УДК 621.793.74:546.56:620.3 **doi: 10.32620/aktt.2022.5.04**

Ю. В. ШИРОКИЙ, А. Ю. СИСОЄВ, Ю. С. ПАНЧЕНКО

Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського «Харківський авіаційний інститут», Україна

ТЕОРЕТИЧНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕМПЕРАТУРНИХ ПОЛІВ МІДІ ПРИ ФОРМУВАННІ НАНОСТРУКТУРНИХ ШАРІВ У ПЛАЗМОВОМУ СЕРЕДОВИЩІ

Предметом *вивчення і математична модель для теплових процесів під час формування наноструктур у плазмовому середовищі. У раніше проведених дослідженнях було показано, що для появи наноструктур необхідно, щоб була певна температура, швидкість її наростання та температурні напруження. Необхідна глибина приповерхневого шару оброблюваного матеріалу, найбільш сприятлива для утворення наноструктур, визначається там, де виникають найвищі температурні градієнти напруження.* ***Метою*** *роботи є визначення технологічних параметрів для стабільного отримання наноструктур при іонно-плазмовій на прикладі обробці поверхні міді.* ***Завдання*** *цієї роботи, змінюючи енергію іонів обирати розташування полів по глибині матеріалу, щоб генерувати необхідні градієнти високої температури у заданих площинах матеріалу. Таким чином, у великому обсязі матеріалу можуть створюватися значні температурні напруги, а значить і наноструктури. Використовуваним* ***методом*** *є аналітичний. У нашій роботі було розроблено математичну модель для опису генерації температурних полів під час іонно-плазмової обробки поверхні та перевірено її на процесі обробки міді іонами кисню. У цій моделі спільні дії плазмових потоків і потоків заряджених частинок з матеріалами реалізуються через теплофізичні, термомеханічні, термосталісні, дифузійні, термохімічні, плазмохімічні процеси та процеси зіткнень. Тому розроблена модель буде сприяти більш точному визначенню технологічних параметрів для утворення умов, що будуть сприяти стабільному росту наноструктур у приповерхневих шарах оброблюваних матеріалів. В результаті чисельних розрахунків визначено залежність температури поверхневого шару міді від енергії іонів кисню. Розраховано температурні поля в зоні дії іонів для трьох рівнів площини поверхневого шару в залежності від глибини проникнення іонів для різних часів їх взаємодії та при різних щільностях струму від $2{,}7\cdot10^6$ до $2{,}1\cdot10^8$ А/м^2. Як показали дослідження, максимальна температура поверхні досягається в кінці теплової дії іона.* ***Висновки.*** *Отримані значення температурних напружень показали можливість утворення наноструктур в поверхневому шарі міді під дією іонів кисню на глибині $x=0{,}5\lambda_m$ при щільностях струму $2{,}7\cdot10^6$ А/м^2. Для площини $x=0{,}5\lambda_m$, при щільності струму $3\cdot10^7$ А/м^2, де були виявлені найбільші температурні градієнти, були розраховані максимальні температурні напруги, які становлять $5\cdot10^8$ N/m, що підтверджує створення умов для отримання наноструктур. Але при $2{,}1\cdot10^8$А/м^2 загальна температура підвищується, а температурні градієнти зменшуються, що веде до зменшення температурних напружень та невиконанню умов отримання наноструктур. Отримані результати можуть бути затребуваними для розробки технології виробництва наноструктур у плазмовому середовищі, наприклад, на міді шляхом іонно-плазмової обробки в кисневому середовищі.*

Ключові слова: *іонізуюче випромінювання; тепловий потік; температурні поля; температурні напруження; наноструктури.*

Вступ

Інтереси сучасних дослідників до наноструктур [1] та наноструктурованих матеріалів [2] зумовлені, з одного буку, можливістю появи нових матеріалів [3], а з іншого - появою нових властивостей у вже відомих матеріалах після виникнення на їхній поверхні наностуктур [4]. Це значно розширює можливості використання цих матеріалів [5]. Наприклад, наноструктурована мідь широко використовується для виробництва джерел пам'яті [6] та супер конденсаторів [7]. Також її можливо застосовувати у сенсорних, електронних та оптоелектронних наноприладах [8] для видалення органічних забруднювачів [9] та у охолоджуючих нанорідинах [10].

Для отримання наноструктурованої міді були розроблені різні методи: хімічного осадження [11]; статистичного, оптимізованого, контрольованого осадження та кальціювання прекурсору [12, 13]; модифікації поверхні міді плазмою [14]; морфологі-

© Ю. В. Широкий, А. Ю. Сисоєв, Ю. С. Панченко, 2022

ISSN 1727-7337 (print)
ISSN 2663-2217 (online)

чного та фазового, селективного синтезу [8]; електрохімічного процесу мікроплазми (АМР) [15] або біосинтезу [16]. Для отримання наноструктур на поверхні міді також розробляються плазмо-іонні методи [17], які дозволять варіювати імплантацією різних іонів [7, 18]. При цьому варто відзначити, що достатньо багато робіт розглядається там, де наноструктури створюються у тонких плівках або на поверхнях [6, 8-10], та суттєво менше робіт там, де їх створюють у приповерхневому шарі конструкційних матеріалів [1, 7, 18].

В проведених раніше дослідженнях було показано, що для отримання наноструктури у приповерхневому шарі при іонно-плазмовій обробці, необхідне створення певних умов [19]. Наприклад, при обробці алюмінію іонами азоту з енергією 800 еВ було досягнуто температур порядку 600-700 К [20]. У роботах [21, 22] також відзначається, що дія заряджених частинок на конструкційні матеріали призводить до появи у приповерхневому шарі матеріалу досить високих температур ($2 \cdot 10^3$ К). Все це говорить про те, що при іонно-плазмовій оброці в зоні іонного впливу є ймовірність появи суттєвих температурних градієнтів. У свою чергу температурні градієнти можуть призвести до великих температурних напружень [23], які й нададуть появу місцевих зон з умовами для створення наноструктур [24]. Щоб дія температурних градієнтів та створених ними температурних напружень була максимально ефективною, треба у певному об'ємі створити максимальне заповнення площини високотемпературними полями. При цьому треба зберегти зони, які мають максимальні градієнти температур. Простим збільшенням щільності іонного струму цього не досягти. При його збільшенні, градієнти температур в зоні дії сусідніх частинок зменшаються [25, 26]. Це призведе до зниження температурних напружень, а значить не будуть виконуватися зазначені вище умови створення наноструктур [25]. Тому є досить актуальною задача з моделюванням температурних полів при іонно-плазмовій обробці на прикладі обробки міді іонами кисню.

Постановка задачі

Як було зазначено вище, для появи наноструктур необхідно, щоб були створені певні умови: температура, швидкість її наростання та значні температурні напруження. В публікаціях [27, 20] було показано, що під дією іонів різної енергії та щільності струму [28], можна отримати достатньо високі температурні напруження за рахунок створення відповідних температурних полів у глибині оброблюваного матеріалу. Для цього, змінюючи енергію іонів, ми можемо обирати розташування полів у глибині матеріалу, щоб генерувати необхідні градієнти високої температури у заданих площинах матеріалу. Таким чином, у великому обсязі матеріалу можуть створюватися значні температурні напруги. Тому цілком доцільна розробка теоретичної моделі, яка врахує як дії окремих частинок на конструкційні матеріали [20], так і їх взаємодію. Також в ній розглянемо нові фактори, такі як різні заряди іонів та взаємний вплив температурного поля, що утворюється під дією окремих іонів та вплив енергії кристалізації [29]. Врахування всіх вище означених чинників в запропонованій математичній моделі дозволить більш точніше визначити технологічні параметри для стабільного отримання наноструктур.

Дослідницька частина

Спільні дії плазмових потоків та потоків заряджених частинок з матеріалів реалізуються через теплофізичні, термомеханічні, термосталісні, дифузійні, термохімічні, плазмохімічні процеси та процеси зіткнень [30]. Ці процеси впливають на природу теплообміну як на поверхні, так і в основній масі матеріалу. Їх слід враховувати через енергетичний баланс як в елементарному обсязі мішені, так і в тепловіддачі на поверхні мішені. Враховуючи ці фактори та їх взаємозв'язок, ми записуємо рівняння теплового балансу в елементарному об'ємі деталі у наступному вигляді:

$$Q_w + Q_{vp} + Q_{vw} = q_{tc} + q_{efd} - q_f + \\ + q_{cp} + q_{eda} + q_{de} + q_d + q_{tch} + q_{LJh}. \quad (1)$$

Перший доданок враховує зміну кількості теплоти в одиниці об’єму:

$$Q_w = C[T] \cdot \gamma[T] \frac{dT(x, y, z, t)}{dt}, \quad (2)$$

де $C[T]$, $\gamma[T]$ – теплоємність та щільність матеріалу мішені, що відповідає температурі Т.

Також беремо до уваги переміщення потоку частинок вздовж обробленої поверхні або зміщення мішені щодо потоку плазми, що описується другим доданком:

$$Q_{vp} = C[T] \cdot \gamma[T] \frac{dT(x, y, z, t)}{dt} v_n, \quad (3)$$

де v_n – швидкість переміщення плазмового потоку або мішені щодо нього.

Враховуємо також теплофізичні процеси, тобто вплив на теплообмін кінцевої швидкості поширення тепла:

$$Q_{vw} = C[T]\cdot\gamma[T]\cdot\tau_p\frac{d^2T(x,y,z,t)}{dt^2}, \qquad (4)$$

де τ_p – час релаксації температури на один Кельвін (цей термін позначає час термізації, коли балістичний зсув і переміщення, спричинені падаючим іоном у матеріалі, перетворюються на тепло).

Права частина рівняння показує теплопровідність:

$$q_{tc} = \lambda[T\nabla T](x,y,z,t), \qquad (5)$$

та переміщення фронту випаровування:

$$q_{efd} = C[T]\cdot\gamma[T]\cdot v_{fd}\frac{\partial T(x,y,z,t)}{\partial t}, \qquad (6)$$

де v_{fd} – швидкість переміщення фронту випаровування.

Також враховується теплота плавлення. Питома теплота плавлення:

$$q_f = A\cdot L_f\cdot\gamma[T]\cdot v_{fd}\frac{\partial V_f}{\partial x}, \qquad (7)$$

де A – поправочний коефіцієнт, L_f – питома теплота плавлення, V_f – обсяг розплавленого металу.

Тепло від об'ємного джерела тепла внаслідок дії частинки в процесі зіткнення становить:

$$q_{cp} = B\cdot J_{i.e.}\cdot\mu_{i.e.}\frac{\partial E_{i.e.}}{\partial x}, \qquad (8)$$

де B – поправочний коефіцієнт, $J_{i.e.}$ – щільність іонних та електронних струмів або потік плазми, $\mu_{i.e.}$ – коефіцієнт акомодації іона і електрона, $\frac{\partial E_{i.}}{\partial x}$ – зміна енергії іона при просуванні вглиб цілі визначена в роботах [19, 30]. Втратами енергії електрона $\frac{\partial E_{e.}}{\partial x}$ ми нехтуємо.

Витрати енергії на витіснення атомів представлені коефіцієнтом:

$$q_{eda} = E_{da}\cdot n_{da}\frac{J_{i.e.}}{\lambda_{mi.e.}}, \qquad (9)$$

де E_{da} – енергія витискання атомів, n_{da} – кількість переміщених атомів в результаті дії іона або електрона, $\lambda_{mi.e.}$ – середня лінійна довжина вільного пробігу іонів і електронів у матеріалі мішені.

Термопружні, термопластичні та термоутомлювальні процеси, що визначають енергію деформації матеріалу елементарного об'єму, розглядаються як коефіцієнт:

$$q_{de} = d\frac{dW(x,y,z,t)}{dt}, \qquad (10)$$

де d – поправочний коефіцієнт $dW(x,y,z,t)$ – енергія деформації одиниці цільового об'єму.

Дифузійні процеси, що визначають тепловіддачу дифузійним матеріалом, записані як:

$$q_d = m_a\cdot C_a[T_a]\frac{dn_a}{dt}(T_a - T(x,y,z,t)), \qquad (11)$$

де m_a – маса дифузійного атома, $C_a[T_a]$ – теплоємність дифузійного матеріалу при температурі T_a.

Термохімічні процеси, пов'язані із здійсненням хімічних реакцій між матеріалом-мішенню та бомбардуючими іонами або між компонентами сплавів та композиційних матеріалів, визначаються як:

$$q_{tch} = P_{tch}(n_A, n_B, T, t_{вз})\frac{dn_{A(B)}}{dt}L_{ftch}, \qquad (12)$$

де $P_{tch}(n_A, n_B, T, t_{вз})$ – ймовірність термохімічної реакції, що залежить від концентрації реагентів n_A та n_B температури T й часу взаємодії $t_{вз}$, L_{ftch} – питома теплота термохімічної реакції, n_A, n_B – концентрація реагенту, що визначає можливість реакції.

Також враховується нагрівання Ленц-Джоуля внаслідок поширення іонного струму:

$$q_{LJh} = \rho[T]J^2(x,y,z,t), \qquad (13)$$

де $\rho[T]$ – питомий електричний опір при температурі T, а $J(x,y,z,t)$ – щільність струму з урахуванням розтікання струму.

Енергія деформації одиниці об'єму будемо визначати за моделлю [20] з урахуванням можливих затрат на енергію кристалізації [29]. Температурні напруги визначимо за виразом:

$$\sigma_{ik} = 2G\left(\frac{\partial^2\Phi}{\partial i\partial k} - \Delta\Phi\cdot\delta_{ik}\right), \qquad (14)$$

де δ_{ik} підпорядковується умовам $\delta_{ik} = 0$ при $i \neq k$ $(i,k = x,y,z)$, $\delta_{ik} = 1$ та $\mathbf{i = k}$, також знайдемо

ISSN 1727-7337 (print)
ISSN 2663-2217 (online)

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

Знаючи термопружності потенціалу переміщень, знаходимо величини подовжень і зсувів

$$\varepsilon_{ik} = \frac{\partial^2\Phi}{\partial i\partial k}, \qquad (15)$$

де i, k = x, y, z.

Зміна концентрації дифундованих атомів в одиницю часу набуде вигляду:

$$\frac{dn_a}{dt} = \begin{cases} \dfrac{J}{e\cdot z\cdot\sqrt{a\tau}}, & \text{якщо } t < t_k; \\ \dfrac{J}{e\cdot z\cdot L_D}, & \text{якщо } t \geq t_k; \end{cases}$$

де L_D – товщина матеріалу, t_k – час, за який матеріал прогріється на всю товщину, J – щільність струму, z – зарядове число нанесеного матеріалу, e – заряд електрону, $t_k = L_D^2/\alpha$, α – коефіцієнт температуропровідності.

Для розрахунку коефіцієнта дифузії візьмемо таку залежність:

$$K_{диф} = a_d\cdot d_в^{\,2}\cdot V_0\cdot\exp\left(-U/(kT)\right), \qquad (16)$$

де a_d – множник порядку 0,1, який визначається типом кристалічної решітки, d_B – відстань між найближчими еквівалентними положеннями вакансій в кристалі, V_0 – величина порядку частоти атомних коливань в кристалі ($10^{12}\ldots10^{14}$ c^{-1}), U – потенційний бар'єр, який вакансії необхідно подолати при зміщенні в сусіднє положення, k – постійна Больцмана, T – абсолютна температура.

Тепловіддача на поверхні деталі, яка залежить від щільності теплового потоку внаслідок дії падаючих частинок, з урахуванням затрат на енергію кристалізації становить:

$$-\lambda[T]\frac{\partial T(x,y,z,t)}{\partial x} = \mu_{i.e.}E_{i.e.}J_{i.e.} - K_{ref.i.e.}J_{i.e.}E_{ref.i.e.} - E_{kr}J_{i.e.} - \sigma\varepsilon T^4(0,y,z,t) + \sigma\varepsilon_c T_c^4, \qquad (17)$$

де σ – постійна Стефана-Больцмана, ε та ε_c – ступінь чорноти мішені, T_c – температура середовища, $E_{i.e.}$ – енергії налітаючих іонів плазми та електронів відповідно, $K_{ref.i.e.}$ – коефіцієнт відбиття іонів або електронів, $E_{ref.i.e.}$ – відбита енергія частинок, $\mu_{i.e.}$ – є коефіцієнтом акомодації, який визначає максимальну частку енергії, яку іон або електрон може передати атому, і визначається виразом [30]:

$$\mu = \lim_{E_1\to E_0}\left(\frac{(E_2\to E_0)}{(E_1\to E_0)}\right), \qquad (18)$$

де E_0 – енергія налітаючої частки, E_1 – енергія атомів на поверхні, E_2 – енергія частки, що залишає.

Результати та обговорення

Використовуючи вищезазначену теоретичну модель, яка розглядає різні механізми передачі енергії мішені під час іонно-плазмової обробки, було отримано залежності зміни температури від енергії іонів у мідній мішені для різних часів взаємодії t (рис. 1), де $\tau_{bm} = (\tau_{bi} + \tau_{be})/2$,

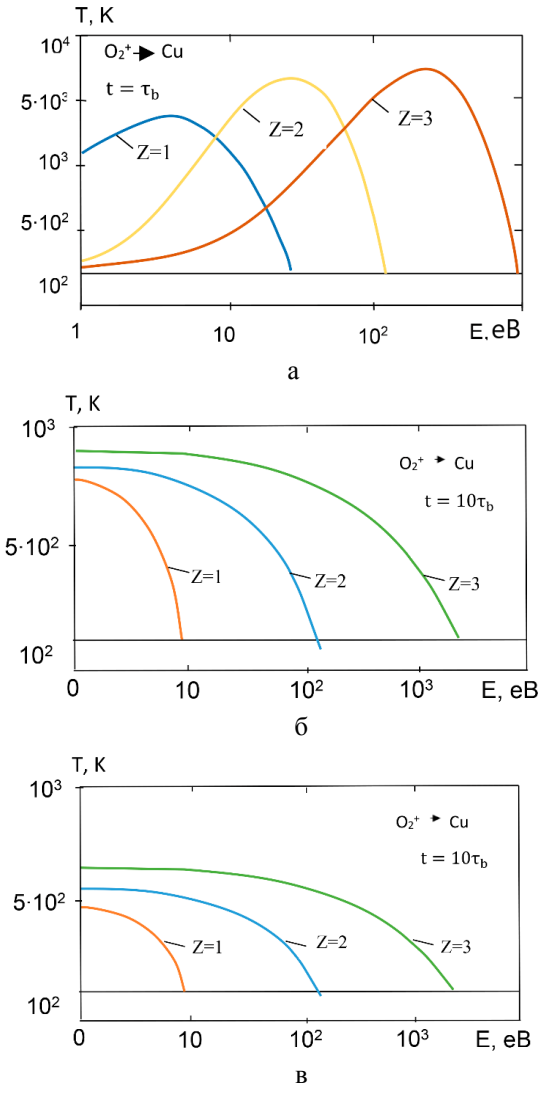
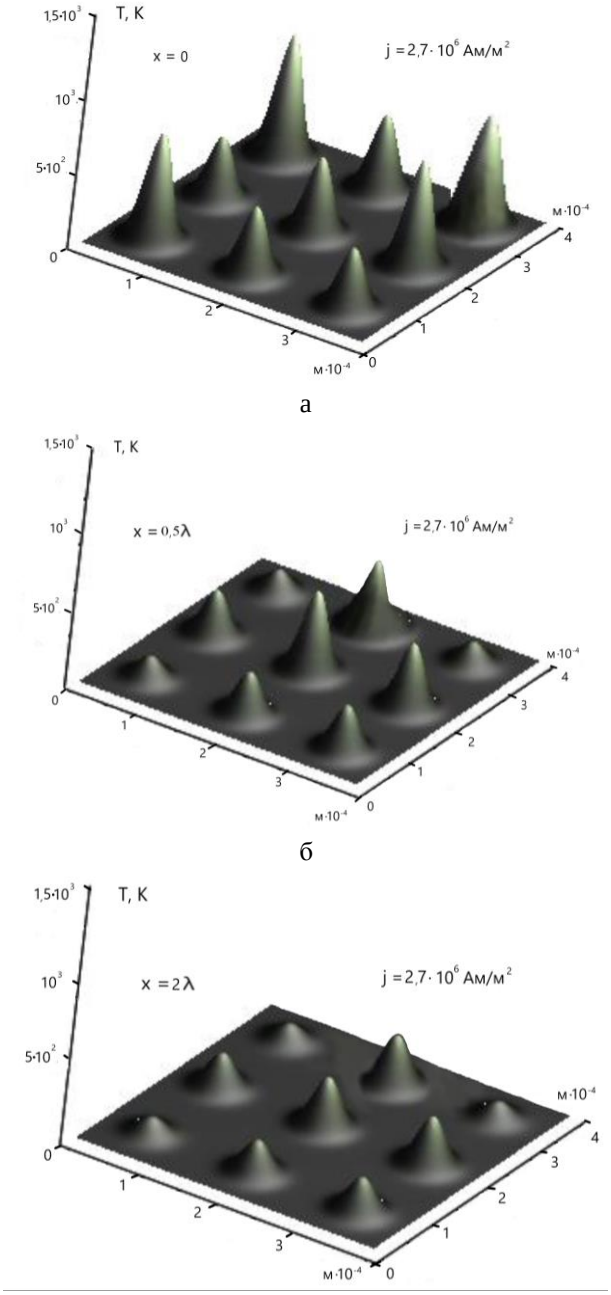


Рис. 1. Залежність температури від енергії іонів при різних часах впливу

Бачимо, що максимальна температура поверхні досягається в кінці теплової дії іона. У цьому випадку найвищі температури відповідають часу взаємодії $t_1 = 1{,}1\tau_b$ (рис. 1, а), у той самий час при збільшенні часу взаємодії температура суттєво не збільшується (рис. 1, б, в).

Також, завдяки розробленій математичній моделі, було отримано структури температурних полів при іонно-плазмовій обробці міді великою кількістю іонів кисню для різних глибин проникнення часток (рис. 2).



а

б

в

Рис. 2. Розподіл температур при дії іонів кисню на мідь за різними глибинами, при щільності струму $J = 2{,}7\cdot10^6$ A/m^2

Так на рис. 2 показано розподіл температур по площі мішені, при щільності струму $J = 2{,}7\cdot10^6$ A/m^2 на глибинах а) $x = 0$, б) $x=0{,}5\lambda_m$, в) $x = \lambda_m$, де

$$\lambda_m = (\lambda_i + \lambda_e)/2, \qquad (19)$$

де λ_e – глибина проникнення електрона, λ_i – глибина проникнення іона. У подальшому було отримано температурні поля на тих же глибинах, але для різних щільностей струму $J = 3\cdot10^7$ A/m^2 (рис. 3) та $J = 2{,}1\cdot10^8$A/m^2 (рис. 4).

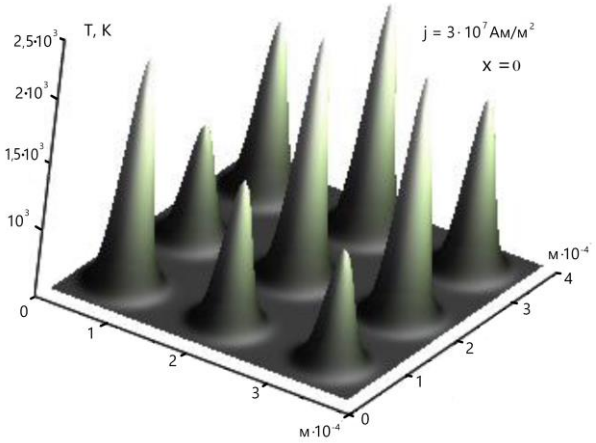
Як показали розрахунки в площині $x=0{,}5\lambda_m$ при щільності струму $J = 2{,}7\cdot10^6$ A/m^2 (рис. 2, б), вже спостерігаються досить значні температурні градієнти, що можуть створювати температурні напруження, які необхідні для виконання умов з утворенням наноструктур [25, 27]. При подальшому збільшенні струму до $J = 3\cdot10^7$ A/m^2, у площині $x=0{,}5\lambda_m$ також виникають великі температурні градієнти, які певно будуть створювати необхідні температурні напруження, що будуть сприяти утворюванню наноструктур. Однак, при подальшому збільшенні щільності струму до $J = 2{,}1\cdot10^8$A/m^2 температурні градієнти вирівнюються (рис. 4), а значить не будуть створюватись необхідні температурні напруження та не будуть виконуватися умови для створення наноструктур.

Для площини $x=0{,}5\lambda_m$ при щільності струму $J = 3\cdot10^7$ A/m^2, де були виявлені найбільші температурні градієнти, були розраховані максимальні температурні напруги, які становлять $\sigma_{max} = 5\cdot10^8$ N/m, що підтверджує створення умов для отримання наноструктур [25, 27].

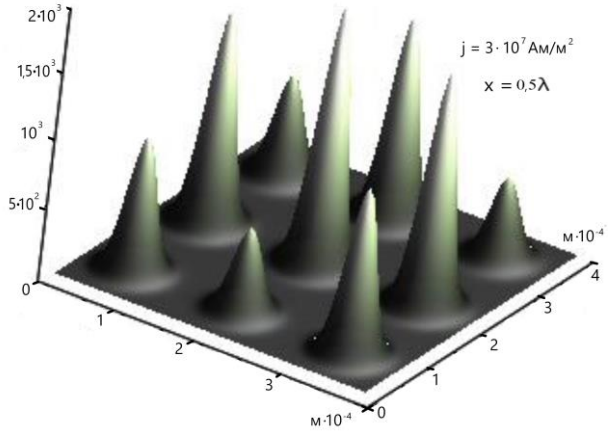
Висновки

Розроблено математичну модель для опису генерації температурних полів під час іонно-плазмової обробки поверхні міді при утворенні наноструктур у приповерхневих шарах. Проведені дослідження температурних полів при іонно-плазмовій обробці міді іонами кисню показують, що можливо створювати температурні поля з високими температурними градієнтами в заданій площині $x=0{,}5\lambda_m$, при щільності струму $J = 2{,}7\cdot10^6$ A/m з досить високими показниками температурних напружень (10^8 N/m), що і буде сприяти утворенню стабільних наноструктур. Створена теоретична модель являється регульованою та контрольованою. Вона буде затребуваною для удосконалення технологій отримання наноструктур плазмово-іонними методами.

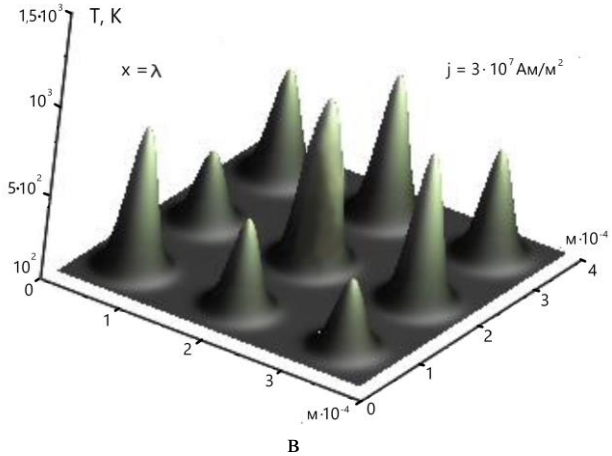
ISSN 1727-7337 (print)
ISSN 2663-2217 (online)



а

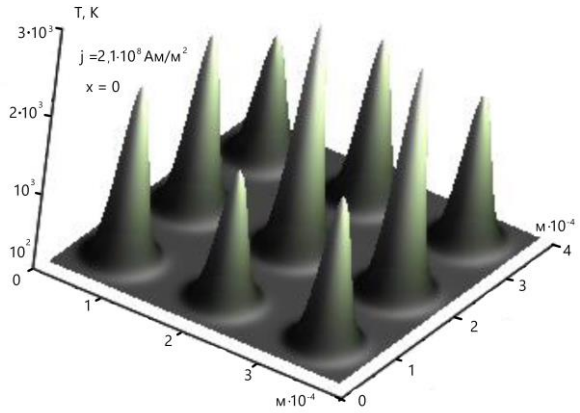


б

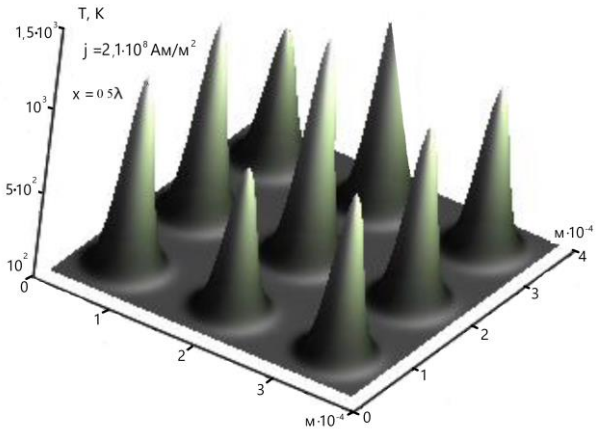


в

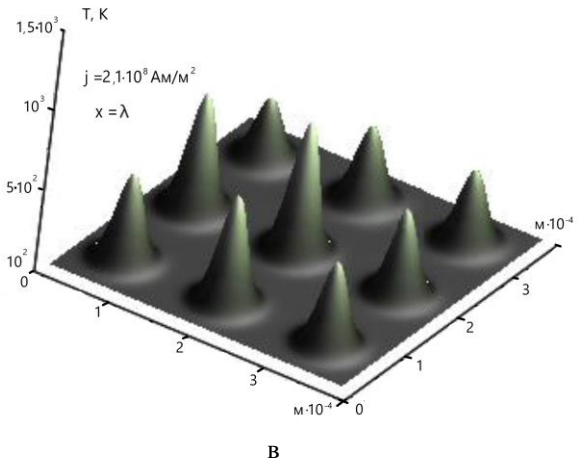
Рис. 3. Розподіл температур при дії іонів кисню на мідь за різними глибинами, при щільності струму J = $3 \cdot 10^7$ A/m^2



а



б



в

Рис. 4. Розподіл температур при дії іонів кисню на мідь за різними глибинами, при щільності струму J = $2{,}1 \cdot 10^8$A/m^2

Подяки. Автори висловлюють подяку *Національному фонду досліджень України* за підтримку проєкту № **2020.02/0119** (конкурс *«Підтримка досліджень провідних та молодих учених»*).

Література

1. MoS2-based nanostructures: synthesis and applications in medicine [Text] / K. Bazaka, I. Levchenko, J. W. M. Lim, O. Baranov, C. Corbella, S. Xu and M. Keidar // Journal of Physics D: Applied Physics. – 2019. – Vol. 52, No. 18. – Article ID: 183001. DOI: 10.1088/1361-6463/ab03b3.

2. Recent progress and perspectives of space electric propulsion systems based on smart nanomaterials [Text] / I. Levchenko, S. Xu, G. Teel, et al // Nat Commun. – 2018. – Vol 9. – Article ID: 879. DOI: 10.1038/s41467-017-02269-7.

3. Creation of Silicon Nanostructures in Electric Arc Discharge [Text] / B. A. Timerkaev, B. R. Shakirov, & D. B. Timerkaeva // High Energy Chem. – 2019. – No 5. – P. 162-166. DOI:10.1134/S0018143919020152.

4. Nanostructured Coatings Based on Amorphous Carbon and Gold Nanoparticles Obtained by the Pulsed Vacuum-arc Method [Text] / O. V. Glukhov, A. Ya. Kolpakov, M. G. Kovaleva, V. M. Beresnev, S. S. Manokhin, A. I. Poplavsky, A. N. Khmara, M. V. Mishunin, M. E. Galkina, J. V. Gerus, M. N. Yapryntsev, V. V. Sirota, O. V. Glukhov // Journal of nano- and electronic physics. – 2019. – Vol. 11, No. 4. – Article ID: 04019.

5. Ghalmi, Z. Durability of nanostructured coatings based on PTFE nanoparticles deposited on porous aluminum alloy [Text] / Z. Ghalmi, M. Farzaneh // Applied Surface Science. – 2014. – Vol. 314. – P. 564–569. DOI: 10.1016/j.apsusc.2014.05.194.

6. Bishop, M. Ion implantation synthesized copper oxide-based resistive memory devices [Text] / S. M. Bishop, H. Bakhru, S. W. Novak, B. D. Briggs, R. J. Matyi, N. C. Cady // Appl. Phys. – 2011. – Vol. 99, No. 20. – P. 202–212.

7. Khatavkar, S. N. Superior Supercapacitive Performance of Grass-like CuO Thin Films Deposited by Liquid Phase Deposition [Text] / S. N. Khatavkar, S. D. Sartale // New Journal of Chemistry. – 2020. – Vol. 17, No. 44. – P. 6778–6790.

8. Ion implantation of copper oxide thin films; statistical and experimental results[Text] / A. Jafari, K. Tahani, D. Dastan,, S. Asgary, Z. Shi, X.-.Yin, W.-D. Zhou, H. Garmestani, Ş. Ţalu // Surfaces and Interfaces. – 2020. – No. 18. – P. 118–127.

9. Morphology and phase selective synthesis of CuxO (x=1, 2) nanostructures and their catalytic degradation activity [Text] / Y. Xi, C. Hu, P. Gao, R. Yang, X. He, X. Wang, B. Wan // Materials Science and Engineering. – 2010. – Vol. 166, No. 1. – P 113–117. DOI: 10.1016/j.mseb.2009.10.008.

10. Sabeeh, S. H. Effect of Cu Salt Molarity on the Nanostructure of CuO Prolate Spheroid International [Text] / S. H. Sabeeh, H. A. Hussein, H. K. Judran // Journal of Nanoscience. – 2017. – Vol. 16, No. 03. – P. 156–167.

11. Piri, F. Synthesis of copper oxide quantum dots: effect of surface modifiers [Text] / F. Piri, M. Shafiee Afarani, A. M. Arabi // Materials Research Express – 2019. – Vol. 6, No. 12. – Article ID: 125006. DOI: 10.1088/2053-1591/ab548d.

12. Synthesis and characterization of copper oxalate and copper oxide nanoparticles by statistically optimized controlled precipitation and calcination of precursor [Text] / R.-N. Mehdi, P. Seied Mahdi1, D.-D. Ali Akbar, H. Seiedeh Somayyeh, Z. Mir Mahdi // CrystEngComm 15-20, The Royal Society of Chemistry Express. – 2013. – No. 15. – P. 4077–4086.

13. Cupric Oxide Nanostructures from Plasma Surface Modification of Copper [Text] / H. S. Salapare, J. A. Balbarona, L. Clerc, P. Bassoleil, A. Zenerino, S. Amigoni, F. Guittard // Biomimetics (Basel). – 2019. – Vol. 4(2), No 42. – P. 432–441.

14. Microplasma-assisted synthesis of CuO nanostructures for catalytic degradation of organic dyes under solar irradiation [Text] / M. A. Khan, M. H. Muhammad, M. S. Khan, T. Iqbal, A. Pervaiz, M. Shafigue, M. Naeem // J Solid State Electrochem. – 2020. – No 24. – P. 1123–1132.

15. Sreeju, N. Studies on catalytic degradation of organic pollutants and anti-bacterial property using biosynthesized CuO nanostructures [Text] / N. Sreeju, A. Rufus, D. Philip // Journal of Molecular Liquids. – 2017. – No. 242. – P. 690–700.

16. Structural characteristics of nanocrystalline copper after carbon ion implantation [Text] / W. Lin, Y. Wei, H. Du, Li. Hou, G. Wang, H. Bi, B. Xu // Micron. – 2017. – Vol. 42, No 7. – P. 691–694.

17. Сисоєв, Ю. О. Підвищення ефективності запалювання вакуумно-дугового розряду в джерелах плазми [Текст] / Ю. О. Сисоєв, Ю. В. Широкий, О. В. Торосян // Авіаційно-космічно техніка та технологія. – 2022. – № 2. – С. 47–54. DOI: 10.32620/aktt.2022.2.06.

18. High power impulse magnetron sputtering discharge [Text] / J. T. Gudmundsson, N. Brenning, D. Lundin, U. Helmersson // Journal of Vacuum Science & Technology A: Vacuum, Surfaces, and Films. – 2012. – Vol. 30, Iss. 3. – P. 1–34.

19. Baranov, O. Current Distribution on the Substrate in a Vacuum Arc Deposition Setup [Text] / O. Baranov, M. Romanov // Plasma Processes and Polymers. – 2008. – Vol. 5, № 3. – P. 256–263.

20. Prospects for producing nanostructures in the volume of parts under the action of plasma flows [Text] / G. Kostyuk, O. Melkoziorova, E. Kostyuk, Iur. Shirokiy // Різання та інструменти в технологічних системах, ХНТУ «ХПІ». – Харків : 2020. – № 92. – С. 107–121.

21. *Study of Ions Energy, Their Varieties and Charge on Temperature, Rate of Temperature Rise, Thermal Stresses for Nanostructures on Construction Materials [Text] / V. Popov, G. Kostyuk, M. Nechyporuk, K. Kostyk // Advanced Manufacturing Pro-*

ISSN 1727-7337 (print)
ISSN 2663-2217 (online)

cesses. InterPartner 2019. Lecture Notes in Mechanical Engineering. – Springer, Cham., 2019. – P. 107–121.

22. Kostyuk, G. Volume of the Nanocluster and Its Depth at Effect of Ions of Different Energies, Varieties and Charges on Titanium Alloy VT-1 [Text] / G. Kostyuk, V. Popov, K. Kostyk // Advanced Manufacturing Processes. InterPartner 2019. Lecture Notes in Mechanical Engineering. – Springer, Cham., 2019. – P. 415–423.

23. *Широкий, Ю. В. Моделювання електроерозійних процесів на графітових електродах при формуванні наноструктур у плазмовому середовищі/ Ю. В. Широкий [Текст] // Відкриті інформаційні та комп'ютерні інтегровані технології : зб. наук. праць Нац. аерокосм. ун-т "ХАІ". – Харків, 2021. – Вип. 94 С. 58–76. DOI: 10.32620/oikit.2021.94.06.*

24. *Широкий, Ю. В. Моделювання умов отримання наноструктур в алюмінієвих сплавах при дії іонізуючого випромінювання [Текст] / Ю. В. Широкий, Ю. О. Сисоєв, Т. В. Постельник // Авіаційно-космічно техніка та технологія. – 2022. – № 2. – С. 55–63. DOI: 10.32620/aktt.2022.2.07.*

25. Костюк, Г. И. Перспективы применения лазерной обработки для создания наноструктур на РИ из «ВолКар» [Текст] / Г. И. Костюк, Ю. В. Широкий // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Технології в машинобудуванні. – Харків, 2017. – № 26(1248). – С. 60–65.

26. *Костюк, Г. И. Перспективы получения наноструктур при действии импульсного лазерного излучения на стали [Текст] / Г.И. Костюк, В. Н. Павленко, Ю. В. Широкий // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Технології в машинобудуванні. – Харків, 2015. – № 40(1149). – С. 47–52.*

27. *Shyrokyi, Y. Erosion Processes on Copper Electrodes Applied to Growth of Nanostructures in Plasma. [Text] / Y. Shyrokyi, G. Kostyuk // DSMIE 2022. Lecture Notes in Mechanical Engineering. – Springer Cham, 2022. – P. 494–503. DOI: 10.1007/978-3-031-06025-0_49.*

28. *Low-pressure planar magnetron discharge for surface deposition and nanofabrication [Text] / O. Baranov, M. Romanov, M. Wolter, S. Kumar, X. Zhong, K. Ostrikov // Physics of Plasmas, – 2010. – Vol. 17, No. 5. – P. 117–128. DOI: 10.1063/1.3431098.*

29. Shyrokyi, Y. Investigation of the Influence of Crystallization Energy on the Size of Nanostructures During Copper Ion-Plasma [Text] / Y. Shyrokyi, G. Kostyuk // Integrated Computer Technologies in Mechanical Engineering - 2021. ICTM 2021. Lecture Notes in Networks and Systems. – Springer Cham., 2022. – Vol. 367. – P. 57–66. DOI: 10.1007/978-3-030-94259-5_6.

30. *Широкий, Ю. В. Моделювання дугового розряду на мідному катоді для генерації наноструктур [Текст] / Ю. В. Широкий, Г. І. Костюк // Відкриті інформаційні та комп'ютерні інтегровані технології : зб. наук. праць. Нац. аерокосм. ун-т "ХАІ". – Харків, 2021. – Вип. 91. – С. 62-76. DOI: 10.32620/oikit.2021.91.05.*

References

1. Bazaka, K., Levchenko, I., Lim, J. W. M., Baranov, O., Corbella, C., Xu S. and Keidar M. MoS2-based nanostructures: synthesis and applications in medicine. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2019, vol. 52, no. 18, article id: 183001. DOI: 10.1088/1361-6463/ab03b3.

2. Levchenko, I., Xu, S., Teel, G. et al Recent progress and perspectives of space electric propulsion systems based on smart nanomaterials. *Nat Commun*, 2018, vol. 9, article id: 879. DOI: 10.1038/s41467-017-02269-7.

3. Timerkaev, B. A., Shakirov, B. R., Timerkaeva D. B. Creation of Silicon Nanostructures in Electric Arc Discharge. *High Energy Chem*, 2019, no. 5, pp. 162-166. DOI: 10.1134/S0018143919020152.

4. Glukhov, O. V., Kolpakov, A. Ya., Kovaleva, M. G., Beresnev, V. M., Manokhin, S. S., Poplavsky, A. I., Khmara, A. N., Mishunin, M. V., Galkina, M. E., Gerus, J. V., Yapryntsev, M. N., Sirota, V. V., Glukhov O. V. Nanostructured Coatings Based on Amorphous Carbon and Gold Nanoparticles Obtained by the Pulsed Vacuum-arc Method. *Journal of nano- and electronic physics*, 2019, vol. 11, no. 4, article id: 04019.

5. Ghalmi, Z., Farzaneh, M. Durability of nanostructured coatings based on PTFE nanoparticles deposited on porous aluminum alloy. *Applied Surface Science*, 2014, vol. 314, pp. 564-569. DOI: 10.1016/j.apsusc.2014.05.194.

6. Bishop, M., Bakhru, H., Novak, S. W., Briggs, B. D., Matyi, R. J., Cady, N. C. Ion implantation synthesized copper oxide-based resistive memory devices. *Appl. Phys*, 2011, vol. 99, no. 20, pp. 202-212.

7. Khatavkar, S. N., Sartale, S. D. Superior Supercapacitive Performance of Grass-like CuO Thin Films Deposited by Liquid Phase Deposition. *New Journal of Chemistry*, 2020, vol. 17, no. 44, pp. 6778-6790.

8. Jafari, A., Tahani, K., Dastan, D., Asgary, S., Shi, Z., Yin, X.-T., Zhou, W.-D., Garmestani, H., Ţalu Jafari, Ş. A. Ion implantation of copper oxide thin films; statistical and experimental results. *Surfaces and Interfaces*, 2020, no. 18, pp. 118-127.

9. Xi, Y., Hu, C., Gao, P., Yang, R., He, X., Wang, X., Wan, B. Morphology and phase selective synthesis of CuxO (x=1, 2) nanostructures and their catalytic degradation activity *Materials Science and Engineering*, 2010, vol. 166, no. 1, pp. 113-117. DOI: 10.1016/j.mseb.2009.10.008.

10. Sabeeh, S. H., Hussein, H. A., Judran, H. K. Effect of Cu Salt Molarity on the Nanostructure of CuO Prolate Spheroid International *Journal of Nanoscience*, 2017, vol. 16, no. 03, pp. 156-167.

11. Piri, F., Shafiee Afarani, M., Arabi, A. M. Synthesis of copper oxide quantum dots: effect of surface modifiers *Materials Research Express*, 2019, vol. 6, no. 12, article id: 125006. DOI: 10.1088/2053-1591/ab548d.

12. Mehdi, R.-N., Seied Mahdi1, P., Ali Akbar, D.-D., Seiedeh Somayyeh, H., Mir Mahdi, Z. Synthesis

and characterization of copper oxalate and copper oxide nanoparticles by statistically optimized controlled precipitation and calcination of precursor. CrystEngComm 15-20, *The Royal Society of Chemistry Express*, 2013, no. 15, pp. 4077-4086.

13. Salapare, H. S., Balbarona, J. A., Clerc, L., Bassoleil, P., Zenerino, A., Amigoni, S., Guittard, F. Cupric Oxide Nanostructures from Plasma Surface Modification of Copper. *Biomimetics (Basel),* 2019, vol. 4, no. 42, pp. 432-441.

14. Khan, M. A., Muhammad, M. H., Khan, M. S., Iqbal, T., Pervaiz, A., Shafigue, M., Naeem, M. Microplasma-assisted synthesis of CuO nanostructures for catalytic degradation of organic dyes under solar irradiation. *J Solid State Electrochem,* 2020, no. 24, pp. 1123-1132. DOI: 10.1007/s10008-020-04602-5.

15. Sreeju, N., Rufus, A., Philip, D. Studies on catalytic degradation of organic pollutants and antibacterial property using biosynthesized CuO nanostructures. *Journal of Molecular Liquids*, 2017, no. 242, pp. 690-700.

16. Lin, W., Wei, Y., Du, H., Hou, Li., Wang, G., Bi, H., Xu, B. Structural characteristics of nanocrystalline copper after carbon ion implantation. *Micron*, 2017, vol. 42, no. 7, pp. 691-694.

17. Sysoyev, Yu. O., Shyrokyj, Yu. V., Torosyan E. V. *Pidvyshhennya efektyvnosti zapalyuvannya vakuumno-dugovogo rozryadu v dzherelax plazmy* [Increasing the ignition efficiency of vacuum-arc discharge in plasma sources]. *Aviacijno-kosmicna tehnika i tehnologia – Aerospace technic and technology,* 2022, no 2. pp. 47-54. DOI: 10.32620/aktt.2022.2.06.

18. Gudmundsson, J. T., Brenning, N., Lundin, D., Helmersson, U. High power impulse magnetron sputtering discharge. *Journal of Vacuum Science & Technology A: Vacuum, Surfaces, and Films,* 2012, vol. 30, no. 3, pp. 1–34.

19. Baranov, O., Romanov, M. Current Distribution on the Substrate in a Vacuum Arc Deposition Setup. *Plasma Processes and Polymers*, 2008, vol. 5, no. 3, pp. 256–263.

20. Kostyuk, G., Melkoziorova, O., Kostyuk, E., Shirokiy, Iur. Prospects for producing nanostructures in the volume of parts under the action of plasma flows. *Rizannia ta instrumenty v tekhnolohichnykh syste-makh, KhNTU «KhPI»,* 2020, no. 92, pp. 107–121.

21. Popov, V. et al. Study of Ions Energy, Their Varieties and Charge on Temperature, Rate of Temperature Rise, Thermal Stresses for Nanostructures on Construction Materials. *Advanced Manufacturing Processes. InterPartner 2019. Lecture Notes in Mechanical Engineering. Springer, Cham,* 2019, pp. 107-121.

22. Kostyuk, G., Popov, V., Kostyk, K. Volume of the Nanocluster and Its Depth at Effect of Ions of Different Energies, Varieties and Charges on Titanium Alloy VT-1. *Advanced Manufacturing Processes. InterPartner 2019. Lecture Notes in Mechanical Engineering. Springer, Cham.*, 2019, pp. 415-423.

23. Shyrokyi, Yu. V. Modeliuvannia elektroeroziinykh protsesiv na hrafitovykh elektrodakh pry formuvanni nanostruktur u plazmovomu seredovyshchi [Modeling of electroerosion processes on graphite electrodes in the formation of nanostructures in a plasma medium]. *Vidkryti informatsiini ta kompiuterni intehrovani tekhnolohii – Open Information and Computer Integrated Technologies*, 2021, no. 94, pp. 58-76. DOI: 10.32620/oikit.2021.94.06.

24. Shyrokyi, Yu. V., Sysoiev, Yu. O., Postelnyk, T. V. Modeliuvannia umov otrymannia nanostruktur v aliuminiievykh splavakh pry dii ionizuiuchoho vyprominiuvannia [Modeling of conditions for obtaining nanostructures in aluminum alloys under the action of ionizing radiation]. *Aviacijno-kosmicna tehnika i tehnologia – Aerospace technic and technology*, 2022, no. 2, pp. 55-63. DOI: 10.32620/aktt.2022.2.07.

25. Kostiuk, H. Y., Shyrokyi, Yu. V. Perspektyvы prymenenyia lazernoi obrabotky dlia sozdanyia nanostruktur na RY yz «VolKar» [Prospects for the use of laser processing to create nanostructures on RI from "VolKar"]. *Visnyk NTU «KhPI». Seriia: Tekhnolohii v mashynobuduvanni,* 2017, no. 26(1248), pp. 60-65.

26. Kostiuk, H. Y., Pavlenko, V.N., Shyrokyi, Yu.V. Perspektyvы poluchenyia nanostruktur pry deistvyy ympulsnoho lazernoho yzluchenyia na staly [Prospects for obtaining nanostructures under the action of pulsed laser radiation on steel]. *Visnyk NTU «KhPI». Seriia: Tekhnolohii v mashynobuduvanni,* 2015, no. 40(1149), pp. 47-52.

27. Shyrokyi, Y., Kostyuk, G. Erosion Processes on Copper Electrodes Applied to Growth of Nanostructures in Plasma. *DSMIE 2022. Lecture Notes in Mechanical Engineering. Springer Cham*, 2022, pp. 494-503. DOI: 10.1007/978-3-031-06025-0_49.

28. Baranov, O. Romanov, M., Wolter, M., Kumar, S., Zhong, X., Ostrikov, K. Low-pressure planar magnetron discharge for surface deposition and nanofabrication. *Physics of Plasmas*, 2010, vol. 17, no. 5, pp. 117–128. DOI: 10.1063/1.3431098.

29. Shyrokyi, Y., Kostyuk, G. Investigation of the Influence of Crystallization Energy on the Size of Nanostructures During Copper Ion-Plasma. *Integrated Computer Technologies in Mechanical Engineering - 2021. ICTM 2021. Lecture Notes in Networks and Systems, Springer Cham*, 2022. vol. 367, pp. 57-66. https://doi.org/10.1007/978-3-030-94259-5_6.

30. Shyrokyj, Y. V., Kostyuk, G. I. Modelyuvannya duhovoho rozryadu na midnomu katodi dlya heneratsiyi nanostruktur [Simulation of an arc discharge on copper cathode for the generation of nanostructures]. *Vidkryti informatsiini ta kompiuterni intehrovani tekhnolohii – Open Information and Computer Integrated Technologies*, 2021, no. 91, pp. 62-76. DOI: 10.32620/oikit.2021.91.05.

Надійшла до редакції 12.08.2022, розглянута на редколегії 28.09.2022

ISSN 1727-7337 (print)
ISSN 2663-2217 (online)

THEORETICAL RESEARCH OF THE TEMPERATURE FIELDS OF COPPER DURING THE FORMATION OF NANOSTRUCTURED LAYERS IN PLASMA ENVIRONMENT

Yurii Shyrokyi, Andrey Sysoiev, Yuliia Panchenko

The subject of study is the mathematical model for thermal processes during the formation of nanostructures in a plasma medium. In previous studies, it was shown that for the appearance of nanostructures, it is necessary that there be a certain temperature, its rate of increase, and thermal stresses. The required depth of the near-surface layer of the processed material, which is most favorable for the formation of nanostructures, is determined where the highest temperature stress gradients occur. The current work determines the technological parameters for obtaining nanostructures during ion-plasma treatment of the copper surface, as an example. The task of this work, by changing the energy of the ions, is to choose the location of the fields along the depth of the material to generate the necessary high temperature gradients in the given planes of the material. Thus, significant thermal stresses, and hence nanostructures, can be created in a large volume of material. The method used is analytical. In our work, a mathematical model was developed to describe the generation of temperature fields during ion-plasma surface treatment and tested on the process of copper treatment with oxygen ions. In this model, the joint actions of plasma flows and flows of charged particles with materials are realized through thermophysical, thermomechanical, thermal fatigue, diffusion, thermochemical, plasma-chemical processes and collisions. Therefore, the developed model will contribute to a more accurate determination of technological parameters for the formation of conditions conducive to the stable growth of nanostructures in the surface layers of processed materials. Because of numerous calculations, the dependence of the temperature of the surface layer of copper on the energy of oxygen ions was determined. The temperature fields in the zone of action of ions for three levels of the plane of the surface layer are calculated depending on the depth of penetration of ions for different times of interaction and at different current densities from $2.7\cdot10^6$ to $2.1\cdot10^8$ A/m^2. Studies have shown that the maximum surface temperature is reached at the end of the thermal action of the ion. Conclusions. The obtained values of thermal stresses showed the possibility of formation of nanostructures in the surface layer of copper under the action of oxygen ions at a depth of $x=0.5\lambda_m$ at a current density of $2.7\cdot10^6$ A/m^2. For the $x=0.5\lambda_m$ plane at a current density of $3\cdot10^7$ A/m^2, where the largest temperature gradients were found, the maximum temperature stresses were calculated, amounting to $5\cdot10^8$ N/m, which confirms the creation of conditions for obtaining nanostructures. But at $2.1\cdot10^8$ A/m^2, the total temperature rises, and the temperature gradients decrease, which decreases temperature stresses and failure to meet the conditions for obtaining nanostructures. The results obtained can be used to develop a technology for the production of nanostructures in a plasma environment, for example, on copper by ion-plasma treatment in an oxygen environment.in a plasma environment, for example, on copper by ion-plasma treatment in an oxygen environment.

Keywords: ionizing radiation; nanostructures; heat flux; temperature fields; temperature rise rate.

Широкий Юрій Вячеславович – канд. техн. наук, доц. каф. теоретичної механіки, машинознавства та роботомеханічних систем, Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського «Харківський авіаційний інститут», Харків, Україна.

Сисоєв Андрій Юрійович – канд. техн. наук, старш. викл. каф. теоретичної механіки, машинознавства та роботомеханічних систем, Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського «Харківський авіаційний інститут», Харків, Україна.

Панченко Юлія Сергіївна – асп. каф. теоретичної механіки, машинознавства та роботомеханічних систем, Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського «Харківський авіаційний інститут», Харків, Україна.

Yurii Shyrokyi – Doctor of Philosophy, Assistant-Professor of Theoretical Mechanics, Engineering and Robomechanical Systems Department, National Aerospace University “Kharkiv Aviation Institute”, Kharkiv, Ukraine,
e-mail: i.shyrokyi@khai.edu, ORCID: 0000-0002-4713-0334, Scopus Author ID: 57222322443.

Andrey Sysoiev – Doctor of Philosophy, Senior Lecturer of Theoretical Mechanics, Engineering and Robomechanical Systems Department, National Aerospace University “Kharkiv Aviation Institute”, Kharkiv, Ukraine,
e-mail: i.sysoiev@khai.edu.

Yuliia Panchenko – PhD student of Theoretical Mechanics, Engineering and Robotic Systems Department, National Aerospace University “Kharkiv Aviation Institute”, Kharkiv, Ukraine,
e-mail: y.panchenko@khai.edu, ORCID: 0000-0002-8210-5564.