э3} = 4\pi R^2 \cdot N_{мон}. \quad (2)$$

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

Энергию связи кристалла можно определить при квантово-механическом подходе как:

$$E_{св} = \frac{1}{2} \sum_{i=j} \frac{q_i q_j}{H_{ij}} - \sum_i q_i \int \frac{\rho(\bar{r})}{|\bar{R} - \bar{r}|} dr + \frac{1}{2} \int \frac{\rho(\bar{r}_1) \cdot \rho(\bar{r}_2)}{r_{12}} - \sum_i q_i \int \frac{\rho_i^0(\bar{r})}{|\bar{R}_i - \bar{r}|} dr - \frac{1}{2} \int \frac{\rho_i^0(\bar{r}_1) \cdot \rho_i^0(\bar{r}_2)}{r_{12}} dr_1 dr_2 \quad (3)$$

где $R_{ij} = |\bar{R}_i - \bar{R}_j|$ – межатомное расстояние; $r_{12} = |\bar{r}_1 - \bar{r}_2|$ – расстояние между электронами; \bar{R}_i и q_i – радиус-вектор и заряд i - атомного остова; ρ – плотность валентных электронов в кристалле; ρ_i^0 – распределение валентной электронной плотности i -го нейтрального атома.

Первый член описывает отталкивание остовов, второй – притяжение электронного облака ρ 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, которую рассматривают в балансе тепла, и после оценки зоны вероятного образования наноструктуры пересчитывают все величины: температуру, скорости нарастания температур, температурные напряжения, размеры зерна и места их образования и уточняют число частиц в нанокластере. С учетом этого эффекта и энергии деформирования были проведены расчеты.

Энергию деформирования единичного объема определим как

$$W = G \left[\varepsilon_{xx}^2 + \varepsilon_{yy}^2 + \varepsilon_{zz}^2 + 2(\varepsilon_{xy}^2 + \varepsilon_{yz}^2 + \varepsilon_{zx}^2) + \frac{\mu}{1-\mu} \ell^2 - \frac{2(1+\mu)\alpha_1}{1-2\mu} \ell (T(x, y, z, t) - T) \right], \quad (4)$$

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

$\varepsilon_{xy}, \varepsilon_{yz}, \varepsilon_{zx}$ – сдвиги относительно соответствующих осей; u_x, u_y, u_z – перемещение относительно соответствующих осей; α_1 – коэффициент линейного расширения материала мишени; μ – коэффициент Пуассона (отношение поперечной деформации к продольной, значения μ заключены между 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:

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 \varepsilon_{xx}}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \varepsilon_{yy}}{\partial x^2} &= 2 \frac{\partial^2 \varepsilon_{xy}}{\partial x \partial y}; & \frac{\partial^2 \varepsilon_{xx}}{\partial y \partial z} &= \frac{\partial}{\partial x} \left[-\frac{\partial \varepsilon_{yz}}{\partial x} + \frac{\partial \varepsilon_{zx}}{\partial y} + \frac{\partial \varepsilon_{xy}}{\partial z} \right] \\ \frac{\partial^2 \varepsilon_{yy}}{\partial z^2} + \frac{\partial^2 \varepsilon_{zz}}{\partial y^2} &= 2 \frac{\partial^2 \varepsilon_{yz}}{\partial z \partial y}; & \frac{\partial^2 \varepsilon_{yy}}{\partial x \partial z} &= \frac{\partial}{\partial y} \left[-\frac{\partial \varepsilon_{zx}}{\partial y} + \frac{\partial \varepsilon_{xy}}{\partial z} + \frac{\partial \varepsilon_{yz}}{\partial x} \right] \\ \frac{\partial^2 \varepsilon_{xx}}{\partial z^2} + \frac{\partial^2 \varepsilon_{zz}}{\partial x^2} &= 2 \frac{\partial^2 \varepsilon_{zx}}{\partial z \partial x}; & \frac{\partial^2 \varepsilon_{zz}}{\partial y \partial x} &= \frac{\partial}{\partial z} \left[-\frac{\partial \varepsilon_{yx}}{\partial z} + \frac{\partial \varepsilon_{yz}}{\partial x} + \frac{\partial \varepsilon_{zx}}{\partial y} \right] \end{aligned} \quad (5)$$

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 .

$$\Delta \Phi - \frac{1-2\mu}{2(1-\mu)} \cdot \frac{\gamma}{G} \cdot \frac{\partial^2 \Phi}{\partial t^2} = \frac{1+\mu}{1-\mu} \cdot \alpha_1 \cdot [T(x, y, z, t) - T], \quad (6)$$

где γ – плотность материала мишени.

Учитывая, что решение задачи проводится в подвижной системе координат и при выходе на стационарный или близкий к нему режим, а второе слагаемое в левой части уравнения (4) становится незначительным, получим

$$\Delta \Phi = \frac{1+\mu}{1-\mu} \cdot \alpha_1 \cdot [T(x, y, z, t) - T]. \quad (7)$$

По величине термоупругого потенциала перемещений и по известным соотношениям находим удлинения и сдвиги:

$$\varepsilon_{ik} = \frac{\partial^2 \Phi}{\partial i \partial k}, \quad (i, k = x, y, z). \quad (8)$$

Величины температурных напряжений определим по выражению

$$\sigma_{ik} = 2G \left(\frac{\partial^2 \Phi}{\partial i \partial k} - \Delta \Phi \cdot \delta_{ik} \right), \quad (9)$$

где δ_{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, массу диффундирующего атома находим как:

$$m_a = M \cdot m_p, \quad (10)$$

где M – атомный вес наносимого материала; m_p – масса протона.

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

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

При $t \geq t_k$

$$\frac{dn_a}{dt} = \frac{j}{e \cdot z \cdot L_D}, \quad (11)$$

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

$$K_{диф} = a_d \cdot d_s^2 \cdot V_0 \cdot \exp(-U/(kT)), \quad (12)$$

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 для таких процессов:

1. Столкновительных: 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: 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: реализуются 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 путем излучения потока ионов, электронов или плазмы (последнее слагаемое):

$$-\lambda[T] \frac{\partial T(x, y, z, t)}{\partial x} = F_{i,e} - F_{расп} - F_{м.э.} - [F_{и.э.} + F_{и.ф.э} + F_{и.э.э} + F_{киэ} + F_{х.ри} + F_{три} + F_{пу}]_i - F_{исп} - F_{пл} - \sigma \varepsilon T^*(0, y, z, t) \pm F_{конд} + F_{пх} + \sigma \varepsilon_c T_c^*, \quad (13)$$

где σ – 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. Напряженное состояние в зоне действия ионов различных сортов, энергий и зарядов и получение наноструктур в алюминиевом сплаве

Исследовали зависимости максимальных температурных напряжений, максимальной скорости роста температуры от энергии и заряда ионов. Результаты показаны на рис. 1–9. Рассмотрена действие ионов B^+ , N^+ , C^+ , Al^+ , V^+ , Cr^+ , O^+ , Ni^+ , Zr^+ , Mo^+ , Hf^+ , W^+ , Ta^+ , Pt^+ . Анализ зависимостей температурных напряжений от энергии ионов для разных зарядов иона B^+ и C^+ показывает, что температурные напряжения с увеличением энергии растут. Растут они также при увеличении заряда иона – максимальные значения достигают $7,08 \cdot 10^8$ и $8,49 \cdot 10^8$ Па (рис.1, а). Значения температурных напряжений недостаточны для образования наноструктур за счет термоупругого деформирования, но они могут интенсифицировать образование наноструктур под действием температур и высоких скоростей их нарастания. Исследование максимальных скоростей деформирования свидетельствует о том, что высокие скорости деформирования $10^{17} \dots 10^{21}$ Па/с могут приводить или существенно ускорять образование наноструктур, а с ростом энергии и заряда эти величины растут (рис. 1, б).

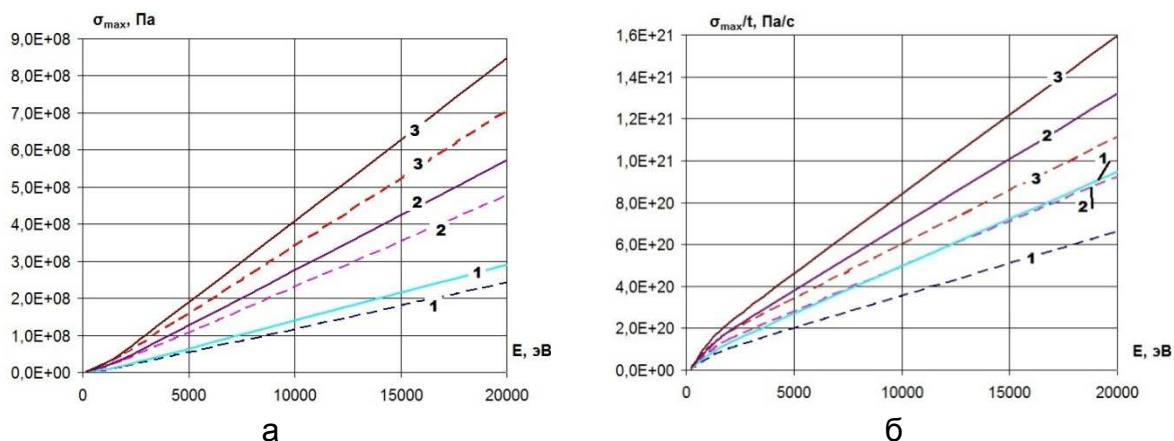


Рис. 1. Зависимости максимальных температурных напряжений (а), максимальной скорости деформирования (б) от энергии ионов B^+ (---) и C^+ (—) (1 – однозарядный, 2 – двухзарядный и 3 – трехзарядный ион) для алюминиевых сплавов

Аналогичные зависимости для случая действия ионов азота и алюминия на алюминиевый сплав показаны на рис. 2, а, б. Видно, что характер зависимостей сохранился, но величины максимальных температурных напряжений стали несколько выше $9,89 \cdot 10^8$ и $1,75 \cdot 10^9$ Па. В этом случае высока возможность образования наноструктур за счет действия температурных напряжений (рис. 2, а), а с учетом высоких скоростей роста напряжений $2,16 \cdot 10^{21}$ и $6,69 \cdot 10^{21}$ Па/с, наноструктуры будут реализовываться в объеме или обеспечивать ускорение их образования под влиянием других факторов температуры и высокой скорости её роста (рис. 2, б).

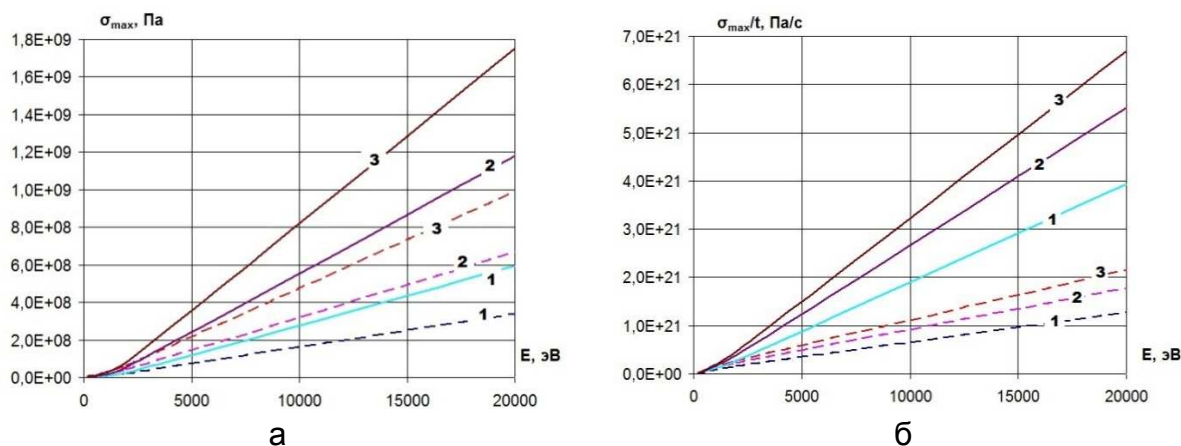


Рис. 2. Зависимости максимальных температурных напряжений (а), максимальной скорости деформирования (б) от энергии ионов N^+ (---) и Al^+ (—) (1 – однозарядный, 2 – двухзарядный и 3 – трехзарядный ион) для алюминиевых сплавов

При действии ионов ванадия и хрома на алюминиевый сплав характер зависимостей сохранился (рис. 3). Максимальные температурные напряжения достигают величин $2,45 \cdot 10^9$ и $2,5 \cdot 10^9$ (рис. 3, а), а максимальные скорости деформирования лежат в пределах $3,44 \cdot 10^{20} \dots 1,31 \cdot 10^{22}$ и $3,49 \cdot 10^{20} \dots 1,35 \cdot 10^{22}$ (рис. 3, б). В этом случае значения температурных напряжений тоже недостаточны для реализации условий образования наноструктур, но скорости их роста высоки и могут способствовать образованию наноструктур путем реализации требуемых температур и скоростей их роста.

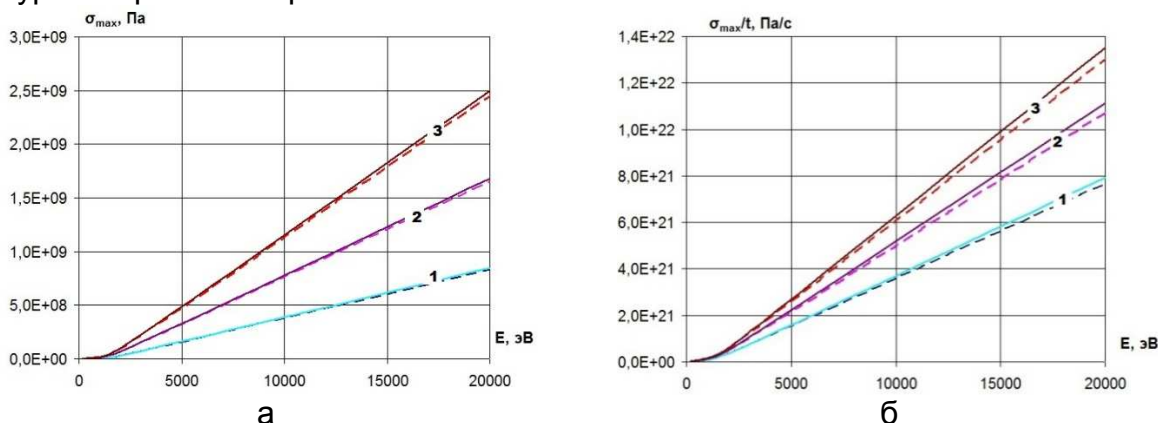


Рис. 3. Зависимости максимальных температурных напряжений (а), максимальной скорости деформирования (б) от энергии ионов V^+ (---) и Cr^+ (—) (1 – однозарядный, 2 – двухзарядный и 3 – трехзарядный ион) для алюминиевых сплавов

При действии ионов кислорода и железа на алюминиевый сплав характер зависимостей температурных напряжений и скоростей их роста от энергии ионов разных зарядов (1–3) сохранился. Наблюдается рост их с ростом энергии ионов и заряда, значения температурных напряжений в области образования наноструктур лежат в пределах $2,28 \cdot 10^7 \dots 1,13 \cdot 10^9$ и $3,19 \cdot 10^7 \dots 2,57 \cdot 10^9$ Па соответственно, т.е. для кислорода и железа они растут по сравнению с ванадием и хромом. Скорости роста температурных напряжений лежат в диапазоне $1,81 \cdot 10^{20} \dots 2,8 \cdot 10^{21}$ Па/с (кислород) и $3,54 \cdot 10^{20} \dots 1,43 \cdot 10^{21}$ Па/с (железо), т.е также наблюдается рост температурных напряжений и скоростей деформирования с возрастанием энергии и заряда ионов (рис. 4).

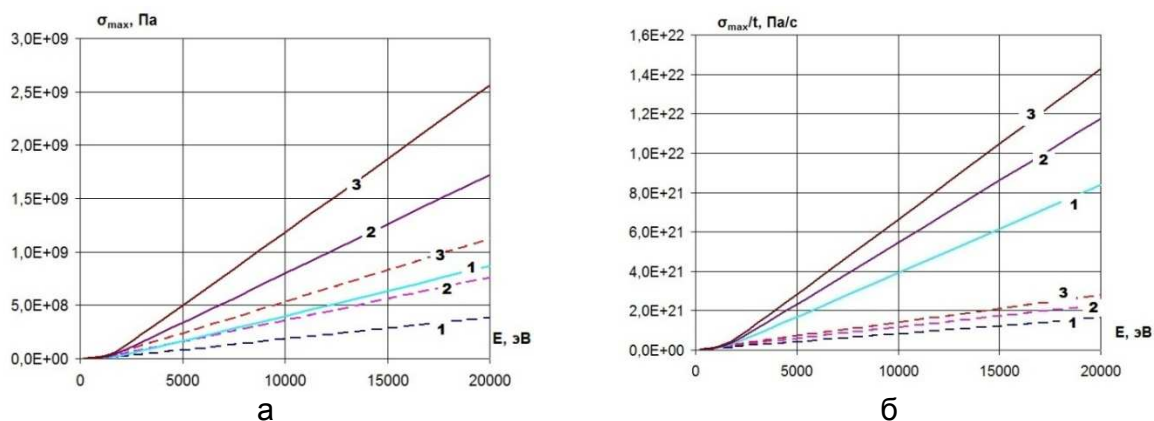


Рис. 4. Зависимости максимальных температурных напряжений (а), максимальной скорости деформирования (б) от энергии ионов O^+ (---) и Fe^+ (—) (1 – однозарядный, 2 – двухзарядный и 3 – трехзарядный ион) для алюминиевых сплавов

Характер кривых для случая действия ионов никеля и кобальта на алюминиевый сплав сохранился (рис. 5), величины температурных напряжений лежат в диапазоне $3,22 \cdot 10^7 \dots 2,63 \cdot 10^9$ и $3,19 \cdot 10^7 \dots 2,59 \cdot 10^9$ Па (рис. 5, а), скорости деформирования лежат в пределах $3,9 \cdot 10^{20} \dots 1,5 \cdot 10^{22}$ и $3,54 \cdot 10^{20} \dots 1,46 \cdot 10^{22}$ Па/с соответственно Ni^+ и Co^+ (рис. 5, б). Следовательно, наблюдается снижение температурных напряжений и скоростей деформирования у ионов кобальта по сравнению с никелем (рис. 6).

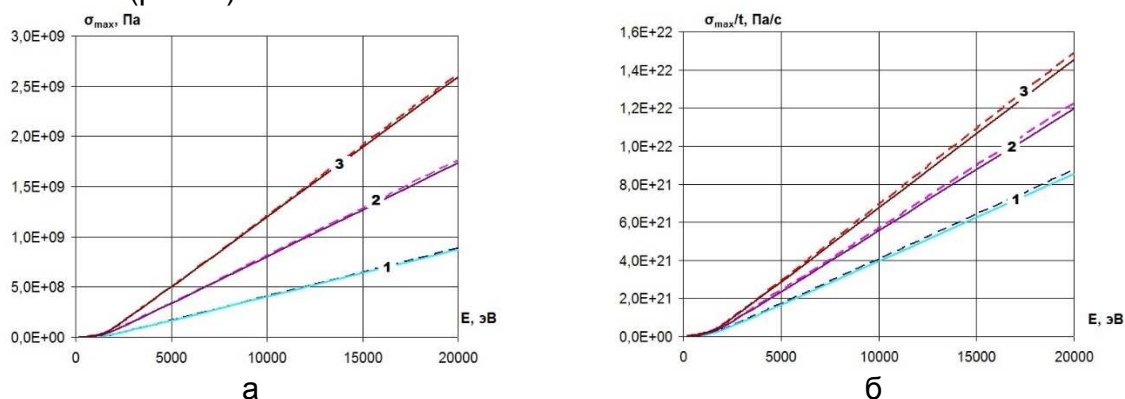


Рис. 5. Зависимости максимальных температурных напряжений (а), максимальной скорости деформирования (б) от энергии ионов Ni^+ (---) и Co^+ (—) (1 – однозарядный, 2 – двухзарядный и 3 – трехзарядный ион) для алюминиевых сплавов

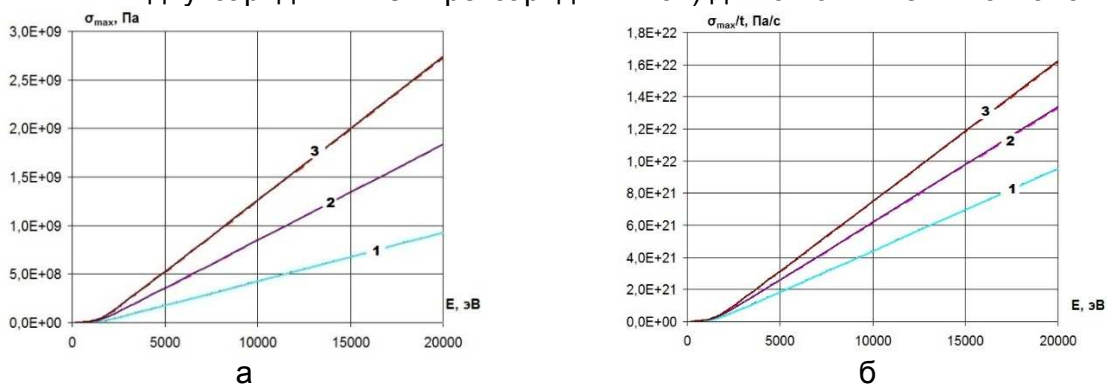


Рис. 6. Зависимости максимальных температурных напряжений (а), максимальной скорости деформирования (б) от энергии ионов Y^+ (---) и Zr^+ (—) (1 – однозарядный, 2 – двухзарядный и 3 – трехзарядный ион) для алюминиевых сплавов

Для ионов циркония и молибдена температурные напряжения реализуются в диапазоне $3,14 \cdot 10^7 \dots 3,74 \cdot 10^9$ и $3,81 \cdot 10^7 \dots 2,55 \cdot 10^9$ Па (рис. 7, а), т.е. в этом случае для ионов циркония температурные напряжения при $2 \cdot 10^3$ эВ больше чем для действия иона молибдена, тогда как при энергии $2 \cdot 10^4$ эВ и трехзарядовом ионе они больше, скорости деформирования лежат в диапазоне $3,45 \cdot 10^{20} \dots 1,62 \cdot 10^{22}$ и $3,42 \cdot 10^{20} \dots 1,63 \cdot 10^{22}$ Па/с. В этом случае также скорость деформирования при $E = 2 \cdot 10^3$ эВ выше для ионов молибдена, тогда как при $E = 2 \cdot 10^4$ эВ – наоборот (рис. 7, б).

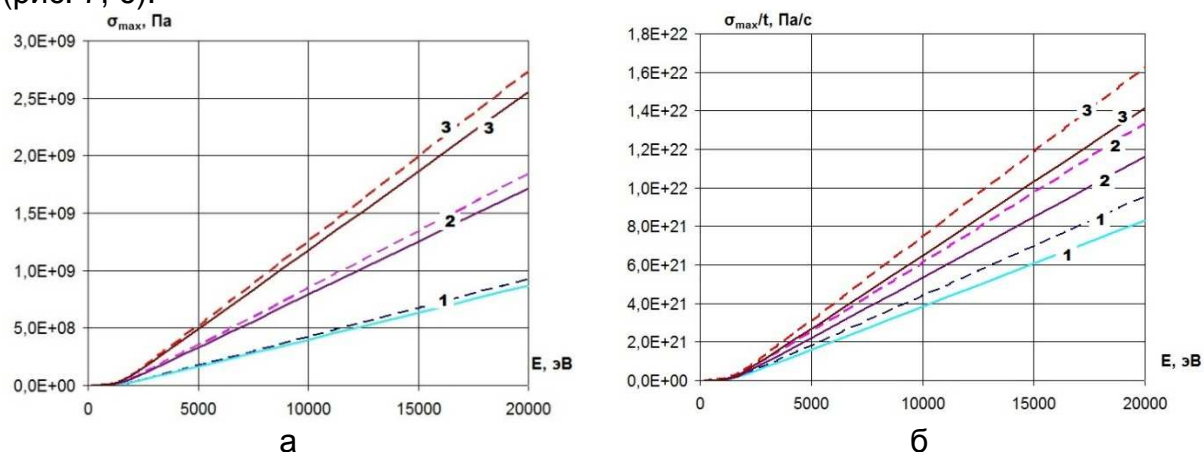


Рис. 7. Зависимости максимальных температурных напряжений (а), максимальной скорости деформирования (б) от энергии ионов Mo+ (---) и Hf+ (—) (1 – однозарядный, 2 – двухзарядный и 3 – трехзарядный ион) для алюминиевых сплавов

Анализ аналогичных зависимостей (рис. 8) для ионов тантала и вольфрама показал, что величины напряжений лежат в диапазоне $2,8 \cdot 10^7 \dots 2,55 \cdot 10^9$ Па, а диапазон скоростей деформирования составляет $2,73 \cdot 10^{20} \dots 1,41 \cdot 10^{22}$ и $2,73 \cdot 10^{20} \dots 1,40 \cdot 10^{22}$ Па/с, т.е. наблюдается некоторое уменьшение величин.

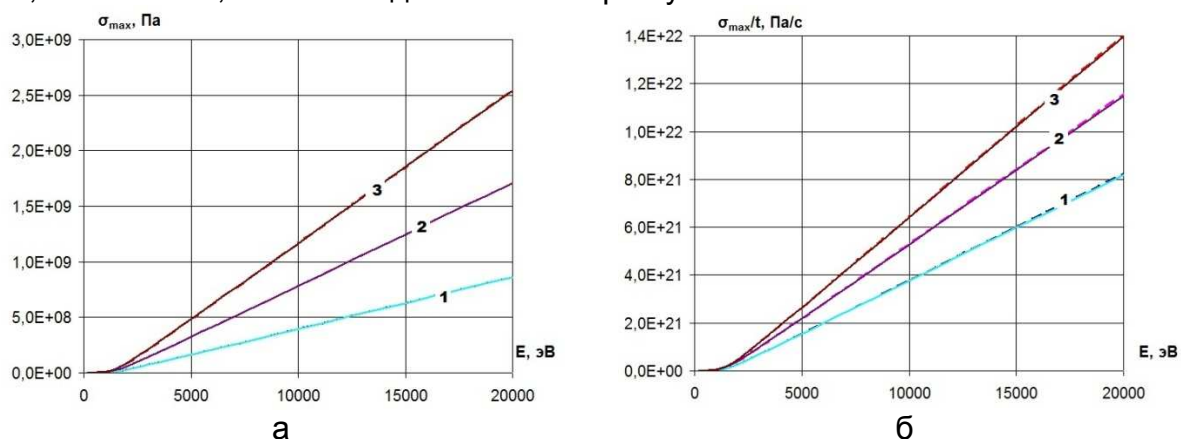


Рис. 8. Зависимости максимальных температурных напряжений (а), максимальной скорости деформирования (б) от энергии ионов Ta+ (---) и W+ (—) (1 – однозарядный, 2 – двухзарядный и 3 – трехзарядный ион) для алюминиевых сплавов

Для случая действия ионов платины на алюминиевый сплав (рис. 9) величины максимальных температурных напряжений лежат в диапазоне $2,75 \cdot 10^7 \dots 2,51 \cdot 10^9$ Па, т.е. при энергии ионов $2 \cdot 10^3$ эВ они уменьшались по сравнению с ионом вольфрама, тоже наблюдается для энергии $2 \cdot 10^4$ эВ.

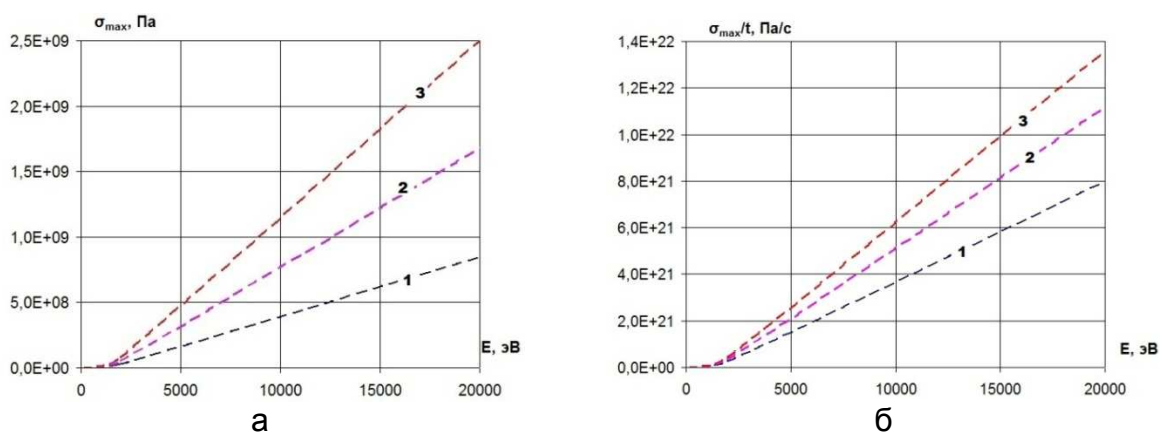


Рис. 9. Зависимости максимальных температурных напряжений (а), максимальной скорости деформирования (б) от энергии ионов Pt^+ (---) (1 – однозарядный, 2 – двухзарядный и 3 – трехзарядный ион) для алюминиевых сплавов

Видно, что величины максимальных температурных напряжений лежат в диапазоне $8,49 \cdot 10^8 \dots 2,6 \cdot 10^9$ Па, причем величины их с ростом атомной массы иона в основном растут. Максимальные скорости деформирования реализуются в диапазоне $10^{20} \dots 4,8 \cdot 10^{22}$ Па/с. Скорости деформирования высоки, и рост их зависит от массы иона, его энергии и заряда, с ростом которых скорость деформирования растет, а размер зоны деформирования уменьшается.

Выводы

1. Для широкого круга ионов V^+ , N^+ , C^+ , Al^+ , V^+ , Cr^+ , O^+ , Ni^+ , Zr^+ , Mo^+ , Hf^+ , W^+ , Ta^+ , Pt^+ показано, что с ростом энергии и заряда иона величины температурных напряжений и скорости деформирования увеличиваются.
2. Толщина слоя, в котором осуществляется деформирование, уменьшается с ростом массы иона, что приводит к большей концентрации энергии, а потому увеличиваются максимальные значения температурных напряжений и скорости деформирования.
3. Обнаружено, что для следующих пар ионов $V-Cr$, $Ni-Co$, $Y-Zr$, $Ta-W$ реализуются практически одинаковые зависимости температурных напряжений и скоростей их деформирования от энергии и заряда иона, что позволяет заменять один ион другим, минимизируя стоимость получения наноструктур.
4. Высокие скорости деформирования, очевидно, могут приводить к образованию наноструктур, а также способствовать ускорению их образования под действием температур и высоких скоростей их роста.

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. – К.: Изд-во АИНУ, 2002. – Кн.1: 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 [Текст] / Г. И. Костюк. – К.: Изд-во АИНУ, 2002. – Кн. 2: Справочник для расчета основных физических и технологических параметров, оценки возможностей, выбора типа технологий и оборудования. – 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. – С. 82 – 87.
19. Коваленко В. Ф. Теплофизические процессы и электровакуумные приборы [Текст] / В. Ф. Коваленко. – М.: Сов. радио, 1975. – 212 с.

Рецензент: д-р техн. наук, проф., зав. каф., декан А. И. Долматов Национального аэрокосмического университета «ХАИ» им. Н.Е. Жуковского, Харьков
Поступила в редакцию 05.09.2014

Визначення температурних напружень і швидкості деформування при дії іонів на алюмінієві сплави і наноструктури

Для широкого кола іонів В+, N+, С+, Al+, V+, Cr+, O+, Ni+, Zr+, Mo+, Hf+, W+, Та+, Pt+ отримані температурні напруження і швидкості їх зростання для випадку дії цих іонів із зарядом від одного до трьох при дії на алюмінієвий сплав Д16Т. Отримано діапазони температурних напружень, які лежать у межах від 10^7 до $2,6 \cdot 10^9$ Па. Швидкості їх зростання змінюються від $5 \cdot 10^{18}$ до $1,3 \cdot 10^{22}$ Па/с, до того ж показано, що з ростом енергії і заряду іонів ці величини зростають і незважаючи на те, що величини напружень ще є недостатніми для самостійного утворення наноструктур, швидкості деформування дозволяють припускати можливість їх утворення.

Ключові слова: температурні напруження, швидкості деформування, наноструктури, алюмінієві сплави.

Determination of thermal stresses and the rate of deformation under the action of ions on aluminum alloys and nanostructures

For a wide range of ions В+, N+, С+, Al+, V+, Cr+, O+, Ni+, Zr+, Mo+, Hf+, W+, Та+, Pt+ obtained by thermal stresses and their rate of growth in the case of these ions with a charge from one to three in if action on aluminum alloy D16T. These ranges of temperature stress, which range from 10^7 to $2,6 \cdot 10^9$ Pa. Their rate of growth vary from $5 \cdot 10^{18}$ to $1,3 \cdot 10^{22}$ Pa/s, besides, it is shown that with increasing energy and charge of the ions, these values increase, and most importantly, despite the fact that the magnitude of the stress still in sufficient for self-formation of nanostructures but the rate of deformation suggest the possibility of their formation.

Keywords: thermal stress, rate of deformation, nanostructures, aluminum alloys.