

УДК 621.9.048.7 : 535.3

doi:10.20998/2413-4295.2025.01.02

ТЕХНОЛОГІЧНІ ОСОБЛИВОСТІ ФОРМУВАННЯ ПЕРІОДИЧНИХ МІКРОСТРУКТУР ТИПУ «ЛУСКА РИБИ» НА ПОВЕРХНІ НЕРЖАВІЮЧОЇ СТАЛІ 12X18H10T НАНОСЕКУНДНИМ ЛАЗЕРНИМ ОПРМІНЕННЯМ

**С. С. ДОБРОТВОРСЬКИЙ^{1,2}, Б. О. АЛЕКСЕНКО^{1*}, В. В. БАСОВ¹, Д. В. ТРУБІН¹,
М. КОШЦІНСЬКИЙ^{2,3}, П. ЗАВАДЗЬКИЙ³**

¹ Кафедра технології машинобудування та металорізальних верстатів, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків, УКРАЇНА

² Кафедра фізики і біофізики, Університет Адама Міцкевича, Познань, ПОЛЬЩА

³ Кафедра фізики та біофізики, Факультет харчових наук і харчування, Познанський університет природничих наук, Познань, ПОЛЬЩА

⁴ Інститут механічних технологій, Познанська політехніка, Познань, ПОЛЬЩА

*e-mail: borys.aleksenko@khp.edu.ua

АНОТАЦІЯ Розглянуто технологічні особливості формування періодичних мікроструктур типу «луска риби» на поверхні нержавіючої сталі 12X18H10T шляхом наносекундного лазерного опромінення. Проаналізовано закономірності взаємодії лазерного випромінювання з матеріалом, що включають процеси нагріву, фазових переходів, абляції та формування рельєфу поверхні. Запропоновано математичну модель процесу, що враховує рівняння теплопровідності, кінетику фазових переходів та механізми абляції. Акцентовано увагу на методах чисельного моделювання, зокрема методах скінченних елементів та скінченних різниць, для прогнозування поведінки матеріалу під впливом лазерного опромінення. Підтверджено кореляцію між енергетичними параметрами лазера та глибиною абляції, що дозволяє визначити оптимальні режими обробки для створення періодичних мікроструктур із заданими геометричними характеристиками. Виконано чисельне моделювання розподілу температурного поля та динаміки змін рельєфу поверхні, що демонструє ефект насичення матеріалу та вплив перекриття імпульсів на формування мікроструктури. Експериментально досліджено формування лазерних мікроструктур на поверхні нержавіючої сталі за допомогою наносекундного лазера Мінімаркер 2. Підтверджено, що отримані мікроструктури добре корелюють із результатами чисельного моделювання. Встановлено, що зміна параметрів сканування, таких як крок між імпульсами та швидкість обробки, дозволяє керувати морфологією та періодичністю отриманих структур. Виявлено, що мікрорельєф поверхні має характерний профіль, близький до Гаусового розподілу інтенсивності лазерного випромінювання. Результати дослідження підтверджують можливість використання лазерної мікротекстуризації для модифікації експлуатаційних характеристик металевих поверхонь, що може бути застосовано в авіаційному, автомобільному, медичному та енергетичному машинобудуванні. Отримані дані можуть слугувати основою для подальшої оптимізації процесів лазерного мікротекстурування та розробки нових технологій поверхневої обробки матеріалів.

Ключові слова: лазерне опромінення; мікроструктура; абляція; теплопровідність; чисельне моделювання; поверхнева обробка; нержавіюча сталь.

TECHNOLOGICAL FEATURES OF PERIODIC MICROSTRUCTURE FORMATION OF THE «FISH-SCALE» TYPE ON THE SURFACE OF 12X18H10T STAINLESS STEEL BY NANOSECOND LASER IRRADIATION

**S. DOBROTVORSKIY^{1,2}, B. ALEKSENKO^{1*}, V. BASOV¹, D. TRUBIN¹, M. KOŚCIŃSKI^{2,3},
P. ZAWADZKI³**

¹ Department of Manufacturing Engineering and Machine Tools, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, UKRAINE

² Faculty of Physics, Adam Mickiewicz University, Poznań, POLAND

³ Department of Physics and Biophysics, Faculty of Food Science and Nutrition, Poznań University of Life Sciences, Poznań, POLAND

⁴ Institute of Mechanical Technology, Poznań University of Technology, Poznań, POLAND

ABSTRACT The paper presents a scientific substantiation of the technological aspects of forming periodic microstructures of the "fish scale" type on the surface of AISI 321 stainless steel using nanosecond laser irradiation. The study establishes the fundamental interactions between laser radiation and the material, develops a mathematical model of heating, phase transitions, ablation, and surface relief formation, and experimentally validates the results. From an engineering perspective, the controlled formation of periodic microstructures on metal surfaces enables the modification of their operational properties, including increased wear resistance, reduced friction coefficient, enhanced adhesion characteristics, and improved corrosion resistance. This opens up broad prospects for applying laser microtexturing in aerospace, automotive, medical, and energy engineering industries, where surface microrelief optimization can significantly enhance component functionality and durability. The study thoroughly examines the interaction of nanosecond laser radiation with metal surfaces, considering key physical processes such as heating, phase transitions,

ablation, and surface roughness formation. A theoretical model of the process is developed based on heat conduction equations, phase transition kinetics, and ablation mechanisms. The model incorporates the laser system Minimarker 2 parameters and the material properties of AISI 321 stainless steel, including density, heat capacity, thermal conductivity, melting and boiling temperatures, absorption coefficient, and specific latent heat of fusion and vaporization. A numerical simulation of heat transfer, phase transitions, and material ablation under laser irradiation is conducted using the finite element method (FEM) and finite difference method (FDM). The model accurately predicts temperature distribution, crater formation, and microstructure evolution in response to laser pulses. The results confirm that with increasing pulse energy, the ablation depth also increases, which is supported by three-dimensional visualizations of craters and temperature fields. Experimental validation of the numerical model uses a nanosecond Minimarker 2 laser to texture the surface of AISI 321 stainless steel. Optical microscopy with a ZEISS AXIO digital microscope is employed to analyze the resulting microstructures. The experimental findings align closely with the numerical predictions, demonstrating that laser-induced periodic microstructures exhibit consistent geometry and high reproducibility. The study also highlights the impact of scan line spacing on the clarity and uniformity of the microstructures. The KEYENCE VHX 7100 digital microscope performs a detailed surface roughness analysis. The roughness profile reveals a periodic, nearly Gaussian distribution, with minor asymmetries attributed to local thermal effects and material reorganization. The results confirm that the developed numerical model accurately describes the heating, phase transitions, and ablation processes in AISI 321 stainless steel under nanosecond laser pulses. The combination of numerical modeling and experimental verification provides a reliable framework for optimizing laser processing parameters to achieve controlled microstructure formation, which is crucial for advancing surface engineering technologies in high-performance industrial applications.

Keywords: Laser irradiation; Microstructure; Ablation; Thermal conductivity; Numerical modeling; Surface treatment; Stainless steel.

Вступ

Розвиток сучасних технологій лазерної обробки матеріалів відкриває нові можливості для створення функціональних мікро- та наноструктур на поверхнях металів. Одним із перспективних напрямів є формування періодичних мікроструктур типу «луска риби» на поверхні нержавіючої сталі, що може бути використано для покращення її експлуатаційних характеристик, зокрема для зниження гідро- та аеродинамічного супротиву, тертя, підвищення зносостійкості та корозійної стійкості.

Наносекундне лазерне опромінення дозволяє здійснювати контрольовану модифікацію поверхні шляхом локального нагріву, плавлення, випаровування (абляції) та реорганізації матеріалу під дією коротких імпульсів високої енергії. Для ефективного управління процесами формування структур необхідно глибоке розуміння фізичних механізмів взаємодії лазерного випромінювання з металевую поверхнею.

Важливим аспектом досліджень є розробка математичних моделей, що описують температурні зміни, фазові переходи та кінетику абляційних процесів під впливом наносекундних лазерних імпульсів. Використання методів чисельного моделювання, зокрема методу скінченних елементів (FEM) та методу скінченних різниць (FDM), дозволяє з високою точністю прогнозувати розподіл температури, шорсткість поверхні та параметри отриманих структур.

У природі існують численні біологічні структури, що вирішують складні технічні завдання, завдяки еволюційним адаптаціям. Наприклад, листя лотоса з його самоочисними властивостями, шкіра панголіна з її антикорозійними та антифрикційними властивостями, шкіра акули з антимікробними властивостями, а також оптично активні крильця метеликів—усі вони є джерелом натхнення для створення нових матеріалів з унікальними

характеристиками. Зокрема, структура риб'ячої луски привертає увагу через свої неперевершені гідродинамічні властивості, які значно знижують тертя, що має важливе значення для зменшення опору при русі в воді [1]. Сучасні технології лазерної обробки дозволяють відтворювати ці природні рішення за допомогою лазерно-індукованих періодичних поверхневих структур (LIPSS), які можна застосовувати для створення матеріалів з необхідними властивостями. Зокрема, наносекундні лазерні імпульси стають ефективним інструментом для формування періодичних мікроструктур, що імітують поверхню риб'ячої луски, на різних матеріалах, зокрема на нержавіючій сталі [2,3].

Технологія лазерної обробки матеріалів, зокрема лазерно-індуковані періодичні поверхневі структури (LIPSS), дозволяє створювати функціональні мікро- та наноструктури на поверхні металів. Одним з перспективних напрямків є формування періодичних мікроструктур типу «луска риби» на поверхні нержавіючої сталі, що покращує експлуатаційні характеристики матеріалів, зокрема знижує тертя та покращує зносостійкість [2]. Дослідження показали, що структура риб'ячої луски може значно знизити гідродинамічний опір та збільшити ефективність матеріалів у різних сферах, таких як суднобудування, енергетика, та транспорт [1,4]. Важливою перевагою лазерної технології є точний контроль за формуванням мікроструктур, що дозволяє точно імітувати природні біологічні властивості, такі як гідрофобність, оптичні характеристики, та тертя. Наприклад, дослідження показали, що поверхня з лазерно сформованими лусками риби має видатні гідрофобні властивості, що дозволяє створювати "самомивні" поверхні, здатні знижувати накопичення забруднень і мікроорганізмів [3]. Крім того, лазерне створення таких структур на поверхні металів дозволяє значно знижувати тертя, що підвищує довговічність матеріалів і зменшує енергетичні витрати, особливо у системах, де тертя

відіграє критичну роль, таких як в двигунах, підводних апаратах та суднах [2,5].

Аналіз літератури також показує, що існує значний потенціал для розвитку нових підходів до створення матеріалів на основі лазерних технологій для спеціалізованих застосувань [6-8]. Зокрема, застосування лазерних імпульсів для створення мікроструктур типу "луска риби" на різних металевих сплавах, таких як нержавіюча сталь, дозволяє не лише знижувати тертя, але й покращувати корозійну стійкість та зносостійкість [1,3,4]. Це відкриває нові перспективи для використання лазерних технологій у промисловості, медицині, енергетиці та інших галузях.

Таким чином, розробка та впровадження технології лазерного створення мікроструктур типу «луска риби» на поверхні нержавіючої сталі є важливим кроком до створення нових, високоефективних матеріалів з унікальними властивостями, які можуть бути застосовані в різних технічних сферах.

Однак варто відзначити, що більшість існуючих досліджень в даній області зосереджена на використанні фемтосекундних лазерних імпульсів, які забезпечують високу точність і можливість формування складних мікроструктур. Натомість дослідження, що стосуються використання наносекундних лазерних імпульсів для формування періодичних мікроструктур типу "луска риби", є менш численними, що свідчить про недостатню розробленість цього напрямку. Зважаючи на це, наше дослідження спрямоване на вивчення технологічних особливостей формування таких структур за допомогою наносекундних лазерних імпульсів на нержавіючій сталі 12X18H10T, що може відкрити нові можливості для їх застосування в промислових умовах.

Мета роботи

Метою статті є наукове обґрунтування технологічних особливостей формування періодичних мікроструктур типу "луска риби" на поверхні нержавіючої сталі 12X18H10T шляхом наносекундного лазерного опромінення. Дослідження спрямоване на встановлення закономірностей взаємодії лазерного випромінювання з матеріалом, розробку математичної моделі процесів нагріву, фазових переходів, абляції та формування рельєфу поверхні, а також експериментальне підтвердження отриманих результатів.

З точки зору машинобудування, формування контрольованих періодичних мікроструктур на поверхні металів дозволяє модифікувати їх експлуатаційні характеристики, зокрема покращувати зносостійкість, знижувати коефіцієнт тертя, підвищувати адгезійні властивості та стійкість до корозії. Це відкриває широкі можливості для застосування лазерної мікротекстуризації в таких

галузях, як авіаційне, автомобільне, медичне та енергетичне машинобудування, де контрольоване формування мікрорельєфу поверхні може значно покращити функціональність і довговічність деталей та вузлів.

Таким чином, стаття спрямована на оптимізацію параметрів лазерної обробки для створення мікроструктур із заданими геометричними характеристиками, що може бути використано при розробці нових технологічних процесів і вдосконаленні поверхневої обробки металів у машинобудуванні.

Виклад основного матеріалу

На початковому етапі дослідження було розглянуто питання взаємодії наносекундного лазерного випромінювання з поверхнею металу. Для створення теоретичної моделі сканування та взаємодії короткоімпульсного лазерного випромінювання з поверхнею нержавіючої сталі 12X18H10T необхідно було враховувати фізичні процеси, що відбуваються під час лазерної обробки, зокрема нагрів, фазові переходи, абляцію та формування шорсткості поверхні. Визначено, що модель повинна базуватися на рівняннях теплопровідності, кінетиці фазових переходів і механізмах абляції. Нижче наведено основні етапи та рівняння для побудови моделі.

Модель нагріву та руйнування поверхні

Розглянемо особливості взаємодії наносекундного лазерного випромінювання з поверхнею нержавіючої сталі 12X18H10T. Для цього було розроблено теоретичну модель, яка враховує фізичні процеси, що відбуваються під час лазерної обробки, включаючи нагрів, фазові переходи, абляцію та формування шорсткості поверхні.

Модель базується на рівняннях теплопровідності, кінетиці фазових переходів та механізмах абляції [9-13]. Основні рівняння для моделювання виглядають наступним чином:

1. Рівняння теплопровідності:

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (k \nabla T) + Q, \quad (1)$$

де Q — джерело тепла, яке залежить від поглинання лазерного випромінювання, визначене рівнянням:

$$Q = \alpha I \exp\left(-\frac{r^2}{2\sigma^2}\right) \exp(-az). \quad (2)$$

Інтенсивність випромінювання I визначається як:

$$I = \frac{E_p}{\pi(d/2)^2 \tau}, \quad (3)$$

де E_p — енергія імпульсу, d — діаметр плями лазера, τ — тривалість імпульсу.

Маємо на увазі, що інтенсивність I можна представити як функцію Гаусового розподілу інтенсивності:

$$I(x, y) = \exp\left(-\frac{(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2}{2\sigma^2}\right), \quad (4)$$

де x_0, y_0 – координати центру лазерного імпульсу, σ – стандартне відхилення (визначає радіус, на якому інтенсивність зменшується).

2. Розв'язок рівняння теплопровідності:

$$T_{m \rightarrow b} = T + \frac{Q \cdot \tau}{\rho \cdot C_p}, \quad (5)$$

де ρ – густина, C_p – теплоємність.

При досягненні температури T_m відбувається плавлення матеріалу, а при температурі T_b – випаровування/

Кількість розплавленого матеріалу визначається балансом енергії:

$$E_m = \rho L_m V_m, \quad (6)$$

де V_m – об'єм розплавленого матеріалу. Швидкість випаровування описується рівнянням:

$$\frac{dm}{dt} = \frac{I - I_{th}}{L_v}, \quad (7)$$

де I_{th} – порогова інтенсивність для випаровування.

Абляція матеріалу описується рівнянням (8):

$$h = \frac{E_p}{\rho L_v A}, \quad (8)$$

де A – площа плями лазера, h – глибина абляції.

Шорсткість поверхні формується через неоднорідність нагріву та абляції. Профіль поверхні можна описати функцією (9):

$$z(x, y) = z_0 + \Delta z(x, y), \quad (9)$$

де z_0 – початкова поверхня, $\Delta z(x, y)$ – зміна висоти поверхні через абляцію.

Для чисельного розв'язання цієї моделі використовуються методи скінченних елементів (FEM) і скінченних різниць (FDM). Профіль шорсткості поверхні отримується через чисельне моделювання з оновленням після кожного імпульсу.

Чисельне моделювання та візуалізація результатів

Для моделювання процесів формування шорсткості поверхні під час лазерної обробки матеріалу, зокрема абляції та теплопереносу, використовуватимемо чисельне розв'язання рівнянь теплопровідності з урахуванням ефекту абляції. Це дозволить точніше описати термічні впливи, що

виникають внаслідок лазерного випромінювання, а також динаміку фазових переходів матеріалу при високих температурах. Для розв'язання поставленої задачі застосовуватимемо комбінований підхід із використанням методу скінченних елементів (FEM) для розв'язування рівнянь теплопровідності та методу скінченних різниць (FDM) для чисельного інтегрування процесів, що супроводжують абляцію.

Основна задача чисельного моделювання полягає у розбитті області обробки на сітку, на якій будуть проводитись обчислення температурних полів та визначення ефектів абляції. Для кожного вузла сітки розв'язуватимемо рівняння теплопровідності, враховуючи зміну температури в матеріалі та фазові переходи, які виникають під час обробки. Після кожного імпульсу лазера здійснюється оновлення профілю поверхні матеріалу, що дозволяє відслідковувати еволюцію шорсткості в часі.

Для чисельного розв'язання задачі та візуалізації результатів використано програмне забезпечення Python 3.13 з використанням бібліотек, зокрема Matplotlib, що дає змогу наочно представити отримані результати в графічному вигляді. Це дозволяє візуалізувати не тільки температурні поля, але й профіль шорсткості поверхні на кожному етапі обробки.

Розглянемо вихідні параметри обробки матеріалу лазером та характеристики сталі.

В якості вихідних параметрів будемо використовувати обробку нержавіючої сталі 12X18H10T, здійснену лазером Мінімаркер 2, відповідно до характеристик, наведених у розділі 2. Надаємо основні фізичні властивості матеріалу, зокрема:

- матеріал: Нержавіюча сталь 12X18H10T
- густина (ρ): 8 г/см³
- теплоємність (C_p): 500 Дж/(кг·К)
- теплопровідність (k): 15 Вт/(м·К)
- температура плавлення (T_m): 1673 K
- температура кипіння (T_p): 3200 K
- питома теплота плавлення (L_m): 2.47×10^5 Дж/кг
- питома теплота випаровування (L_v): 6.09×10^6 Дж/кг
- коефіцієнт поглинання (α): 0.3

Параметри лазера Мінімаркер 2 та умови обробки включають:

- тривалість імпульсу (τ): 100 нс
- частота імпульсів (f): 20 кГц
- потужність (P): 50 Вт
- максимальна енергія імпульсу (E_p): до 1 мДж
- діаметр плями (d): 25 мкм
- площа плями (A): $A = \pi(d/2)^2$
- швидкість сканування (v): до 200 мм/с
- крок сканування (Δy): 25-50 мкм

Ці параметри визначають основні умови для моделювання процесів, що відбуваються на поверхні сталі при обробці лазерним випромінюванням. Враховуючи розмір плями лазера, параметри матеріалу і потужність імпульсів, ми можемо побудувати математичну модель нагріву і абляції, що

дозволяє детально вивчити механізми взаємодії лазерного випромінювання з поверхнею сталі.

Спочатку було перевірено, як працює наша модель при базовому розрахунку параметрів. За умов енергії імпульсу $I = 0.5$ мДж отримано наступні результати:

- Глибина абляції за один імпульс (h): $h \approx 0.1$ мкм
- Кількість імпульсів на точку (N): $N = \frac{f \cdot d}{v} \approx 5$
- Загальна глибина абляції (H): $H = N \cdot h \approx 0.5$ мкм

Додатково враховано, що поглинання випромінювання на повторних імпульсах значно знижується через інтенсивний тепловий вплив. Для наносекундних імпульсів з енергією до 10 мДж і частотою повторення 10 кГц, за різними оцінками, зниження поглинання може досягати 30%.

Таким чином, модель, на основі отриманих результатів, показує реальні значення глибини абляції, що дозволяє стверджувати про її адекватність для опису реальних фізичних процесів. Крок за кроком модель коректно відображає взаємодію лазерного випромінювання з матеріалом, включаючи термічний вплив і динаміку поверхневих змін.

Зі збільшенням енергії імпульсів спостерігається зростання загальної глибини абляції, що підтверджується тривимірними візуалізаціями кратеру (рис. 1 – рис.3).

На основі чисельних розрахунків видно, що кратер, утворений під впливом лазера, має форму, характерну для Гаусового розподілу, що корелює з просторовим розподілом інтенсивності лазерного променя.

Це підтверджує, що модель вірно відображає фізичні закономірності, що визначають поведінку матеріалу під час лазерної обробки. Крім того, зображення 3D візуалізації кратеру, отримані за допомогою Python та бібліотеки Matplotlib, підтверджують правильність моделювання (рис. 1-рис.3).

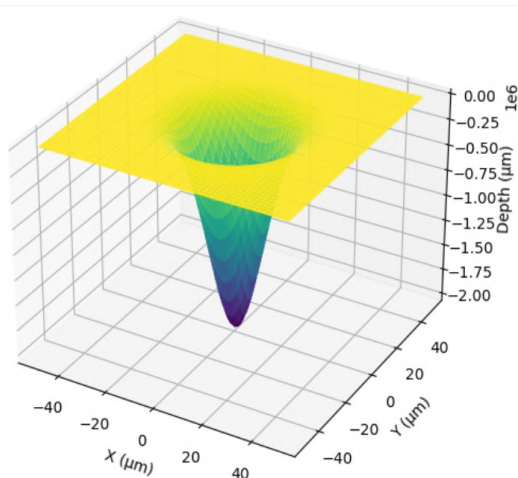


Рис. 1 – 3D візуалізація кратеру руйнування поверхні сталі

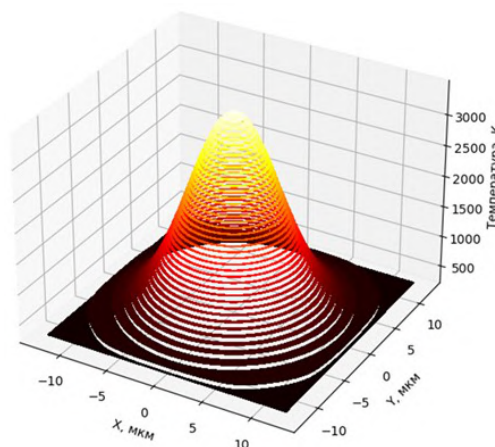


Рис. 2 – 3D візуалізація розподілу температури в кратері при руйнуванні поверхні сталі (лазерний промінь діє з низу пластини сталі - 5×10^{-1} дж)

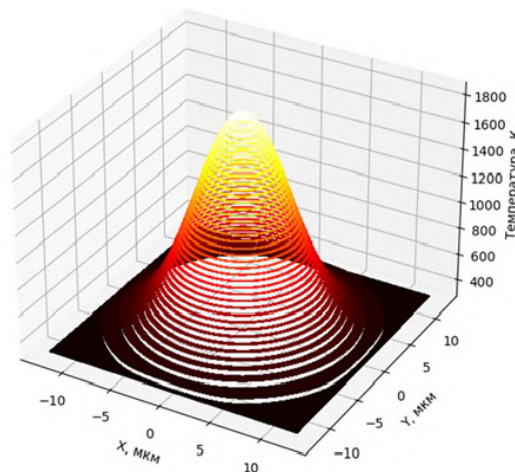


Рис. 3 – 3D візуалізація розподілу температури в кратері при руйнуванні поверхні сталі (лазерний промінь діє з низу пластини сталі - 2.5×10^{-1} дж)

Обговорення результатів

Результати чисельного моделювання

Чисельне моделювання процесів теплопередачі, фазових переходів та абляції під дією наносекундного лазерного імпульсу дозволило отримати узгоджені з фізичними закономірностями результати щодо формування кратерів та зміни температурного поля в області обробки.

Отримані результати підтверджують, що поглинання випромінювання при повторних імпульсах знижується внаслідок термічного впливу на матеріал. За оцінками, для наносекундних імпульсів тривалістю 10–100 нс, енергією до 10 мДж та частотою повторення 10 Гц зниження поглинання може дійсно досягати до 30%. Це зумовлено накопиченням тепла, що впливає на ефективність абляції. Зокрема, очікувана глибина абляції

зменшується приблизно на 30% у порівнянні з ізолюваним впливом одного імпульсу.

На основі моделювання підтверджено кореляцію між енергією імпульсу та глибиною абляції. Візуалізація кратерів (рис. 1) демонструє, що форма кратеру відповідає Гаусовому розподілу. Додатково, 3D-візуалізація температурного поля в кратері при руйнуванні поверхні сталі (рис. 2, рис.3) дозволяє оцінити динаміку зміни температури при різних енергетичних параметрах лазерного променя.

Моделювання розподілу профілю руйнування у місці дії лазерного променя (рис. 4) показує, що при збільшенні кількості імпульсів профіль кратеру поглиблюється, однак ефективність кожного наступного імпульсу поступово знижується.

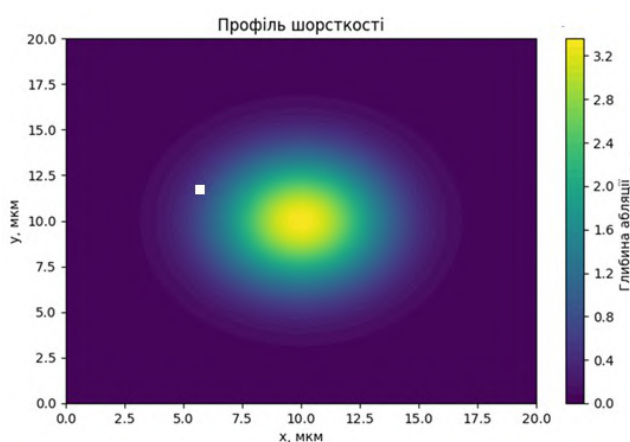


Рис. 4 – Розподіл профілю руйнування поверхні у місці дії лазерного променя при n'яти імпульсах

При аналізі процесу сканування лазерного променя вздовж ліній сканування було визначено, що температурний розподіл між сусідніми імпульсами суттєво змінюється залежно від перекриття імпульсів. На рис. 5 представлено температурне поле для двох лазерних імпульсів із 50% перекриттям, а на рис. 6 – форма кратерів для двох послідовних імпульсів. Видно, що зона термічного впливу значно розширюється при збільшенні кількості імпульсів.

При скануванні трьох імпульсів (рис. 7) температурний профіль виявляє локальні зони перегріву, що впливає на стабільність формування кратерів. Подальше збільшення кількості імпульсів до двадцяти (рис. 8) демонструє ще більш виражену взаємодію сусідніх зон нагріву, що змінює топографію поверхні. При цьому на рис. 9 представлено розподіл профілю руйнування поверхні після двадцяти імпульсів, що підтверджує ефект насичення та зміни характеру абляції на пізніх стадіях процесу.

Таким чином, отримані результати чисельного моделювання дозволяють зробити висновок, що розроблена модель коректно описує процеси нагріву, фазових переходів та абляції у сталі 12X18H10T при дії наносекундних лазерних імпульсів.

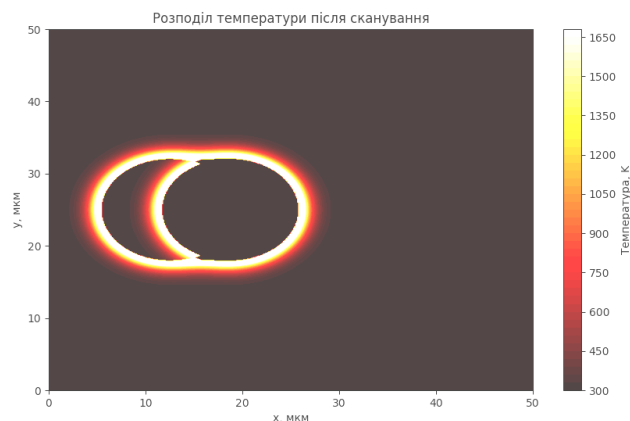


Рис. 5 – Розподіл температурного поля при скануванні двох лазерних імпульсів вздовж ліній сканування (перекриття імпульсів вздовж 50%)

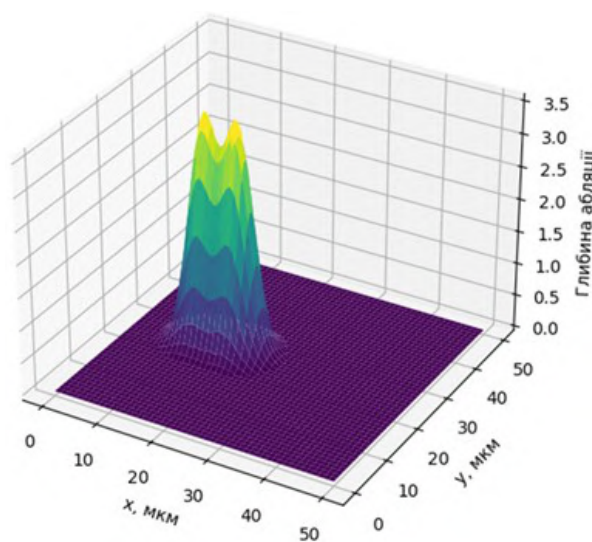


Рис. 6 – Форма кратерів для двох послідовних сусідніх імпульсів

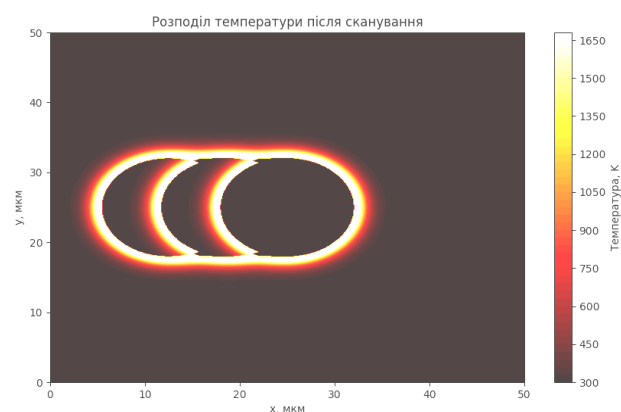


Рис. 7 – Розподіл температурного поля при скануванні трьох лазерних імпульсів вздовж ліній сканування (перекриття імпульсів вздовж 50%)

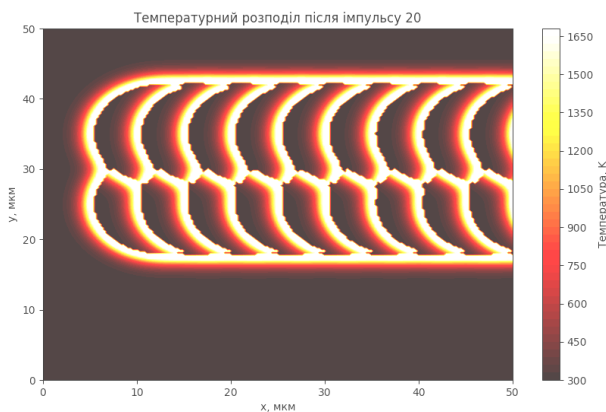


Рис. 8 – Розподіл температурного поля при скануванні двадцяти лазерних імпульсів вздовж ліній сканування (перекриття імпульсів вздовж 50%)

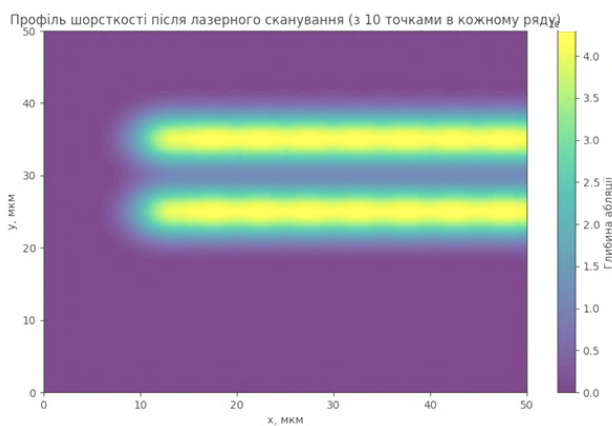


Рис. 9 – Розподіл профілю руйнування поверхні у місці дії лазерного променя при 20 імпульсах

Комп'ютерне 3D-моделювання кратерів та температурного поля підтверджує високу адекватність використаних чисельних методів та дозволяє прогнозувати результати обробки при різних режимах лазерного опромінення.

Експериментальні результати

Для верифікації чисельних розрахунків та перевірки можливості практичного формування періодичних мікроструктур на поверхні нержавіючої сталі 12X18H10T було проведено експериментальне дослідження лазерного мікротекстурування за допомогою наносекундного лазера Мінімаркер 2 згідно з одержаними розрахунками.

Дослідження взаємодії наносекундного лазерного випромінювання з матеріалом показало, що контрольований локальний нагрів, фазові переходи та абляція призводять до формування періодичних мікроструктур із чітко вираженим рельєфом [14,15]. Для оцінки геометричних параметрів сформованих структур було використано цифровий оптичний мікроскоп ZEISS AXIO. Візуалізація профілю

мікроструктури у місці дії лазерного променя представлена на рис. 10.

Отримані експериментальні дані свідчать про те, що форма і розміри створених мікроструктур добре співпадають з результатами чисельного моделювання. Водночас, у ході експерименту встановлено, що зміна відстані між лініями сканування впливає на характер і чіткість формованих мікроструктур. Наприклад, при збільшенні кроку сканування спостерігається більш виражене розділення структур, що дозволяє детальніше дослідити їх морфологічні особливості. При зменшенні відстані між лініями сканування (рис. 11) форма та розміри отриманих мікроструктур стали ще більш подібними до теоретичних розрахунків (рис. 8).

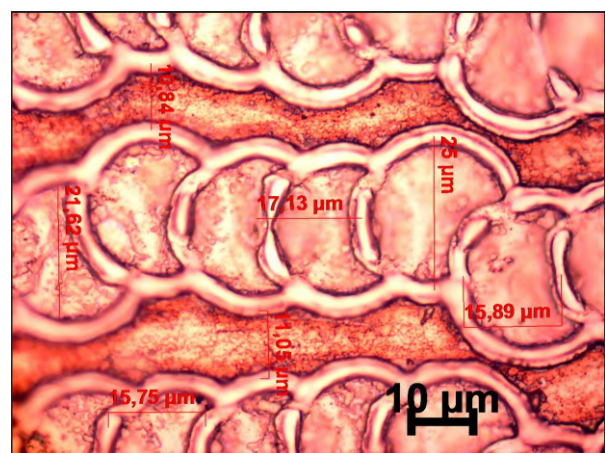


Рис. 10 – Розподіл профілю мікроструктури поверхні у місці дії лазерного променя при скануванні поверхні нержавіючої сталі 12X18H10T

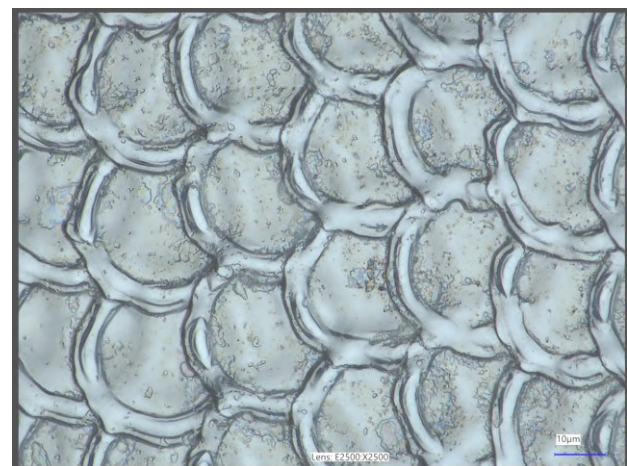


Рис. 11 – Розподіл профілю мікроструктури поверхні у місці дії лазерного променя при скануванні поверхні нержавіючої сталі 12X18H10T

Детальний аналіз шорсткості поверхні, обробленої лазером, було проведено за допомогою

цифрового мікроскопа KEYENCE VHX 7100. Профіль шорсткості поверхні представлено на рис. 12.

Результати аналізу показали високу повторюваність періодичних структур, що вказує на стабільність лазерного процесу та його здатність до відтворення заданих мікрорельєфних особливостей. Виявлено, що профіль шорсткості при дослідженні у локальній області (рис. 12, лінія буракового кольору) має характерну періодичну гармонічну форму.

Детальний аналіз контуру між виступами (розмір 22.89 мкм) вказує на його близькість до несиметричного Гаусового розподілу, з локальними деформаціями, що, ймовірно, є наслідком неоднорідності термічного впливу та локальної реорганізації матеріалу. Таким чином, реальна структура профілю шорсткості повинна аналізуватися як на мікрорівні (глибина до 1 мкм, рис. 12), так і на нанорівні, оскільки особливості рельєфу можуть суттєво впливати на експлуатаційні характеристики поверхонь, оброблених лазером.

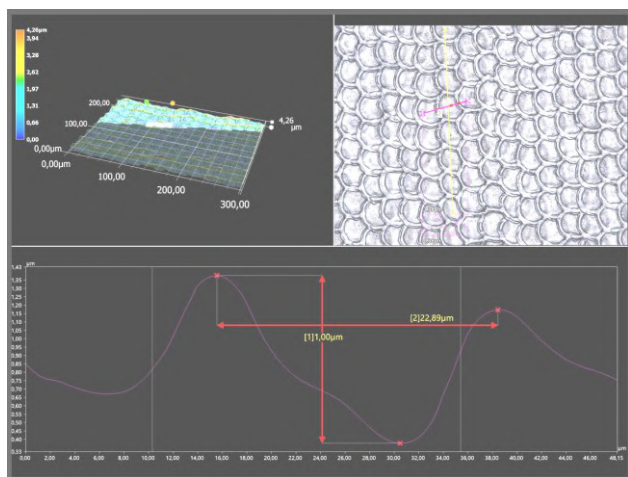


Рис. 12 – Розподіл профілю шорсткості на поверхні сталі

Формування періодичних мікроструктур на поверхні сталі має важливе практичне значення для підвищення експлуатаційних характеристик матеріалу. Отримані структури типу "луска риби" можуть сприяти зниженню коефіцієнта тертя, підвищенню зносостійкості та забезпечити кращу корозійну стійкість.

Механізм покращення трибологічних властивостей можна пояснити тим, що періодична текстура поверхні сприяє рівномірному розподілу масляного матеріалу, знижує контактну площу тертя та запобігає адгезійному зносу. Це може бути особливо корисним для застосування в авіаційній, автомобільній та медичній промисловості, де лазерна мікротекстуризація дозволяє підвищити довговічність та ефективність роботи деталей машин.

Отримані експериментальні результати підтвердили можливість ефективного створення періодичних мікроструктур на поверхні нержавіючої

сталі 12X18H10T шляхом контрольованого впливу наносекундного лазерного випромінювання. Спостережена висока відповідність між результатами чисельного моделювання та реальними експериментальними даними.

Підтверджено, що форма, розміри та періодичність отриманих мікроструктур залежать від енергетичних параметрів лазера, а також від режимів сканування, зокрема відстані між лініями. Прогнозоване підвищення зносостійкості свідчать про перспективність даної технології для промислового застосування.

Наступним кроком є дослідження можливості адаптації розробленої технології для інших типів металевих матеріалів та її подальша оптимізація з урахуванням промислових вимог.

Висновки

Проведене дослідження на основі чисельного моделювання показало, що розроблена математична модель, яка враховує фізичні процеси, що відбуваються під час лазерної обробки, успішно описує взаємодію лазерного випромінювання з поверхнею нержавіючої сталі 12X18H10T. Модель охоплює основні механізми, такі як нагрів, фазові переходи, абляція та формування шорсткості поверхні. Використання рівнянь теплопровідності та механізмів абляції дало змогу точно прогнозувати температурні поля та процеси абляції в залежності від параметрів лазерного випромінювання.

Дослідження показали, що зростання енергії імпульсу лазера призводить до збільшення глибини абляції, що підтверджується 3D-моделюванням кратерів, утворених лазерним випромінюванням. Крок за кроком модель чітко відображає динаміку змін на поверхні сталі, зокрема процес утворення кратерів та їх залежність від параметрів лазерного імпульсу.

Виявлено, що при повторних лазерних імпульсах поглинання випромінювання знижується через накопичення тепла в матеріалі, що призводить до термічного насичення. Це негативно впливає на ефективність абляції, і з кожним наступним імпульсом процес абляції стає менш ефективним. Визначено, що зниження поглинання може досягати до 30%, що має важливе значення при налаштуванні параметрів лазерної обробки.

Експериментальні дослідження лазерної обробки за допомогою наносекундного лазера підтвердили, що при відповідних умовах обробки на поверхні нержавіючої сталі можна формувати періодичні мікроструктури типу "луска риби". Це дозволяє покращити зносостійкість, знизити коефіцієнт тертя та підвищити корозійну стійкість, що є важливим для підвищення експлуатаційних характеристик матеріалу в різних галузях машинобудування.

Зміна відстані між лініями сканування впливає на форму та чіткість формованих мікроструктур. Збільшення кроку сканування призводить до більш вираженого розділення структур, тоді як зменшення відстані між лініями сканування дозволяє досягти більш чіткої форми мікроструктур, що наближається до ідеалізованих теоретичних моделей. Це відкриває нові можливості для налаштування процесу лазерної обробки з метою отримання заданих мікрорельєфних характеристик.

Експериментальні результати показали високу повторюваність формування періодичних мікроструктур, що вказує на стабільність процесу лазерного текстурювання. Це підтверджує здатність лазерного методу до точного і контрольованого формування заданих мікроструктур, що важливо для масового виробництва компонентів з підвищеними експлуатаційними характеристиками.

Враховуючи результати дослідження, можна стверджувати, що технологія лазерної мікротекстурювання має значний потенціал для підвищення ефективності та довговічності деталей машин в різних галузях, таких як авіаційне, автомобільне та медичне машинобудування. Формування контрольованих періодичних мікроструктур на поверхні матеріалів дозволяє досягати значного покращення їх зносостійкості, корозійної стійкості, а також зменшення коефіцієнта тертя, що безпосередньо впливає на підвищення надійності та довговічності механічних систем.

Список літератури

1. Wang Y., Zhang Z., Xu J., Yu H. One-step method using laser for large-scale preparation of bionic superhydrophobic & drag-reducing fish-scale surface. *Surf. Coat. Technol.* 2020. № 126801. doi:10.1016/j.surfcoat.2020.126801.
2. Müller F. A., Kunz C., Gräf S. Bio-Inspired Functional Surfaces Based on Laser-Induced Periodic Surface Structures. *Materials*. 2016. № 9(6). P. 476. doi:10.3390/ma9060476.
3. Yao L., Huang S., Xiao Z. M. On the formation of "Fish-scale" morphology with curved grain interfacial microstructures during selective laser melting of dissimilar alloys. *Acta Materialia*. 2021. 220. P. 117331. doi:10.1016/j.actamat.2021.117331.
4. Chen D., Zhang B., Zhang H., Shangguan Z., Sun C., Cui X., Liu X., Zhao Z., Liu G., Chen H. Laser Ablating Biomimetic Periodic Array Fish Scale Surface for Drag Reduction. *Biomimetics*. 2024. № 9 (7). P. 415. doi:10.3390/biomimetics9070415.
5. Wu X., Wang Y., Xu J., Yu H. Study on surface fabrication and drag reduction performance of the bionic fish-scale composite structure. *J. Phys.: Conf. Ser.* 2023. № 2499. P. 012005. doi:10.1088/1742-6596/2499/1/012005.
6. Wu L., Jiao Z., Song Y. et al. Experimental investigations on drag-reduction characteristics of bionic surface with water-trapping microstructures of fish scales. *Sci. Rep.* 2018. № 8. P. 12186. doi:10.1038/s41598-018-30490-x.
7. Guo L., Liu Y., Ma L. et al. A review of drag reduction technology inspired from biomimetic surfaces and functions.

- Friction*. 2025. № 13. P. 3. doi:10.26599/FRICT.2025.9440876.
8. Yu A., Fu Y., Xie S. et al. Biomimetic interfaces for drag reduction: From mechanism to applications. *Friction*. 2025. № 13. P. 3. doi:10.26599/FRICT.2025.9440900.
9. Афанасьєва О. В., Лалазарова Н. О., Федоренко Є. П. *Лазерна поверхнева обробка матеріалів*. Харків, 2020. 100 с.
10. Коваленко В. С., Головка Л. Ф., Черненко В. С. *Зміцнення та легування деталей машин променем лазера*. Київ: Техніка, 1990. 190 с.
11. Головка Л. Ф., Лук'яненко С. О. *Лазерні технології та комп'ютерне моделювання: монографія*. Київ: Вістка, 2009. 296 с.
12. Головка Л. Ф., Лук'яненко С. О., Михайлова І. Ю., Третяк В. А. *Комп'ютерне моделювання у лазерних технологіях: монографія*. Київ: ВПП «Текст», 2015. 236с.
13. Steen W. M., Mazumder J. *Laser Material Processing*. Springer London, 2010. doi:10.1007/978-1-84996-062-5.
14. Dobrotvorskiy S., Gnilitzkiy I. M., Aleksenko B. A., Basova Y., Zawadzki P., Kościński M. Influence of stainless steel surface roughness parameters on the degree of its blackening during femtosecond laser processing. *Results in Surfaces and Interfaces*, 2025, № 18. P. 100390. doi:10.1016/j.rsufi.2024.100390.
15. Zawadzki P., Dobrotvorskiy S., Aleksenko B., Talar R. Effect of nanosecond laser texturization on tribological behavior of AISI 321 stainless steel. *Materials*, 2024, № 17, P. 5870. doi:10.3390/ma17235870.

References (transliterated)

1. Wang Y., Zhang Z., Xu J., Yu H. One-step method using laser for large-scale preparation of bionic superhydrophobic & drag-reducing fish-scale surface. *Surf. Coat. Technol.*, 2020, no. 126801, doi:10.1016/j.surfcoat.2020.126801.
2. Müller F. A., Kunz C., Gräf S. Bio-Inspired Functional Surfaces Based on Laser-Induced Periodic Surface Structures. *Materials*, 2016, no. 9(6), pp. 476, doi:10.3390/ma9060476.
3. Yao L., Huang S., Xiao Z. M. On the formation of "Fish-scale" morphology with curved grain interfacial microstructures during selective laser melting of dissimilar alloys. *Acta Materialia*, 2021, 220, pp. 117331, doi:10.1016/j.actamat.2021.117331.
4. Chen D., Zhang B., Zhang H., Shangguan Z., Sun C., Cui X., Liu X., Zhao Z., Liu G., Chen H. Laser Ablating Biomimetic Periodic Array Fish Scale Surface for Drag Reduction. *Biomimetics*, 2024, no. 9(7), pp. 415, doi:10.3390/biomimetics9070415.
5. Wu X., Wang Y., Xu J., Yu H. Study on surface fabrication and drag reduction performance of the bionic fish-scale composite structure. *J. Phys.: Conf. Ser.*, 2023, no. 2499, pp. 012005, doi:10.1088/1742-6596/2499/1/012005.
6. Wu L., Jiao Z., Song Y. et al. Experimental investigations on drag-reduction characteristics of bionic surface with water-trapping microstructures of fish scales. *Sci. Rep.*, 2018, no. 8, pp. 12186, doi:10.1038/s41598-018-30490-x.
7. Guo L., Liu Y., Ma L. et al. A review of drag reduction technology inspired from biomimetic surfaces and functions. *Friction*, 2025, no. 13, pp. 3, doi:10.26599/FRICT.2025.9440876.
8. Yu A., Fu Y., Xie S. et al. Biomimetic interfaces for drag reduction: From mechanism to applications. *Friction*, 2025, no. 13, pp. 3, doi:10.26599/FRICT.2025.9440900.

9. Afanasieva O. V., Lalazarova N. O., Fedorenko Ye. P. *Lazerna poverkhneva obrobka materialiv [Laser surface treatment of materials]*. Kharkiv, 2020, 100 p.
10. Kovalenko V. S., Holovko L. F., Chernenko V. S. *Zmitsnennia ta lehuвання detalei mashyn promenem lazera [Strengthening and alloying of machine parts with a laser beam]*. Kyiv. Tekhnika, 1990, 190 p.
11. Holovko L. F., Luk'ianenko S. O. *Lazerni tekhnologii ta komp'uterne modeliuvannia: monohrafiia [Laser technologies and computer modeling: a monograph]*. Kyiv. Vistka, 2009, 296 p.
12. Holovko L. F., Luk'ianenko S. O., Mykhailova I. Yu., Tretiak V. A. *Komp'uterne modeliuvannia u lazernykh tekhnolohiiakh: monohrafiia [Computer modeling in laser technologies: a monograph]*. Kyiv. VPP «Tekst», 2015, 236p.
13. Steen W. M., Mazumder J. *Laser Material Processing*. Springer London, 2010. doi:10.1007/978-1-84996-062-5.
14. Dobrotvorskii S., Gnilit'skyi I. M., Aleksenko B. A., Basova Y., Zawadzki P., Kościński M. Influence of stainless steel surface roughness parameters on the degree of its blackening during femtosecond laser processing. *Results in Surfaces and Interfaces*, 2025, vol. 18, pp. 100390, doi:10.1016/j.rsurfi.2024.100390.
15. Zawadzki P., Dobrotvorskii S., Aleksenko B., Talar R. Effect of nanosecond laser texturization on tribological behavior of AISI 321 stainless steel. *Materials*, 2024, vol. 17, pp. 5870, doi:10.3390/ma17235870.

Відомості про авторів (About authors)

Доброворський Сергій Семенович – доктор технічних наук, професор, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», професор кафедри технології машинобудування та металорізальних верстатів; м. Харків, Україна; ORCID: 0000-0003-1223-1036; e-mail: sergiy.dobrotvorskyy@khpі.edu.ua.

Sergiy Dobrotvorskii – Doctor of Technical Sciences, Professor, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Professor at the Department of Mechanical Engineering Technology and Metal-Cutting Machines; Kharkiv, Ukraine; ORCID: 0000-0003-1223-1036; e-mail: sergiy.dobrotvorskyy@khpі.edu.ua.

Алексенко Борис Олександрович – кандидат технічних наук, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», старший науковий співробітник кафедри технології машинобудування та металорізальних верстатів; м. Харків, Україна; ORCID: 0000-0001-9680-9370; e-mail: borys.aleksenko@khpі.edu.ua.

Borys Aleksenko – Candidate of Technical Sciences (Ph.D.), National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Senior Research Fellow at the Department of Mechanical Engineering Technology and Metal-Cutting Machines; Kharkiv, Ukraine; ORCID: 0000-0001-9680-9370; e-mail: borys.aleksenko@khpі.edu.ua.

Басов Віктор Вікторович – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», молодший науковий співробітник кафедри технології машинобудування та металорізальних верстатів; м. Харків, Україна; ORCID: 0009-0007-2889-3946; e-mail: basovkd@gmail.com.

Viktor Basov – National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Junior Research Fellow at the Department of Mechanical Engineering Technology and Metal-Cutting Machines; Kharkiv, Ukraine; ORCID: 0009-0007-2889-3946; e-mail: basovkd@gmail.com.

Трубін Дмитро Володимирович – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», аспірант кафедри технології машинобудування та металорізальних верстатів; м. Харків, Україна; ORCID: 0009-0000-7953-6139; e-mail: d.trubin05@gmail.com.

Dmytro Trubin – National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Ph.D. Student at the Department of Mechanical Engineering Technology and Metal-Cutting Machines; Kharkiv, Ukraine; ORCID: 0009-0000-7953-6139; e-mail: d.trubin05@gmail.com.

Кошцінський Миколай – PhD з фізики, ад'юнкт, Кафедра фізики і біофізики, Університет природничих наук у Познані, Познань, Польща; ORCID: 0000-0003-0569-3312; e-mail: mikolaj.koscinski@up.poznan.pl.

Mikolaj Kościński – Ph.D. in Physics, Assistant Professor, Department of Physics and Biophysics, Poznań University of Life Sciences, Poznań, Poland; ORCID: 0000-0003-0569-3312; e-mail: mikolaj.koscinski@up.poznan.pl.

Завадзький Павел – доктор технічних наук, доцент, Інститут механічних технологій, Познанський технічний університет, Познань, Польща; ORCID: 0000-0001-8153-8774; e-mail: pawel.zawadzki@put.poznan.pl.

Pawel Zawadzki – Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Institute of Mechanical Technology, Poznań University of Technology, Poznań, Poland; ORCID: 0000-0001-8153-8774; e-mail: pawel.zawadzki@put.poznan.pl.

Будь ласка, посилайтесь на цю статтю наступним чином:

Доброворський С. С., Алексенко Б. О., Басов В. В., Трубін Д. В., Кошцінський М., Завадзький П. Технологічні особливості формування періодичних мікроструктур типу «луска риби» на поверхні нержавіючої сталі 12Х18Н10Т наносекундним лазерним опроміненням. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Нові рішення в сучасних технологіях.* – Харків: НТУ «ХПІ». 2025. № 1 (23). С. 9-18. doi:10.20998/2413-4295.2025.01.02.

Please cite this article as:

Dobrotvorskii S., Aleksenko B., Basov V., Trubin D., Kościński M., Zawadzki P. Technological features of periodic microstructure formation of the «fish-scale» type on the surface of 12X18H10T stainless steel by nanosecond laser irradiation. *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: New solutions in modern technology.* – Kharkiv: NTU "KhPI", 2025, no. 1(23), pp. 9–18, doi:10.20998/2413-4295.2025.01.02.

Надійшла (received) 20.02.2025
Прийнята (accepted) 22.03.2025