

doi: 10.32620/oikit.2024.101.07

УДК 538.95

Ю. В. Широкий, Ю. О. Сисоєв,
К. В. Фесенко, Т. О. Постельник

Дослідження температурних полів на сталях з урахуванням кінцевої швидкості розповсюдження тепла при моделюванні умов отримання наноструктур у плазмовому середовищі

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

Основним завданням дослідження було визначення впливу зміни максимальних температур та температурних напружень під час дії лазерного випромінювання на оброблювальний матеріал (сталь 38Х) з урахуванням кінцевої швидкості розповсюдження тепла. Дослідження проводились на поверхні матеріалу та в його приповерхневому шарі при заданому тепловому потоці. Порівняння отриманих результатів показали, що в місці розповсюдження тепла з'являються певні зміни температур. При врахуванні кінцевої швидкості поширення тепла були знайдені додаткові стрибки температури, які в процесі розвитку температурних полів перемістилися від центральної частини до країв. Були розраховані температурні напруження з урахуванням теплопровідності та термопружності. Проаналізувавши зміну певних фізичних величин, знайдено характер розподілу температур на поверхні матеріалу та у приповерхневих шарах. Виявлено, що є наявність підвищення температурних напружень до 10% на ділянці максимальних градієнтів температур та до 30% у разі різкого стрибка температур. Якраз це і дає сприятливі умови для отримання наноструктур. При визначенні температурних умов для формування наноструктур, особливо для випадку короточасної дії лазерного випромінювання та високоенергетичних теплових потоків від 10^{10} Вт/м² і вище, врахування кінцевої швидкості розповсюдження тепла дає приріст температурних напружень до 10-20%, що може суттєво впливати на визначення технологічних параметрів, необхідних для отримання наноструктур. В той же час при нижчих значеннях теплових потоків та вищих часах дії ЛВ приріст температурних напружень буде менше 10%, що не суттєво вплине на визначення технологічних параметрів лазерного випромінювання. Проведені дослідження важливі для подальших теоретичних досліджень по створенню наноструктур на сталях у плазмовому середовищі.

Ключові слова: температура, швидкість зростання температури, температурні напруження, лазерне випромінювання, наноструктури, технологічні параметри.

Вступ

У сучасних технологіях існує багато методів зміцнення поверхневих шарів конструктивних матеріалів [1, 2]. На наш погляд особливу перспективу мають покриття з наноструктурами [3, 4]. Наноструктури на поверхні можуть значно підвищити зносостійкість деталей [5] або ефективність різального інструменту [6, 7], збільшуючи цим міцність поверхні, знижуючи пружність і підвищуючи межу міцності та ударну в'язкість [8]. Це дозволяє створювати модифіковані шари на деталях, що забезпечить підвищення ресурсу [5, 9] при роботі зі значними ударними навантаженнями [10] та довговічність [11].

На сьогодні розроблено багато методів отримання наноструктур, зокрема електрохімічні [12], лазерні [13], плазмові [14, 15]. Особливий інтерес викликають іонно-плазмові методи, які можуть використовуватися для створення тонких поверхневих або багатощарових наноструктур [4, 16]. Завдяки новим науковим дослідженням активно стали розвиватися методи вакуумно-дугових

нанотехнологій [17]. Були розглянуті впливи зміни валентності іонів за різних частот розряду у мікрокатодному дуговому двигуні [18]. Також було проведено дослідження різноманітних властивостей тонких наноструктур як наномеханічних [19], так і фізичних [20, 21]. При цьому слід зазначити, що основні напрями досліджень присвячено створенню наноструктур на поверхнях матеріалів [22], проте процес їх утворення у поверхневих шарах [4] і в глибині матеріалу вивчається менш активно [4, 23].

Слід зазначити, що сучасними вченими більше уваги приділяється опису отриманих експериментальних результатів та значно менше проводяться теоретичні дослідження, які б могли дозволити передбачати розмір нанозерен в залежності від технологічних параметрів обробки [3, 24]. Особливо це важливо при конструюванні деталей для авіаційної та космічної техніки [3, 25]. На цей час проведені дослідження впливу різних іонів на швидкість зростання температури та температурних напружень, необхідних для формування наноструктур на деяких конструкційних матеріалах [10, 19]. Дослідження впливу кінцевої швидкості розповсюдження тепла проводилось тільки для розмірної лазерної обробки, а дослідження її впливу на визначення температурних напружень при формуванні наноструктур у поверхневих шарах конструкційних матеріалів не проводились взагалі. В той же час слід зазначити, що є необхідність теоретичних досліджень щодо формування температурних умов у плазмовому середовищі при формуванні наноструктур на поверхні легованих сталей [4, 26]. Актуальним стає виявлення впливу кінцевої швидкості розповсюдження тепла на визначення температур та температурних напружень при знаходженні технологічних параметрів, необхідних для отримання наноструктур у поверхневих шарах цих матеріалів.

1. Теоретична частина

Для вирішення вищезазначеної задачі ми використовуємо попередньо розроблену модель теоретичних процесів у зоні дії лазерного випромінювання як джерела плазми [24, 26, 27], де при описі впливу джерела тепла на матеріал враховуються теплофізичні та термомеханічні процеси [28, 29]. Враховуючи елементи раніше проведеного нами дослідження впливу кінцевої швидкості розповсюдження тепла для розмірної лазерної обробки [26], проведемо подальше дослідження теплофізичних та термомеханічних характеристик легованих сталей під час формування наноструктур на поверхні сталі 38Х за допомогою лазерного випромінювання.

Це дозволяє нам підійти до розрахункових параметрів, які близькі до фізичних, що, в свою чергу, забезпечує більш точне визначення технологічних параметрів лазера для отримання наноструктур у поверхневому шарі легованої сталі 38Х.

1.1. Теоретична модель та постановка задачі дослідження

У раніше розглянутих задачах [28, 30] про дію лазерного випромінювання (ЛВ) передбачалася нескінченно велика швидкість поширення тепла. При вивченні короточасної теплової дії ЛВ, ймовірно, буде позначатися ефект кінцевої швидкості поширення тепла [29]. Диференціальне рівняння теплопровідності з урахуванням кінцевої швидкості розповсюдження тепла в лівій частині має доданок, пропорційний добутку другої похідної температури за часом

та часом релаксації – τ_p . З урахуванням цього, ліва частина рівняння балансу тепла набуває вигляду:

$$\frac{\partial T(x, y, z, t)}{\partial t} + \tau_p \frac{\partial T^2(x, y, z, t)}{\partial t^2}. \quad (1)$$

Для аналізу умов, у яких може бути суттєвим ефект кінцевої швидкості розповсюдження тепла, перепишемо праву частину цього рівняння в кінцевих різницях:

$$\frac{\Delta T}{\Delta t} + \tau_p \frac{\Delta T^2}{\Delta t^2} = \frac{\Delta T}{\Delta t} \left(1 + \tau_p \frac{\Delta T}{\Delta t} \right). \quad (2)$$

Якщо $\tau_p \frac{\Delta T}{\Delta t} \ll 1$, то не слід враховувати ефект кінцевої швидкості. При розв'язанні задач про дію ЛВ достатня точність рішення лежить у межах 10 % і, якщо зміни температури лежать в цих межах, то умову можна переписати у вигляді:

$$\frac{0,03}{\tau_p} \geq \frac{\Delta T}{\Delta t}, \text{ або } \Delta T \leq \frac{0,03}{\tau_p} \Delta t. \quad (3)$$

де Δt – це крок за часом при розв'язанні задачі методом кінцевих різниць, який можна прийняти рівним τ_p/n ;

τ_p – час, протягом якого розглядалася теплова задача.

Тоді, користуючись рівнянням для зміни температури на поверхні у просторі (одномірний випадок розповсюдження тепла), отримаємо вираз для критичних теплових потоків, при яких необхідно враховувати ефект кінцевої швидкості розповсюдження тепла:

$$q_{кр} = 0,015 \sqrt{\pi} \frac{2}{\sqrt{a\tau_p}} \sqrt{\frac{t_p}{n}}, \quad (4)$$

де n – число кроків за часом при розрахунку.

Приймаючи крок за часом при розрахунку $0,1 \tau_{дж}$ ($\tau_{дж}$ – час дії теплового джерела), отримаємо вираз для критичної щільності теплового потоку:

$$q_{кр} = 8,36 \cdot 10^{-2} \cdot \frac{2\sqrt{\tau_{дж}}}{\sqrt{a\tau_p}}. \quad (5)$$

У випадку теплових потоків великої щільності необхідно розглядати задачу з кінцевою швидкістю розповсюдження тепла.

Для розрахунку критичних щільностей теплових потоків необхідно визначити час релаксації теплових коливань атомів решітки.

Вважаємо, що теплове зміщення атомів решітки призводить до зсуву матеріалу, матеріал стає пружним. Водночас поступово через внутрішнє тертя відбувається зменшення амплітуди коливань решітки, з'являється в'язкість (плинність) тіла. Подібний феноменологічний підхід було розглянуто ще Максвеллом в 1868 році при вивченні властивостей аморфних тіл [29].

При розгляді пружного деформування кутову деформацію об'єму одиничного розміру під дією сили P_{xy} можна визначити за формулою:

$$\varphi = \frac{P_{xy}}{\sigma}, \quad (6)$$

де σ – модуль пружності другого роду.

Припустимо, що тверде тіло має не пружні, а в'язкі властивості. Тоді в аналізованому об'ємі під дією сили P_{xy} встановиться градієнт швидкості $\frac{\partial V_z}{\partial y}$:

$$\frac{\partial V_{xy}}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial y} \frac{\partial x}{\partial t} = \frac{d\varphi_2}{dt} = \frac{P_{xy}}{\eta}, \quad (7)$$

де η – коефіцієнт внутрішнього тертя (в'язкості).

Далі припустимо, що тверде тіло має властивості пружності і в'язкості, тоді для отримання результуючої деформації продиференціюємо рівняння (6) і складемо (7) і (8):

$$\frac{d\varphi_1}{dt} = \frac{1}{G} \frac{dP_{xy}}{dt}, \quad \frac{d\varphi_2}{dt} = \frac{1}{\eta} P_{xy}. \quad (8)$$

Позначивши $\varphi = \varphi_1 + \varphi_2$, отримаємо:

$$\frac{d\varphi}{dt} = \frac{1}{G} \frac{dP}{dt} + \frac{p}{\eta}. \quad (9)$$

Це рівняння описує тверде тіло, що має властивості пружності і в'язкості.

Розглянемо поведінку такого пружнооплинного тіла з підведенням тепла та припиненням дії сили. Для знаходження закону зміни сили при релаксації прирівняємо праву частину до нуля, оскільки деформація поступово обернеться на нуль:

$$\frac{1}{G} \frac{dP_{xy}}{dt} + \frac{p}{\eta} = 0. \quad (10)$$

Інтегруємо

$$\frac{1}{G} \frac{d}{dt} \ln P_{xy} + \frac{p}{\eta} = 0 \quad (11)$$

і отримуємо

$$\ln P = -\frac{Gt}{\eta}, \quad (12)$$

або

$$P = e^{-\frac{Gt}{\eta}}. \quad (13)$$

Сила P_{xy} в момент часу $t = 0$ залишається постійною як у випадку твердого пружного тіла, проте поступово релаксує і врешті-решт перетворюється в нуль.

Практично швидкість релаксації можна визначити як проміжок часу, за який сила зменшується в e раз. Тоді час визначимо за формулою:

$$\frac{\sigma t}{\eta}, \quad \text{тобто} \quad t = \frac{\eta}{\sigma} \quad (14)$$

Видно, що час релаксації залежить від величини коефіцієнта в'язкості і модуля пружності другого роду, тобто є характеристикою матеріалу. Очевидно,

час передачі енергії дорівнює часу релаксації, оскільки за цей час здійснюється передача енергії від одного атома іншим.

Час релаксації теплопереносу, очевидно, пов'язано з дисипативними (в'язкими) властивостями матеріалу, тобто така апроксимація справедлива.

Так, існує порівняння величини часу релаксації теплоперенесення та періоду коливань атомної решітки [26, 30]. Видно, що зниження амплітуди коливань у e раз відбувається на декілька десятків коливань, що говорить про реальність отриманих величин часу релаксації цим методом. Розмір часу релаксації лежить у діапазоні $4 \cdot 10^{-11}$ до $1,38 \cdot 10^{-10}$ с.

Проведемо аналіз характеристик теплових джерел, за яких необхідно враховувати кінцеву швидкість розповсюдження тепла. Вираз (6) показує взаємозв'язок між критичною щільністю потоку (перевищення якого говорить про необхідність урахування кінцевої швидкості поширення тепла), часом релаксації теплових коливань атомної решітки, часом дії джерела, а також з теплофізичними характеристиками матеріалу. Для мішеней з алюмінію, нікелю, міді, заліза, олова та вісмуту надано залежності критичної щільності теплового потоку від часу дії теплового джерела. В кінцевому випадку для будь-якого матеріалу можна знайти критичні щільності теплового потоку для різних часів дії за виразом з урахуванням часу релаксації коливань атома τ_p представлений в роботі [26].

Для досягнення поставленого завдання вирішувалася задача теплопровідності та термопружності з урахуванням кінцевої швидкості поширення тепла аналогічно [26, 30].

2. Результати розрахунку та їх обговорення

Проведено розрахунки полів температур та температурних напружень. Так на рис. 1 наведено температурні поля сталі 38Х на поверхнях $x=0$, $x=0,5\sqrt{\alpha\tau}$ і $x=\sqrt{\alpha\tau}$ при тепловому потоці $3 \cdot 10^{10}$ Вт/м², $V_n=0$, $\tau_n=10^{-6}$ с, при розгляді задачі теплопровідності з урахуванням кінцевої швидкості поширення тепла, а на рис. 2 наведено температурні поля для тих самих умов, отримані для нескінченної швидкості поширення тепла.

Порівняння цих рисунків дозволяє провести аналіз результатів, з якого видно, що облік кінцевої швидкості розповсюдження тепла призводить до отримання температур на 70°К більше, на поверхнях $x=0$ і $x=0,5\sqrt{\alpha\tau}$ реалізуються стрибки температур у зоні межі розповсюдження тепла. Ці стрибки температур, очевидно, пов'язані з кінцевою швидкістю поширення тепла, і в процесі розвитку температурних полів переміщатимуться від центральної частини до периферії; протяжність зони стрибка, логічно припустити, дорівнюватиме періоду решітки. Градієнти температур, незважаючи на невеликий стрибок, за величиною через малі зони будуть великі і можуть призводити до значних динамічних температурних напружень. Були розраховані температурні напруження при доповненні задачі теплопровідності задачею термопружності.

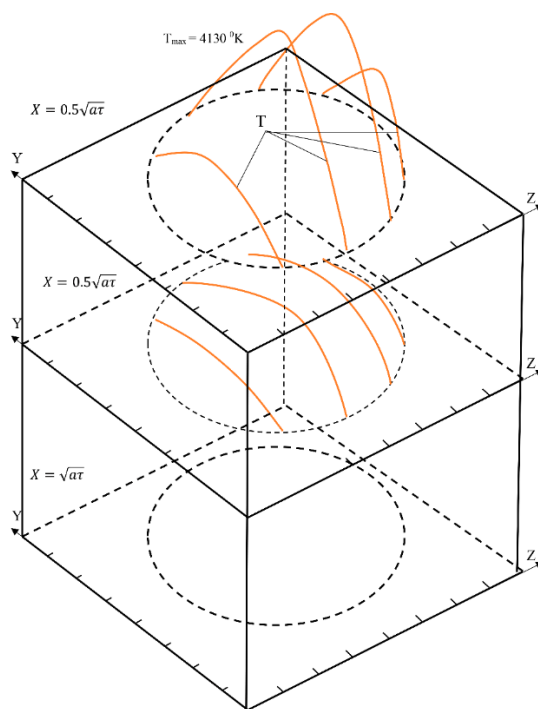


Рис. 1. Температурні поля в зоні дії ЛВ на сталі 38Х при врахуванні кінцевої швидкості розповсюдження тепла ($q = 3 \cdot 10^{10} \text{ Вт/м}^2$)

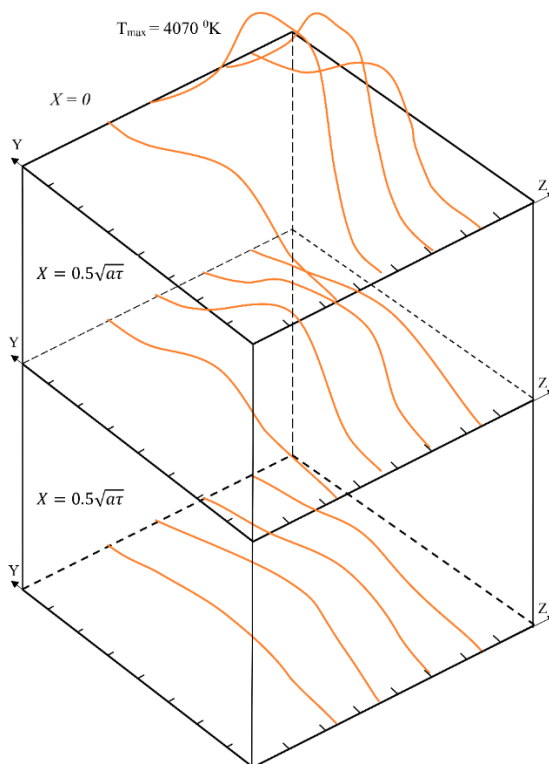


Рис. 2. Температурні поля в зоні дії ЛВ на сталі 38Х при нескінченній швидкості розповсюдження тепла

Так, на рис. 2 видно, що на відміну від характеру розподілу полів температурних напружень, отриманих при розгляді нескінченної швидкості поширення тепла, температури за рахунок більш значних градієнтів температур

для кінцевої швидкості поширення тепла в зоні теплового впливу призводять до більш значних температурних напружень, а в зоні стрибка температур з'являється ще один максимум температурних напружень, причому значення максимальних напружень в обох максимумах можна порівняти ($\sigma_{max} = 2,8 \cdot 10^9$ Н/м² і $\sigma'_{max} = 9,2 \cdot 10^8$ Н/м²), що говорить про необхідність обліку останніх, особливо для випадку малих часів дії лазерного випромінювання. В той же час це говорить, що при визначенні температурних умов для формування наноструктур, особливо для випадку малих часів дії ЛВ та високоенергетичних теплових потоків від 10^9 Вт/м² і вище [29, 30] врахування кінцевої швидкості розповсюдження тепла дасть приріст температурних напружень у діапазоні 10-20%, що може суттєво вплинути на визначення технологічних параметрів ЛВ, необхідних для отримання наноструктур. В той же час при нижчих значеннях теплових потоків та вищих часах дії ЛВ приріст температурних напружень буде менше 10%, що не суттєво вплине на визначення технологічних параметрів ЛВ.

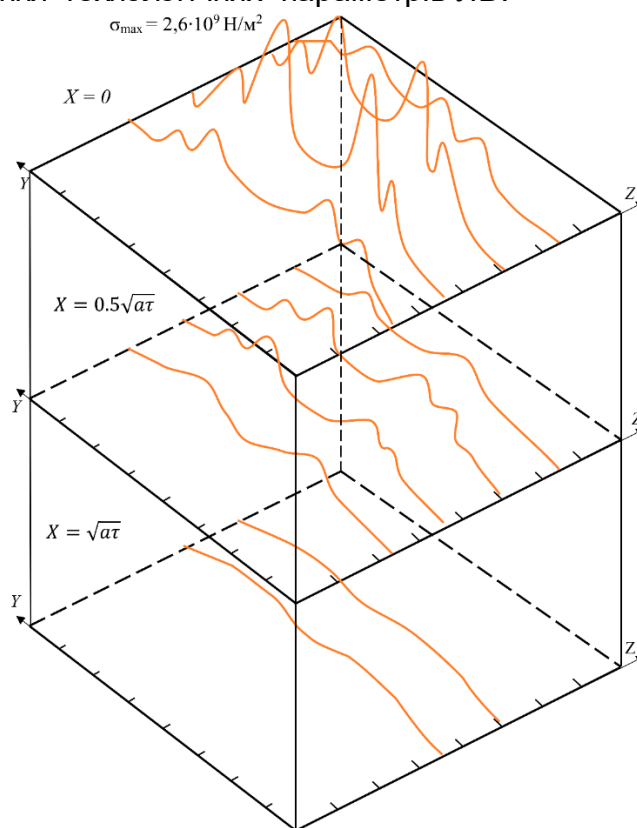


Рис. 3. Розподіл температурних напружень у зоні нерухокої плями при дії ЛВ ($q = 1,5 \cdot 10^{10}$ Вт/м², $\tau_n = 10^{-6}$ с) на сталь 38Х

Висновки

При розгляді теплової задачі дії ЛВ на сталь 38Х з урахуванням обліку кінцевої швидкості поширення тепла розраховано характер розподілу температур та виявлено, що на поверхні ($x=0$) та на глибині ($x=0,5\sqrt{at}$), з'являються стрибки першого роду температур. Також доведено, що підвищується максимальна температура за рахунок зниження ефекту теплопровідності. Було виявлено підвищення величина температурних напружень в зоні поширення максимальних градієнтів температур до 10 %.

У зоні стрибка температур з'являється додатковий максимум температурних напружень, який ставить до 30% від σ_{max} . Також було визначено, що при критичних щільностях теплових потоків $q = 10^{10} - 2 \cdot 10^{10}, \text{Вт/м}^2$, що відповідає умовам розмірної обробці, необхідно враховувати кінцеву швидкість розповсюдження тепла. Також при визначенні температурних умов для формування наноструктур, особливо для випадку малих часів дії ЛВ та високоенергетичних теплових потоків від 10^{10}Вт/м^2 і вище, врахування кінцевої швидкості розповсюдження тепла дасть приріст температурних напружень у діапазоні 10-20%, що може суттєво вплинути на визначення технологічних параметрів ЛВ, необхідних для отримання наноструктур. В той же час при нижчих значеннях теплових потоків та вищих часах дії ЛВ приріст температурних напружень буде менше 10%, що не суттєво вплине на визначення технологічних параметрів ЛВ. Все це буде затребувано при розробці технології отримання наноструктур на сталях та подальших теоретичних дослідженнях створення наноструктур у плазмовому середовищі.

Список літератури

1. 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", Харьков. – 2000. – 207 с.
2. Kostyuk, G. Improving the resource and reliability of details from zirconium alloys during the application of nanocoating and formation of nanostructures / 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>
3. Levchenko, I. Recent progress and perspectives of space electric propulsion systems based on smart nanomaterials / I. Levchenko, S. Xu, G. Teel, et al // Nat. Commun. – 2018.– Vol 9.–P. 879. <https://doi.org/10.1038/s41467-017-02269-7>
4. Костюк, Г. И. Нанопокрyтия и наноструктурные упрочненные слои для повышения ресурса и надежности деталей авиационных двигателей / Г. И. Костюк, Е. А. Воляк, В. А. Фадеев // ХАИ, ББК 72: 74 Н56. – 2018. – С. 54.
5. Kostyuk, G. I. Design of new nanocoatings based on hard alloy / G. I. Kostyuk, Yu. V. Shyrokyi, H. V. Yevsieienkova // Proceedings of XIII international conference on modern achievements of science and education. September 16-23 2020. – Netanya, Israel. – 2020. – P. 94-96.
6. Kostyuk, G. Prospects for producing nanostructures in the volume of parts under the action of plasma flows / G. Kostyuk, O. Melkoziorova, E. Kostyuk, Yu. Shyrokyi // Різання та інструменти в технологічних системах, ХНТУ «ХПІ». – 2020. – № 92. – С. 107–121. <https://doi.org/10.20998/2078-7405.2020.92.12>
7. Nanostructured Coatings Based on Amorphous Carbon and Gold Nanoparticles Obtained by the Pulsed Vacuum-Arc Method / 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. Yaprntsev, V. V. Sirota, O. V. Glukhov // Journal of nano- and electronic physics. – 2019. – Vol. 11, No. 4. – P. 04019
8. 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 "Харків. авіац. ін-т", Харків. – 2018. – 143 с.

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

10. Kostyuk, G. Determination of Technological Parameters for Obtaining Nanostructures under Pulse Laser Radiation on Steel of Drone Engine Parts / G. Kostyuk, M. Nechyporuk, and K. Kostyk // 10th International Conference on Dependable Systems, Services and Technologies (DESSERT), Leeds, UK. – 2019. – P. 208-212. <https://doi.org/10.1109/DESSERT.2019.8770053>

11. 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>.

12. Ghalmi, Z. Durability of nanostructured coatings based on PTFE nanoparticles deposited on porous aluminum alloy / Z. Ghalmi, M. Farzaneh // Applied Surface Science. – 2014. – Vol. 314. – P. 564-569, <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2014.05.194>

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

14. Khan, M. A. Microplasma-assisted synthesis of CuO nanostructures for catalytic degradation of organic dyes under solar irradiation / M. A. Khan, M. H. Muhammad, M. S. Khan, T. Iqbal, A. Pervaiz, M. Shafique, M. Naeem // J Solid State Electrochem. – 2020. – No. 24. – P. 1123-1132. <https://doi.org/10.1007/s10008-020-04602-5>

15. Широкий, Ю. В. Моделювання дугового розряду на мідному катоді для генерації наноструктур / Ю. В. Широкий, Г. І. Костюк // Відкриті інформаційні та комп'ютерні інтегровані технології. – 2021. – Вип. 91. – С. 62–77. <https://doi.org/10.32620/oikit.2021.91.05>

16. Широкий, Ю. В. Вибір технологічних параметрів лазера для отримання зміцнюючих покриттів з наноструктурами на інструментальній сталі У12А / Ю. В. Широкий, Ю. О. Сисоєв, О. В. Торосян, Г. Д. Торосян-Жидеева // Відкриті інформаційні та комп'ютерні інтегровані технології. – 2023. – Вип. 97. – С. 111-125. <https://doi.org/10.32620/oikit.2023.97.07>

17. Baranov, O. Formation of 2D Copper Oxide Nanostructures on Substrates Exposed to Glow Discharge Plasma / O. Baranov // Lecture Notes in Mechanical Engineering. 5th Grabchenko's International Conference on Advanced Manufacturing Processes. – 2023. – P. 247-255. https://doi.org/10.1007/978-3-031-42778-7_22

18. Lin, W. Structural characteristics of nanocrystalline copper after carbon ion implantation / Wan-ming Lin, Ying-hui Wei, Hua-yun Du, Li-feng Hou, Guo-dong Wang, Hai-xiang Bi, Bing-she Xu // Micron. – 2011. – Vol. 42. – No. 7. – P. 691–694. <https://doi.org/10.1016/j.micron.2011.03.007>

19. Popov, V. Study of Ions Energy, Their Varieties and Charge on Temperature, Rate of Temperature Rise, Thermal Stresses for Nanostructures on Construction Materials / V. Popov, G. Kostyuk, M. Nechyporuk, K. Kostyk // Grabchenko's International Conference on Advanced Manufacturing Processes.

Advanced Manufacturing Processes. InterPartner 2019. Lecture Notes in Mechanical Engineering. Springer, Cham. – 2019. – P. 107–121.

20. Широкий, Ю. В. Моделювання електроерозійних процесів на графітових електродах при формуванні наноструктур у плазмовому середовищі / Ю. В. Широкий // Відкриті інформаційні та комп'ютерні інтегровані технології. – 2021. – №. 94. – С. 58–76. <https://doi.org/10.32620/oikit.2021.94.06>

21. Кантемир, І. В. Удосконалення процесів створення наноструктур у плазмово-іонних та лазерних технологіях для підвищення ефективності різального інструменту : дис. канд. техн. наук : 05.03.07 – процеси фізико - техн. оброб. / І. В. Кантемир // Нац. аерокосм. ун-т ім. М. Є. Жуковського "Харків. авіац. ін-т". – Харків. – 2018. – 190 с.

22. Костюк, Г. И. Нанотехнологии: теория, эксперимент, техника, перспективы: моногр. / Г. И. Костюк. – Изд. центр Междунар. академии наук и инновац. Технологий, Киев. – 2012. – 648 с.

23. Kostyuk, G. Prospects for producing nanostructures in the volume of parts under the action of plasma flows / G. Kostyuk, O. Melkozirova, E. Kostyuk, Yu. Shirokiy. // Development and tools in technological systems, KhNTU "KhPI". – 2020. – No. 92. – P. 107-121. – <https://doi.org/10.20998/2078-7405.2020.92.12>

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

25. Широкий, Ю. В. Моделювання умов отримання наноструктур в алюмінієвих сплавах при дії іонізуючого випромінювання / Ю. В. Широкий, Ю. О. Сисоєв, Т. В. Постельник // Авіаційно-космічно техніка та технологія. – Харків. – 2022. – Вип. 2. – С. 55–63. <https://doi.org/10.32620/akt.2022.2.07>

26. Широкий, Ю. В. Оценка режимов лазерной обработки, при которых необходимо учитывать конечную скорость распространения тепла при решении совместной задачи теплопроводности и термоупругости / Ю. В. Широкий // Відкриті інформаційні та комп'ютерні інтегровані технології. – Харків. – 2015. – Вип. 58. – С. 33-40.

27. Костюк, Г. И. Теоретическое исследование действия ионизирующего излучения на конструкционные материалы и образование наноструктур в алюминиевом сплаве Д16Т / Г. И. Костюк, Бехзад Размджуи, Ю. В. Широкий, Ю. С. Панченко / Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии. – Харьков. – 2015. – Вып. 68. – С. 20-25.

28. Костюк, Г. И. Исследование влияния технологических параметров лазерной обработки на поля температур и напряжений / Г. И. Костюк, Ю. В. Широкий, К. П. Исяк и др. / Вісті АНУ. – 2009. – №1(38). – С.39–43.

29. Широкий, Ю. В. Вибір технологічних параметрів лазера для отримання наноструктур на інструментальній сталі У12А / Ю. В. Широкий, Ю. О. Сисоєв, О. В. Торосян, Г. Д. Торосян-Жидеева // Відкриті інформаційні та комп'ютерні інтегровані технології. – 2023. – Вип. 97. – С. 111–125. <https://doi.org/10.32620/oikit.2023.97.07>

30. Попов, В. В. Концепція та принципи конструювання деталей агрегатобудування, їх ефективного формоутворення різальним інструментом з наноструктурами : дис. д-ра техн. наук / В. В. Попов // Нац. аерокосм. ун-т ім. М. Є. Жуковського "Харків. авіац. ін-т". – Харків. – 2020. – 505 с.

References

1. Baranov, O. O. Razrabotka kombinirovannoy tekhnologii dlya formirovaniya poverkhnostnogo sloya aviatsionnykh konstruksionnykh materialov : dis. kand. tekhn. nauk : 05.07.04 – tekhnologiya proizvodstva letatel'nykh apparatov / O. O. Baranov // Nats. aerokosm. un-t im. N. Ye. Zhukovskogo "KhAI", Kharkov. – 2000. – 207 s.
2. Kostyuk, G. Improving the resource and reliability of details from zirconium alloys during the application of nanocoating and formation of nanostructures / 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>
3. Levchenko, I. Recent progress and perspectives of space electric propulsion systems based on smart nanomaterials / I. Levchenko, S. Xu, G. Teel, et al // Nat Commun. – 2018.– Vol 9. – P. 879. <https://doi.org/10.1038/s41467-017-02269-7>
4. Kostyuk, G. I. Nanopokrytiya i nanostrukturnye uprochnennyye sloi dlya povysheniya resursa i nadezhnosti detaley aviatsionnykh dvigateley / G. I. Kostyuk, E. A. Volyak, V. A. Fadeev // KhAI, BBK 72:74 N56. – 2018. – S. 54.
5. Kostyuk, G. I. Design of new nanocoatings based on hard alloy / G. I. Kostyuk, Yu. V. Shyrokyi, H. V. Yevsieienkova // Proceedings of XIII international conference on modern achievements of science and education. September 16-23 2020. – Netanya, Israel. – 2020. – P. 94–96.
6. Kostyuk, G. Prospects for producing nanostructures in the volume of parts under the action of plasma flows / G. Kostyuk, O. Melkoziorova, E. Kostyuk, Yu. Shyrokyi // Різання та інструменти в технологічних системах, ХНТУ «ХПІ». – 2020. – № 92. – С. 107–121. <https://doi.org/10.20998/2078-7405.2020.92.12>
7. Nanostructured Coatings Based on Amorphous Carbon and Gold Nanoparticles Obtained by the Pulsed Vacuum-Arc Method / 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. Yaprntsev, V. V. Sirota, O. V. Glukhov // Journal of nano- and electronic physics. – 2019. – Vol. 11, No. 4. – P. 04019
8. Breus, A. O. Udoskonalennia kombiinovanoi plazmovo-ionnoi tekhnologii dlia otrymannia nanostruktur na poverkhni rizhuchoho instrumentu: dys. kand. tekhn. nauk / A. O. Breus // Nats. aerokosm. un-t im. M. Ye. Zhukovskoho "Kharkiv. aviats. in-t", Kharkiv. – 2018. – 143 s.
9. Kostyuk, G. Volume of the Nanocluster and Its Depth at Effect of Ions of Different Energies, Varieties and Charges on Titanium Alloy VT-1 / G. Kostyuk, V. Popov, K. Kostyk // Advanced Manufacturing Processes. InterPartner 2019. Lecture Notes in Mechanical Engineering, Springer, Cham. – 2019. – P. 415–423.
10. Kostyuk, G. Determination of Technological Parameters for Obtaining Nanostructures under Pulse Laser Radiation on Steel of Drone Engine Parts / G. Kostyuk, M. Nechporuk, and K. Kostyk // 10th International Conference on Dependable Systems, Services and Technologies (DESSERT), Leeds, UK. – 2019. – P. 208-212. <https://doi.org/10.1109/DESSERT.2019.8770053>
11. 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>.
12. Ghalmi, Z. Durability of nanostructured coatings based on PTFE nanoparticles deposited on porous aluminum alloy / Z. Ghalmi, M. Farzaneh // Applied Surface

Science. – 2014. – Vol. 314. – P. 564–569, <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2014.05.194>

13. Kostiuk, G. I. Perspektyvy zastosuvannya lazernoï obrobky dlia stvorennia nanostruktur na RI iz "VolKar" / G. I. Kostiuk, Yu. V. Shyrokyi // Visnyk NTU "KhPI". Seriya: Tekhnologii v mashynobuduvanni. – 2017. – № 26(1248). – S. 60–65.

14. Khan, M. A. Microplasma-assisted synthesis of CuO nanostructures for catalytic degradation of organic dyes under solar irradiation / M. A. Khan, M. H. Muhammad, M. S. Khan, T. Iqbal, A. Pervaiz, M. Shafique, M. Naeem // J Solid State Electrochem. – 2020. – No. 24. – P. 1123-1132. <https://doi.org/10.1007/s10008-020-04602-5>

15. Shyrokyi, Yu. V. Modeliuvannya duhovoho rozriadu na midnomu katodi dlia heneratsii nanostruktur / Yu. V. Shyrokyi, G. I. Kostiuk // Vidkryti informatsiini ta komp'uterni intehrovani tekhnologii. – 2021. – Vyp. 91. – S. 62–77. <https://doi.org/10.1007/s10008-020-04602-5>

16. Shyrokyi, Yu. V. Vybir tekhnologichnykh parametriv lazera dlia otrymannia zmitsniuiuchykh pokryttiv z nanostrukturamy na instrumentalnii stali U12A / Yu. V. Shyrokyi, Iu. O. Sysoiev, O. V. Torosian, H. D. Torosian-Zhydieieva // Vidkryti informatsiini ta komp'uterni intehrovani tekhnologii. – 2023. – Vyp. 97. – S. 111–125. <https://doi.org/10.32620/oikit.2021.91.05>

17. Baranov, O. Formation of 2D Copper Oxide Nanostructures on Substrates Exposed to Glow Discharge Plasma / O. Baranov // Lecture Notes in Mechanical Engineering. 5th Grabchenko's International Conference on Advanced Manufacturing Processes. – 2023. – P. 247–255. https://doi.org/10.1007/978-3-031-42778-7_22

18. Lin, W. Structural characteristics of nanocrystalline copper after carbon ion implantation / Wan-ming Lin, Ying-hui Wei, Hua-yun Du, Li-feng Hou, Guo-dong Wang, Hai-xiang Bi, Bing-she Xu // Micron. – 2011. – Vol. 42. – No. 7. – P. 691–694. <https://doi.org/10.1016/j.micron.2011.03.007>

19. Popov, V. Study of Ions Energy, Their Varieties and Charge on Temperature, Rate of Temperature Rise, Thermal Stresses for Nanostructures on Construction Materials / V. Popov, G. Kostyuk, M. Nechyporuk, K. Kostyk // Grabchenko's International Conference on Advanced Manufacturing Processes. Advanced Manufacturing Processes. InterPartner 2019. Lecture Notes in Mechanical Engineering. Springer, Cham. – 2019. – P. 107–121.

20. Shyrokyi, Yu. V. Modeliuvannya elektroeroziinykh protsesiv na hrafitovykh elektrodam pry formuvanni nanostruktur u plazmovomu seredovyshchi / Yu. V. Shyrokyi // Vidkryti informatsiini ta komp'uterni intehrovani tekhnologii. – 2021. – № 94. – P. 58–76. <https://doi.org/10.32620/oikit.2021.94.06>

21. Kantemyr, I. V. Udoskonalennia protsesiv stvorennia nanostruktur u plazmovo-ionnykh ta lazernykh tekhnologiiakh dlia pidvyshchennia efektyvnosti rizalnoho instrument : dys. kand. tekhn. nauk : 05.03.07 – protsesy fizyko-tekhn. obrob. / I. V. Kantemyr // Nats. aerokosm. un-t im. M. Ye. Zhukovskoho "Kharkiv. aviats. in-t". – Kharkiv. – 2018. – 190 s.

22. Kostiuk, G. I. Nanotekhnologii: teoriia, eksperiment, tekhnika, perspektyvy: monohrafiia / G. I. Kostiuk. – Izd. tsentr Mezhdunar. akademii nauk i innovats. Tekhnologii, Kiev. – 2012. – 648 s.

23. Kostyuk, G. Prospects for producing nanostructures in the volume of parts under the action of plasma flows / G. Kostyuk, O. Melkozirova, E. Kostyuk, Yu. Shirokiy. // Development and tools in technological systems, KhNTU "KhPI". – 2020. – No. 92. – P. 107-121. – <https://doi.org/10.20998/2078-7405.2020.92.12>

24. Kostiuk, G. I., Perspektyvy polucheniia nanostruktur pri deistvii impulsnoho lazernoho izlucheniia na stali / G. I. Kostiuk, V. N. Pavlenko, Yu. V. Shyrokyi // Visnyk NTU «KhPI». Seriya: Tekhnologii v mashynobuduvanni. – Kharkiv. – 2015. – № 40(1149). – P. 47-52.

25. Shyrokyi, Yu. V. Modeliuvannia umov otrymannia nanostruktur v aliuminiievkykh splavakh pry dii ionizuiuchoho vyprominiuvannia / Yu. V. Shyrokyi, Iu. O. Sysoiev, T. V. Postelnyk // Aviatsiino-kosmichna tekhnika ta tekhnolohiia. – Kharkiv. – 2022. – Vyp. 2. – P. 55-63.

26. Shyrokyi, Yu. V. Otsenka rezhymiv lazernoi obrobky, pry yakykh neobkhdno utrymuvaty konechniu shvydkist rozprostrannenniia tepla pry reshenni sobivnoi zadachi teploprovodnosti i termoupruhosti / Yu. V. Shyrokyi // Vidkryti informatsiini ta kompiuterni intehrovani tekhnolohii. – Kharkiv. – 2015. – Vyp. 58. – P. 33–40.

27. Kostyuk, G. I. Teoretychne doslidzhenia dii ionizuiuchoho izluchenniia na konstruktsiini materialy i obriaduvannia nanostruktur v alyuminiievomu splave D16T / G. I. Kostyuk, Bekhzad Razmdzhui, Yu. V. Shyrokyi, Yu. S. Panchenko / Vidkryti informatsiini i komp'iuterni intehrovani tekhnolohii. – Kharkiv. – 2015. – Vyp. 68. – S. 20–25.

28. Kostyuk, G. I. Isledovanie vliianiia tekhnolohicheskikh parametrov lazernoi obrabotki na polia temperatur i napriazhenii / G. I. Kostyuk, Yu. V. Shyrokyi, K. P. Isiak i dr. / Visty AINU. – 2009. – №1(38). – P. 39–43.

29. Shyrokyi, Yu. V. Vybir tekhnolohichnykh parametriv lazera dlia otrymannia nanostruktur na instrumentalnii stali U12A / Yu. V. Shyrokyi, Iu. O. Sysoiev, O. V. Torosian, H. D. Torosian-Zhidiieieva // Vidkryti informatsiini ta komp'iuterni intehrovani tekhnolohii. – 2023. – Vyp. 97. – P. 111–125. <https://doi.org/10.32620/oikit.2023.97.07>

30. Popov, V. V. Kontsepsiia ta pryntsypy konstruktyvannia detaley ahrehatobuduvannia, yikh efektyvnoho formo utvorennia rizalnym instrumentom z nanostrukturamy : dys. d-ra tekhn. nauk / V. V. Popov // Nats. aerokosm. un-t im. M. Ye. Zhukovs'koho "Kharkiv. aviats. in-t". – Kharkiv. – 2020. – 505 s.

Надійшла до редакції 21.10.2024, розглянута на редколегії 21.10.2024

Study of Temperature Fields in Steels Considering the Finite Speed of Heat Propagation During the Simulation of Nanostructure Formation Conditions in a Plasma Environment

The primary objective of the study was to determine the impact of variations in maximum temperatures and thermal stresses during laser radiation exposure on the material being processed (steel 38X), taking into account the finite speed of heat propagation. The research was conducted on the material surface and its near-surface layer under a specified heat flux. A comparison of the obtained results showed that certain temperature variations occur in the area of heat propagation. When the finite speed of heat propagation was considered, additional temperature jumps were identified, which, during the development of the temperature fields, shifted from the central part to the edges. Thermal stresses were calculated considering thermal conductivity and thermoelasticity. Analyzing the changes in certain physical parameters revealed the nature of the temperature distribution on the material surface and in its near-surface layers. It was found that there is an increase in thermal stresses of up to 10% in regions of maximum temperature gradients and up to 30% in cases of

sharp temperature jumps. These circumstances create favorable conditions for nanostructure formation. When determining the thermal conditions for the formation of nanostructures, especially in the case of short-term laser radiation exposure and high-energy heat fluxes of 10^{10} W/m² and above, considering the finite speed of heat propagation results in an increase in thermal stresses up to 10-20%, which can significantly affect the determination of the technological parameters required for nanostructure formation. At the same time, for lower heat flux values and longer laser radiation exposure times, the increase in thermal stresses will be less than 10%, which will not significantly influence the determination of laser radiation technological parameters. The conducted research is important for further theoretical studies on the creation of nanostructures on steels in a plasma environment.

Keywords: temperature, rate of temperature increase, thermal stresses, laser radiation, nanostructures, technological parameters.

Відомості про авторів:

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

Сисоєв Юрій Олександрович – старш. наук. співроб., д-р техн. наук, професор кафедри теоретичної механіки, машинознавства та роботомеханічних систем, Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського «Харківський авіаційний інститут», Харків, Україна. ORCID: 0000-0001-5006-8546, i.sysoiev@khai.edu.

Фесенко Ксенія Володимирівна – доцент, канд. техн. наук, доцент кафедри теорії авіаційних двигунів, Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського «Харківський авіаційний інститут», Харків, Україна. ORCID: 0000-0003-3979-1789, k.fesenko@khai.edu.

Постельник Тетяна Олександрівна – асистент кафедри теоретичної механіки, машинознавства та роботомеханічних систем, Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського «Харківський авіаційний інститут», Харків, Україна. ORCID 0000-0001-5898-0273, t.postelnik@khai.edu.

About the authors:

Shyrokyi Yurii – PhD, Professor of Department of Theoretical Mechanics, Engineering and Robotic Systems, National Aerospace University “Kharkiv Aviation Institute”, Kharkiv, Ukraine. ORCID: 0000-0002-4713-0334, i.shyrokyi@khai.edu.

Sysoiev Iurii – Doctor of Technical Sciences, Professor of Department of Theoretical Mechanics, Engineering and Robotic Systems, National Aerospace University “Kharkiv Aviation Institute”, Kharkiv, Ukraine. ORCID: 0000-0001-5006-8546, i.sysoiev@khai.edu.

Fesenko Kseniia – PhD, Associate Professor of Department of Aircraft Engines Theory, National Aerospace University “Kharkiv Aviation Institute”, Kharkiv, Ukraine. ORCID: 0000-0003-3979-1789, k.fesenko@khai.edu.

Postelnyk Tatiana – Assistant Professor of Department of Theoretical Mechanics, Engineering and Robotic Systems, National Aerospace University “Kharkiv Aviation Institute”, Kharkiv, Ukraine. ORCID 0000-0001-5898-0273, t.postelnik@khai.edu.