

УДК 583.95

МОДЕЛЮВАННЯ ТЕПЛОФІЗИЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ І ВПЛИВУ ІМПУЛЬСНОГО ЛАЗЕРНОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ НА СИСТЕМУ «ЗНОСОСТІЙКЕ ПОКРИТТЯ – РІЗАЛЬНИЙ ІНСТРУМЕНТ»

Канд. техн. наук Ю. В. Широкий, асист. О. Д. Семененко

MODELING OF THERMOPHYSICAL PROPERTIES AND THE EFFECTS OF PULSED LASER RADIATION ON THE “WEAR-RESISTANT COATING–CUTTING TOOL” SYSTEM

PhD (Tech.) Y. V. Shyrokyi, assistant O. D. Semenenko

DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.215.2026.358685>



***Анотація.** Стаття присвячена аналізу впливу імпульсної лазерної обробки (ІЛО) на поверхню покриттів різального інструменту з метою формування наноструктур і підвищення зносостійкості. Незважаючи на значну кількість досліджень наноструктур [4–10], недостатньо вивченими залишаються технологічні параметри фемтосекундних лазерів для отримання нанозерен, вплив способу задавання теплофізичних і термомеханічних характеристик на точність прогнозу властивостей отриманих покриттів, а також термомеханічні напруги в багатошарових композиціях.*

Розроблена математична модель допомагає теоретично оцінити параметри імпульсної лазерної обробки, що забезпечують необхідні властивості різальних інструментів із твердого сплаву зі зносостійкими покриттями. Встановлено, що зміна теплофізичних властивостей шарів значно позначається на розподілі температур у композиції. Однак із зростанням кількості шарів і їхньої товщини вплив теплофізичних властивостей кожного шару на розподіл температур у композиції стає незначним. Спрямовано підбираючи теплофізичні характеристики матеріалу шарів покриття, можна керувати формуванням ізотерм в обсязі всієї композиції. Водночас отримані дані показують, що критичні щільності потужності для покриттів різного складу і конструкцій відрізняються незначно через малу відмінність їхніх коефіцієнтів теплопровідності. Крім того, із визначенням критичної щільності потужності важливим є питання про напруги, що виникають з ІЛО на межі покриття з інструментальною основою. Величина цих напруг може істотно вплинути на величину критичної щільності потужності, визначену з урахуванням лише аналізу теплового стану композиції «покриття-інструментальна основа». Аналітичне рішення визначення напруг є досить складним завданням. З іншого боку, розв'язання цієї проблеми можливе через чисельне моделювання процесу впливу ІЛО на композицію «багатошарове покриття-інструментальна основа».

Методика включає розв'язання спільної задачі теплопровідності та термопружності зі стохастичними і квантово-механічно обчисленими характеристиками. Аналіз залежності кривих показав, що за відносно невисоких щільностей теплового потоку відмінність невелика, тоді як зі зростанням теплового потоку цих значень збільшується, щоправда незначно. А зі зменшенням часу дії теплового потоку ця відмінність зростає. Видно, що фемтосекундний лазер дуже чутливий до способу задавання теплофізичних і термомеханічних характеристик.

ISSN (p) 1994-7852

ISSN (online) 2413-3795

© Широкий Ю. В., Семененко О. Д., 2026.

Висновки підкреслюють практичне значення моделі для оптимізації ІЛО різального інструменту в машинобудуванні.

Ключові слова: імпульсна лазерна обробка, технологічні параметри лазера, фемтосекундний лазер, твердий сплав, різальний інструмент, наноструктурні шари.

Abstract. The article is devoted to the analysis of the influence of pulsed laser processing (PLP) on the surface of coatings for cutting tools with the aim of forming nanostructures and improving wear resistance. Despite the significant number of studies on nanostructures, generalized in monographs [4–10], the technological parameters of femtosecond lasers for obtaining nanograins remain insufficiently studied, as well as the influence of the method of specifying thermophysical and thermomechanical characteristics on the accuracy of prediction, and thermomechanical stresses in multilayer compositions.

The developed mathematical model allows theoretical evaluation of the parameters of pulsed laser processing that ensure the required properties of cutting tools made of cemented carbide with wear-resistant coatings. It has been established that changes in the thermophysical properties of layers significantly affect the temperature distribution in the composition. However, with an increase in the number of layers and their thicknesses, the influence of the thermophysical properties of each layer on the temperature distribution in the composition becomes insignificant. By purposefully selecting the thermophysical characteristics of the coating layer materials, it is possible to control the formation of isotherms throughout the entire composition volume. At the same time, the obtained data show that the critical power densities for coatings of different compositions and structures differ insignificantly due to the small difference in their thermal conductivity coefficients. In addition, when determining the critical power density, the issue of stresses arising during PLP at the interface between the coating and the tool base is important. The magnitude of these stresses can significantly affect the value of the critical power density determined considering only the analysis of the thermal state of the «coating-tool base» composition. Analytical solution for determining stresses is a rather complex task. On the other hand, solving this problem is possible through numerical modeling of the PLP influence process on the «multilayer coating-tool base» composition.

The methodology includes solving the coupled problem of heat conduction and thermoelasticity using stochastic and quantum-mechanically calculated characteristics. Analysis of the dependence curves showed that at relatively low heat flux densities the difference is small, while with an increase in the heat flux the difference increases, though insignificantly. And with a decrease in the duration of the heat flux action, this difference grows. It is evident that the femtosecond laser is very sensitive to the method of specifying thermophysical and thermomechanical characteristics.

The conclusions emphasize the practical significance of the model for optimizing PLP of cutting tools in mechanical engineering.

Keywords: pulsed laser processing, laser technological parameters, femtosecond laser, cemented carbide, cutting tool, nanostructured layers.

Вступ. У сучасній промисловості, зокрема в інструментальному виробництві, поверхневі покриття різального інструменту відіграють головну роль для підвищення зносостійкості, термічної стабільності та загальної ефективності обробки матеріалів. Імпульсна лазерна обробка, особливо з використанням фемтосекундних лазерів, відкриває нові перспективи для модифікації

поверхонь, даючи змогу формувати наноструктури з високою точністю і мінімальним тепловим впливом на підкладку. Експериментальні дослідження демонструють можливість отримання нанорозмірних зерен на різних матеріалах, що суттєво покращує механічні властивості покриттів, такі як твердість, адгезія і стійкість до корозії. Однак на сьогодні

відсутня адекватна теоретична модель, яка б повноцінно описувала процеси формування наноструктур за дії фемтосекундних лазерів, що обмежує прогнозування та оптимізацію технологічних режимів [1-9].

Традиційні підходи, засновані на інтегральних значеннях теплофізичних і термомеханічних характеристик (таких як теплопровідність, теплоємність, щільність, модуль пружності та коефіцієнт лінійного розширення), забезпечують добру узгодженість з експериментальними даними за умови тривалого теплового впливу. Проте для ультракоротких імпульсів фемтосекундного діапазону ці моделі (наприклад моделі 1-15, описані в літературі) можуть бути недостатньо точними, оскільки не враховують квантово-механічні ефекти, що домінують у зоні лазерної дії. Метою цієї роботи є аналіз впливу імпульсної лазерної обробки на поверхню покриттів різального інструменту, надаючи особливу увагу оцінюванню можливості застосування існуючих моделей для прогнозування розмірів нанозерен. Зокрема, ми оцінюємо режими обробки, за яких гарантовано формується наноструктура, а також порівнюємо результати моделювання за стохастичним і квантово-механічним способами задавання теплофізичних і термомеханічних параметрів.

Оцінювання адекватності моделі залежно від методу визначення характеристик дасть змогу виявити потенційні помилки як у параметрах, так і в самій моделі. Оскільки квантово-механічний підхід забезпечує оцінювання порядку величини, близьку до реальних значень, його інтеграція з традиційними методами може суттєво підвищити точність прогнозування обсягу наноструктур. Результати дослідження матимуть практичне значення для розроблення інноваційних технологій поверхневої модифікації різального інструменту, сприяючи підвищенню продуктивності та довговічності в машинобудуванні та суміжних галузях.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Останні дослідження демонструють значний прогрес у вивченні імпульсної лазерної обробки поверхні покриттів різальних інструментів, особливо текстурування для покращення трибологічних властивостей, зменшення зносу та сил різання. Фемтосекундні лазери, на відміну від наносекундних, мінімізують тепловий вплив, допомагаючи формувати мікро- та наноструктури без мікротріщин, що особливо актуально для WC-Co і PCD-інструментів для обробки титанових сплавів і нержавіючої сталі.

Роботи [1, 3] підтверджують перспективність фемтосекундного текстурування для підвищення продуктивності: хрестоподібні мікропатерни на WC-Co вставках, сформовані на «зеленому» тілі перед спіканням (ширина канавки ~100 мкм, глибина ~155 мкм), зменшили знос на 33 % із токарною обробкою AISI 316L за рахунок скорочення площі контакту, покращення мащення та відведення тепла; оптимальна відстань патернів від ріжучого краю – 200 мкм, що уникає руйнування інструменту [1]; показано зменшення сил різання на 20 % для алюмінію та сталі завдяки канавкам і вм'ятинам (діаметр 80–200 мкм, щільність 10–30 %) на WC-TiC/Co з ефектом, подібним до сухої обробки без теплового пошкодження [3]. Ці підходи відкривають шлях для серійного виробництва інструментів із контрольованою мікроструктурою.

Дослідження [2, 12, 14] зосереджені на ролі геометрії текстур в оптимізації для Ti6Al4V: мікро- та нанопатерни на WC-Co зменшують сили різання на 11,6 %, коефіцієнт тертя на 14 % і знос фаски на 65 % за рахунок резервуарів мастила; гібридні текстури (вм'ятини + канавки) знижують сили на 47 % і знос на 30 %, з оптимальною орієнтацією канавок перпендикулярно потоку стружки [2]; поширення цього на 50+ робіт, підкреслюючи гібридні геометрії для зменшення температури на 15 % і зносу на

35 % [12], тоді як у роботі [14] продемонстровано, що розміри текстур (від 50 до 200 мкм) ефективніше розподіляють мастило, зменшуючи тертя і знос. Отже, лазерне текстування не просто модифікує поверхню — воно ініціює каскад трибологічних перетворень, охоплюючи як покриття, так і перехідну зону до субстрату.

Наносекундні лазери, попри теплові ризики, пропонують економічну альтернативу: параметри (потужність до 8 Вт, 20 кГц, 800 мм/с) забезпечують лінійні текстури на цементованих карбідах без окиснення, зменшуючи знос на 14,5 % і шорсткість деталі на 30 % [4]; зафіксовано логарифмічне зростання глибини треків (до 1000 проходів) на AISI 301LN TRIP сталі з підвищенням твердості до 293 HV за рахунок мартенситу і компресійних напруг для втомної міцності [5]; періодичні структури на AISI 321 підвищують твердість (аустеніт → мартенсит), знижують COF і переводять адгезійний знос у тритильний за рахунок гідродинамічного мащення [9]. Обмеження — теплове накопичення — компенсовано багатопрхідними режимами, що робить метод придатним для масового виробництва.

Оптимізація параметрів і гібридні покриття проаналізовано в роботах [7, 8, 10, 11]: у роботі [7] за допомогою ML (ANN з $R^2 = 0,99$) оптимізовано фемтосекундне текстування WC з $WS_2/TiCN$, зменшуючи COF до 0,10 (на 68 %) і знос за рахунок пасток стружки; фокусування на $TiAlN$ -покритих інструментах (енергія 10 мкДж), що знижує адгезію Ni на 25 % з обробкою GH4169 [8]; у роботі [10] порівняно прямі та зигзаг-патерни ультракороткими імпульсами на WC з зигзагами, кращими для чип-контролю (зменшення площі контакту на 20–30 %), а в роботі [11] зазначено, що текстування PCD-різців (низька потужність) зменшує сили на 15–20 % для композита. Ці роботи підкреслюють синергію текстування з покриттями для сухої обробки.

Нарешті, у роботах [6, 13, 15] розкрито функціональні аспекти: фемтосекундне мікро-/нанотекстурування (LIPSS ~ 300 нм) на DLC/SKD11 досягає супергідрофобності (кут 140°) для імпринтингу без задирок [6]; огляд кераміки, де текстури покращують зносостійкість у різальних інструментах [13]; порівняння прямих і хвилястих текстур на монокристалічному алмазі з хвилястими, що підвищують якість поверхні на 53,7 % і краю на 51,2 % [15]. Комбіновані технології не лише зменшують тертя — вони запускають самопідтримувальні процеси структурної адаптації, що охоплюють усю систему інструмент-деталь.

Визначення мети та задач дослідження. Метою дослідження є вдосконалення раніше запропонованої теплової моделі [1, 3–5] і її аналіз з урахуванням математичної моделі впливу імпульсної лазерної обробки фемтосекундними лазерами на поверхню покриттів різального інструменту, а також оцінювання адекватності моделі залежно від способу задавання теплофізичних і термомеханічних характеристик матеріалів для точного прогнозування технологічних параметрів, що забезпечують формування наноструктур у багатошарових покриттях.

Для досягнення поставленої мети було сформульовано такі основні завдання:

1. Проаналізувати сучасний стан досліджень у галузі імпульсної лазерної обробки покриттів різального інструменту, виявити прогалини в знаннях про технологічні параметри фемтосекундних лазерів і вплив способу задавання теплофізичних і термомеханічних характеристик на точність моделювання.

2. Розробити математичну модель спільної нелінійної задачі теплопровідності та термопружності [4] для багатошарової композиції «покриття – інструментальна основа».

3. Провести порівняльний аналіз динаміки температурних полів і щільності теплового потоку на різних глибинах

оброблюваного матеріалу залежно від вибраного способу задавання характеристик.

Основна частина. Подамо лазерну обробку як тепловий вплив на багатошарову композицію. Розглянемо процес поширення тепла в результаті обробки n-шарової

інструментальної композиції поверхневим джерелом тепла [6]. Визначимо температуру пластини, якщо на початковий момент часу $t = 0$ миттєво виділилося Q одиниць тепла (рис. 1).

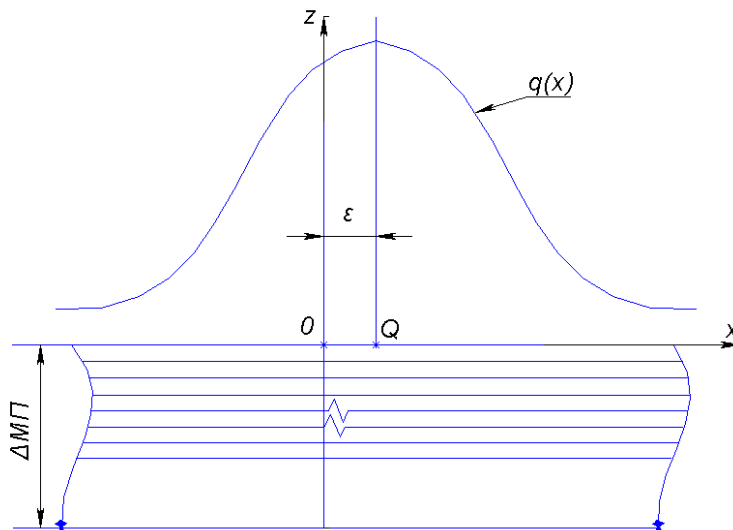


Рис. 1. Схематичне зображення дії теплового джерела

Припустимо, що кількість тепла Q , яке миттєво виділилося в точці з координатою в момент часу $t = 0$, миттєво і рівномірно розподіляється по невеликому інтервалу. Тоді початкова температура на поверхні пластини дорівнює [6]

$$T(x,0) = \begin{cases} 0; & -\infty < x < \xi - \delta; \\ \frac{Q}{2\delta c\rho}; & \xi - \delta < x < \xi + \delta; \\ 0; & \xi + \delta < x < \infty; \end{cases} \quad (1)$$

де c – теплоємність тіла;
 ρ – щільність тіла;
 δ – елементарна мала величина збільшення координати x .

Розв'яжемо рівняння теплопровідності для тіла, на поверхні якого виділилася кількість тепла Q :

$$T_t = a T_{xx} \quad -\infty < x < \infty; \quad 0 < t < \infty; \quad (2)$$

$$T(x,0) = f(x) \quad -\infty < x < \infty; \quad (3)$$

де a – коефіцієнт теплопровідності тіла.

Помножимо обидві частини рівняння (2) на вираз $\frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-ik\xi}$ (де ξ – змінна, що відповідає координаті точки, у якій виділилася кількість тепла Q , k – число) і проінтегруємо його за ξ від $-\infty$ до ∞ за умови, що функція T і її похідні швидко прагнуть до нуля за умови $\xi \rightarrow \pm \infty$ (умова східності).

Використовуючи інтегрування частинами, отримуємо

$$\begin{aligned} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{\partial T}{\partial t} e^{-ik\xi} d\xi &= \frac{\partial}{\partial t} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{+\infty} T e^{-ik\xi} d\xi = a \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{\partial^2 T}{\partial \xi^2} e^{-ik\xi} d\xi = \\ &= a \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \frac{\partial T}{\partial \xi} e^{-ik\xi} \Big|_{\xi=-\infty}^{\xi=+\infty} + a \frac{1}{\sqrt{2\pi}} ik T e^{-ik\xi} \Big|_{\xi=-\infty}^{\xi=+\infty} - ak^2 \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{+\infty} T e^{-ik\xi} d\xi = \quad (4) \\ &= -ak^2 \bar{T}(k,t), \end{aligned}$$

де α – коефіцієнт теплопровідності.

Спрощуючи рівність (4), отримуємо

$$\frac{d\bar{T}}{dt} + ak^2 \bar{T} = 0. \quad (5)$$

Із наведеної рівності

$$\bar{T}(k,t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{+\infty} T(\xi,t) e^{-ik\xi} d\xi, \quad (6)$$

якщо $t = 0$ отримуємо

$$\bar{T}(k,0) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{+\infty} T(\xi,0) e^{-ik\xi} d\xi = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{+\infty} T(\xi) e^{-ik\xi} d\xi = \bar{f}(k). \quad (7)$$

Розв'язок рівняння (5) за початкової умови (7) має вигляд

$$\bar{T}(k,t) = \bar{f}(k) e^{-ak^2 t} \quad (8)$$

Застосовуючи зворотнє перетворення Фур'є, отримуємо вираз для функції температури

$$\begin{aligned} \bar{T}(x,t) &= \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{+\infty} \bar{T}(k,t) e^{-ikx} dk = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{+\infty} e^{-ak^2 t} e^{ik(x-\xi)} dk = \\ &= \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} f(\xi) d\xi \int_{-\infty}^{+\infty} e^{-ak^2 t} \cos(k(x-\xi)) dk = \quad (9) \\ &= \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} f(\xi) d\xi \int_{-\infty}^{+\infty} e^{-ak^2 t} \cos(k(x-\xi)) dk = \frac{1}{2\sqrt{\pi\alpha t}} \int_{-\infty}^{+\infty} f(\xi) e^{-\frac{(x-\xi)^2}{4\alpha t}} d\xi. \end{aligned}$$

Вираз (9) урахує, що

$$\int_{-\infty}^{+\infty} e^{-ak^2} \cos \beta k \, dk = \frac{\sqrt{\pi}}{2\sqrt{a}} e^{-\frac{\beta^2}{4a}}, \quad (10)$$

де β – число.

В отриманому рішенні (9), вважаючи, що $\delta \rightarrow 0$, і прийнявши в першому наближенні початковий розподіл температур в околі точки з координатою ξ рівномірним, отримуємо таке значення функції миттєвого джерела:

$$G(x, \xi, t) = \frac{1}{2\sqrt{\pi at}} e^{-\frac{(x-\xi)^2}{4at}}, \quad (11)$$

де $G(x, \xi, t)$ – функція миттєвого джерела;
 α - коефіцієнт теплопровідності,

$$\alpha = \frac{\lambda}{c\rho}.$$

У разі конвективного теплообміну з навколишнім середовищем (температура навколишнього середовища дорівнює нулю) функція G набуває вигляду

$$G(x, \xi, t) = \frac{e^{-ht}}{2\sqrt{\pi at}} e^{-\frac{(x-\xi)^2}{4at}}, \quad (12)$$

де h – коефіцієнт теплообміну.

Отже, вираз (9) для розподілу температур з урахуванням нововведеної функції миттєвого точкового джерела $G(x, \xi, t)$ набуде вигляду

$$T(x, t) = \int_0^l G(x, \xi, t) f(\xi) d\xi. \quad (13)$$

Здійснюючи граничний перехід, нескінченно наближаючись до точки ξ , одержуємо

$$T(x, t) = G(x, \xi, t) \frac{Q}{c\rho}. \quad (14)$$

Розв'язуючи рівняння (11) і (14), можна отримати розв'язок задачі теплопровідності як розподіл температур у результаті енергетичного впливу миттєвого джерела $G(x, \xi, t)$.

Ураховуючи малу товщину шарів багатошарового покриття порівняно з їхньою довжиною і розміром миттєвого джерела, а також вкрай малий термічний опір між шарами (за рахунок їхнього адгезійного зв'язку), схема для визначення значень наведених коефіцієнтів теплопровідності та теплоємності інструментальної основи і багатошарового ізоtermічними поверхнями зображена на рис. 2.

У цьому випадку однакова кількість тепла Q , віднесена до одиниці площі пластини і одиниці часу, проходить через кожен шар багатошарового покриття. Ця величина визначена за рівнянням

$$Q = -\lambda_1 \frac{T_0 - T_1}{\delta_1} = -\lambda_2 \frac{T_1 - T_2}{\delta_2} = \dots = -\lambda_n \frac{T_{n-1} - T_n}{\delta_n}, \quad (15)$$

де λ_i – коефіцієнт теплопровідності шару з номером i ;

δ_i – товщина шару з номером i .

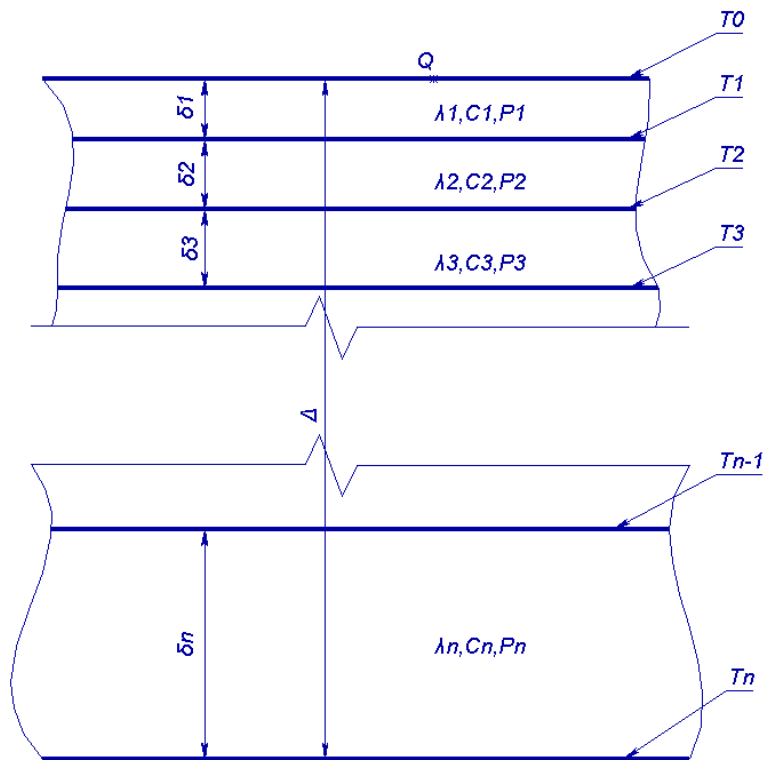


Рис. 2. Схема для визначення приведенного коефіцієнта теплопровідності та теплоємності

З рівняння (15) випливає

$$T_0 - T_1 = -Q \frac{\delta_1}{\lambda_1};$$

$$T_1 - T_2 = -Q \frac{\delta_2}{\lambda_2};$$

.....

$$T_{n-1} - T_n = -Q \frac{\delta_n}{\lambda_n};$$

після підсумовування отримуємо

$$T_0 - T_n = -Q \left(\frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} + \dots + \frac{\delta_n}{\lambda_n} \right). \quad (16)$$

За однакової різниці температур аналізоване багат шарове покриття

еквівалентно суцільному модельному тілу, через яке проходить та сама кількість теплоти Q, що дорівнює

$$Q = -\lambda_s \frac{T_0 - T_n}{\Delta}. \quad (17)$$

Порівнюючи рівняння (16) і (17), отримуємо вираз для визначення наведеного коефіцієнта теплопровідності

$$\lambda_s = \frac{\Delta}{\delta_1 / \lambda_1 + \delta_2 / \lambda_2 + \dots + \delta_n / \lambda_n}. \quad (18)$$

Для визначення наведеного коефіцієнта теплоємності необхідно враховувати, що теплоємність характеризує здатність матеріалу накопичувати теплову енергію.

Коли в об'ємі багатошарового покриття виділяється певна кількість тепла Q , температура покриття збільшується на ΔT . Тоді питома теплоємність c_1 (кількість тепла, яку необхідно передати 1 кг цього матеріалу для підвищення його температури на 1°C) першого шару покриття буде становити

$$c_1 = \frac{Q_1}{m_1 \Delta T} = \frac{Q_1}{S \delta_1 \rho_1 \Delta T}, \quad (19)$$

де δ_1 та ρ_1 – товщина і щільність першого шару покриття відповідно;

S – площа поверхні тіла;

Q_1 – кількість тепла, що виділилося в першому шарі.

Тоді коефіцієнт теплоємності для i -го шару визначимо з виразу

$$c_i = \frac{Q_i}{S \delta_i \rho_i \Delta T}. \quad (20)$$

Для деякого модельного тіла, температура якого з виділенням кількості тепла Q в його обсязі також збільшується на ΔT , можна записати

$$c_{np} = \frac{Q}{S \cdot \Delta \cdot \rho_{np} \cdot \Delta T}. \quad (21)$$

З урахуванням закону збереження енергії

$$Q = \sum_{i=1}^n Q_i, \quad (22)$$

або

$$c_{np} \cdot S \cdot \Delta \cdot \rho_{np} \cdot \Delta T = \sum_{i=1}^n c_i S \delta_i \rho_i \Delta T. \quad (23)$$

Після скорочення отримуємо

$$c_{np} = \frac{\sum_{i=1}^n c_i \delta_i \rho_i}{\Delta \cdot \rho_{np}}. \quad (24)$$

де ρ_{np} – щільність модельного тіла.

Проаналізуємо вплив теплофізичних характеристик шарів інструментальної композиції, товщини шарів і щільності потужності лазерного випромінювання на розподіл температур перерізу інструментального матеріалу Н13А.

Розв'язали спільну задачу теплопровідності та термопружності [4], у якій використано стохастичні значення та отримано за допомогою квантово-

механічного методу теплофізичні та термомеханічні характеристики, дослідили характер зміни температур, швидкість її зміни і щільності теплового потоку на різних глибинах.

На рис. 3, а-г подано залежності температур від щільності теплового потоку на різних глибинах і різних значеннях часу дії лазерного випромінювання (а – 10^{-10} , б – 10^{-12} , в – 10^{-14} , г – 10^{-16} с). При цьому на рисунку суцільними лініями позначені криві з використанням квантово-механічного методу, а пунктиром – стохастичних значень тепло-фізичних і термомеханічних характеристик.

Аналіз залежності кривих показав, що за відносно невисоких щільностей теплового потоку відмінність відносно невелика, тоді як зі зростанням темпового потоку цих значень збільшується, щоправда

незначно. А зі зменшенням часу дії теплового потоку ця відмінність зростає. Видно, що фемтосекундний лазер дуже

чутливий до способу задавання теплофізичних і термомеханічних характеристик.

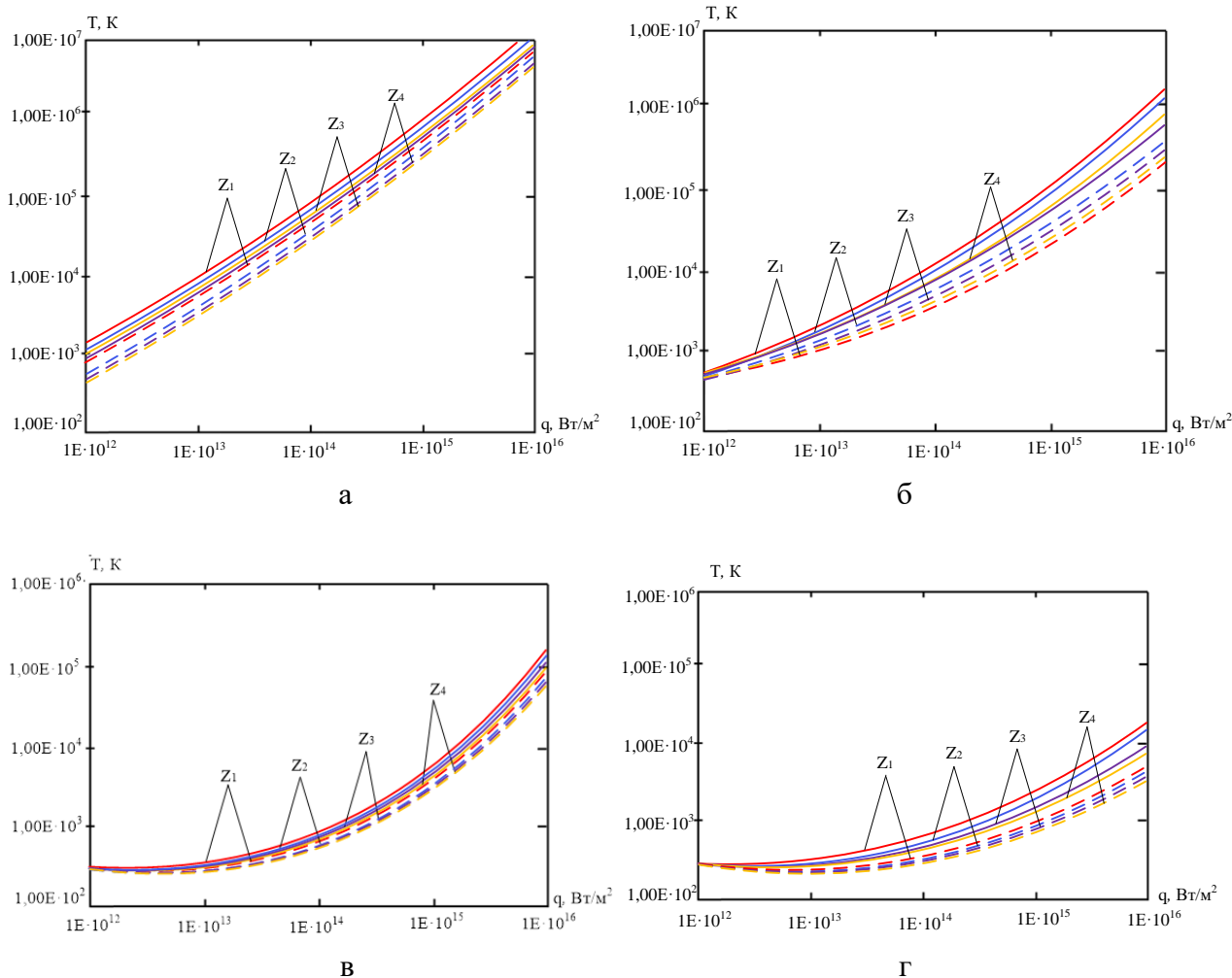


Рис. 3. Залежності максимальної температури T від щільності теплового потоку q , створюваного лазерним випромінюванням за різним часом його дії і на різній глибині ($1 - x = 0, 2 - x = x1, 3 - x = x2, 4 - x = x3$) за різних способів задавання теплофізичних і термомеханічних характеристик: а – 10^{-10} ; б – 10^{-12} ; в – 10^{-14} ; г – 10^{-16} с;

— квантово-механічний метод;

----- стохастичний метод для інструментального матеріалу Н13А

Висновки. На підставі розробленої математичної моделі імпульсної лазерної обробки різальних інструментів із твёрдосплавних матеріалів, оснащених зносостійкими покриттями, можна зробити висновок про основні фактори, що впливають на температурний розподіл у

структурах. Дослідження процесів формування наноструктур за різних підходів щодо моделювання теплофізичних і термомеханічних властивостей показує, що квантово-механічний метод з урахуванням стохастичних значень призводить до вищих температурних

показників порівняно з іншими методами. Ця різниця стає особливо помітною за високих щільностей теплового потоку, зокрема в діапазоні часу від 10^{-16} до 10^{-14} с. Водночас поточні результати не дають змогу остаточно оцінити адекватність моделі для конкретних методів моделювання, тому для подальшої валідації рекомендовано провести порівняльний аналіз об'ємів утворених наноструктур.

Аналіз температурних напружень виявив їхній максимум за щільності теплового потоку $q = 10^9$ Вт/м², що пов'язано з піковим градієнтом температур, і мінімум ($q = 10^{10}$ Вт/м²), де градієнт є найнижчим. У

часовому інтервалі 10^{-10} , 10^{-11} , 10^{-12} с існує потенціал для генерації наноструктур виключно за рахунок температурних напружень, без додаткових факторів. Найвищі значення таких напружень спостерігають саме за квантово-механічному підходу щодо визначення характеристик матеріалів.

Загалом отримані дані підкреслюють перспективність імпульсної лазерної обробки для оптимізації властивостей інструментів, але потребують подальших експериментальних верифікацій для уточнення моделі та її практичного застосування в промисловості.

Список використаних джерел

1. Широкий Ю. В., Сисоєв Ю. О., Торосян О. В., Торосян-Жидєєва Г. Д. (2023). Вибір технологічних параметрів лазера для отримання наноструктур на інструментальній сталі У12А. Відкриті інформаційні та комп'ютерні інтегровані технології. Харків: Національний аерокосмічний університет «ХАІ», № 97. С. 111-125. DOI: 10.32620/oikit.2023.97.07
2. Guimarães B., Marques F., Fernandes C. et al. (2025). Enhancing the cutting performance of laser surface textured WC-Co cutting tools—a study on AISI 316L stainless steel turning. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, No. 135. Pp. 123–140.
3. Shyrokyi Yu. V., Sysoiev Yu. O., Torosian O. V., Zhydeev P. R. (2024) Determination of temperature conditions for the formation of submicro- and nanostructures under ion impact on magnesium alloys in a plasma environment. *Open Information and Computer Integrated Technologies*, No. 102. Pp. 75-91. DOI: <https://doi.org/10.32620/oikit.2024.102.06>
4. Garcia-Fernandez J., Salguero J., Batista M. et al. (2024). Laser Surface Texturing of Cutting Tools for Improving the Machining of Ti6Al4V: A Review. *Metals*, No. 14(12). P. 1422.
5. Shyrokyi Y., Kostyuk G. In: Nechyporuk M., Pavlikov V., Kritskiy D. (eds). (2021). Investigation of the Influence of Crystallization Energy on the Size of Nanostructures During Copper Ion-Plasma Treatment. *Integrated Computer Technologies in Mechanical Engineering - 2021. ICTM 2021. Lecture Notes in Networks and Systems*. Springer, Cham, No 367. Pp. 57-66.
6. Zhou L., Zou P., Yang Z. et al. (2025). Influence of laser texturing parameters on the surface characteristics and cutting performance of cemented carbide tools. *Optics & Laser Technology*, No. 185. P. 112524.
7. Широкий Ю. В., Сисоєв Ю. О., Постельник Т. В. (2022). Моделювання умов отримання наноструктур в алюмінієвих сплавах при дії іонізуючого випромінювання. *Авіаційно-космічно техніка та технологія: сб. науч. тр. Нац. аерокосм. ун-та им. Н. Е. Жуковського «ХАИ»*, Вип. 2. С. 55-63. DOI: <https://doi.org/10.32620/aktt.2022.2.07>
8. Rezayat M., Moradi M., Mateo A. (2024). Nanosecond multi-passes laser surface texturing on AISI 301LN TRIP steel. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, No. 132. Pp. 2457–2470.
9. Широкий Ю. В., Сисоєв Ю. О., Семененко О. Д., Торосян О. В. (2025) Підвищення ефективності деталей машин та різального інструменту комбінованими методами обробки.

Відкриті інформаційні та комп'ютерні інтегровані технології, № 106. С. 84-107.
DOI: 10.32620/oikit.2025.106.06

10. Костюк Г. І., Григор О. Д., Матвеев А. В. (2017). Вплив характеру завдання теплофізичних і термомеханічних характеристик магнієвих сплавів при обробці з метою отримання наноструктур іонами з використанням стохастичних значень і отриманих квантово-механічним методом. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Технології в машинобудуванні*, Вип. 17(1239). С. 78-82.

11. Ahmed Y. S. (2024). Optimizing Femtosecond Texturing Process Parameters Through Advanced Machine Learning Models in Tribological Applications. *Lubricants*, No. 12(12). P. 454.

12. Kostyuk G. I., Grigor O. D. (2018). Comparison of temperature regimes in the zone of laser femtosecond processing of Volkar hard alloy using thermophysical and thermomechanical characteristics, stochastic values calculated by the quantum-mechanical method. *Bulletin of the National Technical University «KhPI». Series: Technologies in Mechanical Engineering – Kharkiv*, No. 6 (1282). Pp. 90-94.

13. Wu X., Zhan J., Mei S. (2022). Optimization of Micro-Texturing Process Parameters of TiAlN Coated Cutting Tools by Femtosecond Laser. *Materials*, No. 15(19). P. 6519.

14. Zawadzki P., Dobrotvorskiy S., Aleksenko V. et al. (2024). Effect of Nanosecond Laser Texturization on Tribological Behavior of AISI 321 Stainless Steel. *Materials*, No. 17(23). P. 5870.

15. Широкий Ю. В., Сисоєв А. Ю., Панченко Ю. С. (2022). Теоретичне дослідження температурних полів міді при формуванні наноструктурних шарів у плазмовому середовищі. *Авіаційно-космічна техніка та технологія*. № 5. С. 51-60. DOI: 10.32620/aktt.2022.5.04

16. Khanna N., Agrawal C., Gupta M. K. et al. (2023). Performance of cutting-tool patterns textured via ultrashort laser pulses. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, No. 237(10). Pp. 1501–1515.

17. Sysoiev Iurii, Shyrokyi Yurii, Fesenko Kseniia (2024). Pulsed vacuum-arc plasma source with laser arc excitation. *Problems of Atomic Science and Technology (PAST)*, No. 1 (149). Pp. 110-115. DOI:10.46813/2024-149-110

18. Kostyuk G. I., Semenenko O. D. (2018). Influence of the method of setting the thermophysical and thermomechanical characteristics of the B3 hard alloy on the nature and efficiency of the formation of nanostructures. *Bulletin of the National Technical University «KhPI». Series: Technologies in mechanical engineering*, No. 34 (1310). Pp. 40-46.

19. Liu, H., Chen, Z., Zhang, L. (2024). Surface Texturing on Polycrystalline Diamond Compact Cutter by Nanosecond Laser. *Advanced Engineering Materials*, No. 26(12). P. 2402204.

20. Широкий Ю. В., Сисоєв Ю. О., Фесенко К. В., Постельник Т. О. (2024). Дослідження температурних полів на сталях з урахуванням кінцевої швидкості розповсюдження тепла при моделюванні умов отримання наноструктур у плазмовому середовищі. *Відкриті інформаційні та комп'ютерні інтегровані технології*. № 101. С. 98-111. DOI: 10.32620/oikit.2024.101.07

21. Nouri H. N., Sajjady S. A., Amini S. (2025). Ceramics Surface Design by Laser Texturing: A Review on Fundamentals, Advances, and Prospects. *Advanced Materials Interfaces*, No. 12(8). P. 2500302.

22. Kostyuk G., Melkozirova O., Kostyuk E., Shyrokyi I. (2020). Prospects for producing nanostructures in the volume of parts under the action of plasma flows. *Різання та інструменти в технологічних системах*. Харків: НТУ «ХПІ». № 92. С. 107-121. DOI: 10.20998/2078-7405.2020.92.12

23. Jonaityte I., Punys J., Sokas G. (2025). Effect of Dimensions in Laser Surface Texturing on Cutting Tools. *Mechanika*, No. 31(4). Pp. 285–292.

24. Zhao Z., Li Y., Wang H. et al. (2025). Investigating the Influence of Laser-Etched Straight and Wavy Textures on the Surface Quality of Monocrystalline Diamond Tools. *Micromachines*, No. 16(1). P. 102.

References

1. Shyrokyi, Yu. V., Sysoev, Yu. O., Torosyan, O. V., Torosyan-Zhideeva, G. D. (2023). Vybir tekhnolohichnykh parametriv lazera dlya otrymannya nanostruktur na instrumental'nyi stali U12A [Selection of laser technological parameters for obtaining Hardening coatings with nanostructures on U12A tool steel]. *Open information and computer integrated technologies*. Kharkiv: National Aerospace University «KHAU», No. 97. Pp. 111-125. DOI: 10.32620/oikit.2023.97.07 [in Ukrainian].

2. Guimarães, B., Marques, F., Fernandes C. et al. (2025). Enhancing the cutting performance of laser surface textured WC–Co cutting tools—a study on AISI 316L stainless steel turning. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, No. 135. Pp. 123–140 [in English].

3. Shyrokyi Yu. V., Sysoiev Yu. O., Torosian O. V., Zhydeev P. R. (2024) Determination of temperature conditions for the formation of submicro- and nanostructures under ion impact on magnesium alloys in a plasma environment. *Open Information and Computer Integrated Technologies*, No. 102. Pp. 75-91. DOI: <https://doi.org/10.32620/oikit.2024.102.06> [in English].

4. Garcia-Fernandez, J., Salguero, J., Batista, M. et al. (2024). Laser Surface Texturing of Cutting Tools for Improving the Machining of Ti6Al4V: A Review. *Metals*, No. 14(12). P. 1422. [in English].

5. Shyrokyi, Y., Kostyuk, G. In: Nechyporuk, M., Pavlikov, V., Kritskiy, D. (eds). (2021). Investigation of the Influence of Crystallization Energy on the Size of Nanostructures During Copper Ion-Plasma Treatment. *Integrated Computer Technologies in Mechanical Engineering - 2021. ICTM 2021. Lecture Notes in Networks and Systems*. Springer, Cham, No 367. Pp. 57-66. [in English].

6. Zhou L., Zou P., Yang Z. et al. (2025). Influence of laser texturing parameters on the surface characteristics and cutting performance of cemented carbide tools. *Optics & Laser Technology*, No. 185. P. 112524. [in English].

7. Shyrokyi, Yu. V., Sysoiev, Yu. O., Postelnyk T. V. (2022). Modelyuvannya umov otrymannya nanostruktur v alyuminiyevykh splavakh pry diyi ionizuyuchoho vyprominyuvannya [Modeling of Conditions for Obtaining Nanostructures in Aluminum Alloys under the Action of Ionizing Radiation]. *Aviation and Space Technology and Engineering: Collection of Scientific Papers of the National Aerospace University named after N.E. Zhukovsky «KhAI»*. No 2. Pp. 55-63. DOI: <https://doi.org/10.32620/aktt.2022.2.07> [in Ukrainian].

8. Rezayat, M., Moradi, M., Mateo, A. (2024). Nanosecond multi-passes laser surface texturing on AISI 301LN TRIP steel. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, No. 132. Pp. 2457–2470. [in English].

9. Shyrokyi, Yu. V., Sysoev, Yu. O., Semenenko, O., Torosyan, O. V., Pidvyshchennya efektyvnosti detaley mashyn ta rizal'noho instrumentu kombinovanymy metodamy obrobky [Improving the efficiency of machine parts and cutting tools using combined processing methods]. *Open information and computer integrated technologies*, No. 106. Pp. 84-107. DOI: 10.32620/oikit.2025.106.06 [in Ukrainian].

10. Kostyuk, G. I., Grigor, O. D., Matvieiev, A. V. (2017). Vplyv kharakteru zavdannya teplofizychnykh i termomekhanichnykh kharakterystyk mahniyevykh splaviv pry obrobtsi z metoyu otrymannya nanostruktur ionamy z vykorystannyam stokhastychnykh znachen' i otrymanykh kvantovo-mekhanichnym metodom [Influence of the Nature of Setting Thermophysical and Thermomechanical Characteristics of Magnesium Alloys during Processing to Obtain Nanostructures by Ions Using Stochastic Values and Obtained by Quantum-Mechanical Method]. *Bulletin of the*

National Technical University «KhPI». Series: Technologies in Mechanical Engineering, No. 17 (1239). Pp. 78-82. [in Ukrainian].

11. Ahmed, Y. S. (2024). Optimizing Femtosecond Texturing Process Parameters Through Advanced Machine Learning Models in Tribological Applications. *Lubricants*, No. 12(12). P. 454. [in English].

12. Kostyuk, G. I., Grigor, O. D. (2018). Comparison of temperature regimes in the zone of laser femtosecond processing of Volkar hard alloy using thermophysical and thermomechanical characteristics, stochastic values calculated by the quantum-mechanical method. *Bulletin of the National Technical University «KhPI». Series: Technologies in Mechanical Engineering – Kharkiv*, No. 6 (1282). Pp. 90-94.

13. Wu, X., Zhan, J., Mei, S. (2022). Optimization of Micro-Texturing Process Parameters of TiAlN Coated Cutting Tools by Femtosecond Laser. *Materials*, No. 15(19). P. 6519. [in English].

14. Zawadzki, P., Dobrotvorskiy, S., Aleksenko, B. et al. (2024). Effect of Nanosecond Laser Texturization on Tribological Behavior of AISI 321 Stainless Steel. *Materials*, No. 17(23). P. 5870. [in English].

15. Shyrokyi, Yu. V., Sysoiev, A. Yu., Panchenko, Yu. S. (2022). Teoretychne doslidzhennya temperaturnykh poliv midi pry formuvanni nanostrukturnykh shariv u plazmovomu seredovyschi [Theoretical Study of Temperature Fields of Copper during Formation of Nanostructured Layers in a Plasma Environment]. *Aviation and Space Technology and Engineering*, No. 5. P. 51-60. DOI: 10.32620/aktt.2022.5.04 [in Ukrainian].

16. Khanna, N., Agrawal, C., Gupta, M. K. et al. (2023). Performance of cutting-tool patterns textured via ultrashort laser pulses. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, No. 237(10). Pp. 1501–1515. [in English].

17. Sysoiev, Iurii, Shyrokyi, Yurii, Fesenko, Kseniia (2024). Pulsed vacuum-arc plasma source with laser arc excitation. *Problems of Atomic Science and Technology (PAST)*, No. 1 (149). Pp. 110-115. DOI:10.46813/2024-149-110 [in English].

18. Kostyuk, G. I., Semenenko, O. D. (2018). Influence of the method of setting the thermophysical and thermomechanical characteristics of the B3 hard alloy on the nature and efficiency of the formation of nanostructures. *Bulletin of the National Technical University «KhPI». Series: Technologies in mechanical engineering*, No. 34 (1310). Pp. 40-46. [in English].

19. Liu, H., Chen, Z., Zhang, L. (2024). Surface Texturing on Polycrystalline Diamond Compact Cutter by Nanosecond Laser. *Advanced Engineering Materials*, No. 26(12). P. 2402204. [in English].

20. Shyrokyi, Yu. V., Sysoiev, Yu. O., Fesenko, K. V., Postelnyk, T. O. (2024). Doslidzhennya temperaturnykh poliv na stalyakh z urakhuvannyam kintsevoyi shvydkosti rozpovsyudzhennya tepla pry modelyuvanni umov otrymannya nanostruktur u plazmovomu seredovyschi [Study of Temperature Fields on Steels Taking into Account the Finite Speed of Heat Propagation during Modeling of Conditions for Obtaining Nanostructures in a Plasma Environment]. *Open Information and Computer Integrated Technologies*, No. 101. P. 98-111. DOI: 10.32620/oikit.2024.101.07 [in Ukrainian].

21. Nouri, H. N., Sajjady, S. A., Amini, S. (2025). Ceramics Surface Design by Laser Texturing: A Review on Fundamentals, Advances, and Prospects. *Advanced Materials Interfaces*, No. 12(8). P. 2500302. [in English].

22. Kostyuk, G., Melkozirova, O., Kostyuk, E., Shyrokyi, I. (2020). Prospects for producing nanostructures in the volume of parts under the action of plasma flows. *Cutting and Tools in Technological Systems*. Kharkiv: NTU «KhPI», No. 92. Pp. 107-121. DOI: 10.20998/2078-7405.2020.92.12 [in English].

23. Jonaityte, I., Punys, J., Sokas, G. (2025). Effect of Dimensions in Laser Surface Texturing on Cutting Tools. *Mechanika*, No. 31(4). Pp. 285–292. [in English].

24. Zhao Z., Li Y., Wang H. et al. (2025). Investigating the Influence of Laser-Etched Straight and Wavy Textures on the Surface Quality of Monocrystalline Diamond Tools. *Micromachines*, No. 16(1). P. 102. [in English].

Широкий Юрій В'ячеславович, кандидат технічних наук, доцент кафедри теоретичної механіки, машинознавства та роботомеханічних систем, Національний аерокосмічний університет «Харківський авіаційний інститут». ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-4713-0334>. E-mail: i.shyrokyi@khai.edu.

Семененко Ольга Діонісівна, асистент кафедри теоретичної механіки, машинознавства та роботомеханічних систем, Національний аерокосмічний університет «Харківський авіаційний інститут». ORCID iD: <https://orcid.org/0009-0001-8425-562X>. E-mail: o.semenenko@khai.edu.

Shyrokyi Yuriy Vyacheslavovich, PhD (Tech). Associate Professor, department of theoretical mechanics, mechanical engineering and robotic systems, National Aerospace University «Kharkiv Aviation Institute».

ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-4713-0334>. E-mail: i.shyrokyi@khai.edu.

Semenenko Olha Dionisivna, Assistant, department of theoretical mechanics, mechanical engineering and robotic systems, National Aerospace University «Kharkiv Aviation Institute». ORCID iD: <https://orcid.org/0009-0001-8425-562X>. E-mail: o.semenenko@khai.edu.

Дата надходження статті 12.02.2026 р.

Дата прийняття статті до друку 10.03.2026 р.

Дата публікації (оприлюднення) статті 4.05.2026 р.

Стаття поширюється на умовах ліцензії Creative Commons Attribution License International CC-BY.