

PACS numbers: 43.35.+d, 62.20.Qp, 68.35.Ct, 68.37.Hk, 68.60.Bs, 81.20.Wk, 81.65.Ps

## Вплив електроерозійного різання та ультразвукового модифікування на якість поверхонь деталей із жароміцного нікелевого стопу ХН73МТЮБ

Б. М. Мордюк, В. М. Шиванюк, Н. І. Хріпта, М. А. Скорик,  
В. І. Закієв\*, О. В. Подобний\*\*, Ю. І. Торба\*\*,\*\*\*, М. О. Гребенніков\*\*,  
Д. В. Павленко\*\*,\*\*\*

*Інститут металофізики ім. Г. В. Курдюмова НАН України,  
бульв. Академіка Вернадського, 36,  
03142 Київ, Україна*

*\*Національний авіаційний університет,  
просп. Любомира Гузара, 1,  
03058 Київ, Україна*

*\*\*ДП «Івченко-Прогрес»,  
вул. Іванова, 2,  
69068 Запоріжжя, Україна*

*\*\*\*Національний університет «Запорізька політехніка»,  
вул. Жуковського, 64,  
69063 Запоріжжя, Україна*

Проаналізовано стан поверхні зразків із жароміцного стопу на нікелевій основі ХН73МТЮБ (ЭИ698) після електроерозійного різання (ЕЕР) дро-

Corresponding author: Bohdan Mykolayovych Mordyuk  
E-mail: [mordyuk@imp.kiev.ua](mailto:mordyuk@imp.kiev.ua)

*G. V. Kurdyumov Institute for Metal Physics, N.A.S. of Ukraine,  
36 Academician Vernadsky Blvd., UA-03142 Kyiv, Ukraine*

*\*National Aviation University,  
1 Lyubomyr Huzar Ave., UA-03058 Kyiv, Ukraine*

*\*\*SE 'Ivchenko-Progres',  
2 Ivanov Str., UA-69068, Zaporizhzhya, Ukraine*

*\*\*\*Zaporizhzhia Polytechnic National University,  
64 Zhukovsky Str., UA-69063 Zaporizhzhya, Ukraine*

Citation: B. M. Mordyuk, V. M. Shyvanyuk, N. I. Khripta, M. A. Skoryk, V. I. Zakiyev, O. V. Podobnyy, Yu. I. Torba, M. O. Hrybyennikov, and D. V. Pavlenko, Influence of Electroerosion Cutting and Ultrasonic Surface Modification on the Surface Quality of Heatproof CrNi73MoTiAlNb Nickel Alloy Components, *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*, 46, No. 9: 915–931 (2024) (in Ukrainian). DOI: [10.15407/mfint.46.09.0915](https://doi.org/10.15407/mfint.46.09.0915)

том у різних за прикладеною енергією режимах і фінішного високочастотного ударного оброблення (ВЧУО) ультразвуковим ударним інструментом. Із застосуванням оптичної інтерферометрії та растрової електронної мікроскопії досліджено особливості сформованої топографії поверхні та її шерсткість, а за допомогою Рентгенової дифракційної аналізи та мікрорентгеноспектральної аналізи досліджено структуру, хемічний і фазовий склади поверхневих шарів. Виявлено мікролегування поверхні у випадку застосування для ЕЕР латунного дроту, що не спостерігається за використанням молібденового дроту. Цей ефект зумовлює зміни механічних властивостей або їхню відсутність відповідно. Інструментальним інденуванням показано, що внаслідок термічного впливу за умов ЕЕР і після фінішного ВЧУО відбувається зміцнення поверхневих шарів, тоді як виявлене за високоенергетичного ЕЕР мікролегування елементами латунного дроту веде до пониження твердості. Встановлено, що модифікування поверхні за допомогою ВЧУО забезпечує пониження параметрів шерсткості та відповідно зменшує ймовірність концентрації напружень на заглибленнях мікрорельєфу, а також усуває небезпечні залишкові напруження розтягу.

**Ключові слова:** ніклевий стоп, електроіскрове різання, поверхневий шар, високочастотне ударне оброблення, мікроструктура, топографія поверхні, шерсткість, твердість, хемічний склад.

The surface state of heatproof specimens of nickel-based CrNi73MoTiAlNb alloy after both wire electroerosion cutting (WEEC) with different applied energies and finishing high-frequency mechanical impact (HFMI) treatment by an ultrasonic tool is analysed. Using an optical interferometry and scanning electron microscopy, the peculiarities of the formed surface topography and roughness are investigated, and using x-ray diffraction analysis and energy dispersive spectroscopy, the structure, chemical and phase compositions of the surface layers are investigated. In the case of the WEEC using brass wire, the surface microalloying is revealed that is not observed, when molybdenum wire is used for WEEC. This effect determines the changes in mechanical properties or their absence, respectively. Instrumented indentation shows that the thermal exposure under WEEC and finishing HFMI modification result in the surface-layers' hardening, while the microalloying detected under high-energy WEEC leads to a hardness decrease. As established, the HFMI surface modification provides a reduction in the surface-roughness parameters and, accordingly, reduces the probability of the stress concentration on the microrelief and terminates harmful tensile residual stresses.

**Key words:** nickel-based alloy, wire electric-erosion cutting, surface layer, high-frequency impact treatment, microstructure, surface topography, roughness, hardness, chemical composition.

*(Отримано 9 червня 2024 р.; остаточн. варіант — 9 липня 2024 р.)*

## 1. ВСТУП

Враховуючи дрібносерійний характер виробництва авіаційної та

ракетно-космічної техніки, складність профілю елементів конструкції їхніх основних деталей, наприклад таких як пази дисків компресора й турбіни, та погану оброблюваність різанням матеріалів, з яких вони виготовляються, на сьогодні проблема пошуку високопродуктивних методів їхнього формоутворення є актуальною. Одним із перспективних методів формоутворення є електроерозійне різання металевим дротом на верстатах із числовим програмним керуванням [1–5]. Метод електроерозійного різання дротом широко використовується на практиці, оскільки він може бути повністю автоматизованим та гнучким у створенні складних геометричних форм. Конкретним прикладом його використання є заміна комплексу протяжок для оброблення пазів у дисках компресора та турбіни, формоутворення профілю зубців шестерень, шліцьових з'єднань тощо. Головним чинником, що до сьогодні стримує розвиток цієї технології є негативний вплив тонкого шару, який формується на поверхні різання, на експлуатаційні характеристики деталю.

Дійсно, топлення поверхні та висока температура у поверхневих шарах оброблюваного матеріалу здійснюють значний вплив на сформовану топографію поверхні та її цілісність, мікроструктурні зміни, залишкові напруження, мікротвердість і розподіл хемічних елементів [6]. Разом з тим, ступінь термічного пошкодження та змін у поверхневих шарах залежить від умов процесу електроерозійного різання (ЕЕР), а саме, від застосовуваної енергії розряду [2, 5, 6], швидкості різання [2], матеріалу дроту тощо.

Відомо, що енергію розряду між електродою та поверхнею часто використовують для цілеспрямованого легування поверхні металевих деталей. За умов періодичного електроіскрового розряду відбувається легування поверхневого шару за рахунок перенесення матеріалу електроди на оброблювану поверхню [7–12]. Однак, у разі застосування ЕЕР для виготовлення відповідальних деталей авіаційної та ракетної техніки, ефект поверхневого легування може бути шкідливим через спричинену ним зміну механічних властивостей поверхневих шарів деталю, що пов'язані з хемічним і фазовим складами матеріалу.

В роботі [6] було показано, що ефективним задля зменшення спричинених ЕЕР пошкоджень може бути послідовне застосування декількох розрізань: основного високоенергетичного та фінішного розрізань, що провадяться за низької енергії та ведуть до значно менших змін стану поверхні деталю. Інший підхід передбачає фінішне механічне або інше оброблення, наприклад шліфуванням, для усунення надмірної шерсткості та дефектності поверхні, утвореної після ЕЕР [13]. Таким чином, небажані зміни у морфології поверхні, мікроструктурному та напруженому станах поверхневого шару, внесені ЕЕР, можуть бути мінімізовані завдяки вибору енергетики процесу ЕЕР і фінішним механічним обробленням.

Відомо, що одними із ефективних методів нейтралізації дефектного шару після електроерозійного різання є методи інтенсивної пластичної деформації поверхні, зокрема метод височастотного ударного оброблення (ВЧУО) ультразвуковим ударним інструментом [14–19]. Цей метод показав високу ефективність у порівнянні з іншими методами інтенсивного пластичного деформування поверхні, такими як шROTO- та піскоструминне оброблення, оброблення металевими кульками в ультразвуковій камері, оброблення у вібруючому барабані та ін. [20–22]. За умови модифікування поверхні деталей за раціональними режимами істотно зменшена шерсткість поверхні, нанорозмірна зеренна структура поверхневого шару та залишкові напруження стиснення в ньому сприяють підвищенню експлуатаційних характеристик, а саме, опору втомі [4, 8, 9], зношуванню [9, 10, 23, 24] та корозії [7, 9, 11, 12]. Таким чином, у деяких випадках їхнє використання забезпечує можливість заміни методу формоутворення складнопрофільних поверхонь деталей газотурбінних двигунів на більш продуктивне електроерозійне оброблення.

Метою даної роботи є визначення оптимальних режимів електроерозійного різання та фінішного ВЧУО ультразвуковим ударним інструментом зразків з жароміцного нікелевого стопу ХН73МБТЮ. Основними завданнями роботи є аналіза спричинених електроерозійним і деформаційним обробленнями змін мікрорельєфу поверхні, хемічного та фазового складів, мікроструктури та твердості поверхневого шару зразків.

## 2. МЕТОДИКА ЕКСПЕРИМЕНТУ

Об'єктом даного дослідження є жароміцний нікелевий стоп ХН73МБТЮ, що застосовується для виготовлення деталей авіаційної техніки, у тому числі лопаток і дисків газових турбін, дисків, деталей кріплень та ін. Хемічний склад стопу наведено у табл. 1.

Електроіскрове різання зразків проведено із використанням латунного дроту та за двох режимів різної інтенсивності (енергії) з метою швидкого та більш повільного процесу одержання зразка (надалі — жорсткий (високоенергетичний) режим (ЕЕР-Ж) і м'який (низькоенергетичний) режим (ЕЕР-М) відповідно), а також із застосуванням молібденового дроту у проміжному (середньоенергетичному) режимі (ЕЕР-Мо). Зразки вирізали з заготовки після деформаційного оброблення на електроерозійному верстаті Mitsubishi MP-1200.

Фінішне модифікування поверхні одержаних зразків проводилося ВЧУО за допомогою ультразвукового приладу USTREAT 4.0, який складається з ультразвукового генератора з робочою частотою у 21 кГц і потужністю у 0,6 кВт, вібратора зі ступінчастим концентра-

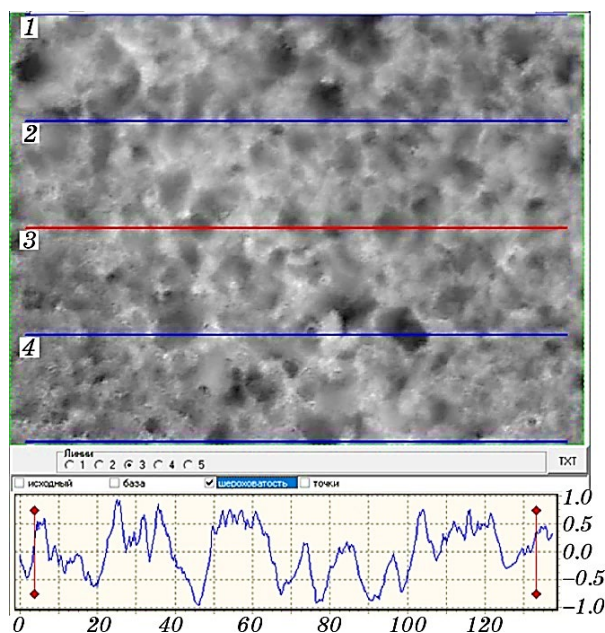
**ТАБЛИЦЯ 1.** Хемічний склад дослідженого нікелевого стопу ХН73МТЮБ (% ваг.).**TABLE 1.** Chemical composition of the nickel-based alloy CrNi73MoTiAlNb (% wt.).

Cr	Nb	Al	Ti	Mo	Fe	Mn	Si	C	Ni	Джерело
13–16	1,9–2,2	1,45–1,8	2,35–2,75	2,8–3,2	$\leq 2$	$\leq 0,4$	$\leq 0,5$	$< 0,07$	решта	довідник [25]
15,19	2,31	2,05	2,48	3,08	1,21	0,35	1,94	2,2	решта	експеримент (EDS)

тором, на якому за допомогою пружин розміщували ударну головку [14–17]. Оброблення зразків проводили із застосуванням двох видів проміжних ударних елементів, виготовлених із загартованої криці ШХ15, що забезпечувало різні частоту ударів і накопичену енергію ударної дії на оброблювану поверхню [18], а саме, плоским круглим ударником пластиною діаметром у 18 мм і товщиною у 3 мм та циліндричним стрижнем діаметром у 5 мм і довжиною у 18 мм. Амплітуда торця концентратора складала  $2A = 50$  мкм. Через періодичний контакт із торцем концентратора бойок одержував імпульс сили та кінетичну енергію, яка витрачалася на модифікування мікрорельєфу поверхні, утвореного під час електроіскрового різання, та на деформування поверхневих шарів зразка. Тривалість оброблення складала 120 с. Режим оброблення був обраний на основі оцінки енергетичних параметрів ультразвукового оброблення, попередньо проведеної для різних схем навантаження та металевих матеріалів [18] і щодо поверхонь деталей газотурбінних двигунів [26].

Для визначення параметрів шерсткості поверхні та візуалізації її тривимірної топографії після електроіскрового різання та наступного фінішного оброблення ВЧУО використовували тривимірний інтерференційний профілометр «Micron-alpha» [27, 28]. Прилад уможлиблює безконтактно міряти тривимірний рельєф поверхні з нанометровою роздільною здатністю по вертикалі. На поверхнях зразків аналізували ділянки площею  $150 \times 100$  мкм<sup>2</sup>, а параметри шерсткості розраховували в межах зареєстрованих ділянок по п'ятьох паралельно розташованих базових лініях. На рисунку 1 представлено приклад зареєстрованої двовимірної топографії ділянки поверхні, сформованої в результаті електроерозійного різання за режимом ЕЕР-М латунним дротом, і паралельно розташовані базові лінії, в межах яких визначалися параметри шерсткості, а також профілограма, що відповідає червоній (№ 3) базовій лінії.

Дослідження структурного та фазового складів поверхневого ша-



**Рис. 1.** Розташування базових ліній для розрахунку параметрів шерсткості в межах зареєстрованої двовимірної топографії поверхні.

**Fig. 1.** Baseline locations for calculating the roughness parameters on the registered two-dimensional topography.

ру зразків проведено за допомогою методу Рентгенової дифрактометрії із застосуванням дифрактометра HUBER у мідному випромінненні ( $\lambda(\text{CuK}\alpha) = 1,5418 \text{ \AA}$ ). Інтервал кутів реєстрації дифракційної картини становив  $2\theta = 20^\circ - 120^\circ$ , крок —  $0,04^\circ$ , час витримки у точці — 2 с. Також використовували растрову мікроскопію та мікрорентгеноспектральну аналізу за допомогою сканувального електронного мікроскопа TESCAN Mira 3 LMU із вбудованим енергодисперсійним мікроаналізатором OXFORD X-MAX 80 мм<sup>2</sup> за пришвидшувальної напруги у 30 кВ та збільшення до  $10^4$  разів.

Механічні властивості зразків після електроіскрового різання та наступного фінішного оброблення ВЧУО досліджували на поперечному перерізі методом неперервного вдавлення індентора Берковича (інструментального індентування). Використовували універсальний мікро/нанотвердомір «Micron-Gamma» за навантаження у 20 г і швидкості навантаження у 2 г/с [29, 30]. Здійснювали серії індентувань із кроком у 60 мкм між кожним уколом по прямій лінії, яку було розташовано під гострим кутом до модифікованих поверхонь, і наступні міряння віддалі кожного уколу від поверхні зразка. Визначення твердості з зареєстрованих діаграм інденту-

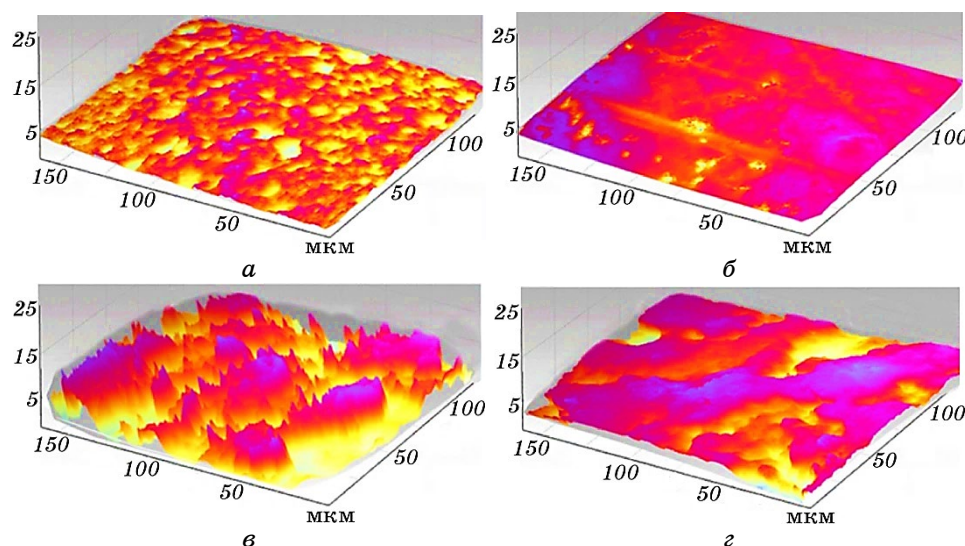
вання проводилися за методикою, наведеною в роботах [31, 32].

### 3. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ РЕЗУЛЬТАТИ Й ОБГОВОРЕННЯ

На рисунку 2 представлено тривимірні топографії ділянок поверхонь досліджуваного ступу після електроерозійного різання у м'якому (ЕЕР-М) і жорсткому (ЕЕР-Ж) режимах та після їхнього наступного модифікування ВЧУО ультразвуковим інструментом.

Кількісна оцінка рельєфу сформованих поверхонь, яка проводилася за п'ятьма паралельно розташованими базовими лініями в межах зареєстрованих ділянок, дала змогу з'ясувати вплив застосованої за умов ЕЕР енергії та термічного впливу, а також ефективність ВЧУО з огляду на можливість усунення значних нерівномірностей мікрорельєфу та відповідної концентрації напружень на його заглибленнях за умов експлуатації. Усереднені значення параметрів  $R_a$  та  $R_z$  шерсткості поверхонь наведено в табл. 2.

Аналіза одержаних результатів показала, що режим електроерозійного оброблення має істотний вплив на рельєф поверхні різання (рис. 2, *a, в*; рис. 3; табл. 2). Так, за м'якого режиму ЕЕР-М форму-



**Рис. 2.** Тривимірна топографія поверхні зразків після ЕЕР у низькоенергетичному ЕЕР-М (*a, б*) та високоенергетичному ЕЕР-Ж (*в, г*) режимах і фінішного ВЧУО модифікування поверхні (*б, г*).

**Fig. 2.** Three-dimensional surface topography of the samples after low-energy WECC-soft (*a, б*) and high-energy WECC-hard (*в, г*) regimes and after finishing HFIT surface modification (*б, г*).

ТАБЛИЦЯ 2. Середні значення параметрів шерсткості поверхні.

TABLE 2. Surface-roughness parameters mean values.

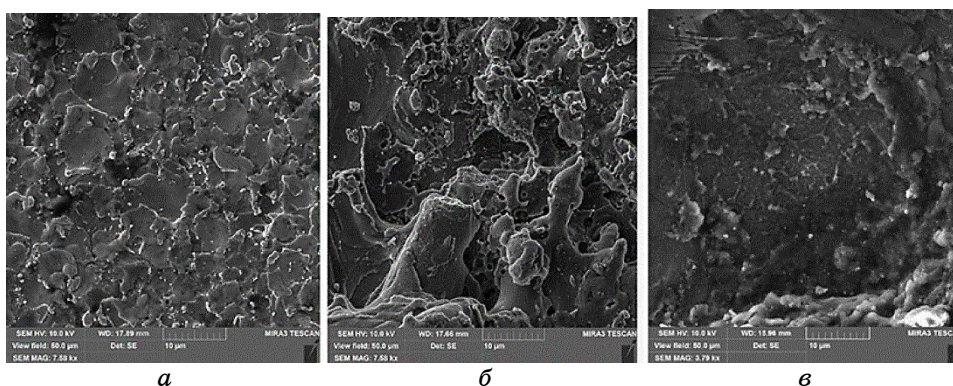
Режим оброблення	$R_a$ , мкм	$R_z$ , мкм
ЕЕР-М	0,365	1,656
ЕЕР-М + ВЧУО	0,05952	0,2352
ЕЕР-Ж	3,261	9,308
ЕЕР-Ж + ВЧУО	1,134	2,084
ЕЕР-Мо	1,938	5,277
ЕЕР-Мо + ВЧУО	0,4355	1,197

ється поверхня з достатньо системним (монотонним) рельєфом, який характеризується наявністю достатньо симетричних, невеликих западин та виступів, що має середні значення параметрів шерсткості поверхні  $R_z = 1,65$  мкм і  $R_a = 0,3695$  мкм. За жорсткого режиму ЕЕР-Ж формується розвинений, неоднорідний рельєф поверхні, що має параметри шерсткості  $R_z = 9,308$  мкм,  $R_a = 3,261$  мкм і характеризується наявністю достатньо високих виступів різних розмірів зі складною формою приблизно однакової висоти (рис. 2, в). Слід відзначити, що режим ЕЕР-М забезпечує більш однорідну та гладку поверхню різання без значних перепадів висот й істотних дефектів. Також доволі рівномірна топографія поверхні із параметрами шерсткості поверхні  $R_z = 5,277$  мкм і  $R_a = 1,938$  мкм спостерігається і після ЕЕР-Мо молібденовим дротом (рис. 3, в; табл. 2).

Результати аналізу морфології поверхні досліджуваних зразків у растровому електронному мікроскопі представлено на рис. 3, де наведено електронно-мікроскопічні зображення ділянок поверхні після різних режимів ЕЕР, та на рис. 4, який демонструє зміну морфології поверхні, сформованої ЕЕР, після фінішного ВЧУО. Поверхні зразків після різних режимів ЕЕР характеризуються неоднорідністю, ступінь якої корелює із застосованою під час ЕЕР енергією та відповідним термічним впливом, що зумовив отоплення поверхні під час різання. Очевидно, найменший ступінь неоднорідності поверхні з великою кількістю плоских ділянок і незначними западинами між ними спостерігається у випадку застосування низькоенергетичного ЕЕР-М (рис. 3, а). Навпаки, дуже розвинутий рельєф формується після ЕЕР-Ж із залученням високої енергії різання, що пов'язано з більш інтенсивним топленням поверхні та можливим натопленням продуктів матеріалу та дроту на неї (рис. 3, б). Процес ЕЕР-Мо, виконаний у проміжному з точки зору енергетики режимі, демонструє проміжний характер мікрорельєфу з наявністю плоских ділянок і невеликих продуктів різання (рис. 3, в).

Фінішне модифікування поверхні, сформованої електроерозійним різанням, методом ВЧУО за допомогою ультразвукового удар-



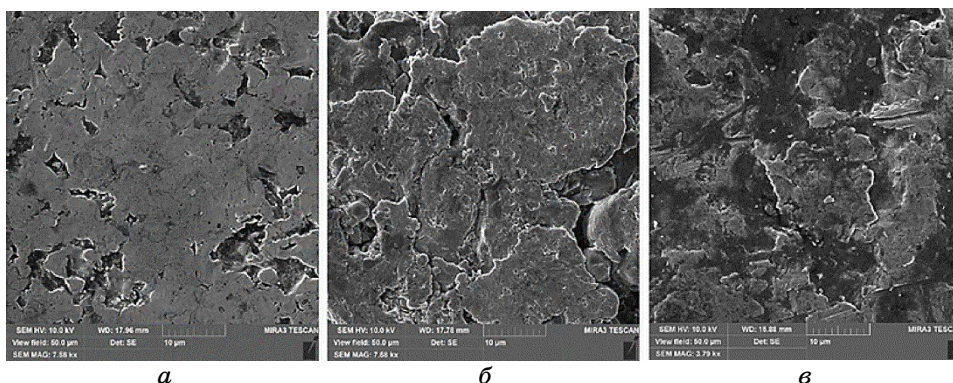


**Рис. 3.** РЕМ-зображення поверхонь зразків стопу ХН73МТЮБ після ЕЕР-М (а) та ЕЕР-Ж (б) латунним дротом і ЕЕР-Мо молібденовим дротом (в).

**Fig. 3.** SEM images of CrNi73MoTiAlNb-alloy specimens' surfaces after WEEC-soft (a) and WEEC-hard (б) using brass wire and after WEEC-Mo using molybdenum wire (в).

ного інструменту веде до зменшення шерсткості поверхні після усіх досліджених режимів ЕЕР (рис. 2, б, г; рис. 4; табл. 2).

ВЧУО поверхні після м'якого режиму ЕЕР-М латунним дротом приводить до пластичної деформації вихідних виступів і формування більш гладкої поверхні, значення параметрів шерсткості



**Рис. 4.** РЕМ-зображення поверхонь зразків стопу ХН73МТЮБ після ВЧУО модифікації мікрорельєфу, сформованого ЕЕР-М (а) та ЕЕР-Ж (б) латунним дротом і ЕЕР-Мо молібденовим дротом (в).

**Fig. 4.** SEM images of CrNi73MoTiAlNb-alloy specimens' surfaces after HFMI modification of microrelief formed by WEEC-soft (a) and WEEC-hard (б) using brass wire and after WEEC-Mo using molybdenum wire (в).

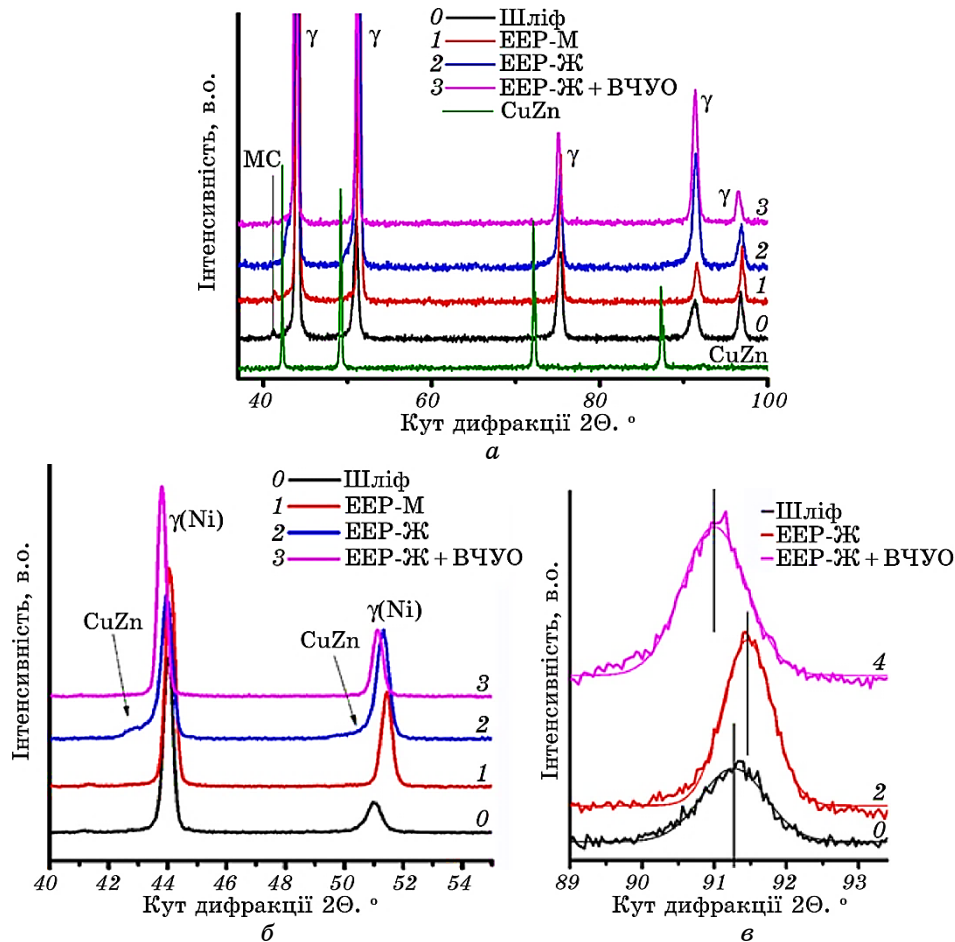
якої зменшуються до  $R_a = 0,05952$  мкм і  $R_z = 0,2353$  мкм. Однак на поверхні ще залишаються невеликі западини. ВЧУО-модифікування поверхні після жорсткого режиму ЕЕР-Ж латунним дротом і після середнього режиму ЕЕР-Мо молібденовим дротом також веде до зменшення шерсткості поверхні (рис. 2, *г*; рис. 4, *б*, *в*; табл. 2). Слід зазначити, що поверхня різання, сформована в результаті жорсткого режиму ЕЕР-Ж, має достатньо розвинений рельєф, а обраний режим ВЧУО не забезпечує повного його згладжування. В результаті ВЧУО-модифікування виступи складної форми, утворені впродовж ЕЕР-Ж, дещо деформуються, що спричиняє зменшення параметрів шерсткості ( $R_z = 2,084$  мкм і  $R_a = 1,134$  мкм). Однак оброблена поверхня має достатньо складну форму із залишками значних западин, які можуть збільшувати ризик концентрації напружень і понижувати експлуатаційні властивості. Те ж саме можна сказати й про морфологію модифікованої ВЧУО поверхні після ЕЕР-Мо молібденовим дротом (рис. 4, *в*). Таким чином, для повного усунення ймовірної концентрації напружень на елементах мікрорельєфу поверхонь, сформованих за умов ЕЕР-Ж і ЕЕР-Мо, потрібно проводити ВЧУО із підвищеною інтенсивністю або впродовж більш тривалого часу.

На рисунку 5 наведено Рентгенові дифрактограми поверхні дослідженого стопу в різних станах. За допомогою Рентгенової фазової аналізи поверхні після шліфування виявлено систему рефлексів ГЦК-твердого розчину ( $\gamma$ -фази) на основі нікелю, а також рефлекс, розташований перед максимумом (111)  $\gamma$ -фази, що відповідає карбїду на основі ніобію та легувальних елементів (МС) (рис. 5, *а*, спектер 0). Електроерозійне різання у режимі ЕЕР-М латунним дротом не вносить істотних змін у фазовий склад (рефлекс від карбїду залишається на рентгенограмі), хоча з'являється незначний вплив перед максимумом (111)  $\gamma$ -фази (рис. 5, *а*, спектер 1). Такий же вплив, але значно більшої інтенсивності та в більш широкому інтервалі кутів з'являється і після різання у режимі ЕЕР-Ж латунним дротом, а рефлекс від карбїдів навпаки зникає, ймовірно, через їхнє розчинення під час топлення, викликаного високоенергетичним ЕЕР (рис. 5, *а*, спектер 2; одержано від латуні). Аналіза позицій рефлексів латуні на дифрактограмі, наведеній внизу рис. 5, *а*, свідчить, що впливи на рентгенограмах поверхонь, сформованих ЕЕР латунним дротом, можуть бути пов'язані із їхнім мікролегуванням елементами, які входять до складу латуні (CuZn). Результати перевірки цього припущення за допомогою мікрорентгеноспектральної аналізи наведено на рис. 6 і в табл. 3.

Рентгенова дифрактограма поверхні досліджуваного стопу після різання у режимі ЕЕР-Мо молібденовим дротом (рис. 5, *а*, спектер 3) виглядає інакше, оскільки на ній відсутні і рефлекси від карбїдів, і впливи від ймовірного мікролегування. Більш очевидно є

описана різниця з огляду на фрагменти дифрактограм, наведені на рис. 5, б. Це свідчить про розчинення карбідів у поверхневому шарі та про відсутність нових фаз, зареєстрованих у випадку ЕЕР латунним дротом.

Ще одним важливим аспектом впливу ЕЕР на поверхневі шари оброблюваного ступу є наявність залишкових напружень розтягу



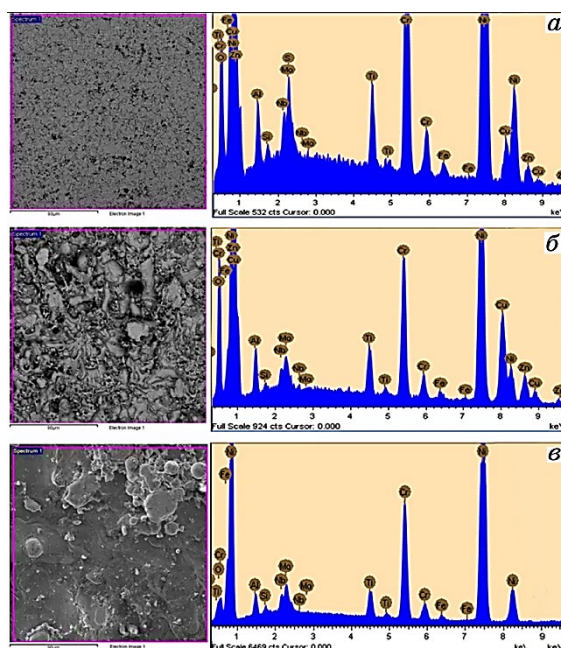
**Рис. 5.** Фрагменти Рентгенових дифрактограм поверхонь ступу ХН73МТЮБ у вихідному шліфованому стані (0), після режимів ЕЕР-М (1) і ЕЕР-Ж (2) латунним дротом, ЕЕР-Мо у проміжному режимі молибденовим дротом (3) і ЕЕР-Ж після ВЧУО (4), а також дифрактограма латуні (CuZn).

**Fig. 5.** Fragments of x-ray diffractograms of CrNi73MoTiAlNb-alloy specimens in the initial state (spectrum 0), after WEEC-soft (1), WEEC-hard (2) by brass wire, WEEC-Mo by molybdenum wire (3), after WEEC-hard followed by HFMI (4), and brass (CuZn).

( $\cong 0,9$  ГПа), про що свідчить зсув Рентгенових максимумів у бік більших кутів за шкалою кутів дифракції (рис. 5, б). Завдяки пластичній деформації мікрорельєфу та поверхневого шару за умов фінішної ВЧУО забезпечується формування напружень стиснення ( $\cong 1,13$  ГПа), що проявляється у зміщенні піків у бік менших кутів дифракції. Тобто залишкові напруження розтягу, спричинені ЕЕР, усуваються за рахунок компенсації напружень різного знаку та їхнього перерозподілу. Для прикладу, на рис. 5, в наведено порівняння положень Рентгенового максимуму (222)  $\gamma$ -фази дослідженого стопу для шліфованого зразка (спектер 0), зразка після ЕЕР-Ж (спектер 2) і фінішного ВЧУО цього ж зразка (спектер 4).

РЕМ-зображення поперечного перерізу дослідженого стопу після різних режимів ЕЕР і відповідні енергодисперсійні спектри, одержані мікрорентгеноспектральною аналізою, представлено на рис. 6.

Таблиця 3 містить дані щодо хемічного складу проаналізованих ділянок поверхні площею  $4 \times 10^4$  мкм<sup>2</sup>, що позначені на рис. 6. Ана-



**Рис. 6.** РЕМ-зображення поверхонь зразків стопу ХН73МТЮБ після режимів ЕЕР-М (а) й ЕЕР-Ж (б) латунним дротом і після ЕЕР-Мо молібденовим дротом (в) із відповідними спектрами мікрорентгеноспектральної аналізи (EDS).

**Fig. 6.** SEM images of CrNi73MoTiAlNb-alloy specimens' surfaces after WEEC-soft (a) and WEEC-hard (б) using brass wire and after WEEC-Mo using molybdenum wire (в) with corresponding EDS spectra.

**ТАБЛИЦЯ 3.** Хемічний склад (% ваг.) областей поверхні стопу ХН73МБТЮ, наведених на рис. 6.**TABLE 3.** Chemical composition (% wt.) of the CrNi73MoNbTiAl-alloy surface areas shown in Fig. 6.

	C	O	Al	Si	Ti	Cr	Fe	Ni	Cu	Zn	Nb	Mo
Рис. 6, а	2,12	2,11	1,47	0,27	2,46	15,12	1,85	63,96	3,59	2,61	1,88	2,56
Рис. 6, б	2,33	2,98	1,52	0,27	2,45	15,23	1,47	40,88	19,77	8,47	1,98	2,75
Рис. 6, в	2,2	2,53	1,64	0,35	2,43	16,85	1,96	66,92	0	0	2,31	2,81

ліза енергодисперсійних даних також свідчить, що у хемічному складі поверхонь, сформованих різанням у режимах ЕЕР-М (а) та ЕЕР-Ж (б) латунним дротом, з'являються істотні домішки Купруму та Цинку (табл. 3). Особливо значний вміст цих елементів фіксується після різання у високоенергетичному режимі ЕЕР-Ж, що корелює з даними Рентгенової аналізи. Це пояснюється перебігом процесів масоперенесення матеріалу дроту у поверхневий шар матеріалу поверхні, а супутній термічний вплив може інтенсифікувати цей процес. Тобто завдяки різкому підвищенню температури та локальному топленню дроту його складові елементи дифундують у поверхневий шар нікелевого стопу, що підлягає різанню. На відміну від цих двох станів поверхні після ЕЕР латунним дротом поверхня після різання молібденовим дротом (ЕЕР-Мо) не спричиняє істотного зростання вмісту Молібдену в поверхневому шарі.

Виявлені особливості мікроструктури та фазового й хемічного складів модифікованих приповерхневих шарів зразків досліджуваного стопу відображаються на його механічних властивостях, а саме, на величині інструментальної твердості, що досліджувалася методом запису кривих навантаження–розвантаження за умов інструментального індентування алмазним наконечником Берковича.

Значення інструментальної твердості  $H_{IT}$  [ГПа], виміряні для поверхневого шару на різній віддалі від поверхні, сформованої за різних режимів ЕЕР і ВЧУО, наведено в табл. 4. Вимірювання проводилися по прямій лінії, розташованій під гострим кутом до модифікованих поверхонь, що дало змогу оцінити глибину, на яку розповсюджуються зміни твердості після різних режимів ЕЕР і впливу ВЧУО-модифікування поверхні. Видно, що у випадку низькоенергетичного різання (ЕЕР-М) спостерігається деяке підвищення твердості у поверхневому шарі товщиною у  $\approx 20$  мкм, а надалі твердість матеріалу складає  $\approx 6$  ГПа. Причиною такого підвищення може бути деяке окиснення поверхні за рахунок термічного ефекту ЕЕР. Після високоенергетичного режиму ЕЕР-Ж також тонкий поверхневий шар має вищу твердість, хоча й у меншій мірі, але на глибині у  $\approx 20$  мкм спостерігається понижена твердість (5,7 ГПа) у

**ТАБЛИЦЯ 4.** Твердість  $H_{IT}$  [ГПа], виміряна на різній віддалі від поверхні зразків стопу ХН73МТЮБ після різних режимів ЕЕР і ВЧУО.

**TABLE 4.** Hardness  $H_{IT}$  [GPa] measured at various distances from the CrNi73MoTiAlNb-alloy specimens' surfaces after different regimes of EEC and HFMI treatment.

Режим ЕЕР	$H_{IT}$ , ГПа				$HV$ , ГПа [33]
	Віддаль від поверхні ЕЕР				
	10 мкм	20 мкм	40 мкм	90 мкм	$\cong 100$ мкм
ЕЕР-М (CuZn)	$8,1 \pm 0,3$	$6,2 \pm 0,2$	$5,9 \pm$	$6,0 \pm 0,1$	$4,552 \pm 0,3$
ЕЕР-Ж (CuZn)	$6,2 \pm 0,1$	$5,5 \pm 0,2$	$6,0 \pm 0,2$	$6,2 \pm 0,1$	$5,065 \pm 0,1$
ЕЕР-Мо	$6,5 \pm 0,3$	$6,4 \pm 0,2$	$6,2 \pm 0,2$	$6,2 \pm 0,2$	–
ЕЕР-М + ВЧУО	$7,4 \pm 0,1$	$7,4 \pm 0,2$	$7,2 \pm 0,2$	$6,3 \pm 0,2$	–
ЕЕР-Ж + ВЧУО	$7,2 \pm 0,1$	$6,9 \pm 0,2$	$6,4 \pm 0,3$	$6,4 \pm 0,3$	$6,082 \pm 0,3$
ЕЕР-Мо + ВЧУО	$7,3 \pm 0,1$	$6,8 \pm 0,2$	$6,5 \pm 0,2$	$6,3 \pm 0,2$	–

порівнянні з твердістю стопу, ймовірно, через сильніший вплив підвищення температури під час ЕЕР-Ж. Крім того, причиною зміни механічних властивостей стопу може бути й проникнення атомів Купруму та Цинку, яке, згідно з даними мікрорентгеноспектральної аналізи, істотно вище саме за умов ЕЕР-Ж (19,77% ваг. Купруму та 8,47% ваг. Цинку), ніж після ЕЕР-М (3,59% ваг. Купруму та 2,61% ваг. Цинку) (табл. 4). Результати щодо інструментальної твердості, зареєстрованої в поперечному перерізі на віддалі у 90 мкм від поверхні ЕЕР, корелюють із даними твердості  $HV$ , одержаними за допомогою розрахунків пружних і механічних характеристик, проведених на основі прецизійних вимірювань швидкостей ультразвуку [33] (табл. 4). Обидва методи свідчать про зростання твердості після фінішного ВЧУО зразка, одержаного різанням у режимі ЕЕР-Ж.

Показово, що ЕЕР-Мо (молібденовим дротом) спричиняє схожі зміни твердості біля поверхні ( $\cong 10$  мкм) і відсутність пониження в глибших шарах, оскільки термічний ефект ЕЕР-Мо, виконаного в проміжному енергетичному режимі, менший, аніж за умов ЕЕР-Ж, а поверхнєве легування відносно легкотопкими Купрумом і Цинком відсутнє за можливого деякого легування Молібденом, який лише незначно змінює загальний вміст Молібдену у складі досліджуваного стопу (табл. 3).

#### 4. ВИСНОВКИ

Одержані результати свідчать, що вибір енергетичних параметрів процесу електроерозійного різання (ЕЕР) дротом необхідно робити



із врахуванням потрібної виробничої продуктивності (швидкості різання), а також низки чинників впливу термічних полів і матеріалу дроту на оброблюваний матеріал. Основними серед цих чинників є формування залишкових напружень розтягу через термічний вплив і нерівномірне охолодження поверхневих шарів після топлення поверхні під час ЕЕР, мікролегування елементами дроту й окиснення поверхні, зміна структури та фазового складу поверхневих шарів стопу за рахунок термічного впливу та мікролегування.

Виявлено, що підвищення енергії ЕЕР спричиняє збільшення концентрації елементів латунного дроту на поверхні дослідженого стопу, а саме, концентрація Купруму та Цинку зростає з 3,59% і 2,61% після низькоенергетичного (ЕЕР-М) режиму різання до 19,77% і 8,47% після високоенергетичного режиму відповідно. Для мінімізації зміни механічних властивостей поверхневих шарів рекомендовано застосовувати різання молібденовим дротом (ЕЕР-Мо), оскільки такий режим ЕЕР не веде до істотних змін хемічного складу, а саме, вмісту Молібдену.

Показано, що застосування ВЧУО ультразвуковим інструментом забезпечує усунення напружень розтягу та формування напружень стиснення, що, згідно з літературними даними, сприяє підвищенню експлуатаційних властивостей (опір зношуванню та втомі) і забезпечує зміцнення поверхневих шарів (твердість зростає до 7,2–7,4 ГПа). Також за допомогою ВЧУО мінімізується шерсткість сформованої за умов ЕЕР поверхні, що зменшує ймовірність концентрації напружень на елементах мікрорельєфу поверхні та подовжує експлуатаційний ресурс. Так, параметер шерсткості  $R_a$  зменшується з 0,365 мкм, 3,261 мкм і 1,938 мкм після низькоенергетичного ЕЕР-М, високоенергетичного ЕЕР-Ж і проміжного молібденовим дротом ЕЕР-Мо до 0,06 мкм, 1,134 мкм та 0,436 мкм, що складає зменшення у шість, три та п'ять разів відповідно.

Таким чином, метод ЕЕР дротом є ефективним для формоутворення складнопрофільних поверхонь деталей газотурбінних двигунів за умови використання оптимальних режимів. Доведено доцільність застосування фінішного модифікування поверхні ВЧУО деталей з жароміцного нікелевого стопу ХН73МТЮБ у якості складової частини комплексного оброблення, що усуває наслідки мікролегування та зростання параметрів шерсткості. Позитивні ефекти ВЧУО полягають у пониженні ймовірності концентрації напружень на елементах мікрорельєфу або у поверхневих шарах. За умов експлуатації це сприятиме підвищенню ресурсу деталей і газотурбінних двигунів загалом.

Роботу виконано за підтримки НФДУ (проект № 2022.01-0038 «Підвищення витривалості авіаційних металевих матеріалів: формування структурно-фазових станів і фізико-механічних властивостей під впливом тверддорозчинного, дисперсійного та деформацій-

ного зміцнень і оздоблення поверхні» із державним реєстраційним № 0123U103378) та державної програми «Підтримка розвитку пріоритетних напрямів наукових досліджень» (КПКВК 6541230) (проект № 0123U100898 «Новітні металовмісні матеріали та інноваційні технології для пріоритетних галузей промисловості України»).

## ЦИТОВАНА ЛІТЕРАТУРА—REFERENCES

1. M. Shabgard, S. Farzaneh, and A. Gholipoor, *J. Braz. Soc. Mech. Sci. Eng.*, **39**: 857 (2017).
2. I. V. Manoj, R. Joy, and S. Narendranath, *Arab. J. Sci. Eng.*, **45**: 641 (2020).
3. F. Klocke, D. Welling, A. Klink, D. Veselovac, T. Nöthe, and R. Perez, *Proc. CIRP*, **14**: 430 (2014).
4. D. Welling, *Proc. CIRP*, **13**: 339 (2014).
5. L. Li, Y. B. Guo, X. T. Wei, and W. Li, *Proc. CIRP*, **6**: 220 (2013).
6. P. Bleys, J.-P. Kruth, B. Lauwers, B. Schacht, V. Balasubramanian, L. Froyen, and J. van Humbeeck, *Adv. Eng. Mater.*, **8**: 15 (2006).
7. M. A. Vasylyev, B. N. Mordyuk, V. P. Bevz, S. M. Voloshko, and O. B. Mordiyuk, *Int. J. Surf. Sci. Eng.*, **14**, No. 1: 1 (2020).
8. A. S. Gill and S. Kumar, *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, **78**: 1585 (2015).
9. B. N. Mordyuk, G. I. Prokopenko, K. E. Grinkevych, N. A. Piskun, and T. V. Popova, *Surf. Coat. Technol.*, **309**: 969 (2017).
10. B. N. Mordyuk, V. V. Silberschmidt, G. I. Prokopenko, Y. V. Nesterenko, and M. O. Iefimov, *Mater. Characterization*, **61**: 1126 (2010).
11. M. A. Vasylyev, B. N. Mordyuk, S. I. Sidorenko, S. M. Voloshko, and A. P. Burmak, *Surf. Eng.*, **34**, No. 4: 324 (2018).
12. V. V. Mohylko, A. P. Burmak, S. M. Voloshko, S. I. Sydorenko, and B. M. Mordiyuk, *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*, **44**, No. 2: 223 (2022) (in Ukrainian); B. В. Могилко, А. П. Бурмак, С. М. Волошко, С. І. Сидоренко, Б. М. Мордюк, *Металлофиз. новейшие технол.*, **44**, № 2: 223 (2022).
13. D. K. Aspinwall, S. L. Soo, A. E. Berrisford, and G. Walder, *Ann. CIRP*, **57**: 187 (2008).
14. B. N. Mordyuk and G. I. Prokopenko, *Handbook of Mechanical Nanostructuring* (Ed. M. Aliofkhaeaei) (Wiley: 2015), ch. 17, p. 417.
15. Н. І. Прокопенко, В. М. Мордюк, М. О. Васильєв, and С. М. Волошко, *Fizychni Osnovy Ul'trazvukovoho Udarnoho Zmitsnennya Metalevykh Pov-erkhon'* [Physical Principles for Ultrasonic Impact Hardening of Metallic Surfaces] (Kyiv: Naukova Dumka: 2017) (in Ukrainian); Г. І. Прокопенко, Б. М. Мордюк, М. О. Васильєв, С. М. Волошко, *Фізичні основи ультразвукового ударного зміцнення металевих поверхонь* (Київ: Наукова думка: 2017).
16. M. A. Vasil'ev, B. N. Mordyuk, D. V. Pavlenko, and L. F. Yatsenko, *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*, **37**, No. 1: 121 (2015) (in Russian); М. А. Васильєв, Б. Н. Мордюк, Д. В. Павленко, Л. Ф. Яценко, *Металлофиз. новейшие технол.*, **37**, № 1: 121 (2015).
17. D. A. Lesyk, S. Martinez, O. O. Pedash, B. N. Mordyuk, V. V. Dzhemelinskyi, and A. Lamikiz, *J. Mater. Eng. Perform.*, **31**: 6283 (2022).



18. S. P. Chenakin, B. N. Mordyuk, and N. I. Khripta, *Vacuum*, **210**: 111889 (2023).
19. D. A. Lesyk, S. Martinez, B. N. Mordyuk, O. O. Pedash, V. V. Dzhemelinskyi, and A. Lamikiz, *Additive Manuf. Let.*, **3**: 100063 (2022).
20. D. Pavlenko, Y. Dvirnyk, and R. Przysowa, *Aerospace*, **8**, No. 1: 1 (2021).
21. D. Pavlenko, E. Kondratyuk, Y. Torba, E. Vyshnepolskyi, and D. Stepanov, *Eastern-European J. Enterprise Technol.*, **1**, No. 12: 31 (2022).
22. D. Lesyk, S. Martinez, B. Mordyuk, V. Dzhemelinskyi, and A. Lamikiz, *Advanced Manufacturing Processes* (Eds. V. Tonkonogyi, V. Ivanov, J. Trojanowska, G. Oborskyi, M. Edl, I. Kuric, I. Pavlenko, and P. Dasic) (Springer: 2020), p. 186.
23. L. Ropyak, T. Shihab, A. Velychkovych, V. Bilinskyi, V. Malinin, and M. Romaniv, *Ceramics*, **6**: 146 (2023).
24. Y. Chabak, V. Efremenko, V. Zurnadzhy, V. Puchý, I. Petryshynets, B. Efremenko, V. Fedun, K. Shimizu, I. Bogomol, V. Kulyk, and D. Jakubéczyová, *Metals*, **12**, Iss. 2: 218 (2022).
25. [https://www.splav-kharkov.com/choose\\_type\\_class.php?type\\_id=14](https://www.splav-kharkov.com/choose_type_class.php?type_id=14).
26. N. I. Khripta, B. M. Mordyuk, V. Yu. Malinin, M. A. Skoryk, V. I. Zakiyev, O. V. Podobnyy, Yu. I. Torba, M. O. Hryebyennikov, and D. V. Pavlenko, *Abstr. IV Int. Conf. 'Functional Materials for Innovative Energetics FMIE-2023' (Sept. 21-23, 2023, Kyiv)*, p. 47 (in Ukrainian); Н. І. Хрипта, Б. М. Мордюк, В. Ю. Малінін, М. А. Скорик, В. І. Закієв, О. В. Подобний, Ю. І. Торба, М. О. Гребенніков, Д. В. Павленко, *Тези IV міжнародної конференції «Функціональні матеріали для інноваційної енергетики ФМІЕ-2023» (21-23 вересня, 2023, Київ)*, с. 47.
27. V. Zakiev, A. Markovsky, E. Aznakayev, I. Zakiev, and E. Gursky, *Proc. SPIE*, **5959**: 595916 (2005).
28. I. Zakiev, G. A. Gogotsi, M. Storchak, and V. Zakiev, *Surfaces*, **3**, Iss. 2: 211 (2020).
29. I. Zakiev, M. Storchak, G. A. Gogotsi, V. Zakiev, and Y. Kokoieva, *Ceramics Int.*, **47**, Iss. 21: 29638 (2021).
30. M. Storchak, I. Zakiev, V. Zakiev, A. Manokhin, *Measurement*, **191**: 110745 (2022).
31. M. O. Vasyl'yev, B. M. Mordyuk, S. M. Voloshko, V. I. Zakiyev, A. P. Burmak, and D. V. Pefti, *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*, **41**, No. 11: 1499 (2019) (in Ukrainian); М. О. Васильєв, Б. М. Мордюк, С. М. Волошко, В. І. Закієв, А. П. Бурмак, Д. В. Пефті, *Металлофиз. новейшие технол.*, **41**, № 11: 1499 (2019)..
32. V. I. Kyryliv, V. I. Zakiev, and O. V. Maksymiv, *Mater. Sci.*, **58**: 795 (2023).
33. O. I. Zaporozhets, V. A. Mykhailovskyi, A. A. Halkina, O. V. Podobnyi, Yu. I. Torba, and D. V. Pavlenko, *Abstr. IV Int. Conf. 'Functional Materials for Innovative Energetics FMIE-2023' (Sept. 21-23, 2023)* (Kyiv: 2023), p. 14.