

Визначення температурних умов отримання субмікро- та наноструктур при дії іонів на магнієві сплави у плазмовому середовищі

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

Магнієві сплави характеризуються високими фізико-механічними властивостями, що робить їх широко застосовуваними в авіаційній техніці. Проте з огляду на високі швидкості та значні температури, в яких працюють сучасні авіаційні конструкції, особливо деталі двигунів, виникає потреба в покращенні їх характеристик. Використання іонізуючого випромінювання для формування наноструктурних і субмікроскопічних шарів на магнієвих сплавах вимагає визначення оптимальних технологічних параметрів. З цією метою проведено теоретичне дослідження впливу іонізуючого випромінювання на магнієвий сплав МЛ9, використовуючи модель, запропоновану раніше. Ця модель дозволяє вирішувати не лише завдання теплопровідності, а й аналізувати термпружний стан у зоні дії іонізуючого випромінювання. В результаті теоретичних досліджень, для широкого спектра іонів, що впливають на магнієві сплави, визначено залежності максимальних температур, а також максимальних і мінімальних температурних напружень від енергії іонів і їх заряду. Ці дані можуть бути використані для оцінки можливості формування наноструктур при відповідних технологічних параметрах обробки. Також, для деяких іонів металів у парному порівнянні встановлено умови, за яких вони створюють подібні температурні поля та температурні напруження. Наприклад, пари нікель та кобальт або молібден та гафній мають схожий вплив на матеріал, що дозволяє вибирати найбільш економічно вигідний варіант іонного впливу для отримання захисних та зміцнюючих покриттів з субмікро або наноструктурами. Отримані результати досліджень можуть бути використані для оцінки потенціалу утворення наноструктур за різними технологічними режимами. Ключовими факторами для цього є значення температур, швидкість їх наростання, а також максимальні та мінімальні температурні напруги. Як критерій для утворення наноструктур можна прийняти досягнення необхідного діапазону температур 500-1500 К, швидкостей наростання температур, що перевищують 10^7 К/с, та наявність температурних напруг в діапазоні від 10^6 до 10^9 Па, які значно прискорюють процес формування наноструктур. Проведені дослідження будуть цікаві при розробці технології отримання захисних та зміцнюючих покриттів на магнієвих сплавах.

Ключові слова: температура, температурні напруги, швидкості наростання температури, іони, енергія іонів, наноструктури, магнієві сплави.

Вступ

Сучасні науковці приділяють значну увагу питанням формування наноструктур на поверхнях конструкційних матеріалів [1, 2]. Основна частина досліджень зосереджена на сталевих [3] та алюмінієвих [4, 5] сплавах, тоді як магнієві сплави вивчаються значно рідше [3].

Зокрема, в [3] розглянуто процес формування нанопокриттів на алюмінієвих і титанових поверхнях методом мікродугового оксидування у водних розчинах. Отримані таким чином покриття демонстрували високу однорідність і пористість, а також мали високий коефіцієнт поглинання електромагнітного випромінювання в терагерцовому діапазоні (до 70 %), що відкривало перспективи для розвитку стелс-технологій. Окрім того, у [6] досліджували параметри анодного синтезу нанопористих плівок на основі анодного оксиду алюмінію

(AOA), що підкреслило важливість попередньої підготовки підкладки та контрольованого напруження в процесі обробки. Також проводилися дослідження довговічності наноструктурованих покриттів на основі наночасток політетрафторетилену, нанесених на пористі алюмінієві та магнієві сплави [7].

З наведеного огляду зрозуміло, що більшість досліджень щодо формування наноструктур на алюмінієвих та магнієвих сплавах мають експериментальний характер [3, 7, 6], тоді як теоретичні дослідження зустрічаються рідше [8]. Окрім цього, мало уваги приділено використанню іонізуючого випромінювання для створення наноструктур у магнієвих сплавах, хоча для інших конструкційних матеріалів проводилися більш детальні дослідження [9, 10].

У роботі [11] запропоновано застосування лазерного випромінювання як джерела іонізуючого впливу, а також проведення досліджень температурних полів і температурних напружень у зоні випромінювання на основі моделі, запропонованої в [10]. Це дозволить визначити оптимальні технологічні параметри для створення субмікро- та наноструктурних шарів у магнієвих сплавах, що сприятиме покращенню їхніх фізико-механічних властивостей.

1. Постановка задачі

Магнієві сплави характеризуються високими фізико-механічними властивостями [12], що робить їх широко застосовуваними в авіаційній техніці [13]. Проте з огляду на високі швидкості та значні температури [14], в яких працюють сучасні авіаційні конструкції, особливо деталі двигунів, виникає потреба в покращенні їх характеристик [15, 16]. Зокрема, лопатки компресора, особливо перших ступенів, зазнають впливу мікро- та макрочастинок, що спричиняє корозійне пошкодження [17]. Отже, забезпечення високої ерозійної стійкості матеріалу є досить важливим завданням.

Для досягнення необхідних властивостей матеріал повинен мати підвищену твердість на поверхні, зберігаючи при цьому здатність до значної деформації без руйнування [5, 17]. Дослідження багатьох авторів підтверджують, що наноструктурні шари мають знижений модуль пружності, що підвищує експлуатаційні характеристики деталей, які працюють в умовах ударних навантажень [5, 17-20]. Це дозволяє матеріалу витримувати значні переміщення при відносно низьких напруженнях [5, 16, 21].

Окрім того, низка досліджень показали [8, 17, 22], що наноструктурні покриття володіють високими антикорозійними властивостями, що додатково підтверджує доцільність їх використання для захисту деталей від впливу агресивних середовищ.

На сьогодні існує значна кількість досліджень [1, 23, 24], присвячених вивченню розміру зерна наноструктур [24, 25], що цілком виправдано, оскільки цей параметр безпосередньо впливає на фізико-механічні характеристики матеріалу [17, 21]. Зокрема, спостерігається його вплив на мікротвердість [17, 27], межу втоми, межу плинності та коефіцієнт тертя [28], що підкреслює важливість прогнозування розміру зерна.

Незважаючи на певну кількість теоретичних досліджень отримання наноструктур у плазмовому середовищі та під дією іонів [21-25, 27] кількість моделей, здатних передбачити розмір зерна, досить обмежена [21, 28], і вони не враховують необхідну енергію для його формування в наноструктурі [29]. Тому в даній роботі була використана оновлена модель, яка враховує майже всі

взаємозв'язки не лише між крайніми атомами в зерні, а й у всьому об'ємі наноструктури [30]. Для цього спочатку окремо розраховувалася кількість частинок у нанокластері, після чого аналізувалася їхня взаємодія з іншими зернами [17, 27].

Застосування такої моделі [30] дозволяє більш точно визначати енергетичні витрати на підвищення температури та оцінювати рівень температурних напружень [21], що робить її ефективним інструментом для прогнозування структурних характеристик наноматеріалів [17, 19].

2. Дослідницька частина

Використання іонізуючого випромінювання для формування наноструктурних і субмікроструктурних шарів на магнієвих сплавах вимагає визначення оптимальних технологічних параметрів. З цією метою проведено теоретичне дослідження впливу іонізуючого випромінювання на магнієвий сплав МЛ9, використовуючи модель, запропоновану в [30].

Ця модель дозволяє вирішувати не лише завдання теплопровідності, а й аналізувати термopужний стан у зоні дії іонізуючого випромінювання. Отримані результати дадуть змогу визначити температурні поля та температурні напруження в оброблюваній області. Це, своєю чергою, дозволить встановити глибину проникнення випромінювання, в межах якої зможуть утворюватися умови для формування наноструктур і субмікроструктур.

Формування наноструктур буде оцінюватися за критеріями, наведеними в [17, 27]: температура в зоні опромінення повинна знаходитися в діапазоні 500-1500 К, а швидкість її зростання перевищувати 10^6 К/с. При цьому температурні напруження, що сприятимуть процесу наноструктурування, мають знаходитися в межах 10^6 – 10^8 Па.

3. Результати розрахунків

За розробленою раніше тепловою моделлю [30] було отримано залежності максимальної температури, максимальних і мінімальних температурних напруг від енергії іонів з різними зарядами (Z_1 ; Z_2 ; Z_3) для широкого кола іонів, що діють на магнієвий сплав МЛ9.

Під час впливу іонів бору та вуглецю, як показано на Рис. 1, температури значно зростають зі збільшенням енергії і досягають $6,7 \cdot 10^3$ К для іонів бору (Z_3), тоді як для іонів вуглецю цей показник менший — близько $5 \cdot 10^3$ К. Зменшення заряду іона призводить до помітного зниження температури: для бору температура знижується до $5 \cdot 10^3$ К, а для вуглецю — до $4 \cdot 10^3$ К. Це також підтверджує, що збільшення маси іона призводить до зниження температури. Температурні напруги зростають зі збільшенням енергії іонів. Спочатку їх збільшення відбувається плавно, а потім швидкість зростання збільшується і стабілізується. Максимальні температурні напруги для іонів бору досягають $7,6 \cdot 10^8$ Па при енергії $2 \cdot 10^4$ еВ, тоді як для іонів вуглецю ці значення менші — $6,2 \cdot 10^8$ Па за тих самих умов.

При малих енергіях величини напруг знижуються майже на порядок, хоча для бору вони дещо вищі, ніж для вуглецю. Для мінімальних температурних напруг залежність має схожий характер до температурної залежності від енергії іонів, тобто спочатку спостерігається швидке зростання, а згодом лінійне підвищення. Мінімальні температурні напруги знижуються більше ніж на порядок,

і максимальні значення для іонів вуглецю становлять $4,25 \cdot 10^7$ Па, тоді як для іонів бору – $3,2 \cdot 10^7$ Па.

Зниження заряду іона також зменшує мінімальні температурні напруги, однак загальний характер залежностей зберігається. Для малих енергій ($E_i=200$) мінімальні температурні напруги зменшуються до значень, менших за 10^7 Па. Дослідження показало, що температурні напруги не є достатніми для утворення наноструктур, але можуть значно прискорити цей процес при певних температурах (500–1500 K). Крім того, швидкість зростання температури у всіх досліджених випадках перевищує 10^7 K/c.

Аналогічні залежності для впливу іонів азоту та алюмінію на магнієві сплави показані на Рис. 2. Максимальні температури зростають із підвищенням енергії іонів, при цьому характер залежності схожий на той, що спостерігається при дії іонів бору та вуглецю. В цьому випадку максимальні температури досягають значень близько $2 \cdot 10^4$ K для іонів азоту (Z_3) та $1,5 \cdot 10^4$ K для іонів азоту (Z_1). Для іонів алюмінію температури значно нижчі — $8 \cdot 10^3$ K та $6,1 \cdot 10^3$ K відповідно для Z_3 і Z_1 (Рис. 2а).

Максимальні температурні напруги спочатку плавно зростають при малих енергіях, а при великих значеннях енергії спостерігається майже лінійна залежність напруг від енергії іонів. При цьому для іонів азоту температурні напруги значно вищі, досягаючи $1,6 \cdot 10^9$ Па при $Z=1$ і енергії $2 \cdot 10^4$ eВ, в той час як для іонів алюмінію ці значення складають $8,4 \cdot 10^8$ Па за тих самих умов. Зменшення заряду іона призводить до значного зниження температурних напруг, які складають $4,8 \cdot 10^8$ Па і $3 \cdot 10^8$ Па відповідно для цих іонів.

При малих енергіях іонів температурні напруги наближаються до 10^7 Па (Рис. 2б). Як і в попередньому випадку, значення мінімальних температурних напруг для іонів алюмінію дещо вищі, ніж для іонів азоту, досягаючи максимуму $3,3 \cdot 10^7$ Па для алюмінію та 10^7 Па для азоту. При мінімальних енергіях ці напруги залишаються незначними. Зміна температурних напруг має схожий характер, як для іонів бору та вуглецю (Рис. 2б), з незначним збільшенням значень порівняно з ними.

У випадку впливу іонів кисню та заліза на магнієві сплави зміни температур і температурних напруг мають такий же характер (Рис. 3). Максимальні температури для іонів кисню варіюються від $3,4 \cdot 10^4$ K до $2,6 \cdot 10^4$ K при енергії $2 \cdot 10^4$ eВ і Z_3 . Для іонів заліза температури значно нижчі і складають 10^4 K та $7 \cdot 10^4$ K за тих самих умов (Рис. 3а). Температурні напруги для обох випадків, як максимальні, так і мінімальні, близькі до попередніх, з мінімальними напругами на рівні $3,1 \cdot 10^7$ Па (Рис. 3б).

При впливі іонів нікелю та кобальту на магнієвий сплав температури та температурні напруги практично однакові для обох іонів (Рис. 4а, 4б). Температури для обох іонів складають $3,5 \cdot 10^4$ K при енергії $2 \cdot 10^4$ eВ і Z_3 , а зменшення заряду знижує температуру до $2,6 \cdot 10^4$ K (Z_1). При малих енергіях (200 eВ) температури майже не змінюються і становлять $4 \cdot 10^3$ K для всіх зарядів (Рис. 4а). Максимальні температурні напруги для обох іонів досягають $2,3 \cdot 10^9$ Па при енергії $2 \cdot 10^4$ eВ і Z_3 , і значно зменшуються до $8 \cdot 10^8$ Па при зменшенні заряду (Z_1). Для малих енергій напруги близькі до 10^8 Па для всіх зарядів (Рис. 4б). Мінімальні температурні напруги також схожі для іонів нікелю та кобальту, з максимальним значенням $1,75 \cdot 10^7$ Па при енергії $2 \cdot 10^4$ eВ і Z_3 . Для мінімальних енергій (200 eВ) вони зменшуються до $6 \cdot 10^6$ Па для Z_3 і $2 \cdot 10^6$ Па для Z_1 .

Вплив іонів молібдену та гафнію на магнієвий сплав призводить до

значного зростання температур при енергії $2 \cdot 10^4$ еВ. Для гафнію температури варіюються від $3,8 \cdot 10^4$ К до $2,7 \cdot 10^4$ К для зарядів Z_3 та Z_1 відповідно. Зменшення енергії до 200 еВ призводить до зниження температури до $2,6 \cdot 10^3$ К для всіх зарядів. Для молібдену температури трохи нижчі, складаючи $2,8 \cdot 10^4$ К для Z_3 та $2,5 \cdot 10^4$ К для Z_1 (Рис. 5а).

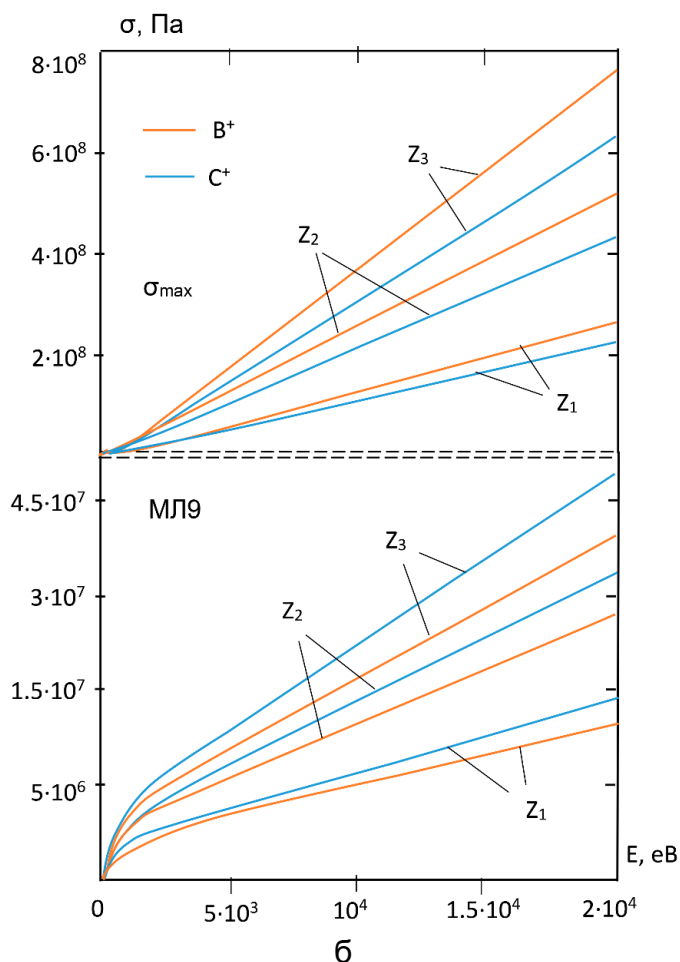
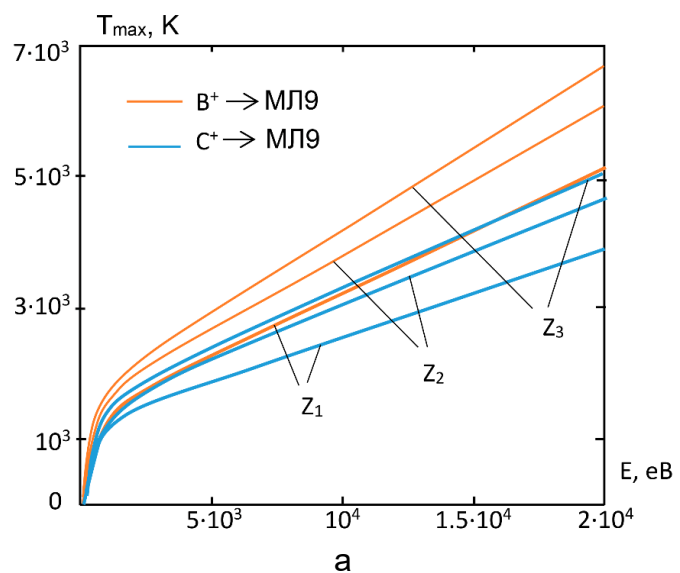


Рис. 1. Залежності максимальних температур (а) і температурних напруг (б) від енергії іонів бору (B^+) і вуглецю (C^+) при їх дії на сплав МЛ9

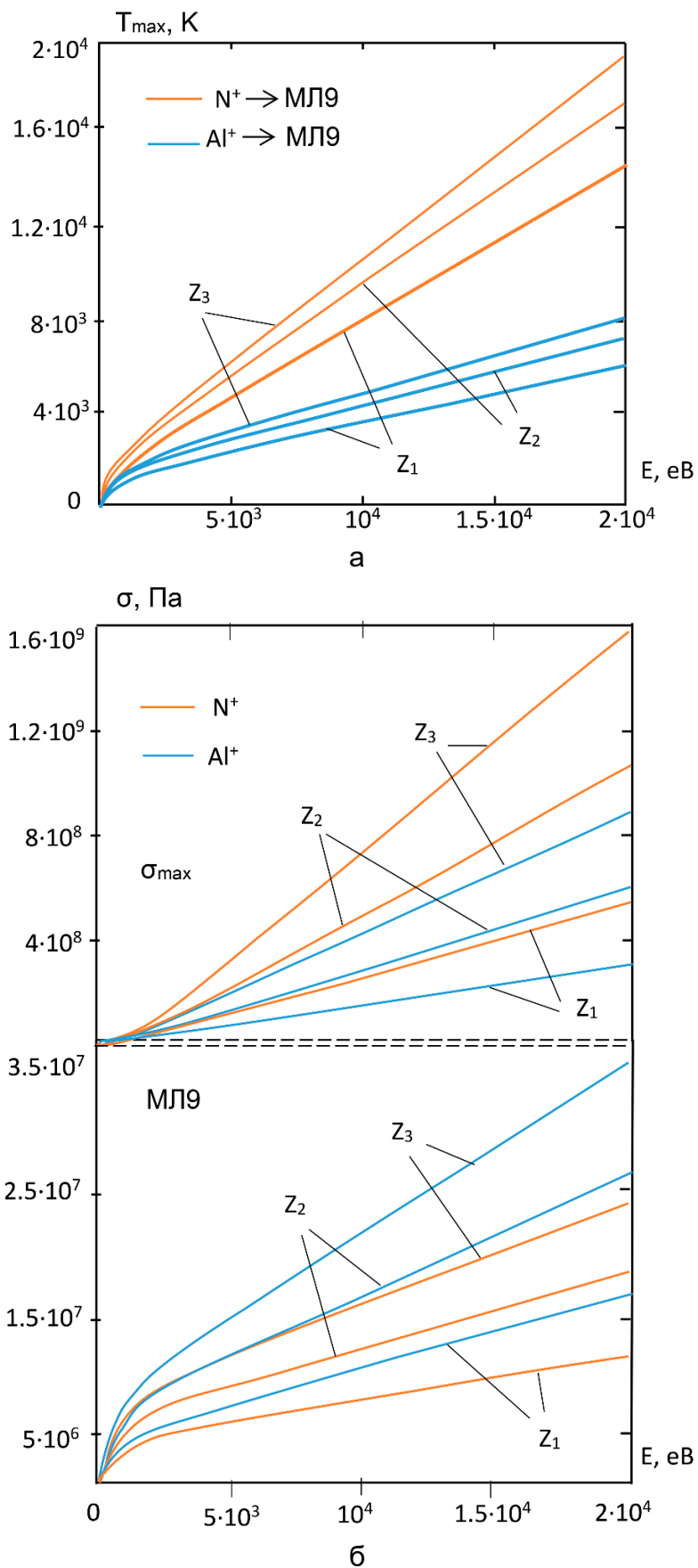


Рис. 2. Залежність максимальних температур (а) і температурних напруг (б) від енергії іонів азоту (N^+) і алюмінію (Al^+) при їх дії на магнієвий сплав МЛ9

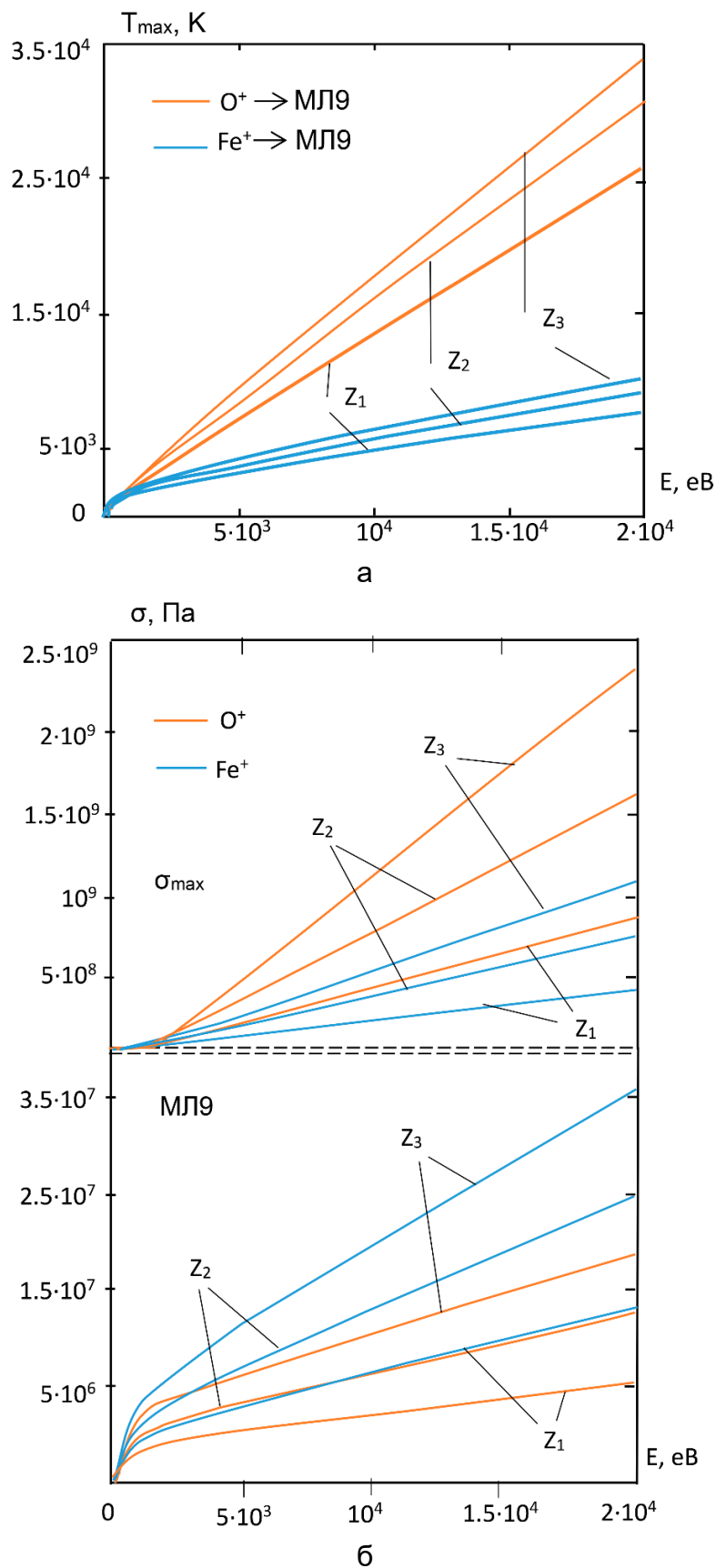


Рис. 3. Залежність максимальних температур (а) і максимальних(б) і мінімальних(в) температурних напруг від енергії іонів кисню (O^+) та заліза (Fe^+) при їх дії на магнієвий сплав МЛ9

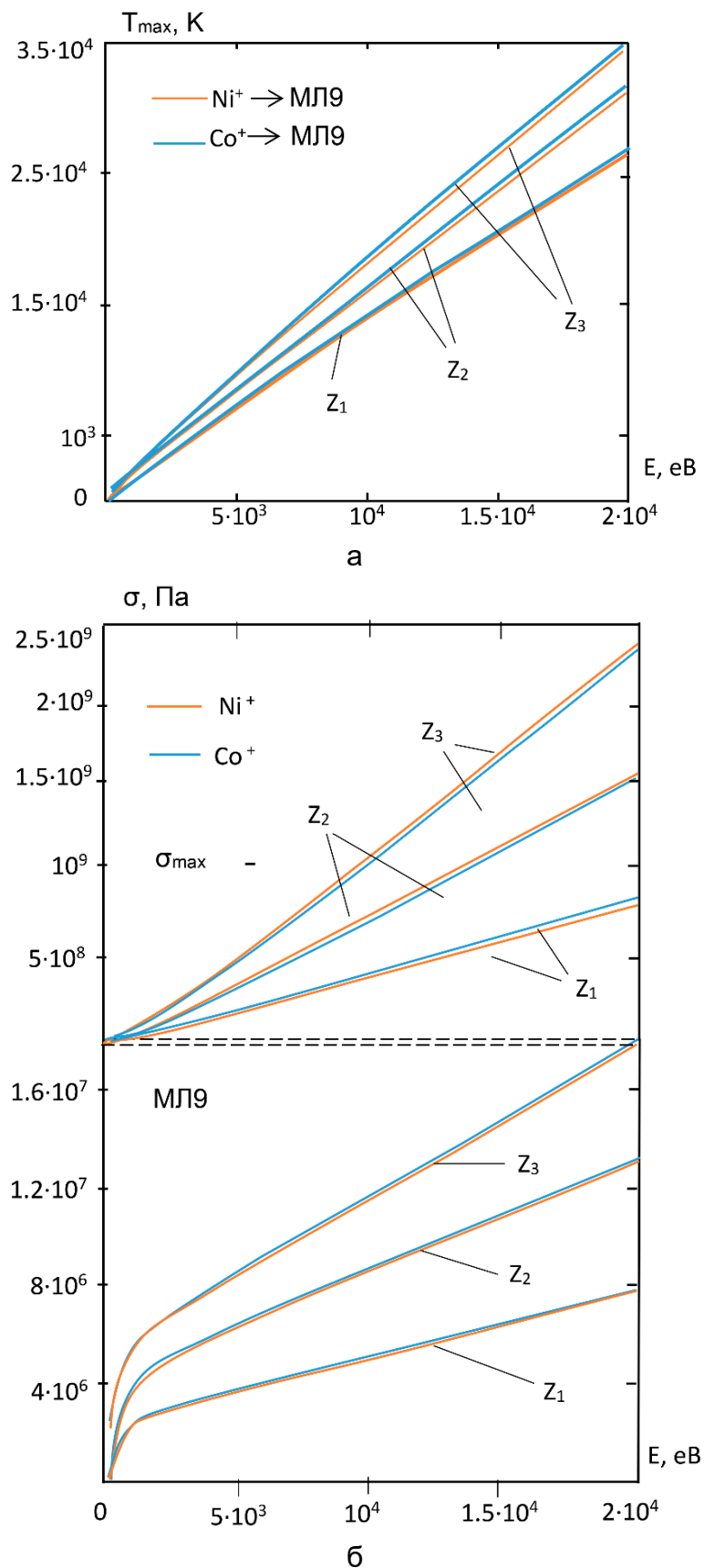


Рис. 4. Залежність максимальних температур (а) і температурних напруг (б) від енергії іонів нікелю (Ni^+) і кобальту (Co^+) при їх дії на магнієвий сплав МЛ9

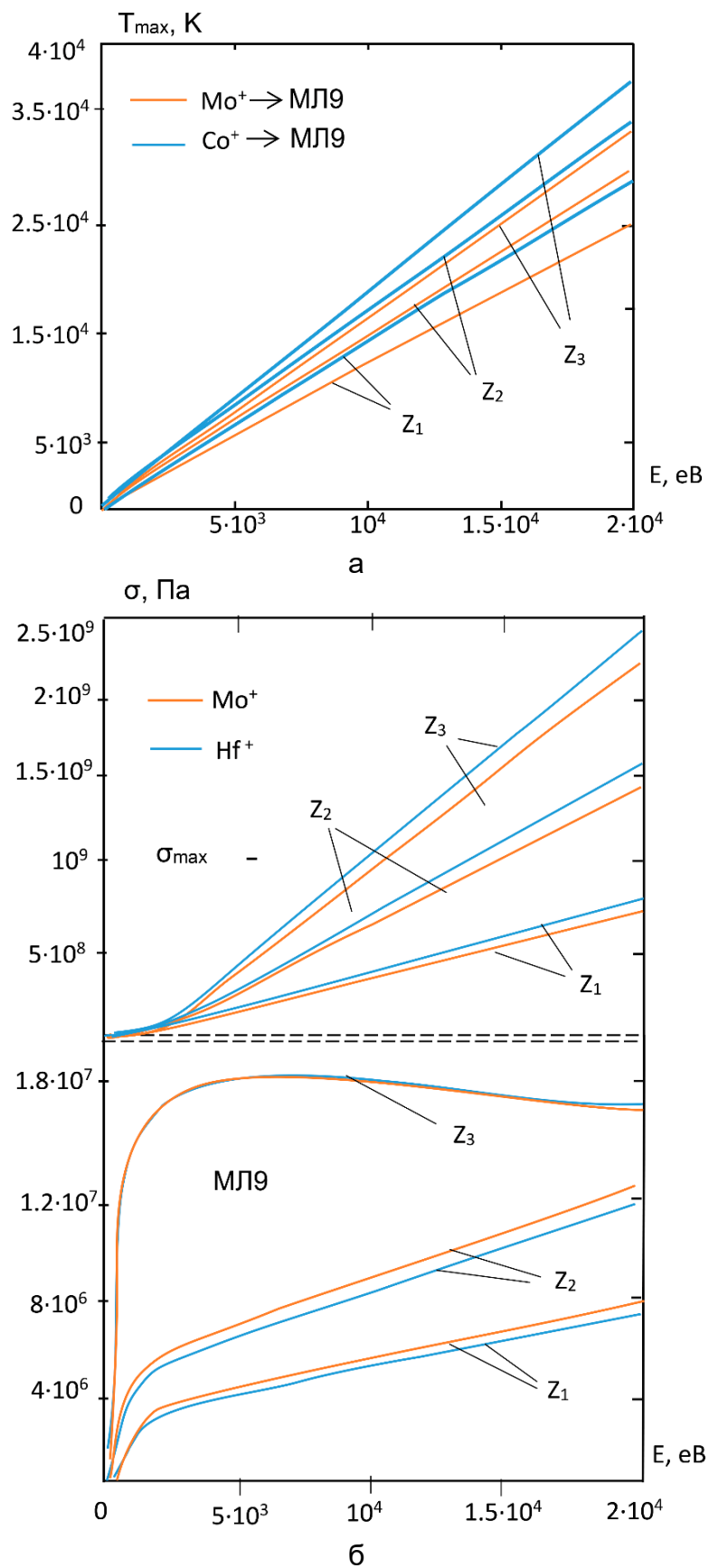


Рис. 5. Залежність максимальних температур (а) температурних напруг (б) від енергії іонів молібдену (Mo^+) і гафнію (Hf^+) при їх дії на магнієвий сплав МЛ9

Максимальні температурні напруги для іонів гафнію дещо вищі, ніж для молібдену, і складають $2,4 \cdot 10^9$ Па при Z_3 та $7 \cdot 10^8$ Па при Z_1 . Для іонів молібдену ці значення трохи менші і складають $2,3 \cdot 10^9$ Па та $6 \cdot 10^8$ Па для відповідних зарядів (Рис. 5б). Мінімальні температурні напруги для іонів молібдену при енергії $2 \cdot 10^4$ еВ становлять $1,70 \cdot 10^7$ Па для Z_3 та $8 \cdot 10^6$ Па для Z_1 . При зниженні енергії до 1000 еВ спостерігаються високі температурні напруги при Z_3 , тоді як для Z_1 та Z_2 залежності мають схожий характер, як і для іонів ітрію та цирконію. При малих енергіях мінімальні температурні напруги знижуються до значень близько $1,5 \cdot 10^6$ Па для обох іонів та зарядів Z_1 і Z_3 (Рис. 5б).

Отримані результати досліджень можуть бути використані для оцінки потенціалу утворення наноструктур за різними технологічними режимами. Ключовими факторами для цього є величини температур, швидкість їх наростання, а також значення максимальних і мінімальних температурних напруг. Як критерій для утворення наноструктур можна прийняти досягнення необхідного діапазону температур (500-1500 К), швидкостей наростання температур, що перевищують 10^7 К/с, та наявність температурних напруг в діапазоні від 10^6 до 10^9 Па, які значно прискорюють процес формування наноструктур.

Висновки

Для широкого спектра іонів, що впливають на магнієві сплави, визначено залежності максимальних температур, а також максимальних та мінімальних температурних напружень від енергії іонів та їх зарядів. Ці дані можуть бути використані для оцінки можливості формування наноструктур при відповідних технологічних параметрах обробки. Для деяких іонів встановлені умови, за яких вони створюють подібні температурні поля та температурні напруження. Наприклад, пари нікель та кобальт або молібден та гафній мають схожий вплив на матеріал, що дозволило вибирати найбільш економічно вигідний варіант іонного впливу для отримання аналогічних наноструктур. Змінюючи енергію, заряд і тип іонів у процесі обробки, можна формувати наноструктуровані шари товщиною до 50–60 мкм, що значно покращує експлуатаційні характеристики деталей з магнієвих сплавів. Проведені дослідження будуть цікаві при розробці технології отримання захисних та зміцнюючих покриттів на магнієвих сплавах.

Список літератури

1. 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. https://doi.org/10.1007/978-3-030-94259-5_6
2. Kostyk, K. 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. https://doi.org/10.1007/978-3-030-91327-4_29
3. Mehdizade, M. Investigation of anodizing time and pulse voltage modes on the corrosion behavior of nanostructured anodic layer in commercial pure aluminum

[Text] / Mansour Soltanieh, Ali Reza Eivani, // Surface and Coatings Technology. – 2019. – Vol. 358, – P. 741-752, ISSN 0257-8972.
<https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2018.08.046>.

4. Baranova, T. A. Microarc synthesis of nanostructured radiation-absorbing coatings on aluminum and titanium surface [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.
<http://dx.doi.org/10.1088/1757-899X/286/1/012037>

5. Tellkamp, V. L. Mechanical behavior and microstructure of a thermally stable bulk nanostructured Al alloy [Text] / V. L. Tellkamp, E. J. Lavernia & A. Melmed, // Metall Mater Tran. – 2001. – № 32. – P. 2335–234. <https://doi.org/10.1007/s11661-001-0207-6>

6. Popov, V. 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 // In: et al. Advanced Manufacturing Processes. InterPartner 2019. Lecture Notes in Mechanical Engineering. Springer, Cham. – 2020. – P. 470-477.
https://doi.org/10.1007/978-3-030-40724-7_48

7. 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, ISSN 0169-4332. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2014.05.194>.

8. Андриевский, Р. А. Наноматериалы: концепция и современные проблемы [Текст] / Р. А. Андриевский // Физика металлов и металловедение. – 2003. – Т. 91, № 1. – С. 50 – 56.

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

10. 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, // " 2019 10th International Conference on Dependable Systems, Services and Technologies (DESSERT). – 2019. – P. 208-212. doi: 10.1109/DESSERT.2019.8770053.

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

12. Івченко, Л. Й. Термінологічний словник-довідник з трибології, надійності та нанотехнологій [Текст] / Л. Й. Івченко, В. Ю. Черкун, В. І. Кубіч, В. В. Черкун // Запоріжжя : ЗНТУ. – 2016. – 116 с.

13. Onopchenko, A. V. Ensuring Quality of Stamping Sheet Aviation Parts [Text] / A. V. Onopchenko, M. O. Kurin, and Yu. V. Shyrokyi // Progress in Physics of Metals –2024. – Vo. 25, – No. 2. – P. 320–363. <https://doi.org/10.15407/ufm.25.02.320>

14. Костюк, Г. И. Инженерная методика оценки динамики полей температур и напряжений в теле детали и коэффициента эрозии при плазменно-ионной и светолучевой обработке [Текст] / Г. И. Костюк, Н. В. Руденко // Авіаційно-космічна техніка і технологія: Держ. аерокосм. ун–т ім. М. Є. Жуковського «ХАІ». – 2000. – Вип. 17. – С. 33–38.

15. Kostyuk, G. I. The surface roughness of the detail the ion-plasma coating

end the ion implantation and alloying [Text] / G. I. Kostyuk, A. K. Myalitsa, A. K. Goriov, A. G. Trushin and all // Нові технології в машинобудуванні: матеріали IX Міжнар. конф., 3–7 вересня 2000 г. – Х., 2000. – С. 52–58.

16. Баранов, О. О. Разработка комбинированной технологии для формирования поверхностного слоя авиационных конструкционных материалов: дис. канд. техн. наук: 05.07.04 – технология производства летательных аппаратов / О. О. Баранов // Нац. аэрокосм. ун-т им. Н. Е. Жуковского "ХАИ", Х. – 2000. – 207 с.

17. Костюк, Г. И. Нанопокрития и наноструктурные упрочненные слои для повышения ресурса и надежности деталей авиационных двигателей [Текст] / Г. И. Костюк, Е. А. Воляк, В. А. Фадеев // ХАИ, ББК 72: 74 Н56. – 2018. – С. 54.

18. Широкий, Ю. В. Вибір технологічних параметрів лазера для отримання зміцнюючих покриттів з наноструктурами на інструментальній сталі У12А [Текст] / Ю. В. Широкий, Ю. О. Сисоєв, О. В. Торосян, Г. Д. Торосян-Жидеева // Відкриті інформаційні та комп'ютерні інтегровані технології: збірник наукових праць / Нац. аерокосм. ун-т ім. М. Є. Жуковського "ХАИ". – Харків, 2023. – Вип. 97. – С. 111-125. <https://doi.org/10.32620/oikit.2023.97.07>

19. Baranov, O. Hierarchical Nanomaterials by Selective Deposition of Noble Metal Nanoparticles: Insight into Control and Growth Processes. [Text] / O. Baranov, T. Belmonte, I. Levchenko, K. Bazaka, M. Košiček, U. Cvelbar // Advanced Theory and Simulations. – 2023. – No. 6. – Vol. 9. – P. 2300288. <https://doi.org/10.1002/adts.202300288>.

20. Prasad, K. Carbon Nanocomposites in Aerospace Technology: A Way to Protect Low-Orbit Satellites Weerasinghe Janith / Prasad Karthika, Mathew Joice, Trifoni Eduardo, Baranov Oleg, Levchenko Igor, Bazaka Kateryna // Nanomaterials. – 2023. – No. 13. – Vol. 11. – P.1763. <https://doi.org/10.3390/nano13111763>.

21. 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: сб. науч. тр. / Нац. аерокосм. ун-т ім. М. Є. Жуковського «ХАИ». Харків, 2022. – Вип. 2. – С.55-63, <https://doi.org/10.32620/akt.2022.2.07>

22. 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 : НТУ «ХПІ», 2017. – № 26(1248). – С. 60-65.

23. 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 : НТУ «ХПІ», 2015. – № 40(1149). – С. 47-52. – Бібліогр.: 9 назв. – ISSN 2079-004X.

24. 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 ім. М. Є. Жуковського «ХАИ». Харків, 2021. – Вип. 91. – С. 62-77, <https://doi.org/10.32620/oikit.2021.91.05>

25. Бреус, А. О. Удосконалення комбінованої плазмово-іонної технології для отримання наноструктур на поверхні ріжучого інструменту: дис. канд. техн. наук / А. О. Бреус // Нац. аерокосм. ун-т ім. М. Є. Жуковського "ХАИ", М-во освіти і науки України; Харків, 2018. – 143 с.

26. Kostyuk, G. Improving the resource and reliability of details from zirconium

alloys during the application of nanocoating and formation of nanostructures [Text] / G. Kostyuk, V. Popov // Bulletin of the National technical university "Kharkiv Polytechnic Institute" Series: Techniques in a machine industry. – 2019. – No. 19. – P. 40-50. <https://doi.org/10.20998/2079-004X.2019.1.07>

27. Kostyuk, G. Prospects for producing nanostructures in the volume of parts under the action of plasma flows [Text] / G. Kostyuk, O. Melkozirova, E. Kostyuk, I. Shyrokyi / Різання та інструменти в технологічних системах. – Харків: НТУ «ХПІ». – 2020. – № 92. – С. 107-121. <https://doi.org/10.20998/2078-7405.2020.92.12>.

28. Костюк, Г. И. О возможности использования пар трения "покрытие-покрытие" и выбор пар трения "покрытие-покрытие" в многослойных покрытиях с учетом их адгезионного взаимодействия [Текст] / Г. И. Костюк, Ю. В. Широкий // Вісник АІНУ. – Вип №.3. – 2011. – С. 36–40.

29. Широкий, Ю. В. Визначення впливу внутрішніх енергій кристалічної решітки на отримання наноструктур у поверхневих шарах алюмінієвих сплавів [Текст] / Ю. В. Широкий, // Відкриті інформаційні та комп'ютерні інтегровані технології: зб. наук. праць / Нац. аерокосм. ун-т ім. М. Є. Жуковського «ХАІ». Харків, 2023. – № 99. – С. 32–43. <https://doi.org/10.32620/oikit.2023.99.03>

30. Широкий, Ю. В. Дослідження температурних полів на сталях з урахуванням кінцевої швидкості розповсюдження тепла при моделюванні умов отримання наноструктур у плазмовому середовищі [Текст] / Ю. В. Широкий, Ю. О. Сисоєв, К. В. Фесенко, Т. О. Постельник // Відкриті інформаційні та комп'ютерні інтегровані технології: зб. наук. праць / Нац. аерокосм. ун-т ім. М. Є. Жуковського «ХАІ». Харків, 2024. – № 101. – С. 98–111. <https://doi.org/10.32620/oikit.2024.101.07>

References (BSI)

1. 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. https://doi.org/10.1007/978-3-030-94259-5_6

2. Kostyk, K. 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. – R. 292-301. https://doi.org/10.1007/978-3-030-91327-4_29

3. Mehdizade, M. Investigation of anodizing time and pulse voltage modes on the corrosion behavior of nanostructured anodic layer in commercial pure aluminum [Text] / Mansour Soltanieh, Ali Reza Eivani, // Surface and Coatings Technology. – 2019. – Vol. 358, – P. 741-752, ISSN 0257-8972. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2018.08.046>.

4. Baranova, T. A. Microarc synthesis of nanostructured radiation-absorbing coatings on aluminum and titanium surface [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. <http://dx.doi.org/10.1088/1757-899X/286/1/012037>

5. Tellkamp, V. L. Mechanical behavior and microstructure of a thermally

stable bulk nanostructured Al alloy [Text] / V. L. Tellkamp, E. J. Lavernia & A. Melmed, // Metall Mater Tran. – 2001. – № 32. – R. 2335–234. <https://doi.org/10.1007/s11661-001-0207-6>

6. Popov, V. 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 // In: et al. Advanced Manufacturing Processes. InterPartner 2019. Lecture Notes in Mechanical Engineering. Springer, Cham. – 2020. – R. 470-477. https://doi.org/10.1007/978-3-030-40724-7_48

7. 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, ISSN 0169-4332. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2014.05.194>.

8. Andrievskij, R. A. Nanomaterialy: koncepciya i sovremennyye prob-lemy [Tekst] / R. A. Andrievskij // Fizika metallov i metallovedenie. – 2003. – T. 91, № 1. – S.50 – 56.

9. Design of New Nanocoatings Based on Hard Alloy [Text] / V. Popov, G. Kostyuk, O. Tymofyeyev, K. Kostyk, O. Naboka, // In: et al. Advances in Design, Simulation and Manufacturing III. DSMIE 2020. Lecture Notes in Mechanical Engineering. Springer, Cham. – 2020. – R. 522-531. https://doi.org/10.1007/978-3-030-50794-7_51

10. 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, // " 2019 10th International Conference on Dependable Systems, Services and Technologies (DESSERT). – 2019. – R. 208-212. doi: 10.1109/DESSERT.2019.8770053.

11. Gusev, A. I. Nanomaterialy, nanostruktury, nanotekhnologii [Tekst] / A. I. Gusev // – M.: Fizmatlit, 2005. – 416 s.

12. Ivshenko, L. J. Terminologichnij slovník-dovidnik z tribologiyi, nadiynos-ti ta nanotekhnologii [Tekst] / L. J. Ivshenko, V. Yu. Cherkun, V. I. Kubich, V. V. Cherkun // Zaporizhzhya : ZNTU. – 2016. – 116 s.

13. Onopchenko, A. V. Ensuring Quality of Stamping Sheet Aviation Parts [Text] / A. V. Onopchenko, M. O. Kurin, and Yu. V. Shyrokyi // Progress in Physics of Metals –2024. – Vo. 25, – No. 2. – P. 320–363. <https://doi.org/10.15407/ufm.25.02.320>

14. Kostyuk, G. I. Inzhenernaya metodika ocenki dinamiki polej tempe-ratur i napryazhenij v tele detali i koefficienta erozii pri plazmenno-ionnoj i svetoluchevoj obrabotke [Tekst] / G. I. Kostyuk, N. V. Rudenko // Aviacijno-kosmichna tehnika i tehnologiya: Derzh. aerokosm. un–t im. M. Ye. Zhu-kovskogo «HAI». – 2000. – Vip. 17. – S. 33–38.

15. Kostyuk, G. I. The surface roughness of the detail the ion-plasma coating end the ion implantation and alloying [Text] / G. I. Kostyuk, A. K. Myalitsa, A. K. Goriov, A. G. Trushin and all // Novi tehnologiyi v mashinobuduvanni: materiali IH Mizhnar. konf., 3–7 veresnya 2000 g. – H., 2000. – S. 52–58.

16. Baranov, O. O. Razrabotka kombinirovannoj tehnologii dlya formirovaniya poverhnostnogo sloya aviacionnyh konstrukcionnyh materialov: dis. kand. tehn. nauk: 05.07.04 – tehnologiya proizvodstva letatelnyh appara-tov / O. O. Baranov // Nac. aerokosm. un-t im. N. E. Zhukovskogo "HAI", H. – 2000. – 207 s.

17. Kostyuk, G. I. Nanopokritiya i nanostrukturnye uprochnennyye sloi dlya povysheniya resursa i nadezhnosti detalej avyacionnyh dvigatelej [Tekst] / G. I.

Kostyuk, E. A. Volyak, V. A. Fadeev // HAI, BBK 72: 74 N56. – 2018. – S. 54.

18. Shirokij, Yu. V. Vibir tehnologichnih parametriv lazera dlya otrimannya zmicnyuyuchih pokrityv z nanostrukturami na instrumentalnij stali U12A [Tekst] / Yu. V. Shirokij, Yu. O. Sisoyev, O. V. Torosyan, G. D. Torosyan-Zhidyeyeva // Vidkriti informacijni ta komp'yuterni integrovani tehnologiyi: zbirnik naukovih prac / Nac. aerokosm. un-t im. M. Ye. Zhukovskogo "HAI". – Harkiv, 2023. – Vip. 97. – S. 111-125. <https://doi.org/10.32620/oikit.2023.97.07>

19. Baranov, O. Hierarchical Nanomaterials by Selective Deposition of Noble Metal Nanoparticles: Insight into Control and Growth Processes. [Text] / O. Baranov, T. Belmonte, I. Levchenko, K. Bazaka, M. Kosicek, U. Cvelbar // Advanced Theory and Simulations. – 2023. – No. 6. – Vol. 9. – R. 2300288. <https://doi.org/10.1002/adts.202300288>.

20. Prasad, K. Carbon Nanocomposites in Aerospace Technology: A Way to Protect Low-Orbit Satellites Weerasinghe Janith / Prasad Karthika, Mathew Joice, Trifoni Eduardo, Baranov Oleg, Levchenko Igor, Bazaka Kateryna // Nanomaterials. – 2023. – No. 13. – Vol. 11. – P.1763. <https://doi.org/10.3390/nano13111763>.

21. Shirokij, Yu.V. Modelyuvannya umov otrimannya nanostruktur v alyuminiyevih splavah pri diyi ionizuyuchogo viprominyuvannya [Tekst] / Yu. V. Shirokij, Yu. O. Sisoyev, T. V. Postelnik //Aviacijno-kosmichno tehnika ta tehnologiya: sb. nauch. tr. / Nac. aerokosm. un-t im. M. Ye. Zhukovskogo «HAI». Harkiv, 2022. – Vip. 2. – S.55-63, <https://doi.org/10.32620/akt.2022.2.07>

22. Kostyuk, G. I. Perspektivy primeneniya lazernoj obrabotki dlya sozdaniya nanostruktur na RI iz «VolKar» [Tekst] / G. I. Kostyuk, Yu. V. Shirokij / Visnik NTU «HPI». Seriya: Tehnologiyi v mashinobuduvanni. – Harkiv : NTU «HPI», 2017. – № 26(1248). – S. 60-65.

23. Perspektivy polucheniya nanostruktur pri dejstvii impulsnogo lazernogo izlucheniya na stali [Tekst] / G.I. Kostyuk, V.N. Pavlenko, Yu.V. Shirokij // Visnik NTU «HPI». Seriya: Tehnologiyi v mashinobuduvanni. – Harkiv : NTU «HPI», 2015. – № 40(1149). – S. 47-52. – Bibliogr.: 9 nazv. – ISSN 2079-004X.

24. Shirokij, Yu. V. Modelyuvannya dugovogo rozryadu na midnomu katodi dlya generaciyi nanostruktur [Tekst] / Yu. V. Shirokij, G. I. Kostyuk // Vidkriti informacijni ta komp'yuterni integrovani tehnologiyi: zb. nauk. prac / Nac. aerokosm. un-t im. M. Ye. Zhukovskogo «HAI». Harkiv, 2021. – Vip. 91. – S. 62-77, <https://doi.org/10.32620/oikit.2021.91.05>

25. Breus, A. O. Udoskonalennya kombinovanoyi plazmovo-ionnoyi tehnologiyi dlya otrimannya nanostruktur na poverhni rizhuchogo instrumentu: dis. kand. tehn. nauk / A. O. Breus // Nac. aerokosm. un-t im. M. Ye. Zhukovskogo "HAI", M-vo osviti i nauki Ukrayini; Harkiv, 2018. – 143 s.

26. Kostyuk, G. Improving the resource and reliability of details from zirconium alloys during the application of nanocoating and formation of nanostructures [Text] / G. Kostyuk, V. Popov // Bulletin of the National technical university "Kharkiv Polytechnic Institute" Series: Techniques in a machine industry. – 2019. – No. 19. – P. 40-50. <https://doi.org/10.20998/2079-004X.2019.1.07>

27. Kostyuk, G. Prospects for producing nanostructures in the volume of parts under the action of plasma flows [Text] / G. Kostyuk, O. Melkozirova, E. Kostyuk, I. Shyrokyi/ Rizannya ta instrumenti v tehnologichnih sistemah. – Harkiv: NTU «HPI». – 2020. – № 92.– S. 107-121. <https://doi.org/10.20998/2078-7405.2020.92.12>.

28. Kostyuk, G. I. O vozmozhnosti ispolzovaniya par treniya "pokrytie-pokrytie" i vybor par treniya "pokrytie-pokrytie" v mnogoslojnyh pokrytyah s uchetom ih

adgezionnogo vzaimodejstviya [Tekst] / G. I. Kostyuk, Yu. V. Shirokij // Visnik AINU. – Vip №.3. – 2011. – S. 36–40.

29. Shirokij, Yu. V. Viznachennya vplivu vnutrishnih energij kristalichnoyi reshitki na otrimannya nanostruktur u poverhnevih sharah alyuminiyevih splaviv [Tekst] / Yu. V. Shirokij, // Vidkriti informacijni ta komp'yuterni integrovani tehnologiyi: zb. nauk. prac / Nac. ayerokosm. un-t im. M. Ye. Zhukovskogo «HAI». Harkiv, 2023. – № 99. – S. 32–43. <https://doi.org/10.32620/oikit.2023.99.03>

30. Shirokij, Yu. V. Doslidzhennya temperaturnih poliv na stalyah z urahuvannyam kincevoyi shvidkosti rozpovsyudzhennya tepla pri modelyuvanni umov otrimannya nanostruktur u plazmovomu seredovishi [Tekst] / Yu. V. Shirokij, Yu. O. Sisoyev, K. V. Fesenko, T. O. Postelnik // Vidkriti informacijni ta komp'yuterni integrovani tehnologiyi: zb. nauk. prac / Nac. ayerokosm. un-t im. M. Ye. Zhukovskogo «HAI». Harkiv, 2024. – № 101. – S. 98–111. <https://doi.org/10.32620/oikit.2024.101.07>

Надійшла до редакції 23.12.2024; розглянута на редколегії 23.12.2024

Determination of Temperature Conditions for the Formation of Submicro- and Nanostructures Under Ion Impact on Magnesium Alloys in a Plasma Environment

Magnesium alloys exhibit high physico-mechanical properties, making them widely used in aerospace engineering. However, considering the high speeds and extreme temperatures at which modern aerospace structures, particularly engine components, operate, there is a need to enhance their performance characteristics. The use of ionizing radiation for forming nanostructured and submicrostructures layers on magnesium alloys requires the determination of optimal technological parameters. To address this, a theoretical study was conducted on the effect of ionizing radiation on the ML9 magnesium alloy using a previously proposed model. This model enables the resolution of not only heat conduction problems but also the analysis of the thermomechanical state in the zone of ionizing radiation exposure. As a result of the theoretical studies, dependencies of maximum temperatures, as well as maximum and minimum thermal stresses, on ion energy and charge were determined for a wide range of ions affecting magnesium alloys. These data can be used to assess the feasibility of nanostructure formation under specific processing conditions. Additionally, for certain metal ions in paired comparisons, conditions were established under which they generate similar temperature fields and thermal stresses. For example, the nickel-cobalt and molybdenum-hafnium pairs exhibit comparable effects on the material, allowing for the selection of the most cost-effective ion treatment option to obtain protective and strengthening coatings with submicro- or nanostructures. The obtained research results can be used to evaluate the potential for nanostructure formation under various technological regimes. The key factors for this assessment include temperature values, their rate of increase, as well as the maximum and minimum thermal stress values. A criterion for nanostructure formation can be considered as achieving the required temperature range (500–1500 K), temperature increase rates exceeding 10^7 K/s, and the presence of thermal stresses in the range of 10^7 – 10^9 Pa, which significantly accelerate the nano structuring process. The conducted research will be valuable in developing technologies for producing protective and strengthening coatings on magnesium alloys.

Keywords: temperature, thermal stresses, temperature increase rate, ions, ion energy, nanostructures, magnesium alloys.

Відомості про авторів:

Широкий Юрій Вячеславович – кандидат технічних наук, доцент, кафедри теоретичної механіки, машинознавства та роботомеханічних систем, Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського «ХАІ», Харків, Україна; i.shyrokyi@khai.edu; ORCID: 0000-0002-4713-0334

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 «ХАІ», Харків, Україна.

Торосян Олена Василівна – асист. каф. теоретичної механіки, машинознавства та роботомеханічних систем Національного аерокосмічного університету ім. М. Є. Жуковського «ХАІ», Харків, Україна.

Жидєєв Павло Романович – аспірант. кафедри теоретичної механіки, машинознавства та роботомеханічних систем Національного аерокосмічного університету ім. М. Є. Жуковського «ХАІ», Харків, Україна.

About the Author:

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

Sysoiev Iurii – 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.

Torosian Olena Vasilivna – Assistant of Dept. of Theoretical Mechanics, Engineering and Robotic Systems, National Aerospace University “Kharkiv Aviation Institute”, Kharkiv, Ukraine, e-mail: o.tarasyan@khai.edu, ORCID: 0000-0002-7389-6093.

Zhydieiev Pavel – PhD student, Department of Theoretical Mechanics, Mechanical Engineering, and Robotic Systems National Aerospace University “Kharkiv Aviation Institute”, Kharkiv, Ukraine,