

УДК 670.191.33

## МЕТОД ПЕРЕВІРКИ ЦИКЛІЧНОСТІ МІКРОРЕЛЬЄФУ САМООРГАНІЗОВАНОЇ ПОВЕРХНІ ТИТАНОВОГО СПЛАВУ, ОБРОБЛЕНОЇ ЛАЗЕРОМ

Я. В. ЛИТВИНЕНКО, П. О. МАРУЩАК

*Тернопільський національний технічний університет ім. Івана Пулюя*

Оцінено морфологію рельєфних утворень на поверхні титанового сплаву, обробленої фемтосекундним лазерним імпульсом, за припущення наявності просторово повторюваної сегментно-циклічної структури, сформованої сегментами-циклами. Крім сегментної, проаналізовано також ритмічну структуру із постійним або змінним ритмами на основі математичної моделі циклічного випадкового процесу. За опрацьованим методом можна визначити морфологію поверхні і її статистичні характеристики.

**Ключові слова:** *фемтосекундний лазерний імпульс, перевірка циклічності мікрорельєфу, сегментна структура, самоорганізація поверхні.*

The morphology of relief formations on the surface of a titanium alloy treated with a femtosecond laser pulse for cyclicity has been evaluated. An assumption is introduced about the presence of a segment-cyclic structure, which has a spatial repeatability formed by segment-cycles. In addition to the segment structure, a rhythmic structure with a constant or variable rhythm is also considered based on a mathematical model of a cyclic random process (stochastic case). A method has been developed for checking the cyclicity of the formed relief formations, which makes it possible to evaluate the morphology of the resulting surface and its statistical characteristics.

**Keywords:** *femtosecond laser pulse, verification of microrelief cyclicity, segmental structure, surface self-organization.*

**Вступ.** Формуванню самоорганізованих лазерно-індукованих циклічних (періодичних) поверхневих структур на титанових сплавах за імпульсного лазерного опромінення сьогодні приділяють особливу увагу [1], оскільки таке оброблення спричиняє специфічні фізико-хімічні процеси у поверхневих шарах матеріалів, закономірності яких залежать від часу впливу, температури, швидкості нагрівання та охолодження. Керуючи його параметрами, можна формувати поверхневий шар зі заданими властивостями, мікроструктурою, розміром зерна, фазовим складом та твердістю. Оптимізацією режиму лазерної дії вдається забезпечити заданий розподіл залишкових мікро- та макронапружень та одержати властивості поверхні, які неможливо відтворити іншими методами високоенергетичного впливу [2, 3]. При цьому на поверхні титанових сплавів відбуваються процеси структурної самоорганізації, за яких між різними частинами профілю виникають і підтримуються технологічно відтворювані взаємозв'язки – кореляції. Поверхня фактично є “замороженим” знімком швидкоплинної самоорганізації поверхні. Тому кореляція висоти та геометрії профілю на різних ділянках такої обробленої поверхні – ознака впорядкованості структури та результат самоорганізації.

Відомі методи оцінювання структури поверхні за алгоритмами побудови двовимірного розподілу рельєфу з використанням результатів атомно-силової мік-

роскопії [1–5], які визначають ступінь впорядкованості поверхні та ґрунтуються на підходах нелінійної динаміки. Водночас, застосовуючи ідеї та методи теорії самоорганізації поверхонь для дослідження структуроутворення у матеріалах, можна оцінити ступінь упорядкованості та змінювати її [6–10].

Аналітичні підходи – один зі шляхів зменшити трудомісткість опису структуроутворення [11]. Коректне та обґрунтоване їх вживання для оцінки циклічних процесів можливе лише за верифікації циклічності.

Відома [11] математична модель коливних явищ у вигляді циклічної функції, зокрема, введено поняття неперервного та дискретного циклічних випадкових процесів зі сегментною структурою. Ритмічну структуру циклічної функції описує дискретна функція ритму, яка визначає закон зміни часових інтервалів між однофазними її значеннями [12]. В автоматизованих системах цифрового оброблення циклічних процесів використовують методи сегментації.

Нижче розвинуто методи опису рельєфних утворень, зокрема, метод верифікації циклічності досліджуваного процесу (оцінювання його на приналежність до класу циклічних).

**Визначення морфології рельєфних утворень на поверхні титанового сплаву, обробленої фемтосекундним лазерним імпульсом.** Використовували модель формування рельєфних утворень на поверхні сплаву Ti–6Al–4V з початковим мікрорельєфом заввишки 0,065...0,003  $\mu\text{m}$  та оброблені волоконним лазером UFFL\_60\_200\_1030\_SHG 300 фс (Active Fiber Systems GmbH, Йена, Німеччина) зі сердечником з аморфного скла, легованого ітербієм. Лазерну систему інтегрували до п'ятиосьового верстата Microgantry GU4 (Kugler GmbH, Салем, Німеччина). Частоту повторення імпульсів лазерної системи варіювали від 50,3 kHz до 18,6 MHz зі середньою потужністю до 60 W. Лазер випромінював лінійне поляризоване світло з довжиною хвилі 1030 nm. Об'єктивом  $f$ -тета з фокусною відстанню 163 mm формували коловий діаметр фокуса  $d_f = 36 \mu\text{m}$  за інтенсивності  $1/e^2$  (профіль лазерного променя Гаусса). Цей діаметр плями використовували у всіх розрахунках параметрів лазера [3, 4]. Визначали властивості рельєфних утворень на поверхні сплаву за енергії оброблення  $q = 0,49 \text{ J/cm}^2$ . Щоб перевірити їх циклічність, розробили напівавтоматизований алгоритм верифікації, за яким встановлювали приналежність різних досліджуваних процесів до класу циклічних. Порівнювали параметри двох частин профілограми обробленої лазером поверхні за наявності інформації про нормальний (гауссовий) розподіл значень реалізації досліджуваного мікрорельєфу.

Під час розв'язку задачі про верифікацію циклічності постулювали, що досліджуваний процес можна описати математичною моделлю як циклічний випадковий зі сегментною структурою (сегментною-циклічною). Розглянемо особливості його використання для стохастичного випадку.

**Опис методу верифікації циклічності.** Вхідними даними тут є мікрогеометрія рельєфу обробленої лазером поверхні  $\xi_{\omega}(l), l \in \mathbf{W}$ . На першому кроці аналізували дві окремі частини мікрорельєфу, не синхронізуючи початки їх відліків, тобто

$$\xi_{\omega}(l) = \sum_{q=1}^2 \xi_{q\omega}(l), \quad \xi_{1\omega}(l), l \in \mathbf{W}', \quad \xi_{2\omega}(l), l \in \mathbf{W}'', \quad \mathbf{W} = \mathbf{W}' \cup \mathbf{W}'' . \quad (1)$$

На другому паралельно окремо обробляли ці частини, застосовуючи методи сегментування [11, 12], при цьому отримали множини відліків часу для ідентифікованої сегментної циклічної структури  $\hat{\mathbf{D}}'_c = \{\hat{l}'_i, i = \overline{1, C'}\}$ , першої частини і сегментної структури  $\hat{\mathbf{D}}''_c = \{\hat{l}''_i, i = \overline{1, C''}\}$  для другої частини досліджуваних рельєфних утворень, де  $C', C''$  – кількість сегментів-циклів для відповідних частин процесу.

Далі оцінювали ритмічну структуру окремо кожної частини мікрорельєфу за відомими методами [11, 12]. Встановили, що ритм стабільний, та визначили значення періоду  $\hat{T}'_{\xi_1}$ ,  $\hat{T}''_{\xi_2}$ . За змінного ритму отримали функції  $\hat{T}'_{\xi_1}(l,1)$ ,  $\hat{T}''_{\xi_2}(l,1)$ . Отже, за змінного ритму  $\hat{T}'_{\xi_1}(l,1)$ ,  $l \in \mathbf{W}'$  для сегментної циклічної структури  $\hat{\mathbf{D}}'_c$

$$\hat{T}'_{\xi_1}(l,1) = \hat{l}'_{i+1} - \hat{l}'_i \neq \hat{l}'_{i+2} - \hat{l}'_{i+1} \neq \dots; \quad (2)$$

за постійного  $\hat{T}'_{\xi_1}(l,1)$ ,  $l \in \mathbf{W}'$  для сегментної зонної структури  $\hat{\mathbf{D}}'_c$

$$\hat{T}'_{\xi_1}(l,1) = \hat{l}'_{i+1} - \hat{l}'_i = \hat{l}'_{i+2} - \hat{l}'_{i+1} = \dots = \hat{T}'_{\xi_1}. \quad (3)$$

Аналогічно оцінили ритмічну структуру для другої частини мікрорельєфу  $\hat{T}''_{\xi_2}(l,1)$  чи періоду  $\hat{T}''_{\xi_2}$ .

Після цього оцінювали статистичні характеристики опису мікрорельєфу поверхні, враховуючи його ритмічну структуру. Отримали оцінки математичних сподівань та дисперсії для першої  $\hat{m}'_{\xi_1}(l)$ ,  $\hat{d}'_{\xi_1}(l)$  та другої  $\hat{m}''_{\xi_2}(l)$ ,  $\hat{d}''_{\xi_2}(l)$  частин реалізації (ділянок мікрорельєфу) за співвідношеннями (4), (5) [11]:

$$\hat{m}'_{\xi_1}(l) = \frac{1}{C'} \sum_{i=1}^{C'} \xi_{1\omega}(l + \hat{T}'_{\xi_1}(l,1)), l \in \mathbf{W}'_1, \hat{m}''_{\xi_2}(l) = \frac{1}{C''} \sum_{i=1}^{C''} \xi_{2\omega}(l + \hat{T}''_{\xi_2}(l,1)), l \in \mathbf{W}''_1, \quad (4)$$

де  $\mathbf{W}'_1$ ,  $\mathbf{W}''_1$  – області визначення першого циклу відповідних частин сигналу,

$$\hat{d}'_{\xi_1}(l) = \frac{1}{C' - 1} \sum_{i=1}^{C'} (\xi_{1\omega}(l + \hat{T}'_{\xi_1}(l,1)) - \hat{m}'_{\xi_1}(l + \hat{T}'_{\xi_1}(l,1)))^2, \quad l \in \mathbf{W}'_1,$$

$$\hat{d}''_{\xi_2}(l) = \frac{1}{C'' - 1} \sum_{i=1}^{C''} (\xi_{2\omega}(l + \hat{T}''_{\xi_2}(l,1)) - \hat{m}''_{\xi_2}(l + \hat{T}''_{\xi_2}(l,1)))^2, \quad l \in \mathbf{W}''_1. \quad (5)$$

Статистичні оцінки нормували, вважаючи, що ділянка визначення нормованих оцінок рівна ділянці визначення першого сегмента-циклу  $\mathbf{W}_{\text{norm}} = \mathbf{W}_1$ , а тривалість нормованого циклу така ж, як і першого, тобто  $T_{\text{norm}} = \hat{T}'_1$ . Для нормування статистичних оцінок використали співвідношення

$$\hat{m}'_{\text{norm}}(l) = \hat{m}'_{\xi_1} \left( l \cdot \frac{T'_1}{T_{\text{norm}}} \right), \quad l \in \mathbf{W}_{\text{norm}}, \quad \hat{d}'_{\text{norm}}(l) = \hat{d}'_{\xi_1} \left( l \cdot \frac{T'_1}{T_{\text{norm}}} \right), \quad l \in \mathbf{W}_{\text{norm}}, \quad (6)$$

$$\hat{m}''_{\text{norm}}(l) = \hat{m}''_{\xi_1} \left( l \cdot \frac{T''_1}{T_{\text{norm}}} \right), \quad l \in \mathbf{W}_{\text{norm}}, \quad \hat{d}''_{\text{norm}}(l) = \hat{d}''_{\xi_1} \left( l \cdot \frac{T''_1}{T_{\text{norm}}} \right), \quad l \in \mathbf{W}_{\text{norm}}. \quad (7)$$

На завершальному етапі перевіряли статистичну гіпотезу. Врахували особливості реалізацій статистичних оцінок характеристик аналізованого мікрорельєфу для обох аналізованих частин. Сформували оцінки інтервалів довіри  $v'_{\text{max}}(l)$ ,  $v'_{\text{min}}(l)$ ,  $v''_{\text{max}}(l)$ ,  $v''_{\text{min}}(l)$  для відповідних частин даних (взяті з ймовірністю  $p = 0,997$ ). Інтервали довіри

$$v'_{\text{max}}(l) = \hat{m}'_{\text{norm}}(l) + 3 \cdot \sqrt{\hat{d}'_{\text{norm}}(l)}, \quad l \in \mathbf{W}_{\text{norm}},$$

$$v'_{\text{min}}(l) = \hat{m}'_{\text{norm}}(l) - 3 \cdot \sqrt{\hat{d}'_{\text{norm}}(l)}, \quad l \in \mathbf{W}_{\text{norm}},$$

$$v''_{\text{max}}(l) = \hat{m}''_{\text{norm}}(l) + 3 \cdot \sqrt{\hat{d}''_{\text{norm}}(l)}, \quad l \in \mathbf{W}_{\text{norm}},$$

$$v''_{\text{min}}(l) = \hat{m}''_{\text{norm}}(l) - 3 \cdot \sqrt{\hat{d}''_{\text{norm}}(l)}, \quad l \in \mathbf{W}_{\text{norm}}. \quad (8)$$

Оскільки відома нормальність розподілу параметрів форми рельєфних утворень (досліджуваних реалізацій), для яких виконували експерименти, використали довірчі інтервали (8). Припускали, що оцінки імовірнісних характеристик однієї частини процесу мають бути стохастично еквівалентні. За такого підходу статистичні оцінки першої частини знаходяться в межах коридору довіри, визначеного статистичним оцінюванням його другої частини, і навпаки. При цьому висунуто гіпотезу  $H_1$ , коли досліджуваний процес циклічний (може мати змінний чи постійний ритми), і гіпотезу  $H_2$ , коли він нециклічний. Критерій порівняння статистичних оцінок для цих гіпотез має вигляд

$$H = \begin{cases} H_1, & \begin{cases} v''_{\min}(l) < \hat{m}'_{\text{norm}}(l) < v''_{\max}(l), & l \in \mathbf{W}_{\text{norm}}, \\ v'_{\min}(l) < \hat{m}''_{\text{norm}}(l) < v'_{\max}(l), & l \in \mathbf{W}_{\text{norm}}, \end{cases} \\ H_2, & \text{за невиконання умов чи умови.} \end{cases} \quad (9)$$

На рис. 1–4 подано етапи верифікації циклічності сигналу (профілограми поверхні).

Рис. 1. Тестова реалізація вимірних рельєфних утворень для перевірки пропонуваного методу верифікації циклічності мікрорельєфу.

Fig. 1. Test implementation of the measured relief formations to verify the proposed method of verification of the cyclicity of the microrelief.

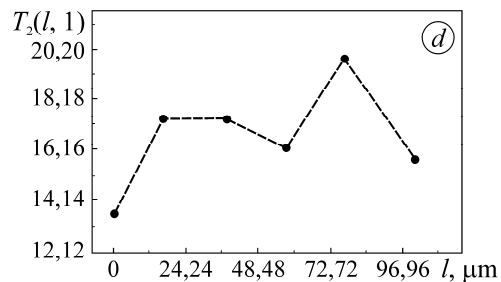
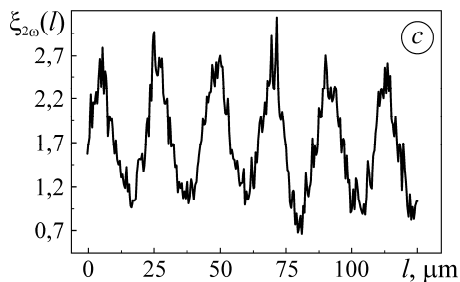
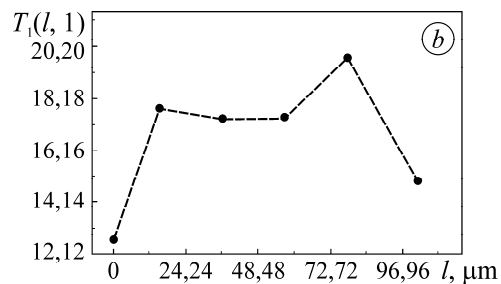
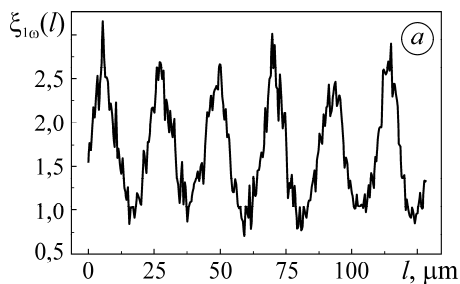
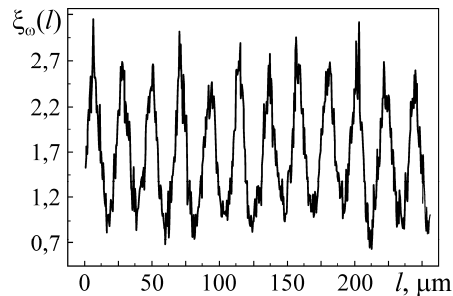


Рис. 2. Перша (а) та друга (с) частини досліджуваного мікрорельєфу, а також ритмічна структура (дискретна функція ритму) (b, d), використана для аналізу циклічності рельєфних утворень.

Fig. 2. The first (a) and second (c) parts of the studied microrelief and the estimated rhythmic structure (discrete rhythm function) (b, d) used to analyze the cyclicity of relief formations.

Отримані статистичні оцінки математичних сподівань відповідних сегментів-циклів першої частини рельєфних утворень знаходяться в інтервалах довіри, визначених за статистичними оцінками математичних сподівань та дисперсій відповідних сегментів-циклів другої його частини, що підтверджує гіпотезу  $H_1$ . Під час застосування методу, за умови, що ідентифіковано сегментно-зонну структуру мікрорельєфу, слід верифікувати циклічність окремих сегментів-ділянок, а для ідентифікованої сегментної циклічної структури – відповідні сегменти-цикли. Пропонований метод розширює математичний апарат технічного діагностування [13–15] та створює додаткові можливості контролю якості поверхонь металів, оброблених короткими лазерними імпульсами.

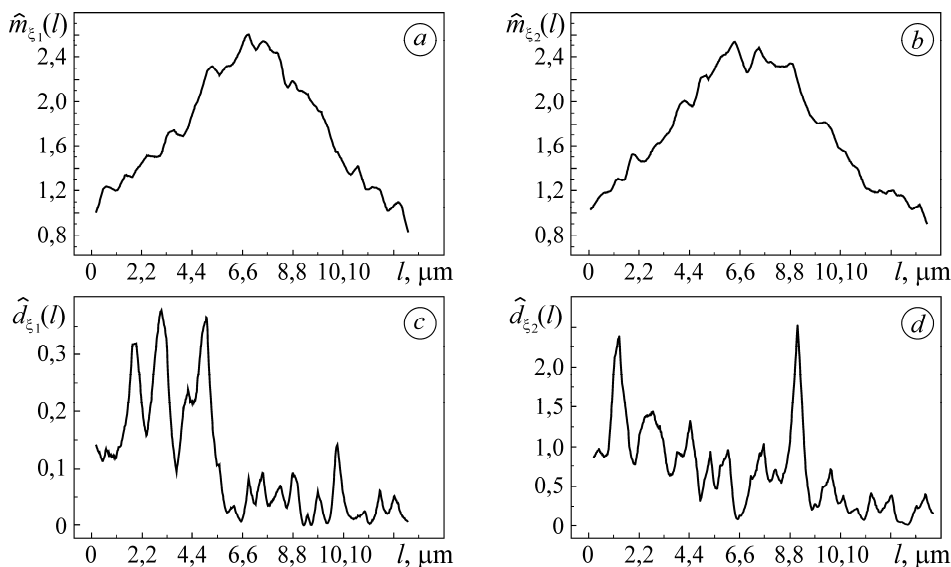


Рис. 3. Реалізації оцінок математичних сподівань (*a, b*) та дисперсій першої (*a, c*) та другої (*b, d*) частин мікрорельєфу для сегментів-циклів.

Fig. 3. Implementation of estimates of mathematical expectations (*a, b*) and dispersions of the first (*a, c*), and second (*b, d*) parts of the microrelief for segments-cycles.

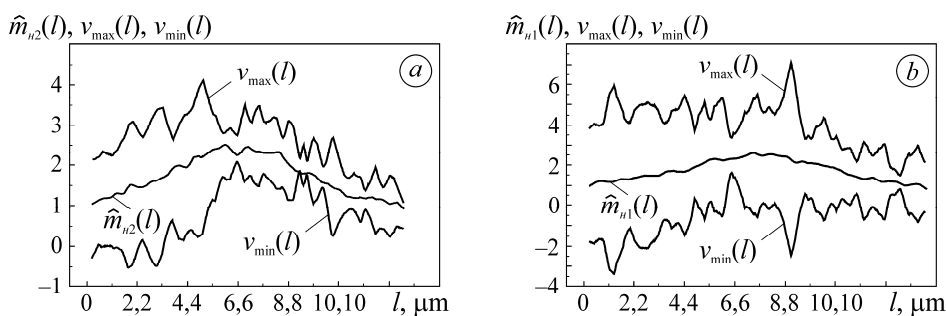


Рис. 4. Інтервали довіри нормованих реалізацій оцінок першої (*a*) та другої (*b*) частин мікрорельєфу та їх математичне сподівання (ймовірність довіри  $p = 0,997$ ).

Fig. 4. Confidence intervals of normalized realizations of assessments of the first (*a*) and second (*b*) parts of the microrelief and their mathematical expectations (confidence probability  $p = 0.997$ ).

## ВИСНОВКИ

За запропонованим методом верифікації циклічності досліджуваного процесу проаналізовано морфологію рельєфних утворень на поверхні титанового спла-

ву, обробленої фемтосекундним лазерним імпульсом. На основі аналізу результатів мікрогеометрії поверхні введено припущення про наявність сегментної циклічної структури з просторовою повторюваністю і, сформованої сегментами-циклами. Крім сегментної, вивчено також ритмічну структуру із постійним або змінним ритмами за математичною моделлю циклічного випадкового процесу. Апробовано новий метод перевірки циклічності сформованих рельєфних утворень і виявлено впорядкованість мікрогеометрії поверхні титанового сплаву, обробленої лазером, та визначено її статистичні характеристики.

1. Нікіфоров Ю. М., Ковалюк Б. П. Лазерна ударно-хвильова дія на матеріали. – Тернопіль: Вид-во ТНТУ ім. Івана Пулюя, 2015. – 272 с.
2. *Mathematical modeling of the concentrated energy flow effect on metallic materials* / S. Kononov, X. Chen, V. Sarychev, S. Nevskii, V. Gromov, and M. Trtica // *Metals*. – 2017. – 7, № 1. – Article Number: 4. <https://doi.org/10.3390/met7010004>
3. *Effects of chemical solvents on the wetting behavior over time of femtosecond laser structured Ti6Al4V surfaces* / G. Schnell, C. Polley, S. Bartling, and H. Seitz // *Nanomaterials*. – 2020. – 10, № 6. – Article Number: 1241. <https://doi.org/10.3390/nano10061241>
4. *Schnell G., Duenow U., and Seitz H. Effect of laser pulse overlap and scanning line overlap on femtosecond laser-structured Ti6Al4V surfaces* // *Materials*. – 2020. – 13, № 4. – Article Number: 969. <https://doi.org/10.3390/ma13040969>
5. *Modifications of roughness and wettability properties of metals induced by femtosecond laser treatment* / P. Bizi-Bandoki, S. Benayoun, S. Valette, B. Beaugiraud, and E. Audouard // *Appl. Surf. Sci.* – 2011. – 257, № 12. – P. 5213–5218. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2010.12.089>
6. *Femtosecond laser-induced periodic surface structure on diamond film* / Q. Wu, Y. Ma, R. Fang, Y. Liao, Q. Yu, X. Chen, and K. Wang // *Appl. Phys. Lett.* – 2003. – 82. – P. 1703–1705.
7. *Laser-induced periodic surface structure. I. Theory* / J. E. Sipe, J. F. Young, J. S. Preston, and H. M. van Driel // *Phys. Rev. B*. – 1983. – 27. – P. 1141–1154.
8. *Cunha A., Oliveira V., and Vilar R. Ultrafast laser surface texturing of titanium alloys // Laser Surface Modification of Biomaterials: Techniques and Applications*. – 2016. – 56 – P. 301–322. DOI:10.1016/B978-0-08-100883-6.00011-3
9. *High-speed manufacturing of highly regular femtosecond laser-induced periodic surface structures: Physical origin of regularity* / I. Gnilytskyi, T. J.-Y. Derrien, Y. Levy, N. M. Bulgakova, T. Mocek, and L. Orazi // *Sci. Rep.* – 2017. – 7. – Article number: 8485. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-08788-z>.
10. *Manipulation of multiple periodic surface structures on metals induced by femtosecond lasers* / H. U. Lim, J. Kang, C. Guo, and T. Y. Hwang // *Appl. Surf. Sci.* – 2018. – 454. – P. 327–333.
11. *Lytvynenko I. V., Maruschak P. O., and Lupenko S. A. Processing and modeling of ordered relief at the surface of heat-resistant steels after laser irradiation as a cyclic random process // Automatic Control and Comp. Sci.* – 2014. – 48. – P. 1–9.
12. *A new method for modeling the cyclic structure of the surface microrelief of titanium alloy Ti6Al4V after processing with femtosecond pulses* / V. Hutsaylyuk, I. Lytvynenko, P. Maruschak, V. Dzyura, G. Schnell, and H. Seitz // *Materials*. – 2020. – 13, № 21. – Article number: 4983. <https://doi.org/10.3390/ma13214983>
13. *Nondestructive testing of the state of surfaces damages by corrosion pitting* / B. P. Rusyn, N. P. Anufrieva, N. R. Hrabovs'ka, and V. H. Ivanyuk // *Materials Science*. – 2014. – 49, № 5. – P. 516–524.
14. *Quantitative analysis of structural changes in steel caused by high-temperature holding in hydrogen* / O. Z. Student, B. P. Rusyn, B. V. Kysil', M. I. Kobasyar, T. P. Stakhiv, and A. D. Markov // *Materials Science*. – 2003. – 39, № 1. – P. 17–24.
15. *Дзюра В. О., Марущак П. О. Технологічні методи забезпечення параметрів якості поверхонь тіл обертання та їх профілометричний контроль*. – Тернопіль: ФОП В. А. Палляниця, 2021. – 170 с.

Одержано 20.01.2022