

Ю. В. ШИРОКИЙ, Ю. О. СИСОЄВ, Т. О. ПОСТЕЛЬНИК

*Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського
«Харківський авіаційний інститут», Україна***МОДЕЛЮВАННЯ УМОВ ОТРИМАННЯ НАНОСТРУКТУР
В АЛЮМІНІЄВИХ СПЛАВАХ ПРИ ДІЇ ІОНІЗУЮЧОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ**

Використання іонізуючого випромінювання для отримання наноструктурних та субмікроструктурних шарів в алюмінієвих сплавах потребує визначення необхідних технологічних параметрів. Тому було проведено теоретичне дослідження іонізуючого випромінювання на алюмінієвий сплав АК8 за раніше запропонованою моделлю. Для вибору області у матеріалі алюмінієвого сплаву, де зможуть утворюватися наноструктури при дії іонізуючого випромінювання, задавали різні довжини перебігу іонів. В результаті теоретичного дослідження формування наноструктур у поверхневому шарі алюмінієвого сплаву АК8 було отримано розподіл температур в зоні іонізуючого випромінювання на різних глибинах матеріалу. Також були побудовані поля температур для різних щільностей теплового потоку $q_1 = 10^6 \text{ Вт/м}^2$ та $q_2 = 10^5 \text{ Вт/м}^2$. Отримані температурні поля для теплового потоку q_1 показали, що зі збільшенням глибини матеріалу, температура знижується з 2480 до 650 К. При цьому значення максимальних температур на поверхні матеріалу вище, ніж необхідно для отримання наноструктур. На нижчих глибинах максимальні температури знижуються до значень, при яких можуть реалізовуватися наноструктури. В той же час при дії теплового потоку q_2 максимальна температура на поверхні знизилася до значень 1950 К, а на глибині вона становила 550 К. Оцінка швидкості наростання температури показує, що вона перевищує 10^7 К/с при q_1 та дорівнює 10^6 К/с при q_2 . Все це підтвердило можливість створення умов для формування наноструктур. Завдяки температурному діапазону, отриманого за розрахованими температурними полями, було визначено глибини алюмінієвого сплаву де можуть формуватися наноструктури. Також проводились дослідження впливу розмірів плями лазерного випромінювання на поверхні матеріалу для формування наноструктур, яке показало, що при дії плями розміром до 10^{-3} м , можливість реалізації наноструктур суттєво знижується, тоді як зниження розміру плями до 10^{-4} м призводить до суттєвого підвищення можливості формування наноструктур. Для оцінки можливого обсягу наноструктур було розглянуто залежність розміру нанокластера від щільності теплового потоку в діапазоні від 10^7 до 10^{10} Вт/м^2 та часу його дії в діапазоні від 10^{-9} с до 10^{-3} с. Також побудовано залежності максимальної температури від щільності теплового потоку та часу його дії. Все це дозволяє робити вибір технологічних параметрів лазерного випромінювання для отримання наноструктурованих шарів на алюмінієвих сплавах, а можливість визначення розмірів наноструктур дозволяє прогнозувати фізико-механічні характеристики поверхневих шарів оброблювальних матеріалів. Ці дослідження можуть бути цікаві фахівцям, що займаються зміцненням поверхонь алюмінієвих сплавів та подальшими дослідженнями наноструктур.

Ключові слова: іонізуюче випромінювання; наноструктури; тепловий потік; температурні поля; швидкість наростання температури.

Вступ

У виробництві сучасної авіаційної техніки та машинобудуванні дуже широко використовуються алюмінієві сплави [1, 2], що дає можливість суттєво полегшити вагу деталей [3]. В той же час невисокі фізико-механічні характеристики алюмінієвих сплавів часто не дозволяють їх використовувати значно ширше [2, 4]. Для покращення фізичних властивостей деталей з алюмінієвих сплавів використовують різні методи [5, 6], наприклад, додавання домішок у відомі сплави [4, 7] для отримання матеріалів із заданими характеристиками або модифікування пове-

рхневих шарів найбільш поширених сплавів [5, 8]. Якщо робота по створенню нових алюмінієвих сплавів потребує багато часу та коштів, то роботи по зміцненню поверхонь цих сплавів, виглядають менш затратними та більш перспективними. На теперішній час відомо багато методів для модифікування поверхневих шарів на алюмінієвих сплавах таких як ультразвуковий [9], іонно-плазмовий [10] метод мікродугового оксидування [11] або радіочастотного напилення [12]. Але найбільший інтерес у сучасних наукових дослідженнях викликає використання наноструктур при формуванні різноманітних покриттів на алюмінієвих сплавах [13]. Наноструктуровані покриття дозволяють не тільки суттєво підви-

щити фізико-механічні характеристики алюмінієвих сплавів такі як зносостійкість [4, 10], втомну міцність [4, 14], забезпечення працездатності при ударних навантаженнях [10], але й надати нові цікаві властивості такі як підвищена корозійна стійкість [4, 12], супергідрофобні [8, 11] та антиобмерзальні властивості [15], радіаційно-поглинаючі [6] та ін. Виходячи з вищезначеного, можна сміливо стверджувати те, що алюмінієві сплави при їх малій питомій вазі та високих фізико-механічних та інших властивостях, які набувають завдяки покриттям з наноструктурами, і надалі будуть широко застосовуватись як в авіаційно-космічній техніці [1], так і в машинобудуванні, зокрема в автомобільній [2, 17] та суднобудівній [18, 19] промисловості.

Постановка задачі

Питанням по отриманню наноструктур на поверхнях конструкційних матеріалів сучасними методами приділяється дуже багато уваги [20, 21]. При цьому дуже багато робіт ведеться по сталевим сплавам [22] і значно менше по алюмінієвим [8, 11]. Так у [8] розглянуто формування нанопокриттів на алюмінієвих та титанових поверхнях методом мікродугового оксидування у водних розчинах. Отримані покриття за цим методом показали високу однорідність і пористість та мали високий коефіцієнт поглинання електромагнітного випромінювання у терагерцовому діапазоні (до 70 %), що дуже цікаво для подальшого розвинення стелс-технологій. Також розглядалися параметри при анодному синтезі нанопористих плівок на основі анодного оксиду алюмінію (АОА) [23], які вказали на важливість попередньої обробки підкладки та напруження при обробці. Проводились дослідження довготривалості наноструктурованих покриттів на основі наночасток політетрафторетилену на пористих алюмінієвих сплавах [9]. Як бачимо з вище наведеного, отримання наноструктур на алюмінієвих сплавах значно більше досліджують експериментально [8, 9, 23] та менше теоретично [24]. Також мало уваги приділяють використанню іонізуючого випромінювання для отримання наноструктур в алюмінієвих сплавах, хоча для сталевих проводились досить ретельні дослідження [25, 26]. У [27] було показано, що в якості джерела іонізуючого випромінювання, доцільно взяти лазерне випромінювання та провести дослідження полів температур та температурних напружень у зоні діючого випромінювання за представленою раніше моделлю [10]. А також провести дослідження впливу розміру лазерної плями на поверхні матеріалу на формування наноструктур. Це дасть змогу підібрати технологічні параметри для реалізації наноструктурних та субмікроструктурних шарів

на алюмінієвих сплавах та підвищити їх фізико-механічні характеристики.

Дослідницька частина

Використання іонізуючого випромінювання для отримання наноструктурних та субмікроструктурних шарів на алюмінієвих сплавах потребує визначення необхідних технологічних параметрів. Тому проведемо теоретичного дослідження іонізуючого випромінювання на алюмінієвий сплав АК8 за моделлю запропонованою у [10]. Модель дозволяє вирішити завдання не тільки теплопровідності, а й термоджоружності у зоні дії іонізуючого випромінювання. Вирішення цих двох питань дозволить сформувати температурні поля та температурні напруження в зоні дії лазерної плями. Після цього можна буде виявити зони за глибиною матеріалу, де можливе буде створення умов для реалізації наноструктур та субмікроструктур. Умови для реалізації наноструктур будемо визначати за наступними критеріями [28]: температури повинні бути від 500 К до 1500К, а їх наростання повинно бути більше 10^6 К/с. При цьому температурні напруги, які будуть прискорювати процес утворення наноструктур, будуть у діапазоні від 10^6 Па до 10^8 Па.

Результати та обговорення

При виборі області у матеріалі алюмінієвого сплаву, де можуть утворюватися наноструктури при дії іонізуючого випромінювання, виходили з довжини перебігу іонів $L_i = \sqrt{at}$ [27]. За моделлю [10] було проведено розрахунки діючих температур та отримані поля температур у лазерній плямі на різних глибинах: $X_1 = 0$, $X_2 = L_i$, $X_3 = 2 L_i$ та для різних щільностей теплового потоку $q_1 = 10^6$ Вт/м² (рис. 1) та $q_2 = 10^5$ Вт/м² (рис. 2).

З отриманих температурних полів для теплового потоку $q_1 = 10^6$ Вт/м² (рис. 1) видно, що зі збільшенням глибини матеріалу, температура знижуються з 2480 до 650 К. При цьому значення максимальних температур на поверхні (рис. 1, а) дещо вище, ніж необхідно для отримання наноструктур [27]. В той же час на глибинах X_2 (рис. 1, а) та X_3 (рис. 1, а) максимальні температури знижуються до значень, при яких можуть реалізовуватися наноструктури.

При дії теплового потоку $q_2 = 10^5$ Вт/м² максимальна температура на поверхні (рис. 2, а) знизилася до значень 1950 К, а на глибинах X_2 та X_3 вона становила 550 К. Оцінка швидкості наростання температури показує, що вона перевищує 10^6 К/с при q_1 (рис. 1, а) та дорівнює 10^6 К/с при q_2 (рис. 2). Все це свідчить про можливість реалізації наноструктур на

глибинах X_2 та X_3 при дії теплового потоку q_1 та значно меншу можливість при q_2 .

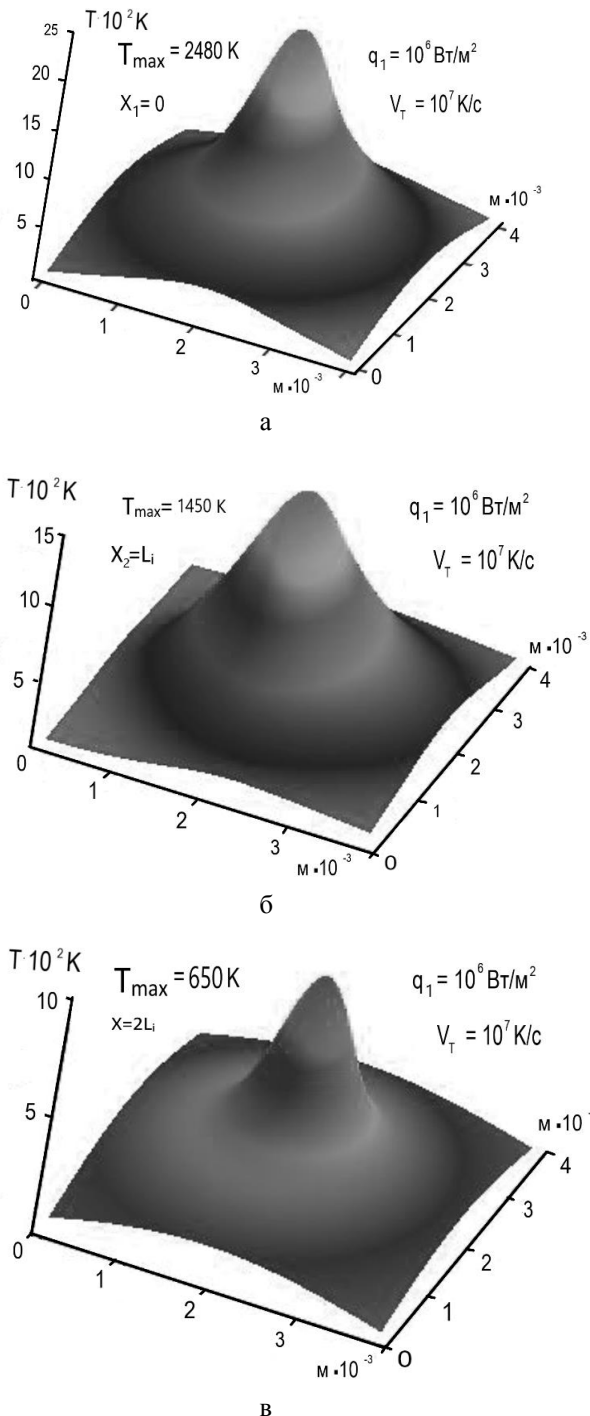


Рис. 1. Температурні поля при дії лазерного випромінювання $q_1 = 10^6$ Вт/м² на сплав АК8 на різних глибинах матеріалу:
а) $X_1 = 0$, б) $X_2 = L_i$, в) $X_3 = 2 L_i$

При дії теплового потоку $q_2 = 10^5$ Вт/м² максимальна температура на поверхні (рис. 2, а) знизилася до значень 1950 К, а на глибинах X_2 та X_3 вона становила 550 К. Оцінка швидкості наростання температури показує, що вона перевищує 10^6 К/с при q_1

(рис. 1, а) та дорівнює 10^6 К/с при q_2 (рис. 2). Все це свідчить про можливість реалізації наноструктур на глибинах X_2 та X_3 при дії теплового потоку q_1 та значно меншу можливість при q_2 .

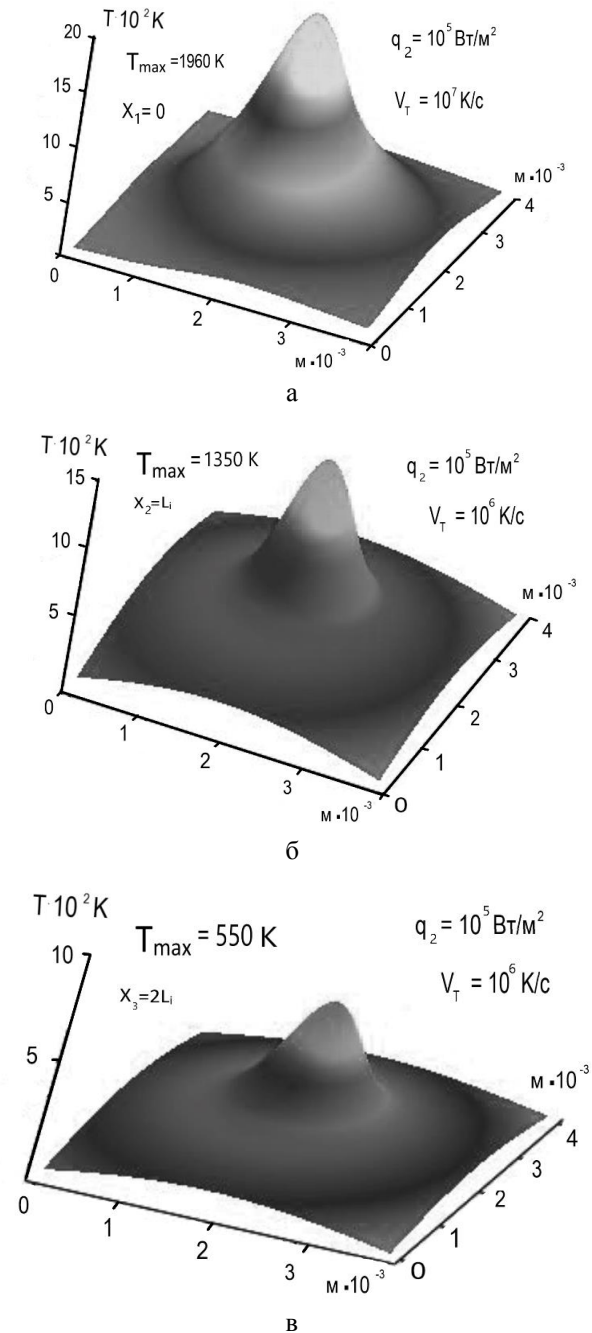


Рис. 2. Температурні поля при дії лазерного випромінювання $q_2 = 10^5$ Вт/м² на сплав АК8 на різних глибинах матеріалу:
а) $X_1 = 0$, б) $X_2 = L_i$, в) $X_3 = 2 L_i$

Завдяки температурному діапазону, отриманому за розрахованими температурними полями, було визначено глибини алюмінієвого сплаву де можуть реалізовуватись наноструктури. А для оцінки їх можливого розміру було побудовано залежність обсягу

нанокластеру від щільності теплового потоку в діапазоні від 10^7 до 10^{10} Вт/м² та часу його дії в діапазоні від 10^{-9} с до 10^{-3} с (рис. 3). З побудованих поверхонь, на яких реалізуються наноструктури, (рис. 3) бачимо, що при щільності теплового потоку порядку більше 10^{10} Вт/м² наноструктури не реалізуються. При розгляді часу дії теплового потоку видно, що у діапазоні до 10^{-4} с та більше 10^{-8} с з усіма щільностями теплового потоку, реалізація наноструктур також мало ймовірна. Дослідження розмірів плями лазерного випромінювання на поверхні матеріалу показали, що при дії плями розміром до 10^{-3} м можливість реалізації наноструктур суттєво знижується, тоді як зниження розміру плями до 10^{-4} м призводить до суттєвого підвищення можливості реалізації наноструктури.

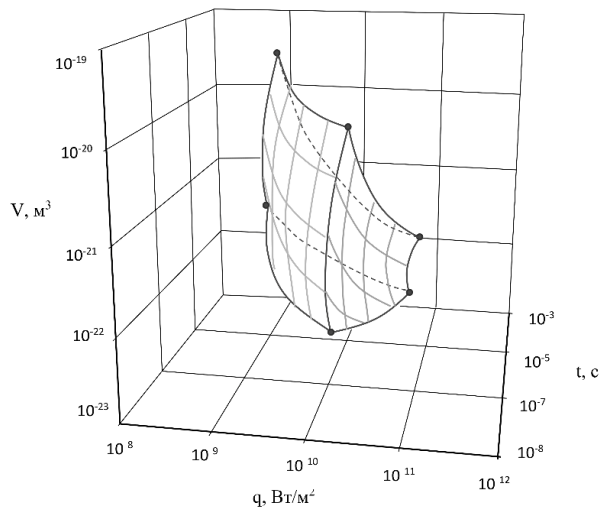


Рис. 3. Залежність об'єму нанокластера від щільності теплового потоку q та часу його дії t

Для швидкої оцінки можливості отримання наноструктур було побудовано залежності максимальної температури в зоні опромінення від щільності теплового потоку і часу його дії (рис. 4). Побудовані площини показують максимальні температури, які можуть бути реалізовані в заданих умовах. Тоді, наприклад, провівши посічені площини за $T_{\max} = 500$ К та $T_{\max} = 1500$ К, можна також оцінити технологічні параметри, при яких слід очікувати появи наноструктур. Область, обмежена цими січними та отриманими поверхнями, дає технологічні параметри де утворюються наноструктури.

Проведені вище теоретичні дослідження дозволяють оцінити обсяг нанокластерів, що будуть реалізовуватись при дії заданого іонізуючого випромінювання. В свою чергу за знайденими розмірами нанокластерів можна спрогнозувати фізико-

механічні характеристики поверхневого шару алюмінієвого сплаву [28].

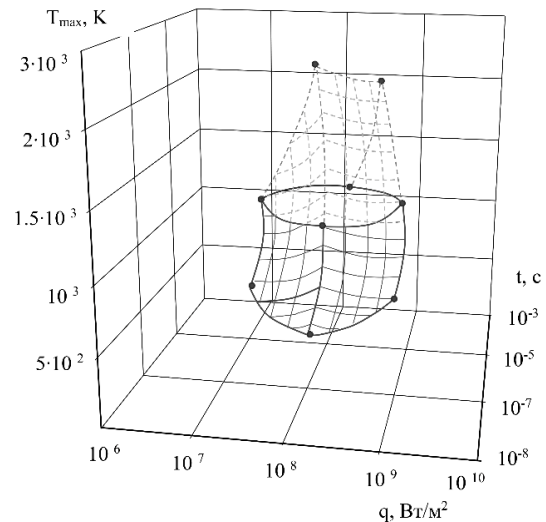


Рис. 4. Залежність максимальної температури у зоні дії теплового потоку від його щільності q та часу його дії t

Висновки

В результаті теоретичного дослідження формування наноструктур у поверхневому шарі алюмінієвого сплаву АК8 за моделлю [10] було отримано розподіл температур в зоні іонізуючого випромінювання на різних глибинах матеріалу. Також були побудовані поля температур для різних щільностей теплового потоку $q_1 = 10^6$ Вт/м² та $q_2 = 10^5$ Вт/м². Завдяки температурному діапазону, отриманого за розрахованими температурними полями, було визначено ті глибини алюмінієвого сплаву, де зможуть формуватися наноструктури. Для оцінки їх можливого обсягу було побудовано залежність розміру нанокластеру від щільності теплового потоку в діапазоні від 10^7 до 10^{10} Вт/м² та часу його дії в діапазоні від 10^{-9} с до 10^{-3} с. Також побудовано залежності максимальної температури від щільності теплового потоку та часу його дії. Все це дозволяє робити вибір технологічних параметрів лазерного випромінювання для отримання наноструктурованих шарів на алюмінієвих сплавах, а можливість визначення розмірів наноструктур дозволяє прогнозувати фізико-механічні характеристики поверхневих шарів оброблювальних матеріалів.

Подяки. Ю. В. Широкий висловлює подяку Національному фонду досліджень України за підтримку (конкурс «Підтримка досліджень провідних та молодих учених», номер проекту 2020.02/0119).

Література

1. Starke, E. A. *Application of modern aluminum alloys to aircraft* [Text] / E. A. Starke, J. T. Staley // *Progress in Aerospace Sciences*. – 1996. – Vol. 32, No. 2-3. – P. 131-172. DOI: 10.1016/0376-0421(95)00004-6.
2. Stojanovic, B. *Application of aluminum and aluminum alloys in engineering*. [Text] / B. Stojanovic, M. Bukvic, I. Epler // *Applied Engineering Letters*. – 2018. – Vol. 36, No. 2. – P. 52-63. DOI: 10.18485/aeletters.2018.3.2.2
3. *Recent development in aluminium alloys for the automotive industry* [Text] / W. S. Miller, L. Zhuang, J. Bottema, A. J. Wittebrood, P. De Smet, A. Haszler, A. Vieregge // *Materials Science and Engineering*. – 2000. – Vol. 280, No. 1. – P. 37-49, DOI: 10.1016/S0921-5093(99)00653-X.
4. Trudonoshyn, O. *Use of the ABI technique to measure the mechanical properties of aluminium alloys: Effect of heat-treatment conditions on the mechanical properties of alloys* [Text] / Oleksandr Trudonoshyn, Maxim Puchnin, Olena Prach // *Materiali in tehnologije*. – 2016. – Vol. 50, No. 3. – P. 427-431. DOI: 10.17222/mit.2014.295.
5. Becker, M. *Chromate-free chemical conversion coatings for aluminum alloys* [Text] / Markus Becker // *Corrosion Reviews*. – 2019. – Vol. 37, No. 4. – P. 321-342. DOI: 10.1515/corrrev-2019-0032.
6. *Strengthening mechanisms in a high-strength bulk nanostructured Cu–Zn–Al alloy processed via cryomilling and spark plasma sintering* [Text] / H. Wen, T. D. Topping, D. Isheim, D. N. Seidman, E. J. Lavernia // *Acta Materialia*. – 2013. – Vol. 61, No. 8. – P. 2769-2782. DOI: 10.1016/j.actamat.2012.09.036.
7. Tellkamp, V. L. *Mechanical behavior and microstructure of a thermally stable bulk nanostructured Al alloy* [Text] / V. L. Tellkamp, E. J. Lavernia, A. Melmed // *Metal Mater Tran*. – 2001. – No. 32. – P. 2335–2343. DOI: 10.1007/s11661-001-0207-6.
8. Mehdizade, M. *Investigation of anodizing time and pulse voltage modes on the corrosion behavior of nanostructured anodic layer in commercial pure aluminum* [Text] / Maryam Mehdizade, Mansour Soltanieh, Ali Reza Eivani // *Surface and Coatings Technology*. – 2019. – Vol. 358. – P. 741-752. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2018.08.046.
9. Ghalmi, Z. *Durability of nanostructured coatings based on PTFE nanoparticles deposited on porous aluminum alloy* [Text] / Zahira Ghalmi, Masoud Farzaneh // *Applied Surface Scienc*. – 2014. – Vol. 314, – P. 564-569. DOI: 10.1016/j.apsusc.2014.05.194.
10. *Prospects for producing nanostructures in the volume of parts under the action of plasma flows* [Text] / G. Kostyuk, O. Melkozirova, E. Kostyuk, I. Shirokiy // *Різання та інструменти в технологічних системах*. – X. : НТУ «ХПІ». – 2020. – No. 92. – P. 107-121. DOI: 10.20998/2078-7405.2020.92.12.
11. *Microarc synthesis of nanostructured radiation-absorbing coatings on aluminum and titanium surface* [Text] / T. A. Baranova, A. K. Chubenko et al. // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. – 2017. – Vol. 286. – P. 1757-8981. DOI: 10.1088/1757-899X/286/1/012037.
12. Jafari, R. *Fabrication of superhydrophobic nanostructured surface on aluminum alloy* [Text] / R. Jafari, M. Farzaneh // *Appl. Phys*. – 2011. – Vol. 102. – P. 195–199. DOI: 10.1007/s00339-010-6131-0.
13. Kostyuk, G. I. *Experimental study of the flat details temperature fields at the laser beam motion and nanostructures formation* [Text] / G. I. Kostyuk, Yu. V. Shirokiy // *Proceedings of XIII international conference on modern achievements of science and education September 6-13 2018*. – Netanya (Israel), 2018. – P. 78-80.
14. *The microstructure and properties of nanostructured Cr-Al alloying layer fabricated by high-current pulsed electron beam* [Text] / C. Zhang, P. Lv, H. Xia, Z. Yang, S. Konovalov, X. Chen, Q. Guan // *Vacuum*. – 2019. – Vol. 167. – P. 263-270. DOI: 10.1016/j.vacuum.2019.06.022.
15. Barthwal, S. *Rapid fabrication of a dual-scale micro-nanostructured superhydrophobic aluminum surface with delayed condensation and ice formation properties* [Text] / Sumit Barthwal, Si-Hyung Lim // *Soft Matter, The Royal Society of Chemistry*. – 2019. – Iss. 39. – P. 7945-7955. DOI: 10.1039/C9SM01256G.
16. *Microarc synthesis of nanostructured radiation-absorbing coatings on aluminum and titanium surfaces* [Text] / T. A. Baranova, A. K. Chubenko, A. E. Ryabikov, A. I. Mamaev, V. A. Mamaeva, E. Yu. Beletskaya. // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. – 2017. – Vol. 286. – P. 1757-8981. DOI: 10.1088/1757-899X/286/1/012037.
17. *Study of strength properties of semi-finished products from economically alloyed high-strength aluminium-scandium alloys for application in automobile transport and shipbuilding* [Text] / V. Baranov, S. Sidelnikov, E. Zenkin, V. Frolov, D. Voroshilov, O. Yakivnyuk, I. Konstantinov, R. Sokolov and I. Belokonova // *Open Engineering*. – 2018. – Vol. 8, No. 1. – P. 69-76. DOI: 10.1515/eng-2018-0005.
18. Wahid, M. A. *Aluminum alloys in marine construction: characteristics, application, and problems from a fabrication viewpoint* [Text] / M. A. Wahid, A. N. Siddiquee & Z. A. Khan // *Mar Syst Ocean Technol*. – 2020. – Vol. 15. – P. 70–80. DOI: 10.1007/s40868-019-00069-w.
19. *Cavitation erosion behavior of superhydrophobic coatings on Al5083 marine aluminum alloy* [Text] / J. Fahim, S. M. M. Hadavi, H. Ghayour,

S. A. Hassanzadeh Tabrizi // *Wear*. – 2019. – Vol. 424-425. – P. 122-132. DOI: 10.1016/j.wear.2019.02.017.

20. *Plasma under control: Advanced solutions and perspectives for plasma flux management in material treatment and nanosynthesis [Text]* / O. Baranov, K. Bazaka, H. Kersten, M. Keidar, U. Cvelbar, S. Xu, I. Levchenko // *Applied Physics Reviews*. – 2017. – Vol. 4, No. 4. – P. 041302-1-041302-33. DOI: 10.1063/1.5007869.

21. Shyrokyi, Y. *Investigation of the Influence of Crystallization Energy on the Size of Nanostructures During Copper Ion-Plasma Treatment [Text]* / Y. Shyrokyi, G. Kostyuk // In: Nechyporuk M., Pavlikov V., Kritskiy D. (eds) *Integrated Computer Technologies in Mechanical Engineering - 2021. ICTM 2021. Lecture Notes in Networks and Systems*. – 2021. – Vol. 367. Springer, Cham. DOI: 10.1007/978-3-030-94259-5_6.

22. *Ensuring the High Strength Characteristics of the Surface Layers of Steel Products [Text]* / K. Kostyk, V. Kostyk, O. Akimov, K. Kamchatna-Stepanova, Y. Shyrokyi // *Advanced Manufacturing Processes III. InterPartner 2021. Lecture Notes in Mechanical Engineering*. Springer, Cham. – 2022. – Vol. 9. – P. 292-301. DOI: 10.1007/978-3-030-91327-4_29.

23. *Evaluation of the influence of synthesis conditions on the morphology of nanostructured anodic aluminum oxide coatings on Al 1050 [Text]* / F. A. Bruera, G. R. Kramer, M. L. Vera, A. E. Ares // *Surfaces and Interfaces*. – 2020. – Vol. 18. – Article No. 100448. DOI: 10.1016/j.surf.2020.100448.

24. *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 Processes. InterPartner 2019. Lecture Notes in Mechanical Engineering*. Springer, Cham. – 2020. – P. 470-477. DOI: 10.1007/978-3-030-40724-7_48.

25. Андрієвський, П. А. *Наноматеріали: концепція і сучасні проблеми [Текст]* / П. А. Андрієвський // *Фізика металів і металознавство*. – 2003. – Т. 91, № 1. – С. 50–56.

26. *Design of New Nanocoatings Based on Hard Alloy [Text]* / V. Popov, G. Kostyuk, O. Tymofeyev, K. Kostyk, O. Naboka // *Advances in Design, Simulation and Manufacturing III. DSMIE 2020. Lecture Notes in Mechanical Engineering*. Springer, Cham. – 2020. – P. 522-531. DOI: 10.1007/978-3-030-50794-7_51.

27. Kostyuk, G. *Determination of Technological Parameters for Obtaining Nanostructures under Pulse Laser Radiation on Steel of Drone Engine Parts, [Text]* / G. Kostyuk, M. Nechyporuk and K. Kostyk // *10th International Conference on Dependable Systems, Services*

and Technologies (DESSERT). – 2019. – P. 208-212. DOI: 10.1109/DESSERT.2019.8770053.

28. Гусев, А. И. *Наноматериалы, наноструктуры, нанотехнологии [Текст]* / А. И. Гусев. – М. : Физматлит, 2005. – 416 с.

References

1. Starke, E. A., Staley, J. T. Application of modern aluminum alloys to aircraft. *Progress in Aerospace Sciences*, 1996, vol. 32, no. 2-3, pp. 131-172. DOI: 10.1016/0376-0421(95)00004-6.

2. Stojanovic, B., Bukvic, M., Epler, I. Application of aluminum and aluminum alloys in engineering. *Applied Engineering Letter*, 2018, vol. 36, no. 2, pp. 52-63. DOI: 10.18485/aeletters.2018.3.2.2.

3. Miller, W. S., Zhuang, L., Bottema, J., Wittebrood, A. J., De Smet, P., Haszler, A., Vieregge, A. Recent development in aluminium alloys for the automotive industry. *Materials Science and Engineering*, 2000, vol. 280, no. 1, pp. 37-49, DOI: 10.1016/S0921-5093(99)00653-X.

4. Trudonoshyn, O., Puchnin, M., Prach, O. Use of the ABI technique to measure the mechanical properties of aluminium alloys: Effect of heat-treatment conditions on the mechanical properties of alloys. *Materiali in tehnologije – Materials and technology*, 2016, vol. 50, pp. 427-431. DOI: 10.17222/mit.2014.295.

5. Becker, M. Chromate-free chemical conversion coatings for aluminum alloys. *Corrosion Reviews*, 2019, vol. 37, no. 4, pp. 321-342. DOI: 10.1515/corrrev-2019-0032.

6. Wen, H., Topping, T. D., Isheim, D., Seidman, D. N., Lavernia, E. J. Strengthening mechanisms in a high-strength bulk nanostructured Cu–Zn–Al alloy processed via cryomilling and spark plasma sintering. *Acta Materialia*, 2013, vol. 61, no. 8, pp. 2769-2782. DOI: 10.1016/j.actamat.2012.09.036.

7. Tellkamp, V. L., Lavernia, E. J., Melmed, A., Mechanical behavior and microstructure of a thermally stable bulk nanostructured Al alloy. *Metall Mater Tran*, 2001, no 32, pp. 2335–2343. DOI: 10.1007/s11661-001-0207-6.

8. Mehdizade, M., Soltanieh, M., Eivani, A. R. Investigation of anodizing time and pulse voltage modes on the corrosion behavior of nanostructured anodic layer in commercial pure aluminum. *Surface and Coatings Technology*, 2019, vol. 358, pp. 741-752. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2018.08.046.

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

10. Kostyuk, G., Melkoziorova, O., Kostyuk, E., Shirokiy, I. Prospects for producing nanostructures in the volume of parts under the action of plasma flows *Rizannya ta instrumenti v tekhnologichnih sistemah*. Kharkiv, NTU «HPI», 2020, no. 92, pp. 107-121. DOI: 10.20998/2078-7405.2020.92.12.
11. Baranova, T. A., Chubenko, A. K., Ryabikov, A. E., Mamaev, A. I., Mamaeva, V. A., Beletskaya, E. Yu. Microarc synthesis of nanostructured radiation-absorbing coatings on aluminum and titanium surface. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2017, vol. 286, pp. 1757-8981. DOI: 10.1088/1757-899X/286/1/012037.
12. Jafari, R., Farzaneh, M. Fabrication of superhydrophobic nanostructured surface on aluminum alloy. *Appl. Phys.*, 2011, vol. 102, pp. 195-199. DOI: 10.1007/s00339-010-6131-0.
13. Kostyuk, G. I., Shirokiy, Yu. V. Experimental study of the flat details temperature fields at the laser beam motion and nanostructures formation. *Proceedings of XIII international conference on modern achievements of science and education 2018. September 6-13 Netanya (Israel)*, 2018, pp. 78-80.
14. Zhang, C., Lv, P., Xia, H., Yang, Z., Konovalov, S., Chen, X., Guan, Q. The microstructure and properties of nanostructured Cr-Al alloying layer fabricated by high-current pulsed electron beam, *Vacuum*, 2019, vol. 167, pp. 263-270. DOI: 10.1016/j.vacuum.2019.06.022.
15. Barthwal, S., Lim, S. Rapid fabrication of a dual-scale micro-nanostructured superhydrophobic aluminum surface with delayed condensation and ice formation properties. *Soft Matter, The Royal Society of Chemistry*, 2019, iss. 39, pp. 7945-7955. DOI: 10.1039/C9SM01256G.
16. Baranova, T. A., Chubenko, A. K., Ryabikov, A. E., Mamaev, A. I., Mamaeva, V. A., Beletskaya, E. Yu. Microarc synthesis of nanostructured radiation-absorbing coatings on aluminum and titanium surfaces. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2017, vol. 286, pp. 1757-8981. DOI: 10.1088/1757-899X/286/1/012037.
17. Baranov, S., Sidelnikov, E., Zenkin, V., Frolov, D., Voroshilov, O., Yakivnyuk, I., Konstantinov, R., Sokolov and Belokonova, I. V. Study of strength properties of semi-finished products from economically alloyed high-strength aluminium-scandium alloys for application in automobile transport and hipbuilding. *Open Engineering*, 2018, vol. 8, no. 1, pp. 69-76. DOI: 10.1515/eng-2018-0005.
18. Wahid, M. A., Siddiquee, A. N., Khan, Z. A. Aluminum alloys in marine construction: characteristics, application, and problems from a fabrication viewpoint. *Mar Syst Ocean Technol*, 2020, vol. 15, pp. 70-80. DOI: 10.1007/s40868-019-00069-w.
19. Fahim, J., Hadavi, S. M. M., Ghayour, H., Hassanzadeh Tabrizi, S. A. Cavitation erosion behavior of super-hydrophobic coatings on Al5083 marine aluminum alloy. *Wear*, 2019, vol. 424-425, pp. 122-132. DOI: 10.1016/j.wear.2019.02.017.
20. Baranov, O., Bazaka, K., Kersten, H., Keidar, M., Cvelbar, U., Xu, S., Levchenko, I. Plasma under control: Advanced solutions and perspectives for plasma flux management in material treatment and nanosynthesis *Applied Physics Reviews*, 2017, vol. 4, no. 4, pp. 041302-1-041302-33. DOI: 10.1063/1.5007869.
21. Shyrokiy, Y., Kostyuk, G. Investigation of the Influence of Crystallization Energy on the Size of Nanostructures During Copper Ion-Plasma Treatment. *Integrated Computer Technologies in Mechanical Engineering - 2021. ICTM 2021. Lecture Notes in Networks and Systems*, 2021, vol. 367. Springer, Cham. DOI: 10.1007/978-3-030-94259-5_6.
22. Kostyk, K., Kostyk, V., Akimov, O., Kamchatna-Stepanova, K., Shyrokiy, Y. Ensuring the High Strength Characteristics of the Surface Layers of Steel Products. *Advanced Manufacturing Processes III. InterPartner 2021. Lecture Notes in Mechanical Engineering. Springer, Cham*, 2022, vol. 9, pp. 292-301. DOI: 10.1007/978-3-030-91327-4_29.
23. Bruera, F. A., Kramer, G. R., Vera, M. L., Ares, A. E. Evaluation of the influence of synthesis conditions on the morphology of nanostructured anodic aluminum oxide coatings on Al 1050. *Surfaces and Interfaces*, 2020, vol. 18, article no. 100448. DOI: 10.1016/j.surfin.2020.100448.
24. Popov, V., Kostyuk, G., Nechyporuk, M., Kostyk K. 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*, 2020, pp. 470-477. DOI: 10.1007/978-3-030-40724-7_48.
25. Andrievskij, R. A. Nanomaterialy: koncepciya i sovremennye problem [Nanomaterials: concept and modern problems]. *Fizika metallov i metallovedenie – Physics of metals and metal science*, 2003, vol. 91, no. 1, pp. 50 – 56.
26. Popov, V., Kostyuk, G., Tymofeyev, O., Kostyk, K., Naboka, O. Design of New Nanocoatings Based on Hard Alloy. *Advances in Design, Simulation and Manufacturing III. DSMIE 2020. Lecture Notes in Mechanical Engineering. Springer, Cham*, 2020, pp. 522-531. DOI: 10.1007/978-3-030-50794-7_51.
27. Kostyuk, G., Nechyporuk, M., Kostyk, K. Determination of Technological Parameters for Obtaining Nanostructures under Pulse Laser Radiation on Steel of Drone Engine Parts, *10th International Conference on Dependable Systems, Services and Technologies (DES-*

SERT), 2019, pp. 208-212.
10.1109/DESSERT.2019.8770053.

DOI: 28. Gusev, A. I. *Nanomaterialy, nanostruktury, nanotekhnologii* [Nanomaterials, nanostructures, nanotechnologies]. Moscow, Fizmatlit Publ., 2005. 416 p.

Надійшла до редакції 19.01.2022, розглянута на редколегії 15.04.2022

МОДЕЛИРОВАНИЕ УСЛОВИЙ ПОЛУЧЕНИЯ НАНОСТРУКТУР В АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВАХ ПРИ ДЕЙСТВИИ ИОНИЗИРУЮЩЕГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Ю. В. Широкий, Ю. А. Сисоев, Т. А. Постельник

Использование лазерного излучения как источника ионизирующего излучения для получения наноструктурных и субмикроструктурных слоев алюминиевых сплавов требует определения необходимых технологических параметров. Поэтому было проведено теоретическое исследование ионизирующего излучения на алюминиевый сплав АК8 по ранее предложенной модели. При выборе области в материале алюминиевого сплава, где могут образовываться наноструктуры при действии ионизирующего излучения, наносили разные длины течения ионов. В результате теоретического исследования формирование наноструктур в поверхностном слое алюминиевого сплава АК8 было получено распределение температур в зоне ионизирующего излучения на разных глубинах материала. Также были построены поля температур для разных плотностей теплового потока $q_1 = 10^6$ Вт/м² и $q_2 = 10^5$ Вт/м². Полученные температурные поля для теплового потока q_1 показали, что с увеличением глубины материала температура снижается с 2480 до 650 К. При этом значения максимальных температур на поверхности материала несколько выше, чем необходимо для получения наноструктур на низших глубинах, максимальные температуры снижаются до значений, при которых могут реализовываться наноструктуры. В то же время при действии теплового потока $q_2 = 10^5$ Вт/м² максимальная температура поверхности снизилась до значений 1950 К, а на глубине она составляла 550 К. Оценка скорости нарастания температуры показывает, что она в случае превышает 10^7 К/с при q_1 и равнялась 10^6 К/с при q_2 . Все это подтвердило возможность создания условий формирования наноструктур. Благодаря температурному диапазону, полученному по рассчитанным температурным полям, были определены глубины алюминиевого сплава, где могут формироваться наноструктуры. Также проводились исследования влияния размеров пятна лазерного излучения на поверхности материала на формирование наноструктур, которое показало, что при действии пятна размером до 10^{-3} м возможность реализации наноструктур существенно снижается, в то время как снижение размера пятна до 10^{-4} м приводит к существенному повышению возможности формирования наноструктур. Для оценки возможного объема наноструктур рассматривалась зависимость размера нанокластера от плотности теплового потока в диапазоне от 10^7 до 10^{10} Вт/м² и времени его действия в диапазоне от 10^{-9} до 10^{-3} с. Также построена зависимость максимальной температуры от плотности теплового потока и времени его действия. Все это позволяет производить выбор технологических параметров лазерного излучения для получения наноструктурированных слоев на алюминиевых сплавах, а возможность определения размеров наноструктур позволяет прогнозировать физико-механические характеристики поверхностных слоев обрабатываемых материалов. Эти исследования могут быть интересны специалистам, занимающимся укреплением поверхностей алюминиевых сплавов и последующими исследованиями наноструктур.

Ключевые слова: ионизирующее излучение; наноструктуры; тепловой поток; температурные поля; скорость нарастания температуры.

MODELING OF CONDITIONS FOR OBTAINING NANOSTRUCTURES IN ALUMINUM ALLOYS UNDER THE ACTION OF IONIZING RADIATION

Yurii Shyrokyi, Iurii Sysoiev, Tatiana Postelnyk

The use of laser radiation as a source of ionizing radiation to obtain nanostructured and submicrostructured layers on aluminum alloys requires the determination of the necessary technological parameters. Therefore, a theoretical study of ionizing radiation on aluminum alloy AK8 was conducted according to the previously proposed model. When choosing the region in the material of the aluminum alloy, where nanostructures can be formed under the action of ionizing radiation, apply different lengths of ions. Because of the theoretical study of the formation of nanostructures in the surface layer of the aluminum alloy AK8, the temperature distribution in the zone of ionizing radiation at different depths of the material was obtained. Temperature fields for different heat flux densities $q_1 = 10^6$ W/m² and $q_2 = 10^5$ W/m² were also constructed. The obtained temperature fields for heat flux q_1 showed

that with increasing depth of the material, the temperature decreases from 2480 to 650 K. The values of maximum temperatures on the material surface are slightly higher than necessary to obtain nanostructures at lower depths maximum temperatures decrease to nanostructures can be realized. Simultaneously, under the action of heat flux $q_2 = 10^5 \text{ W/m}^2$, the maximum surface temperature decreased to values of 1950 K, and at depth it was 550 K. and was equal to 10^6 K/s at q_2 . All these confirmed the possibility of creating conditions for the formation of nanostructures. Due to the temperature range obtained from the calculated temperature fields, the depths of the aluminum alloy where nanostructures can be formed were determined. Studies of the effect of laser radiation spot size on the surface of the material on the formation of nanostructures were also conducted, which showed that when exposed to a spot size of $3 \cdot 10^3$ to 10^{-3} m , the possibility of nanostructures is significantly reduced, while reducing the spot size to 10^{-4} m leads to a significant increase in the possibility of forming nanostructures. To estimate the possible volume of nanostructures, the dependence of the nanocluster size on the heat flux density in the range from 10^7 to 10^{10} W / m^2 and its action time in the range from 10^{-9} to 10^{-3} s were considered. The dependence of the maximum temperature on the heat flux density and the time of its action is also constructed. All this allows you to choose the technological parameters of laser radiation to obtain nanostructured layers on aluminum alloys, and the ability to determine the size of nanostructures allows you to predict the physical and mechanical characteristics of the surface layers of processing materials. These studies may be of interest to specialists in strengthening the surfaces of aluminum alloys and further studies of nanostructures.

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

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 Юрій Олександрович – д-р техн. наук, старш. наук. співроб., проф. каф. теоретичної механіки, машинознавства та роботомеханічних систем, Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського «Харківський авіаційний інститут», Харків, Україна.

Постельник Тетяна Олександрівна – асист. 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 Department of Theoretical Mechanics, Engineering and Robomechanical Systems, National Aerospace University “Kharkiv Aviation Institute”, Kharkiv, Ukraine,

e-mail: i.shyrokyi@khai.edu; ORCID: 0000-0002-4713-0334, Scopus Author ID: 57222322443.

Iurii Sysoiev – Doctor of Technical Sciences, Professor of Department of Theoretical Mechanics, Engineering and Robotic Systems, National Aerospace University “Kharkiv Aviation Institute”, Kharkiv, Ukraine,

e-mail: i.sysoiev@khai.edu, ORCID: 0000-0001-5006-8546, Scopus Author ID: 55886163000.

Tatiana Postelnyk – Assistant Lecturer of Department of Theoretical Mechanics, Engineering and Robotic Systems, National Aerospace University “Kharkiv Aviation Institute”, Kharkiv, Ukraine,

e-mail: t.postelnyk@khai.edu, ORCID: 0000-0001-5898-0273.