

Оценка объема нанокластера и глубин его залегания в алюминиевом сплаве при действии ионов различных энергий

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

На основе решения совместной задачи теплопроводности и термоупругости получены поля температур и температурных напряжений, в которых выделены зоны, где образуются наноструктуры (НС). Для алюминиевого сплава при действии большого числа различных ионов и их зарядов от 1 до 3 получены зависимости объема нанокластера и глубин его залегания от энергии.

Ключевые слова: наноструктура, нанокластер, объем нанокластера, глубина залегания наноструктуры, ион.

Введение

Благодаря малому удельному весу и достаточно высоким физико-механическим характеристиками в авиационно-космической технике широко применяются алюминиевые сплавы. Но из-за относительно низкой микротвердости они не позволяют обеспечить требуемую износостойкость. Применение же традиционных плазменно-ионных покрытий может в некоторой степени решить проблему, но координального улучшения свойств достичь не получается. Создание наноструктурных слоев в алюминиевых сплавах позволит значительно увеличить микротвердость поверхностного слоя и в тоже время снизить модуль упругости, что позволит деталям работать успешно при ударных и знакопеременных нагрузках. Все это говорит о важности рассматриваемой задачи создания наноструктур в алюминиевых сплавах.

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

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 (НС).

Для того чтобы такие условия реализовались в значительном объеме (действие высоких температур и напряжений), также необходимо обеспечить максимальное заполнение поля температур зоной 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 ус-

ловия образования наноструктур не выполняются.

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

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

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

1. Постановка задачи исследования

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

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

Теперь рассмотрим реальные возможности реализации этих задач.

2. 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 и в балансе энергии в элементарном объеме металлической мишени, и в теплообмене на поверхности мишени, т.е. в граничных условиях.

2.1. 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-джоулев нагрев (восьмое слагаемое) за счет растекания ионного тока и энергия образования кристалла (девятое слагаемое).

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

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;

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

$V_f[T]$ – 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 ;

$P_{T,x}(n_A, n_B, T, t_{B3})$ – 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 оценить приняв зерно виде сферы радиусом R , тогда площадь поверхности определим как $4\pi R^2$, а число атомов на единице поверхности в монослое можно определить используя зависимость числа атомов – N_M в монослое от атомного номера (рис. 4.2 из [19]), тогда число атомов одного зерна, взаимодействующих с атомами соседних зерен $N_{вз}$, определим так:

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

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

Энергию связи кристалла можно определить при квантовомеханическом подходе как:

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

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

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

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 -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, которая рассматривается в балансе тепла и после оценки зоны вероятного образования наноструктуры пересчитываются все величины: температура, скорости нарастания температур, температурные напряжения, размеры зерна и места их образования и уточняется число частиц в нанокластере. С учетом этого эффекта и энергии деформирования были проведены расчеты.

Энергию деформирования единичного объема определим по методике [1].

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

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

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

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

Величины температурных напряжений определим по выражению

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

где 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, масса диффундирующего атома определяется как:

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

где M – атомный вес наносимого материала;

m_p – масса протона.

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

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

При $t \geq t_k$

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

где j – плотность тока;

e – заряд электрона;

z – зарядовое число наносимого материала;

L_D – толщина детали;

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

α – коэффициент температуропроводности.

Формула для расчета коэффициента диффузии:

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

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} с⁻¹);

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

k – постоянная Больцмана;

T – абсолютная температура.

2.2. Теплообмен на поверхности детали

Тепловой поток на поверхности мишени создается за счет:

1. Столкновительных процессов: тепла, выделяемого на поверхности вследствие действия иона (первое слагаемое справа), отводится тепловой поток с

распыленными частицами (второе слагаемое), с термоэлектронами (третье слагаемое), для ионов - отводится тепловой поток с ионно-ионной эмиссией или вторичной ионной эмиссией (пятое слагаемое), потенциальной ионно-электронной эмиссией (шестое слагаемое), кинетической ионно-электронной эмиссией (седьмое слагаемое), характеристическим рентгеновским излучением (восьмое слагаемое), тормозным рентгеновским излучением (девятое слагаемое), переходным излучением (десятое слагаемое).

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

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

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

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

где 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.

3. Влияние энергии ионов, их сорта и заряда на величину объема наноструктуры и определение эффективной плотности тока для получения НС в алюминиевых сплавах

Величина объема наноструктур при единичном действии иона на алюминиевый сплав D16Т дает возможность прогнозировать требуемую плотность ионного тока в потоке для полного заполнения слоя, где возможно образование для этого иона соответствующего сорта, энергии и заряда. Так, на рис. 1–9 представлены зависимости объема нанокластера и глубин его залегания от зарядового числа z и энергии E для ионов: В, С – рис. 1; N, Al – рис. 2; V, Cr – рис. 3, аналогичные зависимости для ионов O, Fe – рис. 4; Ni, Co – рис. 5; Y, Zr – рис. 6; Mo, Hf – рис. 7; Ta, W – рис. 8; Pt – рис. 9.

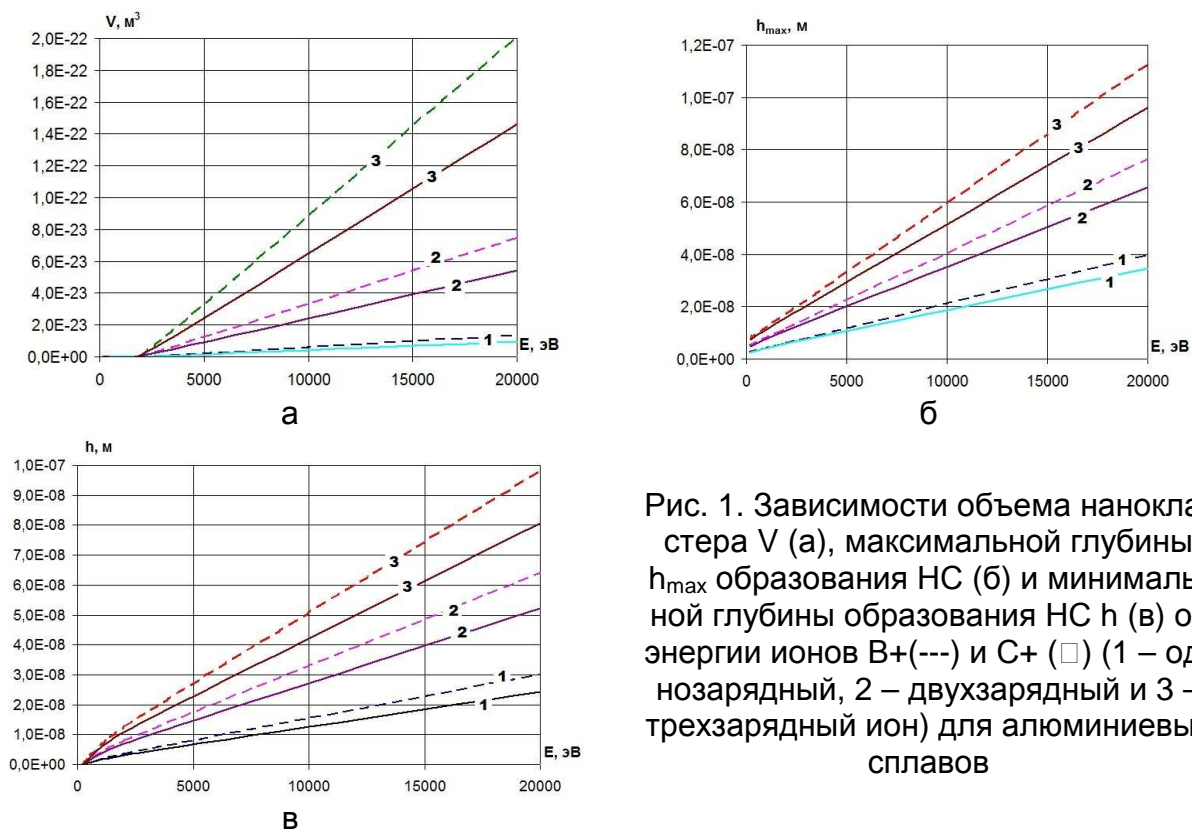


Рис. 1. Зависимости объема нанокластера V (а), максимальной глубины h_{max} образования НС (б) и минимальной глубины образования НС h (в) от энергии ионов V^+ (---) и C^+ (—) (1 – однозарядный, 2 – двухзарядный и 3 – трехзарядный ион) для алюминиевых сплавов

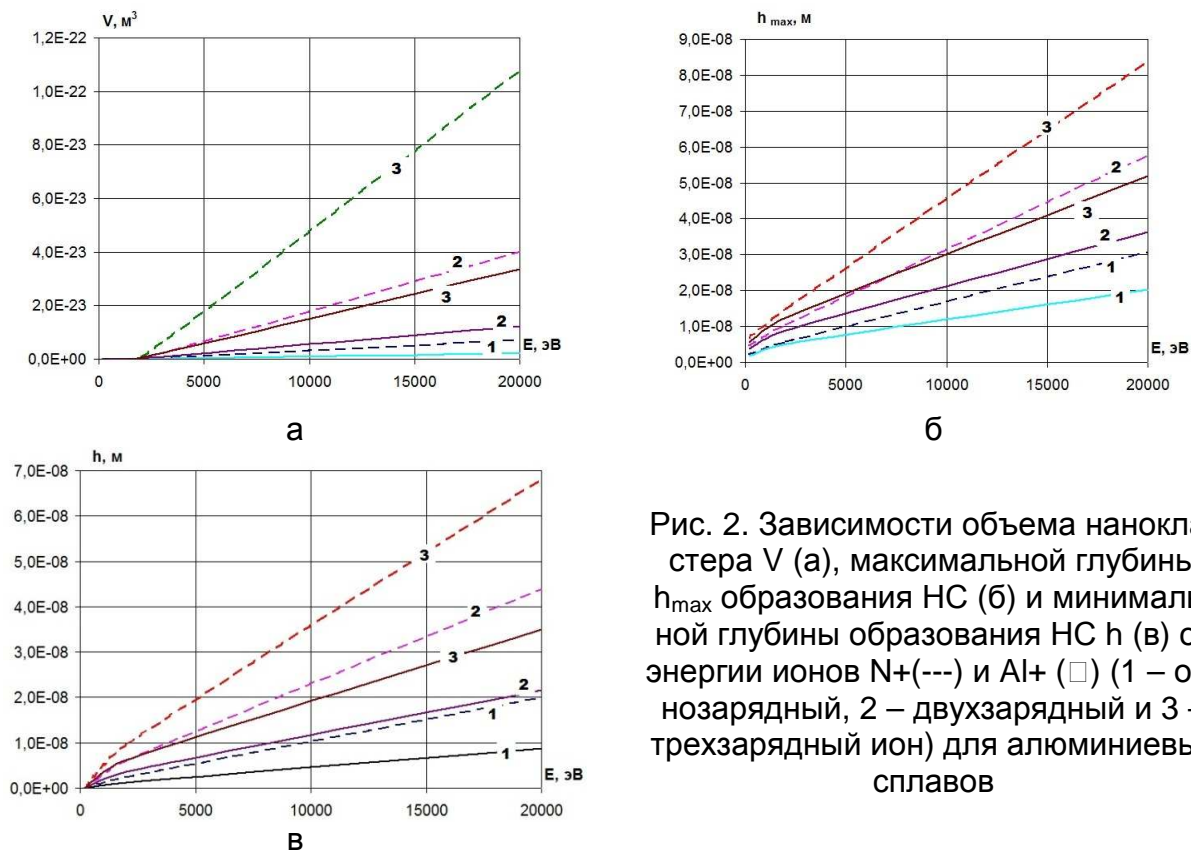


Рис. 2. Зависимости объема нанокластера V (а), максимальной глубины h_{max} образования НС (б) и минимальной глубины образования НС h (в) от энергии ионов N^+ (---) и Al^+ (—) (1 – однозарядный, 2 – двухзарядный и 3 – трехзарядный ион) для алюминиевых сплавов

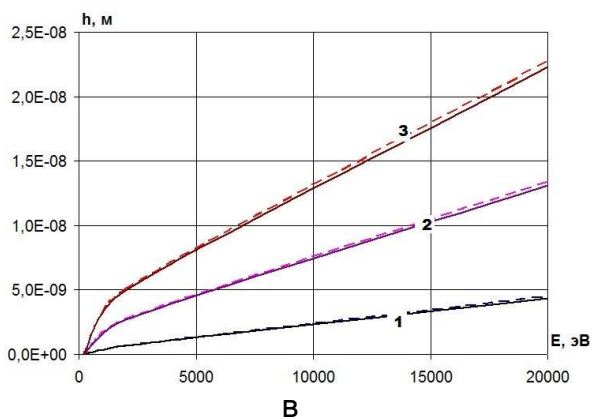
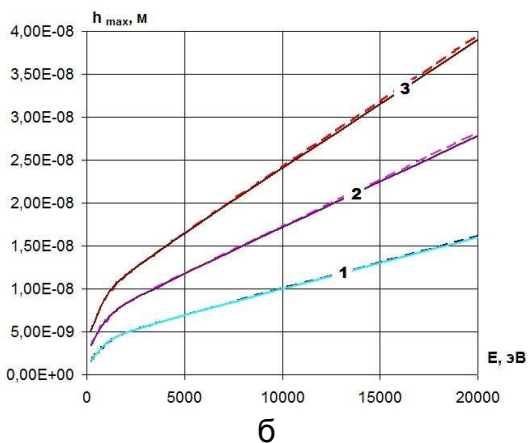
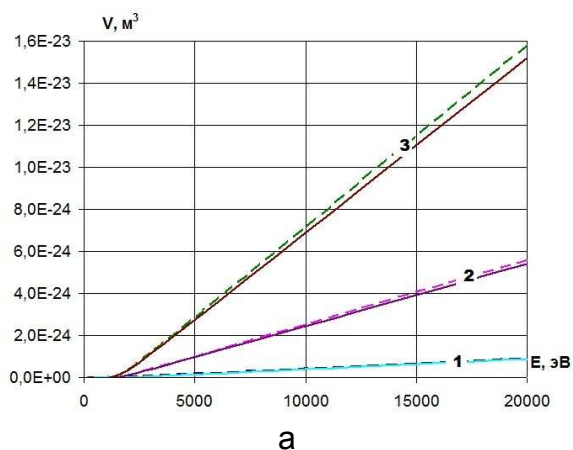


Рис. 3. Зависимости объема нанокластера V (а), максимальной глубины h_{max} образования НС (б) и минимальной глубины образования НС h (в) от энергии ионов V^+ (---) и Cr^+ (□) (1 – однозарядный, 2 – двухзарядный и 3 – трехзарядный ион) для алюминиевых сплавов

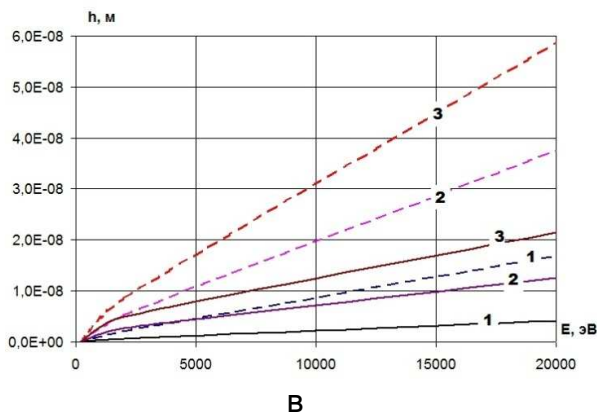
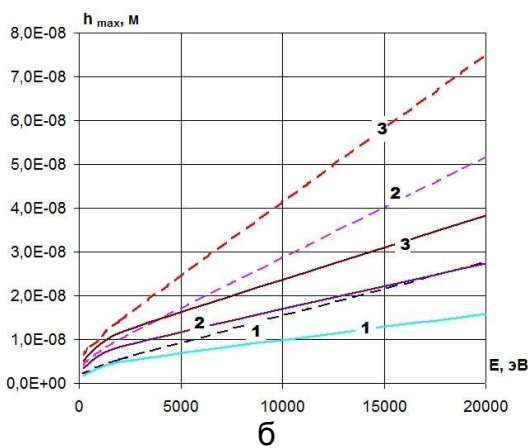
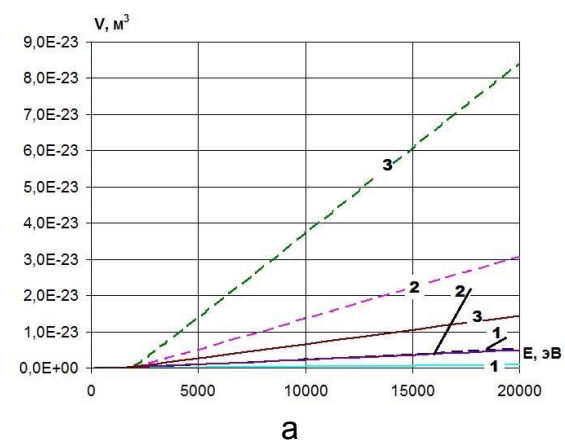


Рис. 4. Зависимости объема нанокластера V (а), максимальной глубины h_{max} образования НС (б) и минимальной глубины образования НС h (в) от энергии ионов O^+ (---) и Fe^+ (□) (1 – однозарядный, 2 – двухзарядный и 3 – трехзарядный ион) для алюминиевых сплавов

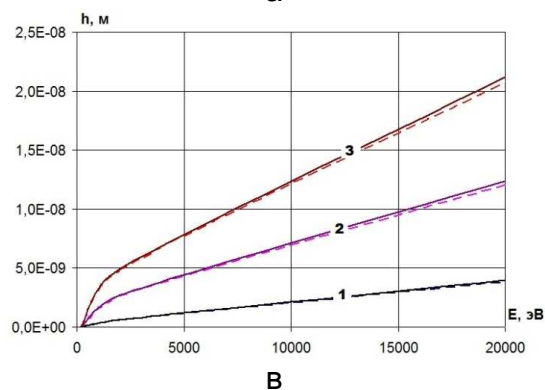
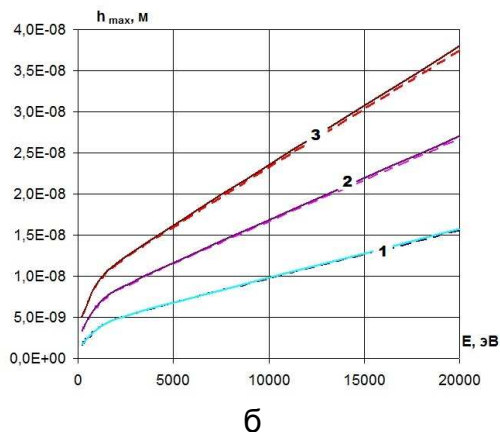
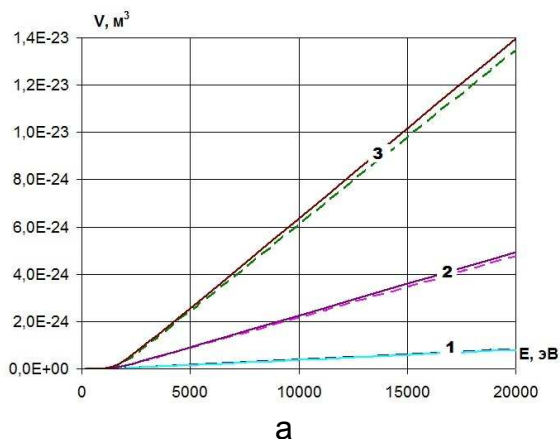


Рис. 5. Зависимости объема нанокластера V (а), максимальной глубины h_{\max} образования НС (б) и минимальной глубины образования НС h (в) от энергии ионов Ni^{+} (---) и Co^{+} (\square) (1 – однозарядный, 2 – двухзарядный и 3 – трехзарядный ион) для алюминиевых сплавов

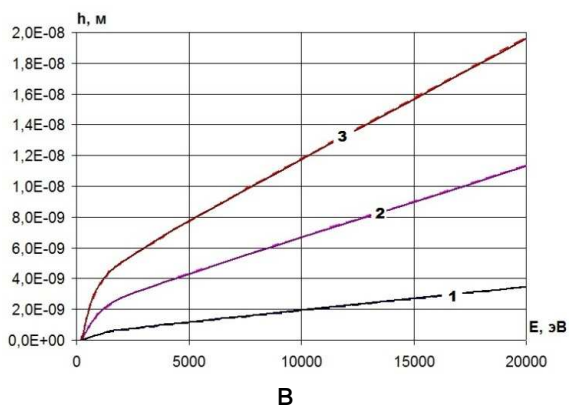
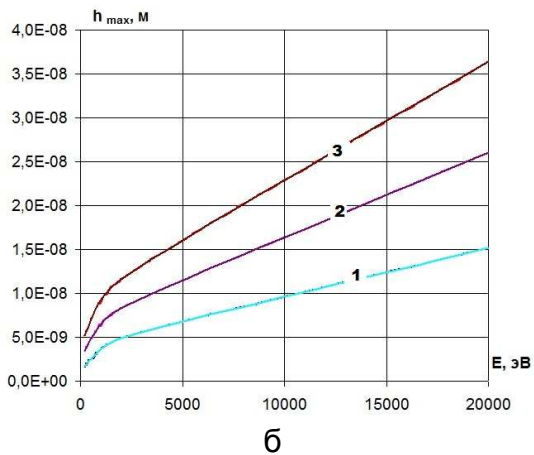
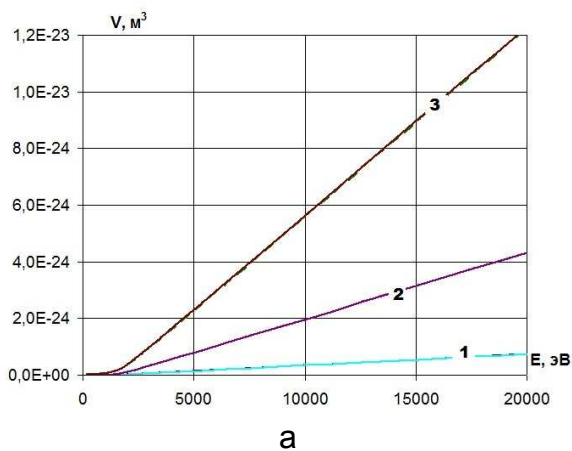


Рис. 6. Зависимости объема нанокластера V (а), максимальной глубины h_{\max} образования НС (б) и минимальной глубины образования НС h (в) от энергии ионов Y^{+} (---) и Zr^{+} (\square) (1 – однозарядный, 2 – двухзарядный и 3 – трехзарядный ион) для алюминиевых сплавов

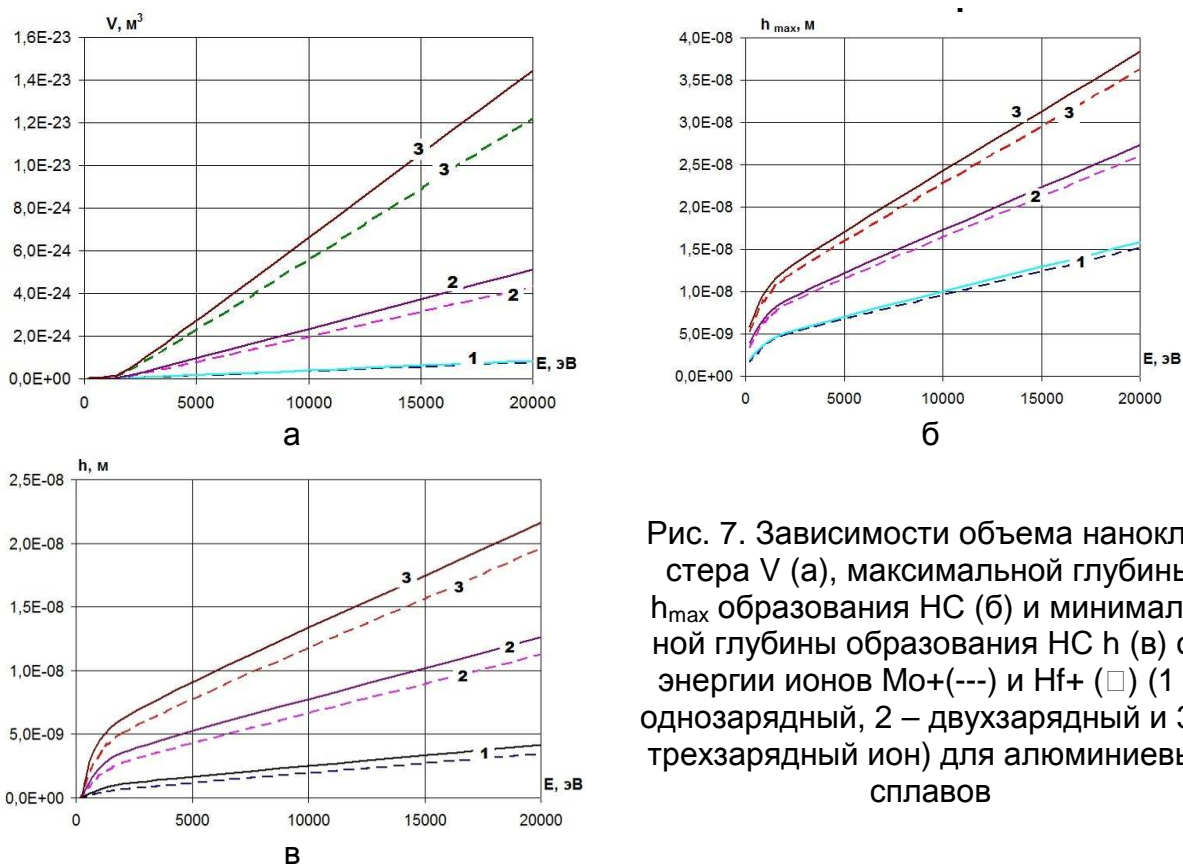


Рис. 7. Зависимости объема нанокластера V (а), максимальной глубины h_{max} образования НС (б) и минимальной глубины образования НС h (в) от энергии ионов $Mo+$ (---) и $Hf+$ (—) (1 – однозарядный, 2 – двухзарядный и 3 – трехзарядный ион) для алюминиевых сплавов

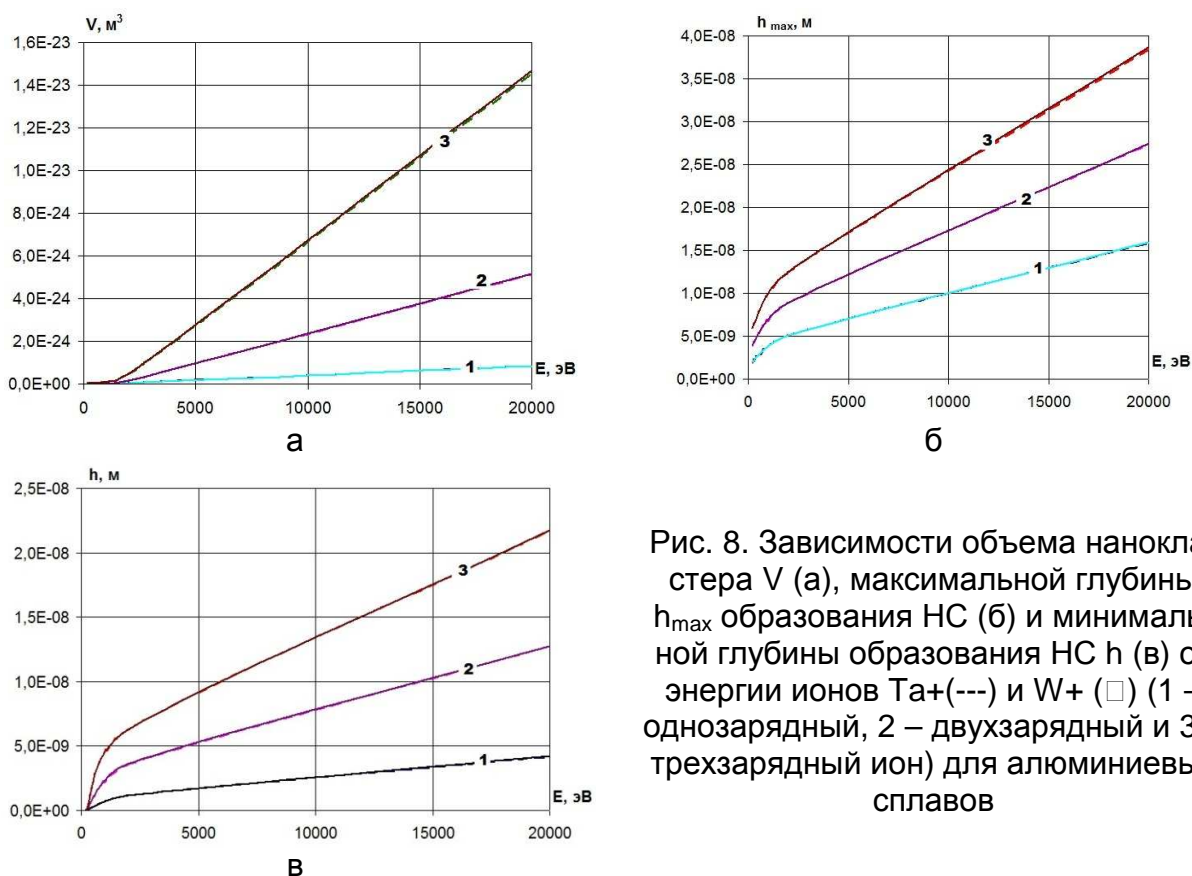


Рис. 8. Зависимости объема нанокластера V (а), максимальной глубины h_{max} образования НС (б) и минимальной глубины образования НС h (в) от энергии ионов $Ta+$ (---) и $W+$ (—) (1 – однозарядный, 2 – двухзарядный и 3 – трехзарядный ион) для алюминиевых сплавов

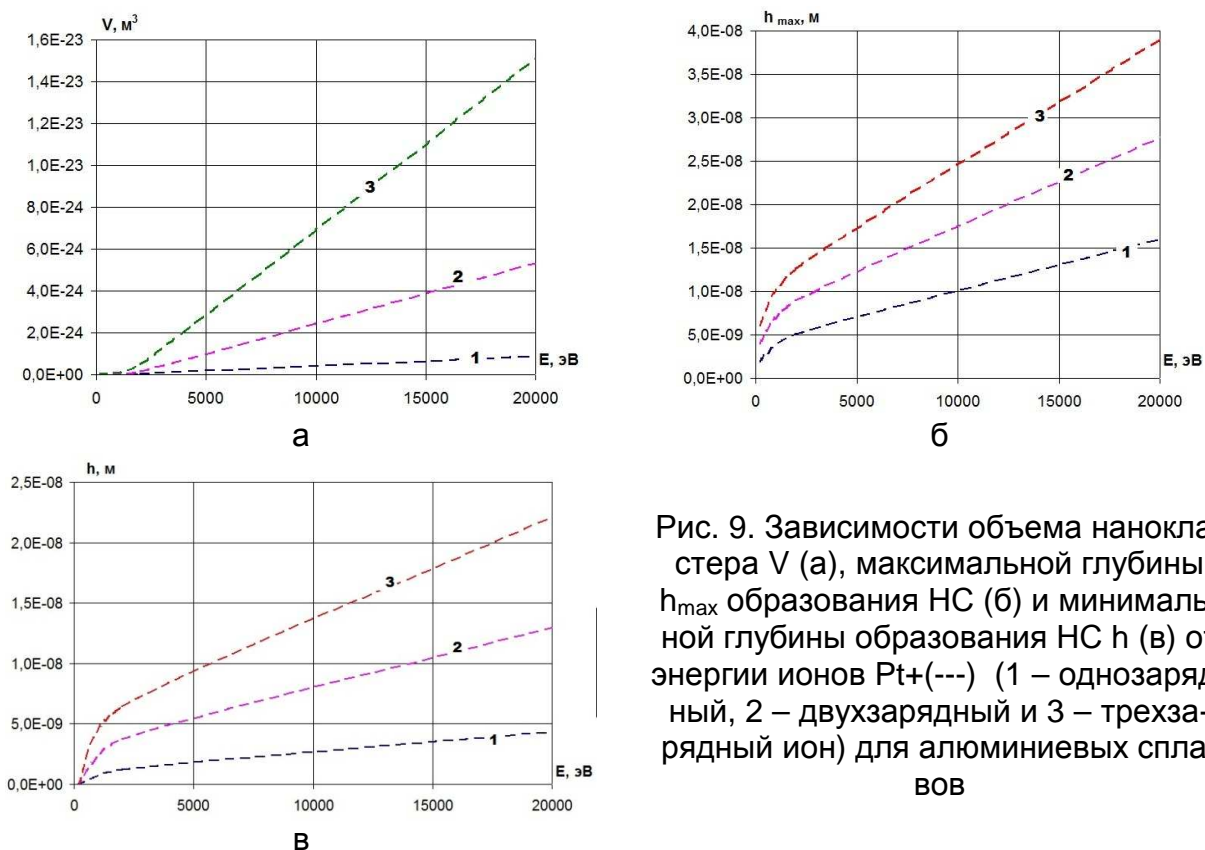


Рис. 9. Зависимости объема нанокластера V (а), максимальной глубины h_{\max} образования НС (б) и минимальной глубины образования НС h (в) от энергии ионов Pt^{+} (---) (1 – однозарядный, 2 – двухзарядный и 3 – трехзарядный ион) для алюминиевых сплавов

Видно, что с ростом энергии ионов и их зарядов реализуется существенный рост объемов, заряд же ионов влияет меньше.

Полученные зависимости будут необходимы для определения потребной плотности тока соответствующего сорта, заряда и энергии для полного заполнения слоя наноструктурами, а, выбрав необходимые энергии, заряды и сорта ионов для получения наноструктур в основном требуемой толщины, аналогично проводим оценки требуемых плотностей токов в каждом слое.

Зная объем, занимаемый наноструктурой при соответствующих энергиях, сортах и зарядах ионов и диапазон глубин, на которых этот объем находится, очевидно можно оценить плотность ионного тока.

Тогда по известным диапазонам глубин залегания зон, где образуются наноструктуры, выбираем энергии, сорта и зарядности ионов для полного заполнения объема по глубине, т.е. так, чтобы они дополняли друг друга. Далее определяем плотность тока каждого из сортов иона и заряда, чтобы максимально заполнить необходимый объем поверхностного слоя детали наноструктурами (желательно, чтобы окончание первого слоя было началом второго, окончание второго – началом третьего слоя, и так далее). Тогда для любого i -го слоя плотность тока определяется как

$$j_i = \frac{h_{i2} - h_{i1}}{V_{НСi}} z_i e,$$

где h_{i1} и h_{i2} – начальная и конечная координаты зоны, где реализуются наноструктуры для i -го иона; $V_{НСi}$ – объем зоны, где образуются наноструктуры; z_i – зарядовое число i -го иона; e – заряд электрона.

Зная j_i , $V_{НСi}$, h_{i1} , h_{i2} и z_i и выбрав E_i , мы можем сформировать необходимое количество потоков ионов, позволяющих получить наноструктурированный слой

требуемой толщины, а с учетом технической задачи формирования немоноэнергетичных разнозарядовых потоков ионов можно решить задачу по технологическим параметрам ионной обработки.

Выводы

1. На основе исследования влияния энергии, сорта и заряда иона показана возможность получения плотности ионного тока, при которой можно обеспечить максимально возможное заполнение наноструктурами слоя на диапазоне глубины (минимальной и максимальной (n_1 и n_2) залегания наноструктуры в алюминиевых сплавах.

2. Показана возможность получать слои наноструктур необходимой и толщины за счет применения потоков ионов с разной энергией, зарядом и сортом.

3. Конструирование наноструктур с помощью различных потоков ионов, обеспечивается таким образом: максимальная глубина первого слоя должна быть близка к минимальной глубине второго слоя и так далее.

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 нанопокртия: перспективы и реальность [Текст]: учеб. пособие / Г.И. Костюк. – Х.: Нац. аэрокосм. ун-т «Харьк. авиац. ин-т», 2009. – 406 с.

5. Костюк, Г.И. Научные основы создания современных технологий [Текст]: учеб. пособие / Г.И. Костюк. – Х.: Нац. аэрокосм. ун-т «Харьк. авиац. ин-т», 2008. – 552 с.

6. Костюк, Г.И. Эффективный режущий инструмент с покрытием и упрочненным слоем [Текст]: моногр.-справ. / Г.И. Костюк. – Х.: Нац. аэрокосм. ун-т «Харьк. авиац. ин-т», 2007. – 633 с.

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

8. Костюк, Г.И. Физико-технические основы роботизированного производства [Текст]: учеб. пособие / Г.И. Костюк. – Х.: Нац. аэрокосм. ун-т «Харьк. авиац. ин-т», 2006. – 614 с.

9. Гречихин, Л.И. Физика наночастиц и нанотехнологий [Текст] /Л.И. Гречихин. – М.: УП «Технопринт», 2004. – 397 с.

10. Шнейдер, П. Инженерные проблемы теплопроводности [Текст] / П. Шнейдер. – М.: Иностран. лит. – 1960. – 488 с.

11. Аксенов, И.И. Вакуумная дуга в эрозионных источниках плазмы [Текст] / И.И. Аксенов. – Х.: Изд-во НИИ «ХФТИ», 2005. – 211 с.
12. Хаякава, С. Ядерно-физический аспект [Текст]: в 2 кн. / С. Хаякава. – М.: Мир, 1973.- Кн. 2. – 701 с.
13. Готт, Ю.В. Взаимодействие частиц с веществом в плазменных исследованиях [Текст] / Ю.В. Готт. – М.: Атомиздат, 1978. – 271 с.
14. Гусев, А.И. Нанокристаллические материалы: методы получения и свойства [Текст] / А.И. Гусев. – Екатеринбург: Изд-во РАН, Уральское отд-ние, 1998. – 302 с.
15. Гусев, А.И. Наноматериалы наноструктуры, нанотехнологии [Текст] / А.И. Гусев. – М.: Физматлит, 2005. – 416 с.
16. Решетняк, Е.Н. Синтез упрочняющих наноструктурных покрытий [Текст] / Е.Н. Решетняк, А.И. Стрельницкий // Вопросы атомной науки и техники. – 2008. – № 2. – С. 119 – 130.
17. Андриевский, Р.А. Наноматериалы: концепция и современные проблемы [Текст] / Р.А. Андриевский // Физика металлов и металловедение. – 2003. – Т. 91, № 1. – С. 50 – 56.
18. Состав, структура и свойства наноструктурных пленок боридов тантала [Текст] / А.А Гончаров, П.И. Игнатенко, В.В. Петухов и др. // ЖТФ. –2006. – Т. 76, вып. 10.
19. Коваленко В.Ф. Теплофизические процессы и электровакуумные приборы [Текст] / В.Ф. Коваленко. – М.: Сов. радио. 1975. – 212 с.

Рецензент: д-р техн. наук, проф. зав. каф. Долматов А. И., Национальный аэрокосмический университет «ХАИ» им. Н. Е. Жуковского, Харьков
Поступила в редакцию 11.06.2014

Оцінювання обсягу нанокластера і глибин його залягання в алюмінієвому сплаві при дії іонів різних енергій

На основі розв'язання сумісної задачі теплопровідності й термопружності отримано поля температур і температурних напружень, в яких виділено зони, де утворюються наноструктури (НС). Для алюмінієвого сплаву при дії великої кількості різних іонів і їхніх зарядів від 1 до 3 отримано залежності обсягу нанокластера і глибин його залягання від енергії.

Ключові слова: наноструктури, нанокластер, обсяг нанокластера, глибина залягання наноструктури, іон.

Estimation of the nanocluster and its depth aluminum alloy under the action of ions different energies

On the basis of a joint decision problem of heat conduction and thermoelasticity obtained of field temperature and thermal stresses, in which the zones where formed nanostructures (NS) . For aluminum alloy under the action of a large number of different ions and their charges from 1 to 3 depending on the volume received nanocluster and its depth of energy.

Keywords: nanostructure, nanocluster volume nanocluster, the depth of the nanostructure, ion.