

doi: 10.32620/oikit.2023.98.07

УДК 538.95

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

Визначення технологічних параметрів лазерного випромінювання для отримання субмікро- та наноструктур у зміцнювальних покриттях на сталях

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

Використовуючи попередньо розроблену модель теоретичних процесів у зоні дії лазерного випромінювання, де при описі впливу іонізованого випромінювання на матеріал враховуються теплофізичні та термомеханічні процеси з урахуванням впливу енергії кристалізації та інших внутрішніх енергій під час утворення наноструктур та на окремих температурних рівнях. Було проведено подальше дослідження теплофізичних та термомеханічних характеристик різних конструкційних сталей під час формування наноструктур на їхніх поверхнях за допомогою лазерного випромінювання. Для загальної перевірки моделі було визначено температурні поля в зоні дії лазерного випромінювання на сталі 20 (рис. 1. а) та сталі 50 (рис. 1. б), причому розрахунки проводили як для процесу нагрівання так і для охолодження. Розрахунки проводили для щільностей теплового потоку і часу його дії які близькі до необхідних для отримання наноструктур (500...2000 K), та при швидкості наростання температури, що перевищує 10^7 K/c. В результаті розрахунків за уточненою тепловою моделлю було отримано розподіли температур на глибині 1 мкм під час дії лазерного випромінювання на сталі з різним вмістом вуглецю (сталі 20, 38Х, 50 та У8) при різних пікових щільностях теплового потоку в поверхневому шарі. Побудовано просторово-часову картину розподілу температур по радіусу плями і в часі при дії лазерного випромінювання з щільністю теплового потоку $q = 3 \cdot 10^8$ Вт/м² при радіусі плями 0,1 мм. Визначено зони утворення наноструктур залежно від щільності теплового потоку від часу дії лазерного випромінювання. Проведені теоретичні дослідження за оновленою тепловою моделлю підтвердили, що необхідно враховувати швидкість наростання температури бо при їх перевищенні виникає ймовірність термопружного руйнування під дією температурних напруг. Саме тоді, через недостатніх швидкостях наростання температури, при лазерному формування наноструктур у поверхневих шарах вуглецевих сталей, буде утворюються більше мікро-і суб-мікроструктур.

Ключові слова: наноструктура, лазерне випромінювання, температура, тепловий потік, сталь температурні напруги, технологічні параметри.

Вступ

Наноструктури на поверхні можуть значно підвищити ефективність деталей [1, 2] та різального інструменту [3], збільшуючи міцність поверхні, знижуючи пружність і підвищуючи межу міцності та ударну в'язкість. Це дозволяє створювати шари на деталях, які забезпечують підвищення ресурсу [4] при роботі зі значними ударними навантаженнями і забезпечують довговічність [5].

Існують різноманітні методи отримання наноструктурованих матеріалів, такі як електрохімічні [6], плазмові [7], лазерні [8] та інші [9]. Особливо цікавими є іонно-плазмові методи, які можуть використовуватися для формування тонких поверхневих або багат шарових наноструктур і для модифікації поверхневих шарів матеріалів [10]. Наукові дослідження постійно розширюють можливості

вакуумно-дугових нанотехнологій. Наприклад, досліджується вплив зміни валентних іонів при різних частотах розряду у мікрокатодному дуговому двигуні [11]. Також досліджуються різні оптичні, наномеханічні [12] та фізичні властивості тонких наноструктур [13, 14]. Варто зазначити, що багато досліджень спрямовані на створення наноструктур на поверхнях матеріалів [15, 16], проте менше уваги приділяється дослідженню процесу їх утворення в поверхневих шарах та в глибині матеріалу [3, 17].

Наразі не існує достатньої кількості теоретичних робіт, які дозволяють передбачати розмір нанозерен в залежності від технологічних параметрів обробки [18, 19], особливо для конструктивних матеріалів авіаційних деталей [20]. Також слід відзначити малу кількість теоретичних досліджень щодо впливу іонізуючого випромінювання на формування наноструктур у сталевих деталях [21, 22]. Все це підкреслює важливість і актуальність дослідження технологічних параметрів лазерного випромінювання, що необхідні для отримання наноструктур у поверхневих шарах вуглецевих сталей.

1. Теоретична частина

Для вирішення означеної вище задачі ми використовуємо попередньо розроблену модель теоретичних процесів у зоні дії лазерного випромінювання [21, 22], де при описі впливу іонізованого випромінювання на матеріал враховуються теплофізичні та термомеханічні процеси [23, 24]. Варто зауважити, що у цій моделі лише частково розглядається внутрішні енергії під час утворення наноструктур. В той же час, у дослідженнях [19, 23] розглядався вплив енергії кристалізації на окремих температурних рівнях, а об'ємне дослідження температурних полів за означеною вище моделлю з урахуванням [25] проводилось тільки для матеріалів з високим коефіцієнтом теплопровідності в [26, 27]. Тому, потрібно провести подальше дослідження теплофізичних та термомеханічних характеристик різних конструкційних сталей під час формування наноструктур на їхніх поверхнях за допомогою лазерного випромінювання.

Все це дозволить нам підійти до розрахункових фізичних параметрів, що і забезпечить більш точне визначення технологічних параметрів лазера для отримання наноструктур у поверхневих шарах вуглецевих сталей. Це свідчить про актуальність та важливість проведених досліджень.

1.1. Теоретична модель та постановка задачі дослідження

При описі використання лазера у технологічних цілях спираються на сфокусоване джерело когерентного випромінювання [22, 28]. Тому у цій роботі докладно розглянемо тільки деякі особливості опису теплових потоків. Так щільність теплового потоку, який розподілений у фокальній площині опишемо наступним чином:

$$q(r) = q_0 \left[\frac{2I_1(Br)}{(Br)^2} \right]^2, \quad (1)$$

де $I_1(Br)$ – функція Беселя першого роду першого порядку;

q_0 – інтенсивність у центрі плями, яку розрахуємо за формулою:

$$q_0 = \frac{I_1 D^2}{4\lambda^2 F^2} P_0, \quad (2)$$

де P_0 – потужність випромінювання, поглинена матеріалом.

Тоді функцію Беселя визначимо наступним чином:

$$B = \frac{l_1 D}{\lambda F}, \quad (3)$$

де D – діаметр лінзи;

λ – довжина хвилі випромінювання;

F – фокусна відстань.

Також, щільність теплового потоку може бути отримана від добутку функції, яка залежить тільки від часу, і функції координат поверхні:

$$q_0(r, \tau) = A\varphi(\tau)q(r), \quad (4)$$

У формулі (4) A – поглинальна здатність оброблюваного матеріалу, що залежить в загальному випадку як від стану поверхні (ступеня обробки, шорсткості), так і від її температури; $q(r)$ – просторовий розподіл потужності випромінювання, що розраховується за формулою (1) з урахуванням (2) і (3); $\varphi(\tau)$ описує тимчасову структуру імпульсу; наприклад, для імпульсу лазера, що працює в пучковому режимі з упорядкованою генерацією.

Функція може бути представлена у вигляді

$$(\tau) = (1 - \cos \omega \tau). \quad (5)$$

Тоді для функції, що описує криву, яка обходить піки, буде справедливий вираз:

$$\varphi(\tau) = \tau^n \exp(br^m), \quad (6)$$

де n і m – цілі числа.

Модулювання частоти імпульсів лазера дозволяє отримати моноімпульси випромінювання тривалістю 10^{-8} С, тимчасова структура яких може бути описана функцією близькою до трикутної, причому, крутість переднього фронту може бути відмінною від крутості заднього.

Світловий потік, що падає на поверхню матеріалу, частково відбивається, а решта його проходить усередину об'єму тіла й поглинається там і на поверхні тіла діє теплове джерело, розподілене у просторі та часі.

Щільність поглиненого теплового потоку практично для всіх технологічних застосувань лазера змінюється всередині об'єму матеріалу згідно із законом Бугера

$$q_V(z) = q_{V_0}(1 - R)e^{-\alpha z}, \quad (7)$$

де $q_V(z)$, q_{V_0} – відповідно об'ємні щільності теплового потоку випромінювання на відстані z та на поверхні, Вт/см³:

$$q_{V_0} = \frac{q_n(r, \tau)}{0,1\delta}, \quad (8)$$

Тут $\delta \approx 10^{-4} \dots 10^{-5}$ м – шар, в якому світловий потік поглинається при взаємодії з електронами провідності; R і α – відповідно відбивна здатність і коефіцієнт поглинання світла.

З урахуванням дії об'ємного джерела та опромінення, об'ємну щільність якого розраховують за виразом (7) на основі (8), і поверхневого джерела тепла з щільністю теплового потоку за виразом (4) з урахуванням (5), (6) вирішують рівняння теплопровідності. Особливості врахування теплопровідності на поверхні матеріалу, при формуванні наноструктур іонно-плазмовими методами, було розглянуто нами раніше [23, 27]. Тепловий потік на поверхні мішені достатньо докладно розглянуто у роботах [27, 29].

У наших попередніх публікаціях [20, 22] ми розглядали вплив лазерного випромінювання на матеріал через рівняння теплового балансу, вирішували спільне завдання теплопровідності та термопружності. В цій роботі ми також враховували енергію утворення наноструктур. За допомогою цієї моделі ми

розраховували поля температур у зоні дії випромінювання. Після цього, використали отримані значення температур та визначали температурні напруги, які коригували не лише температуру, а й швидкість її зростання, що є необхідною умовою для формування наноструктур. Тому більш точне визначення області конструкційного матеріалу (сталі), де створюються умови для утворення наноструктур, дозволить відокремити об'єм, в якому реалізуються наноструктури, та визначити його залежність від технологічних параметрів лазерного випромінювання. Ми будемо перевіряти ці розрахунки на сталях марок 20, 50, 38Х та У8.

2. Результати розрахунку та їх обговорення

Розрахунки полів температур при дії потоку лазерного випромінювання на оброблювальну деталь проведемо використовуючи раніше запропоновану модель [21, 26].

Для загальної перевірки моделі було визначено температурні поля в зоні дії лазерного випромінювання на сталі 20 (рис. 1. а) та сталі 50 (рис. 1, б), причому розрахунки проводили як для процесу нагрівання так і для охолодження. Розрахунки проводили для щільностей теплового потоку і часу його дії, які близькі до необхідних для отримання наноструктур (500...2000 К), та при швидкості наростання температури, що перевищує 10^7 К/с [26]. Так, на рис. 1 показані залежності максимальної температури в плямі $r = 0,1$ мм при дії теплових потоків з піковими щільностями $q_{1\max} = 10^{10}$ Вт/м², $q_{2\max} = 2 \cdot 10^{10}$ Вт/м² та $q_{3\max} = 3 \cdot 10^{10}$ Вт/м² з часом дії 10^{-7} с на сталь 20 (рис. 1, а) та сталь 50 (рис. 1, б).

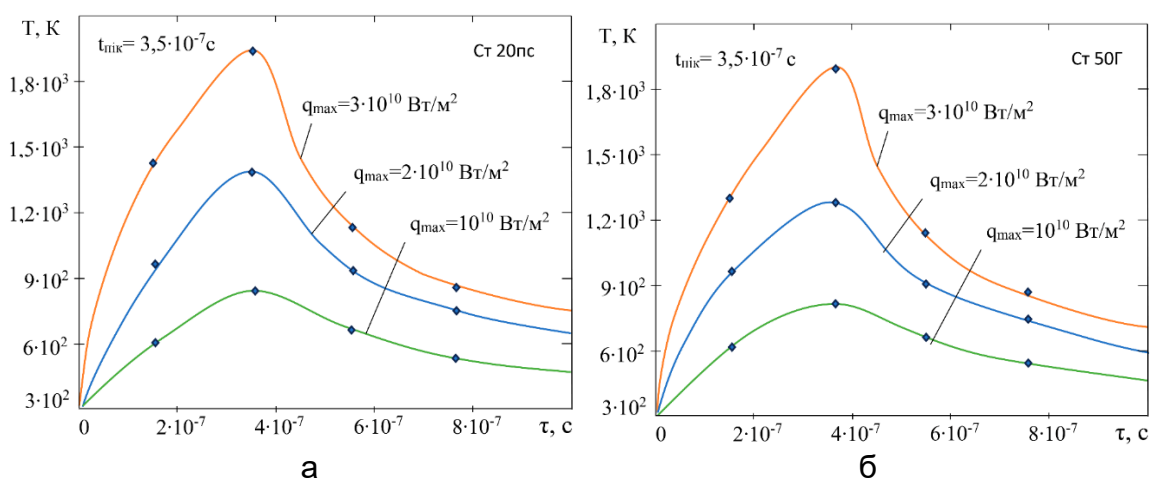


Рис. 1. Розподіл температур на глибині 1 мкм під час дії лазерного випромінювання на сталь 20 – а та сталь 50 – б. Пікова густина теплового потоку, що діє в початковий момент часу $3,5 \cdot 10^{-7}$ с

Бачимо, що для першого режиму максимальні температури як сталі 20 (рис. 1, а) так і сталі 50 (рис. 1, б) не перевищують температуру 1000 К, та час, за який вони діють $t = 3,1 \cdot 10^{-7}$ с (релаксація температурного поля) не створюють можливості для створення початкового розміру зерна, але при $q_{2\max}$ та $q_{3\max}$, в той же час швидкість зростання і спаду температури перевищує 10^7 К, що підтверджує ймовірність утворення наноструктур.

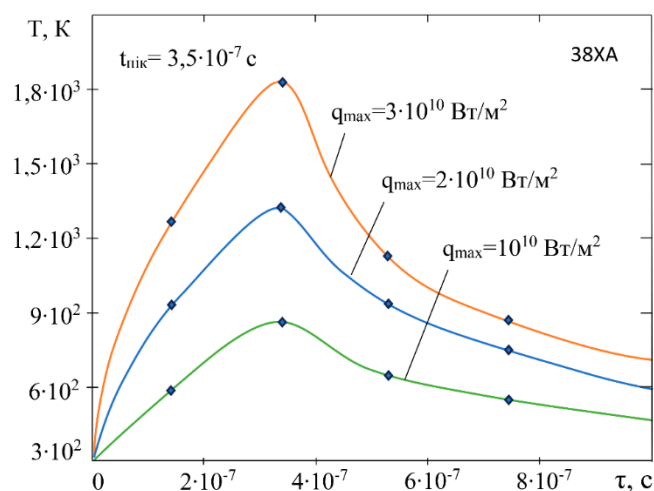


Рис. 2. Розподіл температур на глибині 1 мкм під час дії лазерного випромінювання на сталь 38XA при різних пікових щільностях теплового потоку, що діють в початковий момент часу $3,5 \cdot 10^{-7}$ с

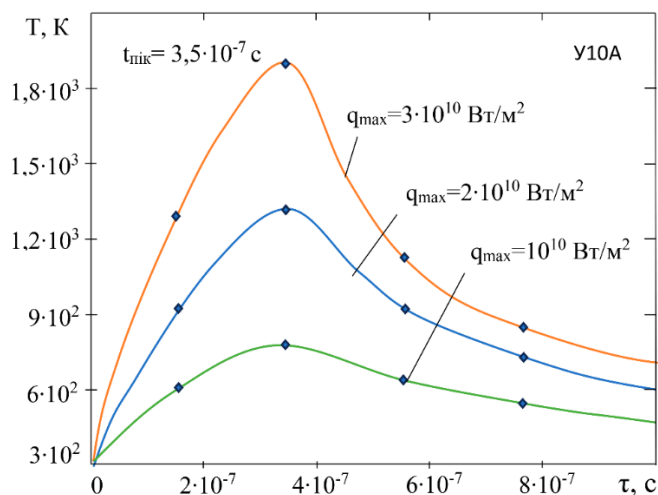


Рис. 3. Розподіл температур на глибині 1 мкм під час дії лазерного випромінювання на сталь У8 при різних пікових щільностях теплового потоку, що діють в початковий момент часу $3,5 \cdot 10^{-7}$ с

Також слід відзначити, що час досягнення температури 1300 К для сталі 20 становить $1,6 \cdot 10^{-7}$ с при q_{max} для другого режиму і 10^{-7} с відповідно для другого режиму, що менше, ніж для сталі 50, а значить і вплив такої температури на зростання зерна в цьому випадку менший [3].

У третьому випадку величини максимальних температур збільшуються і становлять величини порядку 1900 К для сталі 50 а для сталі 20 перевищують 1800 К, характер зміни максимальної температури в часі зберігся, швидкість зростання температури і для цих матеріалів перевищує 10^7 К/с. Це свідчить про те, що при цьому режимі у поверхневих шарах цих матеріалів створюються умови для отримання наноструктур.

Для високовуглецевих сталей У8 і У12 при дії теплового потоку $3 \cdot 10^{10}$ Вт/м² і $2,5 \cdot 10^{10}$ Вт/м² максимальні температури перевищують також 1500 К і наближаються до 2000 К, але час дії таких температур не перевищує $2 \cdot 10^{-7}$ с.

Для таких матеріалів при інших режимах до часу дії 10^{-6} с температурний режим сприяє утворенню наноструктур, та й швидкість наростання температур перевищує 10^7 К/с. Це підтверджує, що і для таких матеріалів висока ймовірність утворення наноструктур.

Оцінити розмір зони утворення наноструктури можна за радіусом зони утворення наноструктур. Для цього побудована просторово-часова картина розподілу температур по радіусу та в часі для сталі 40Х при дії теплового потоку з щільністю $3 \cdot 10^{10}$ Вт/м² при радіусі плями 0,1 мм.

Видно, що за радіусом температура знижується в порівнянні з максимальною на 200...250 К, що свідчить про незначний вплив зони, де температура перевищує допустиму (1500 К), на характер зростання зерна, який буде незначним. Все це ще раз підтверджує можливість отримання наноструктур у шарі глибиною порядку мікрметрів і радіусом більше 0,1 мм.

Практично ті ж або близькі температури можна отримати при щільності теплового потоку на два порядки менше $q = 3 \cdot 10^8$ Вт/м² та часу його дії $3 \cdot 10^{-3}$ с (рис. 5), але в цьому випадку наноструктури не утворюються, а утворюються мікро- та субмікрокластери розміром 1...3 мкм та 0,5...0,8 мкм (див. роботу [9]). Отже, для отримання наноструктур необхідна наявність швидкостей зростання температури більше 10^7 К/с, а в цьому випадку максимальна швидкість росту температури досягає лише $6 \cdot 10^6$ К/с і можливе утворення тільки субмікроструктур.

Для вибору технологічних параметрів лазерного випромінювання при отриманні наноструктур на основі проведених розрахунків температур і швидкостей їх наростання були побудовані залежності критичних щільностей теплових потоків $q_{кр\ max}$ і $q_{кр\ min}$ від часу їх дії, при яких утворюються наноструктури на сталі 40Х (рис. 6).

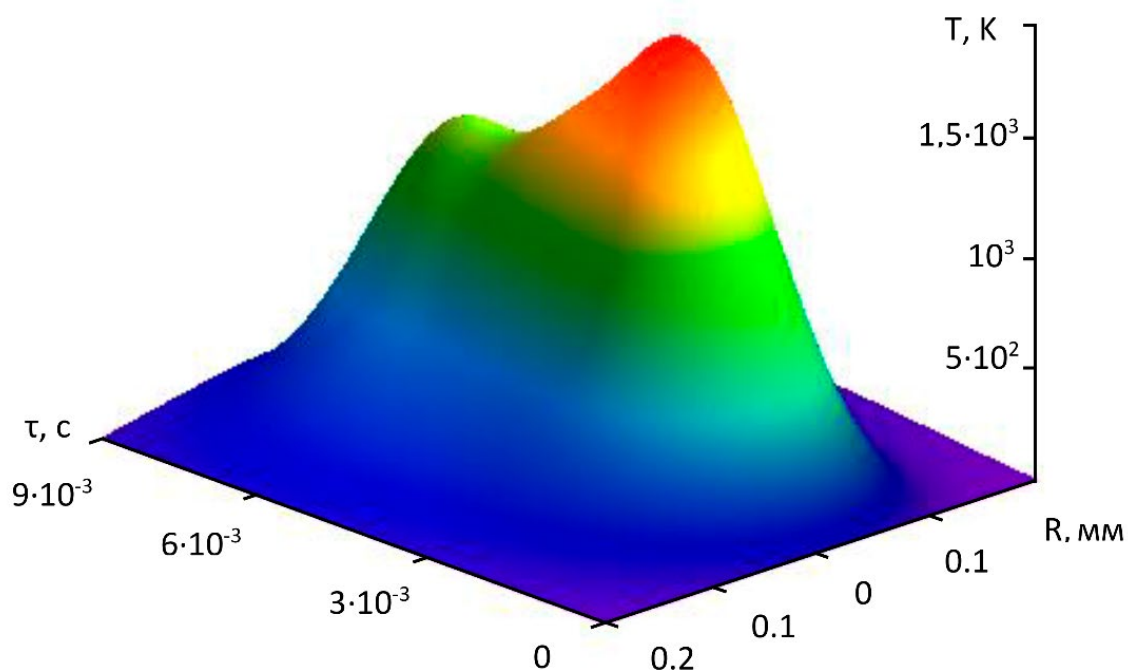


Рис. 5. Просторово-часова картина розподілу температур по радіусу і в часі при дії лазерного випромінювання з щільністю теплового потоку $q = 3 \cdot 10^8$ Вт/м² при радіусі плями 0,1 мм

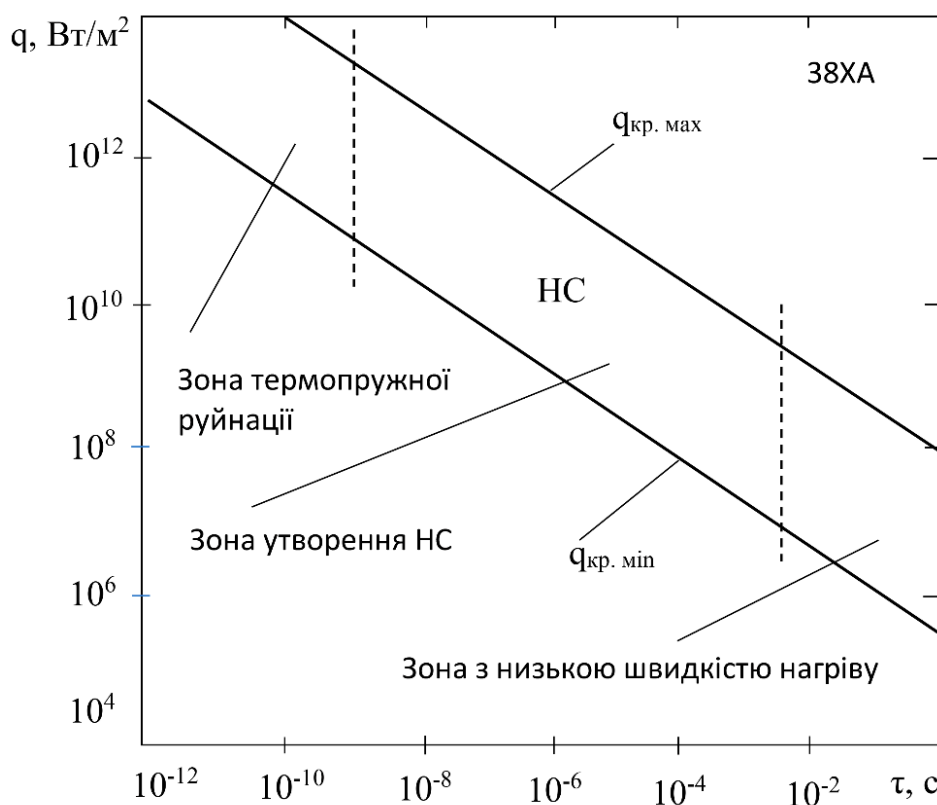


Рис. 6. Залежність критичних значень щільностей теплових потоків, що забезпечують отримання наноструктур від часу їх дії

Видно, що зона технологічних параметрів, що забезпечує отримання наноструктур, обмежена прямими $q_{кр. max}$, $q_{кр. min}$, зоною, де недостатня швидкість росту температури і зоною, де висока ймовірність термопружного руйнування. Показано можливість вибору технологічних параметрів лазерного випромінювання, щільності теплового потоку та часу його дії, що забезпечують одержання наноструктур у поверхневому шарі.

Висновки

За уточненою тепловою моделлю визначено було отримано розподіли температур на глибині 1 мкм під час дії лазерного випромінювання на сталі з різним вмістом вуглецю (сталі 20, 38Х, 50 та У8) при різних пікових щільностях теплового потоку в поверхневому шарі.

Побудовано просторово-часову картину розподілу температур по радіусу плями і в часі при дії лазерного випромінювання з щільністю теплового потоку $q = 3 \cdot 10^8$ Вт/м² при радіусі плями 0,1 мм

Визначено зони утворення наноструктур залежно від щільності теплового потоку від часу дії лазерного випромінювання.

Проведені теоретичні дослідження показують, що необхідно враховувати швидкість наростання температури бо при їх перевищенні виникає ймовірність термопружного руйнування під дією температурних напруг. Також визначено, що при недостатніх швидкостях наростання температури при лазерній обробці у поверхневих шарах вуглецевих сталей буде утворюються більше мікро- і суб-мікроструктур.

Список літератури

1. 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>
2. Костюк, Г. И. Теоретическое исследование действия ионизирующего излучения на конструкционные материалы и образование наноструктур в алюминиевом сплаве Д16Т [Текст] / Г. И. Костюк, Бехзад Размджуй, Ю. В. Широкий, Ю. С. Панченко // Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии збірник наукових праць – Харків : Нац. аерокосм. ун-т "ХАІ",. – 2015. – Вып. 68. – С. 20-25.
3. 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. – Х.: НТУ «ХПІ». – 2020. – № 92.– С. 107-121. <https://doi.org/10.20998/2078-7405.2020.92.12>
4. 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), Leeds, UK. – 2019. – P. 208–212. <https://doi.org/10.1109/DESSERT.2019.8770053>.
5. 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 // ХАІ, ББК 72: 74 Н56. – 2018. – С. 54.
6. Khan, M.A., Microplasma-assisted synthesis of CuO nanostructures for catalytic degradation of organic dyes under solar irradiation [Text] / M. A. Khan, H. Mahmood, M. S. Khan, et al. // J Solid State Electrochem. – 2020. – No. 24. – P. 1123-1132 <https://doi.org/10.1007/s10008-020-04602-5>
7. 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, збірник наукових праць – Харків : Нац. аерокосм. ун-т "ХАІ". – 2021. – Вип. 91. – С. 62-77. <https://doi.org/10.32620/oikit.2021.91.05>
8. 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-Жидєєва // Відкриті інформаційні та комп'ютерні інтегровані технології, збірник наукових праць – Харків : Нац. аерокосм. ун-т "ХАІ". – 2023. – Вип. 97. – С. 111–125. <https://doi.org/10.32620/oikit.2023.97.07>
9. 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>.
10. Prasad, K. Carbon Nanocomposites in Aerospace Technology: A Way to Protect Low-Orbit Satellites Weerasinghe Janith [Text] / 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>.

¹¹. Ji, T. Influence of pulse frequency on discharge characteristics of micro-cathode arc thruster [Text] / Tianyuan Ji, Liqiu Wei, Yanfei Wang, Yan Song, Haikuo Cai, Hong Li, Yongjie Ding, Daren Yu // *Vacuum*. – 2021. – Vol. 196. – P. 110748. <https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2021.110748>.

¹². Gökçe, M. Ay. Optical and Nanomechanical Properties of C Coated BN Thin Film Deposited by Thermionic Vacuum Arc Technique Prasad Karthika [Text] / Gökçe, M. Ay. and Pat, Suat // *Journal of Solid-State Science and Technology*. – 2021. – Vol. 10. – no. 10. – P. 103013. <http://dx.doi.org/10.1149/2162-8777/ac2f1f>

¹³. Elmas, S. Determination of physical properties of graphene doped ZnO (ZnO:Gr) nanocomposite thin films deposited by a thermionic vacuum arc technique [Text] / Saliha, Elmas, Suat, Pat, Reza, Mohammadigharehbagh, Caner, Musaoğlu, Mustafa, Özgür, Uğur, Demirkol, Soner, Özen, Şadan, Korkmaz // *Physica B: Condensed Matter*. – 2019. – Vol. 557. – PP. 27–33. <https://doi.org/10.1016/j.physb.2018.12.039>.

¹⁴. Vladioiu, R. Structural and Mechanical Properties of Nanostructured C-Ag Thin Films Synthesized by Thermionic Vacuum Arc Method [Text] / Rodica Vladioiu, Aurelia Mandes, Virginia Dinca-Balan, Vilma Bursikova // *Journal of Nanomaterials*. – 2018. –vol. 2018. – P.10. <https://doi.org/10.1155/2018/9632041>

¹⁵. Košiček, M. In search of the limits of CuO thermal oxidation nanowire growth by combining experiment and theory [Text] / Košiček, Martin, Baranov, Oleg, Zavašnik, Janez, Cvelbar, Uroš// *Applied Physics Letters*. – 2023. – No. 123 – Vol. 424. – P. 041601. <https://doi.org/10.1063/5.0151293>

¹⁶. Baranov, O. Formation of 2D Copper Oxide Nanostructures on Substrates Exposed to Glow Discharge Plasma [Text] / Baranov, O // *Lecture Notes in Mechanical Engineering* 5th Grabchenko's International Conference on Advanced Manufacturing Processes. – 2023. – PP. 247-255 https://doi.org/10.1007/978-3-031-42778-7_22

¹⁷. Lin, W. Structural characteristics of nanocrystalline copper after carbon ion implantation [Text] / 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>

¹⁸. Baranov, O. Current Distribution on the Substrate in a Vacuum Arc Deposition Setup [Text] / O. Baranov, M. Romanov // *Plasma Processes and Polymers* – 2008. – Vol. 5, № 3. – P. 256–263.

¹⁹. 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 // 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 умов отримання наноструктур в алюмінієвих сплавах при дії іонізуючого випромінювання [Текст] / Ю.В. Широкий, Ю.О. Сисоєв, Т.В. Постельник // *Авіаційно-космічна техніка та технологія: сб. науч. тр. Нац. аерокосм. ун-та им. Н.Е. Жуковского «ХАИ»*. – 2022. – Вип. 2. – С. 55–63. <https://doi.org/10.32620/aktt.2022.2.07>

²¹. 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. – Х.: НТУ «ХПІ». – 2017. – № 26(1248). – С. 60–65.

²². Костюк, Г. И. Перспективы получения наноструктур при действии импульсного лазерного излучения на стали [Текст] / Г. И. Костюк, В. Н. Павленко, Ю. В. Широкий // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Технології в машинобудуванні. – Х.: НТУ «ХПІ». – 2015. – № 40(1149). – С. 47–52.

²³. Широкий, Ю. В. Оценка режимов лазерной обработки, при которых необходимо учитывать конечную скорость распространения тепла при решении совместной задачи теплопроводности и термоупругости [Текст] / Ю. В. Широкий // Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии: сб. науч. тр. Нац. аэрокосм. ун-та им. Н.Е. Жуковского «ХАИ». – 2015. – . № 58. – С. 33–40.

²⁴. 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. : 13 - мех. інженерія : захищ. 12.04.19 / І. В. Кантемир ; Нац. аерокосм. ун-т ім. М. Є. Жуковського "Харків. авіац. ін-т. – Харків. – 2018. – 190 с.

²⁵. Shyrokyi, Y., Investigation of the Influence of Crystallization Energy on the Size of Nanostructures During Copper Ion-Plasma Treatment. [Text]/ Y. Shyrokyi, G. Kostyuk // Integrated Computer Technologies in Mechanical Engineering. – 2022. – vol. 367. – P. 57-66. https://doi.org/10.1007/978-3-030-94259-5_6

²⁶. 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-космічна техніка та технологія: сб. науч. тр. Нац. аерокосм. ун-та им. Н.Е. Жуковского «ХАИ». – 2022. – Вип. 2. – С.55–63. <https://doi.org/10.32620/aktt.2022.2.07>

²⁷. Широкий, Ю. В. Теоретичне дослідження температурних полів міді при формуванні наноструктурних шарів у плазмовому середовищі [Текст]/ Ю. В. Широкий, А. Ю. Сисоєв, Ю. С. Панченко [Текст] //Авіаційно-космічна техніка та технологія: сб. науч. тр. Нац. аерокосм. ун-та им. Н.Е. Жуковского «ХАИ». – 2022. –Вип. 5.– С.51–60. <https://doi.org/10.32620/aktt.2022.5.04>

²⁸. 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", М-во освіти і науки України ; Харків. – 2018. – 143 с.

²⁹. 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.

References

¹. 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, pp. 40–50.

². Kostyuk H. Y. Teoretycheskoe yssledovanye deystviya yonyzyruyushcheho yzluchenyya na konstruktsyonnyye materyaly y obrazovanye nanostruktur v alyumyniyevom splave D16T H. Y. Kostyuk, Bekhzad Razmdzhuy, Yu.V. Shyrokyu, Yu.S. Panchenko [Открытые ynformatsyonnyye y komp'yuternyye yntehryrovannyye

tekhnohyy zbirnyk naukovykh prats' – Kharkiv : Nats. aerokosm. un-t "KhAI", 2015, no. 68, pp. 20–25.

³. Kostyuk G. Prospects for producing nanostructures in the volume of parts under the action of plasma flows. G. Kostyuk, O. Melkozirova, E. Kostyuk, I. Shyrokyi [Rizannya ta instrumenty v tekhnolohichnykh systemakh. – Kh.: NTU «KhPI»], 2020, no 92, pp. 107–121

⁴. 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 [2019 10th International Conference on Dependable Systems, Services and Technologies (DESSERT), Leeds, UK], 2019, pp. 208–212.

⁵. Kostyuk, H. Y. Nanopokrytyya y nanostrukturnyye uprochnennyye sloy dlya povyshenyya resursa y nadezhnomy detaley avyatsyonnykh dvigateley H. Y. Kostyuk, E. A. Volyak, V. A. Fadeev [KhAI, BBK 72: 74 N56], 2018, pp. 54.

⁶. Khan, M. A., Microplasma-assisted synthesis of CuO nanostructures for catalytic degradation of organic dyes under solar irradiation. M. A. Khan, H. Mahmood, M. S. Khan, et al. [J Solid State Electrochem], 2020, No. 24, pp. 1123–1132

⁷. Shyroky, Yu. V. Modelyuvannya duhovoho rozryadu na midnomu katodi dlya heneratsiyi nanostruktur Yu. V. Shyroky, H. I. Kostyuk [Vidkryti informatsiyi ta komp'yuterni intehrovani tekhnolohiyi, zbirnyk naukovykh prats' – Kharkiv : Nats. aerokosm. un-t "KhAI"], 2021, no. 91, pp. 62-77.

⁸. Shyroky, Yu. V. Vybir tekhnolohichnykh parametriv lazera dlya otrymannya zmitsnyuyuchykh pokryttiv z nanostrukturamy na instrumental'niy stali U12A. Yu. V. Shyroky, Yu. O. Sysoyev, O. V. Torosyan, H. D. Torosyan-Zhydyeyeva [Vidkryti informatsiyi ta komp'yuterni intehrovani tekhnolohiyi, zbirnyk naukovykh prats' – Kharkiv : Nats. aerokosm. un-t "KhAI"], 2023, no. 97, pp. 111-125.

⁹. Baranov, O. Hierarchical Nanomaterials by Selective Deposition of Noble Metal Nanoparticles: Insight into Control and Growth Processes / O. Baranov, T. Belmonte, I. Levchenko, K. Bazaka, M. Košiček, U. Cvelbar [Advanced Theory and Simulations], 2023, no. 6, Vo. 9. pp. 2300288.

¹⁰. 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, Vo. 11, pp.1763.

¹¹. Ji T. Influence of pulse frequency on discharge characteristics of micro-cathode arc thruster. Tianyuan Ji, Liqiu Wei, Yanfei Wang, Yan Song, Haikuo Cai, Hong Li, Yongjie Ding, Daren Yu [Vacuum], 2021, Vo. 196, pp. 110748.

¹². Gökçe M. Ay. Optical and Nanomechanical Properties of C Coated BN Thin Film Deposited by Thermionic Vacuum Arc Technique Prasad Karthika. Gökçe, M. Ay. and Pat, Suat. [Journal of Solid-State Science and Technology], 2021, Vo. 10, no. 10, pp.103013.

¹³. Elmas S. Determination of physical properties of graphene doped ZnO (ZnO:Gr) nanocomposite thin films deposited by a thermionic vacuum arc technique. Saliha, Elmas, Suat, Pat, Reza, Mohammadigharehbagh, Caner, Musaoğlu, Mustafa, Özgür, Uğur, Demirkol, Soner, Özen, Şadan, Korkmaz [Physica B: Condensed Matter], 2019, no. 557, pp. 27–33.

¹⁴. Vladioiu R. Structural and Mechanical Properties of Nanostructured C-Ag Thin Films Synthesized by Thermionic Vacuum Arc Method. Rodica Vladioiu, Aurelia

Mandes, Virginia Dinca-Balan, Vilma Bursikova [Journal of Nanomaterials], 2018, no. 2018, pp.10.

^{15.} Košiček, M. In search of the limits of CuO thermal oxidation nanowire growth by combining experiment and theory [Text] /Košiček, Martin, Baranov, Oleg, Zavašnik, Janez, Cvelbar, Uroš// Applied Physics Letters. – 2023. – No. 123 – Vol. 424. – P. 041601. <https://doi.org/10.1063/5.0151293>

^{16.} Baranov O. Formation of 2D Copper Oxide Nanostructures on Substrates Exposed to Glow Discharge Plasma Baranov, O [Lecture Notes in Mechanical Engineering 5th Grabchenko's International Conference on Advanced Manufacturing Processes], 2023, pp. 247-255

^{17.} 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, no. 7, pp. 691–694.

^{18.} Baranov, O. Current Distribution on the Substrate in a Vacuum Arc Deposition Setup O. Baranov, M. Romanov [Plasma Processes and Polymers], 2008, no. 3, pp. 256–263.

^{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, pp. 107–121.

^{20.} Shyrokyi Yu. V. Modelyuvannya umov otrymannya nanostruktur v alyuminiyevykh splavakh pry diyi ionizuyuchoho vyrominyuvannya Yu.V. Shyrokyi, Yu.O. Sysoyev, T.V. Postel'nyk [Aviatsiyno-kosmichno tekhnika ta tekhnolohiya: sb. nauch. tr. Nats. aerokosm. un-ta ym. N.E. Zhukovskoho «KhAY»], 2022, no. 2, pp. 55-63

^{21.} Kostyuk, H. Y. Perspektyvy pryimenenyya lazernoy obrabotky dlya sozdannya nanostruktur na RY yz «VolKar» H. Y. Kostyuk, Yu. V. Shyrokyi [Visnyk NTU «KhPI». Seriya: Tekhnolohiyi v mashynobuduvanni. – Kh.: NTU «KhPI»], 2017, no 26(1248), pp. 60–65.

^{22.} Kostyuk, H. Y. [Perspektyvy poluchenyya nanostruktur pry deystvyy ymпульсноho lazernoho yzluchenyya na staly] H. Y. Kostyuk, V. N. Pavlenko, Yu. V. Shyrokyi [Visnyk NTU «KhPI». Seriya: Tekhnolohiyi v mashynobuduvanni. – Kh.: NTU «KhPI»], 2015, no. 40(1149), pp. 47–52.

^{23.} Shyrokyi, Yu. V. Otsenka rezhymov lazernoy obrabotky, pry kotorykh neobkhodimo uchytivat' konechnuyu skorost' rasprostraneniya tepla pry resheniiy sovmestnoy zadachy teploprovodnosti y termoupruhosti Yu. V. Shyrokyi [Otkritie ynfomatsyonnyye y komp'yuternyye yntehnyrovannyye tekhnolohyy: sb. nauch. tr. Nats. aerokosm. un-ta ym. N.E. Zhukovskoho «KhAY»], 2015, no. 58, pp. 33–40.

^{24.} Kantemir, I. V. Udoshkonalennyya protsesiv stvorennyya nanostruktur u plazmovo-ionnykh ta lazernykh tekhnolohiyakh dlya pidvyshchennyya efektyvnosti rizal'noho instrumentu; dys. kand. tekhn. Nauk, 05.03.07 protsesy fizyko - tekhn. obrob., I. V. Kantemir [Nats. aerokosm. un-t im. M. Ye. Zhukovskoho "Kharkiv. aviats. in-t. – Kharkiv], 2018, pp. 190.

^{25.} Shyrokyi, Y. Investigation of the Influence of Crystallization Energy on the Size of Nanostructures During Copper Ion-Plasma Treatment. Y. Shyrokyi, G. Kostyuk [Integrated Computer Technologies in Mechanical Engineering], 2022, no. 367. pp. 57-66.

²⁶. Shyrokyy, Yu. V. Modelyuvannya umov otrymannya nanostruktur v alyuminiyevykh splavakh pry diyi ionizuyuchoho vyprominyuvannya Yu. V. Shyrokyy, Yu. O. Sysoyev, T. V. Postel'nyk [Aviatsiyno-kosmichno tekhnika ta tekhnolohiya: sb. nauch. tr. Nats. aerokosm. un-ta ym. N.E. Zhukovskoho «KhAY»], 2022, no. 2, pp. 55-63.

²⁷. Shyrokyy, Yu. V. Teoretychne doslidzhennya temperaturnykh poliv midi pry formuvanni nanostrukturnykh shariv u plazmovomu seredovyshchi Yu. V. Shyrokyy, A. Yu. Sysoyev, Yu. S. Panchenko [Aviatsiyno-kosmichno tekhnika ta tekhnolohiya: sb. nauch. tr. Nats. aerokosm. un-ta ym. N.E. Zhukovskoho «KhAY»], 2022, no. 5, pp. 51–60.

²⁸. Breus, A. O. Udoskonalennya kombinovanoyi plazmovo-ionnoyi tekhnolohiyi dlya otrymannya nanostruktur na poverkhni rizhuchoho instrumentu : dys. kand. tekhn. nauk A. O. Breus [Nats. aerokosm. un-t im. M. Ye. Zhukovskoho "Kharkiv. aviats. in-t", M-vo osvity i nauky Ukrainy ; Kharkiv], 2018, pp. 143.

²⁹. Baranov, O. O. Razrabotka kombynyrovannoy tekhnolohyy dlya formirovaniya poverkhnostnoho sloya avyatsyonnykh konstruksyonnykh materialov : dys. kand. tekhn. nauk : 05.07.04 - tekhnolohyya proyzvodstva letatel'nykh apparatov O. O. Baranov [Nats. aerokosm. un-t ym. N.E. Zhukovskoho "KhAY", Kh.], 2000, pp. 207.

Надійшла в редакцію 20.12.2023, розглянута на редколегії 20.12.2023

Determining the technological parameters of laser irradiation to obtain submicro- and nanostructures in strengthening coatings on steels

Using the previously developed model of theoretical processes in the zone of laser irradiation, where thermal and thermomechanical processes are described, including the influence of crystallization energy and other internal energies during the formation of nanostructures at various temperature levels, further investigation of the thermal and thermomechanical characteristics of different structural steels during the formation of nanostructures on their surfaces using laser irradiation was conducted. To validate the model, temperature fields were determined in the zone of laser irradiation on steel 20 (Fig. 1a) and steel 50 (Fig. 1b), considering both heating and cooling processes. Calculations were performed for heat flux densities and durations of exposure close to those necessary for obtaining nanostructures (500...2000 K) and with temperature rise rates exceeding 10^7 K/s. As a result of calculations using the refined thermal model, temperature distributions at a depth of 1 μ m during laser irradiation on steel with different carbon contents (steel 20, 38X, 50, and Y8) at various peak heat flux densities in the surface layer were obtained. A spatiotemporal distribution of temperatures along the radius of the laser spot and over time during laser irradiation with a heat flux density of $q=3 \cdot 10^8$ W/m² at a spot radius of 0.1 mm was constructed. Zones of nanostructure formation were identified depending on the heat flux density over the duration of laser irradiation. Theoretical investigations using the updated thermal model confirmed the need to consider the temperature rise rate, as exceeding it increases the likelihood of thermomechanical failure. At the same time, due to insufficient temperature rise rates during laser nanostructure formation in the surface layers of carbon steels, more micro- and sub microstructures are formed.

Keywords: nanostructure, laser irradiation, temperature, heat flux, steel, temperature stress, technological parameters

Відомості про авторів:

Широкий Юрій Вячеславович – кандидат технічних наук, доцент, кафедри теоретичної механіки, машинознавства та роботомеханічних систем, Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського «Харківський авіаційний інститут» м. 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 «Харківський авіаційний інститут», Харків, Україна.

Постельник Тетяна Олександрівна – асистент кафедри теоретичної механіки, машинознавства та роботомеханічних систем Національного аерокосмічного університету ім. М. Є. Жуковського «Харківський авіаційний інститут», Харків, Україна.

About the Author:

Shyrokyi Yurii – 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.

Postelnyk Tatiana – assistant lecturer of Dept. of Theoretical Mechanics, Engineering and Robotic Systems, National Aerospace University named after N. Ye. Zhukovsky «KhAI», Kharkov, Ukraine, e-mail: t.postelnik@khai.edu, ORCID 0000-0001-5898-0273