

## METALLIC SURFACES AND FILMS

PACS numbers: 29.25.Bx, 61.46.–w, 61.80.Fe, 62.20.–x, 68.37.Hk

### Морфологія поверхні та властивості поверхневого шару алюмінієвого стопу 6111 після оброблення імпульсним пучком релятивістських електронів

В. В. Брюховецький\*, В. Ф. Клепиков\*, В. В. Литвиненко\*,  
Д. Є. Мила\*\*, С. І. Петрушенко\*\*, В. А. Бичко\*\*\*, Ю. Ф. Лонін\*\*\*\*,  
А. Г. Пономарьов\*\*\*\*

\**Інститут електрофізики і радіаційних технологій НАН України,  
вул. Чернишевського, 28,  
61002 Харків, Україна*

\*\**Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна,  
пл. Свободи, 4,  
61022 Харків, Україна*

\*\*\**Національний університет «Чернігівська політехніка»,  
вул. Шевченка, 95,  
14035 Чернігів, Україна*

\*\*\*\**Національний науковий центр  
«Харківський фізико-технічний інститут» НАН України,  
вул. Академічна, 1,  
61108 Харків, Україна*

---

Corresponding author: Vasyl Volodymyrovych Bryukhovetsky  
E-mail: ntcefo@yahoo.com

\**Institute of Electrophysics and Radiation Technologies, N.A.S. of Ukraine,  
28 Chernyshevsky Str., UA-61002 Kharkiv, Ukraine*

\*\**V. N. Karazin Kharkiv National University,  
4 Svobody Sqr., UA-61022 Kharkiv, Ukraine*

\*\*\**Chernihiv Polytechnic National University,  
95 Shevchenko Str., 14035 Chernihiv, Ukraine*

\*\*\*\**National Science Centre  
'Kharkiv Institute of Physics and Technology', N.A.S. of Ukraine,  
1 Akademichna Str., UA-61108 Kharkiv, Ukraine*

Citation: V. V. Bryukhovetsky, V. F. Klepikov, V. V. Lytvynenko, D. Ye. Myla,  
S. I. Petrushenko, V. A. Bychko, Yu. F. Lonin, and A. H. Ponomarev, Surface Mor-  
phology and Properties of the Surface Layer of AA6111 Aluminium Alloy Treated by a  
Pulsed Beam of Relativistic Electrons, *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*, **44**, No. 4: 515–  
530 (2022) (in Ukrainian), DOI: 10.15407/mfint.44.04.0515.

Досліджено морфологію поверхні та особливості мікроструктури поверхневого шару алюмінійового стопу 6111, опроміненого імпульсним пучком релятивістських електронів. Інтенсивний тепловий нагрів, створюваний пучком електронів, призводить до отоплення поверхневого шару стопу. Внаслідок надшвидкого застигання розтопу утворюється поверхневий шар з модифікованою субмікросталічною зерненою мікроструктурою. Вплив імпульсного пучка електронів супроводжується формуванням розвинутого поверхневого рельєфу з мікротріщинами і кратерами. Профіль поверхні має хвилястий тип з напівсферичними виступами. За даними про мікротвердість визначено показники міцності та пластичності модифікованого імпульсним пучком електронів поверхневого шару.

**Ключові слова:** імпульсний пучок релятивістських електронів, алюмінійовий стоп, мікротріщини, кратери.

The surface morphology and properties of the microstructure of the surface layer of aluminium alloy 6111 irradiated by a pulsed beam of relativistic electrons are studied. Intense thermal heating, which is created by the electron beam, melts the surface layer of the alloy. A surface layer with a modified sub-microcrystalline grain microstructure is formed as a result of the ultra-fast melt solidification. The effect of the pulsed electron beam is accompanied by the formation of a developed surface relief with micro-cracks and craters. The surface profile has a wavelike type with hemispherical protrusions. The strength and plasticity of the surface layer modified by the pulsed electron beam are determined according to the micro-hardness data.

**Key words:** pulsed beam of relativistic electrons, aluminium alloy, micro-cracks, craters.

*(Отримано 25 січня 2022 р.)*

## 1. ВСТУП

Властивості поверхневих прошарків металів і стопів дуже часто відіграють визначальну роль за умови використання їх як конструкційних матеріалів. Оброблення ж поверхні виробів концентрованими потоками енергії дає можливість цілеспрямовано модифікувати її властивості. Серед багатьох метод модифікації поверхні, що включають оптимізацію мікроструктури, значна увага приділяється опроміненню йонними, лазерними та електронними пучками [1]. Однак серед різних технологій поверхневого оброблення останнім часом викликає все більшу зацікавленість імпульсний електронний пучок з високим струмом, який може досягати сотень кА [2–9]. Ця методика має більше переваг перед методикою оброблення лазерними та йонними пучками в аспекті простоти та надійності. Вона також може розглядатись як інструмент диспергування поверхневого шару матеріалу, що дозволить удосконалювати методу електроіскрового легування [10, 11]. Енергоефективність оброблення ім-

пульсним електронним пучком (ІЕП) є набагато вищою, ніж у лазерного пучка. Також в разі опромінення ІЕП відсутня проблема впливу йонних домішок, спричинених опроміненням йонним пучком. Під час опромінення ІЕП висока енергія ( $10^8$ – $10^9$  Вт/см<sup>2</sup>) може виділятися у поверхневому шарі протягом дуже короткого часу (менше десятків мікросекунд), викликаючи швидкий нагрів, топлення, навіть випаровування, а потім надшвидке застигання та охолодження. Надзвичайно швидкі термоцикли можуть викликати подрібнення зерна у поверхневому шарі. Крім того, у модифікованому шарі можуть утворюватися різні нерівноважні мікроструктури, такі як дислокації, двійники, вакансії, пересичений твердий розчин тощо. Наслідком таких змін може бути підвищення мікротвердості, корозійної стійкості та зносостійкості поверхні матеріалів, зменшення коефіцієнта тертя, підвищення динамічної міцності виробів. Фактично, різноманітні модифікації мікроструктури та покращені властивості матеріалів, які є недосяжними за звичайних метод термомеханічного оброблення, можуть бути одержані шляхом опромінення ІЕП [2–9].

Слід зазначити, що модифікація поверхні ІЕП супроводжується утворенням топографічного рельєфу на поверхні мішені. Вплив на топографію рельєфу поверхні після оброблення електронним пучком здійснює низка факторів, основними серед яких є інтенсивне випаровування, що створює тиск віддачі пари та горизонтальний потік пари; викид матеріалу мішені та розчинення включень у навколишньому матеріалі розтопу, що створює неоднорідний хемічний склад; температурні градієнти та потік розтопу. Складна взаємодія зазначених процесів відповідає за профіль поверхні, що спостерігається на металевих мішенях після оброблення ІЕП. Тому важливим і актуальним завданням є вивчення морфології поверхні, яка утворюється після дії на матеріал ІЕП. Велике значення також мають знання про вплив параметрів ІЕП на характер топографічного малюнку, який утворюється на поверхнях мішеней після їх оброблення. У цій роботі детально охарактеризовано морфологію поверхні та еволюцію мікроструктури модифікованого шару алюмінійового стопу 6111 після опромінення ІЕП.

## 2. МЕТОДИКА ПРОВЕДЕННЯ ЕКСПЕРИМЕНТІВ

Для опромінення виготовляли пластини з розмірами  $100 \times 100$  мм<sup>2</sup> з листів алюмінійового стопу 6111, товщиною 1,1 мм. Перед опроміненням поверхневий шар плакіровки пластини був відшліфований, а поверхня пластини була відполірована. Опромінення підготовлених таким чином пластин проводилося ІЕП на прискорювачі ТЕМР-А в ННЦ «ХФТІ» НАН України [2, 3, 9]. Густина потоку енергії на мішені  $W$  становила приблизно  $10^9$  Вт/см<sup>2</sup> (енергія пучка

$E \sim 0,35$  MeV, струм  $I \sim 2000$  А, тривалість імпульсу  $\tau_1 \sim 5 \cdot 10^{-6}$  с, діаметр пучка  $D \sim 3$  см). Опромінення здійснювалося одним імпульсом у вакуумі при  $1,3 \cdot 10^{-3}$  Па.

Дослідження мікроструктури і фрактограми зламів опромінених зразків проведені за допомогою сканувального електронного мікроскопу Tescan VEGA 3 LMH. Енергодисперсійна рентгенівська мікроаналіза локальних мікрооб'ємів опромінених шарів стопу проводили за допомогою сканувального електронного мікроскопа Tescan VEGA 3 LMH з приставкою для рентгенівської енергодисперсійної мікроаналізи системи «Bruker XFlash 5010». Розподіл легуючих елементів на площині шліфа визначали в режимі картування на растровому електронному мікроскопі Tescan VEGA 3 LMH методом енергодисперсійної рентгенівської аналізи.

Мікротвердість вимірювали при кімнатній температурі на повітрі з використанням мікротвердоміра ПМТ-3М за методом Віккерса (HV) при навантаженні 50 г.

### 3. МАТЕРІЯЛ

Матеріалом, дослідженим у цій роботі, був комерційний алюмінієвий стоп 6111-T4 з хемічним складом, наведеним у табл. 1. Слід зазначити, що окрім основних легуючих елементів (Si і Mg), що забезпечують твердорозчинне і дисперсійне зміцнення, стопи серії 6xxx додатково легують Купрумом (з метою подальшого підвищення механічних властивостей), Хромом (з метою компенсації несприятливого впливу Купруму на корозійні властивості), а також марганцем, який спільно з хромом перешкоджає сегрегації кремнію на межах зерен [12].

Алюмінієвий стоп 6111 був розроблений компанією Alcan в 1983 році [13]. Він застосовується в автомобілебудуванні, оскільки поєднує в собі хорошу здатність до формовки і високий потенціал до зміцнення [13]. Для того, щоб збільшити міцність литих напівфабрикатів алюмінієвого стопу 6111 застосовують стандартне термічне оброблення T4 (гартування та природне старіння). Подальше підвищення міцності стопу 6111 досягається за рахунок виділення фази  $Mg_2Si$  під час штучного старіння в поєднанні з введенням деякої додаткової густини дислокацій за рахунок незначної

**ТАБЛИЦЯ 1.** Хемічний склад (% мас.) алюмінієвого стопу 6111.

**TABLE 1.** Chemical composition (% wt.) of AA6111 aluminium alloy.

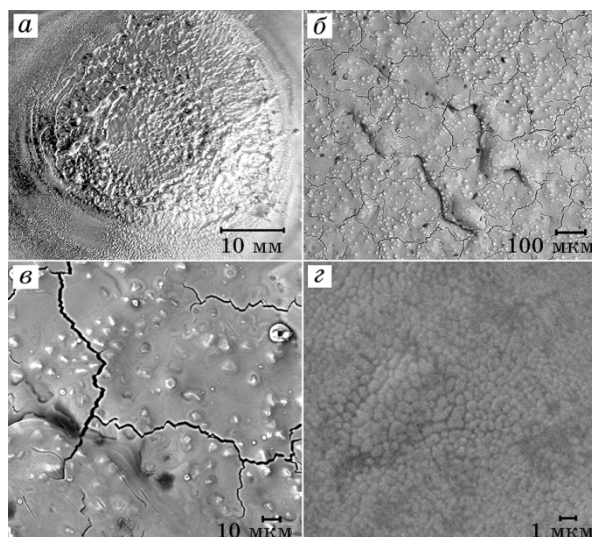
Mg	Si	Cu	Mn	Fe	Cr	Al
0,5–0,9	0,7–1,1	0,5–0,7	0,1–0,4	0,1–0,4	0,1	Основа

попередньої деформації [13, 14].

Середній розмір зерна стопу 6111, досліджуваного у цій роботі, було визначено як 40 мкм. Механічні випробування при кімнатній температурі дозволили визначити, що межа міцності стопу складає 340 МПа, а межа плинності — 152 МПа. Максимальне видовження до зруйнування при кімнатних температурах складає 21%. При високих гомологічних температурах, незважаючи на досить крупний розмір зерен, стоп демонструє надпластичну поведінку [15]. При температурі  $T = 793 \text{ K}$  і швидкості істинної деформації  $\dot{\epsilon} = 5,2 \cdot 10^{-4} \text{ s}^{-1}$  видовження зразків цього стопу до зруйнування складає 180%.

#### 4. РЕЗУЛЬТАТИ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

Вивчення поверхневого рельєфу, що утворюється на мішені після дії на неї ІЕП, має дуже велике значення як з наукової точки зору, оскільки це дає нові знання про низку фізичних процесів, що відбуваються під час дії ІЕП, так і з практичної точки зору для розуміння можливості застосування на практиці такого виду опромінення для оброблення поверхонь деталей і напівфабрикатів. Оскільки ма-



**Рис. 1.** Загальний вид опроміненої пластини з алюмінійового стопу 6111 (а) та види ділянок опроміненої поверхні стопу 6111 за різної величини збільшення (б, в, з).

**Fig. 1.** General view of the irradiated plate of aluminium alloy 6111 (a) and types of areas of the irradiated surface of the alloy 6111 at different ranges of magnification (b, v, z).

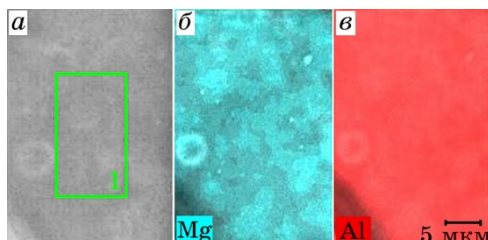
ксимальне поглинання енергії ІЕП доводиться на підповерхневу область, відбувається мікробух поверхні, що супроводжується ударно-пластичною хвилею в напрямку мішені та викидом матеріалу в сторону дії пучка [2–9]. Розтоплений шар матеріалу мішені кристалізується внаслідок теплообміну з нерозтопленою частиною мішені. На рисунку 1, *a* показано загальний вигляд поверхні пластини, виготовленої зі стопу 6111, яка була опромінена ІЕП. Дослідний зразок на цьому рисунку є не шліфованими і зберігає звичайний поверхневий рельєф, в якому записана історія кристалізації його розтопленої ІЕП поверхні. Видно, що інтенсивний тепловий нагрів пластини, створюваний пучком електронів, призвів до отоплення її поверхневого шару. Частина продуктів абляції, ежектована у вигляді рідкої фази, сконденсувалася неоднорідним крапельним покривом на поверхні мішені. На рисунках 1, *b–г* наведено збільшений вид ряду фрагментів поверхні пластини стопу 6111 після опромінення ІЕП. Дія ІЕП спричинила формування на мішені розвинутого рельєфу поверхні, де присутні мікротріщини і кратери (рис. 1, *b, в*). За допомогою растрової електронної мікроскопії можна спостерігати чітку рівновісну зеренну структуру з розміром зерен приблизно 0,7 мкм (рис. 1, *г*), яка, очевидно, утворюється внаслідок надшвидкого застигання розтопу зі швидкістю  $10^7$ – $10^9$  К/с. Як видно з цього рисунку, після оброблення ІЕП на поверхні мішені чіткість меж зерен є досить очевидною навіть без щавлення. Тобто після опромінення електронним пучком межі зерен виникали на поверхні без щавлення, про подібне явище повідомлялося раніше в [16]. Появу меж зерен пов'язують з надшвидким нагріванням та охолодженням при опроміненні електронним пучком. Про те, що мікроструктуру оброблених електронним променем зразків можна спостерігати безпосередньо без процесу хемічного щавлення, було вказано ще в [17]. Цей висновок був підтверджений і в цьому дослідженні. Таким чином, встановлено, що безпосередньо в поверхневих прошарках стопу 6111 оброблення ІЕП сприяє диспергуванню зеренної структури, при цьому розмір зерен у порівнянні з вихідним станом зменшується майже на два порядки.

Слід зазначити, що при візуальній аналізі помітне суттєве потемніння поверхні опроміненої пластини (рис. 1, *a*). Це може пояснюватися окисненням поверхні модифікованого ІЕП шару під час взаємодії з залишком атмосферних газів у вакуумній камері. Опромінення здійснюється усередині вакуумної камери прискорювача при тиску  $1,3 \cdot 10^{-3}$  Па. За такого тиску процеси окиснення все ще відбуватимуться через наявність Оксигену в залишковому вакуумному середовищі. Результати кількісної енергодисперсійної аналізи ділянки на поверхні отопленого шару (рис. 2, *a*), які приведені в таблиці 2, показують, що, окрім основних легувальних елементів, на поверхні є присутнім Оксиген. На рисунках 2, *b, в* наведено резуль-

тати дослідження розподілу атомів Mg і Al на поверхні тієї ж ділянки перетопленого шару, проведених у режимі картування. Магній на поверхні має острівцевий розподіл, тоді як атоми Алюмінію мають більш однорідний розподіл. Як відомо [18], окиснення Магнію у повітряній атмосфері йде значно енергійніше, ніж окиснення Алюмінію. Оксид Магнію утворюється швидше, ніж  $Al_2O_3$ , через вищу реакційну здатність Магнію, ніж у Алюмінію. За окиснення розтопу алюмінійового стопу, що містить Магній, спочатку утворюється MgO [18, 19]. Під час подальшого окиснення може утворюватися оксид  $Al_2MgO_4$  а вже потім утворюється суцільний тонкий прошарок з  $Al_2O_3$ , який робить неможливим подальше проникнення Оксигену в стоп і окиснення припиняється.

Враховуючи характерне співвідношення масових часток Оксигену і Магнію (табл. 2) можна говорити, що на поверхні перетопленого шару існує неоднорідна острівцева оксидна плівка, що складається з MgO. Деяко вища на модифікованій поверхні у порівнянні з середнім значенням у складі стопу концентрація Магнію (див. табл. 1, 2), ймовірно, обумовлена тим, що у формування енергетичного спектру при проведенні енергодисперсійної мікроаналізи поверхневих оксидні прошарки дають завищений питомий внесок.

На рисунку 3 приведено види поперечного перерізу отопленої поверхні, дивлячись на які можна охарактеризувати неоднорідності поверхневого рельєфу і шерсткість поверхні стопу, модифікованої дією ІЕП. Поверхня має хвилястий тип з локальними виступами, висота яких сягає понад 100 мкм (рис. 3, а). Наявність таких напівсферичних виступів зумовлена розбризуванням розтопу з осередку максимального енерговиділення та надшвидким загартування розтопу після опромінення. Слід зазначити, що локальна шерсткість поверхні не перевищує 1,7 мкм (рис. 3, б).



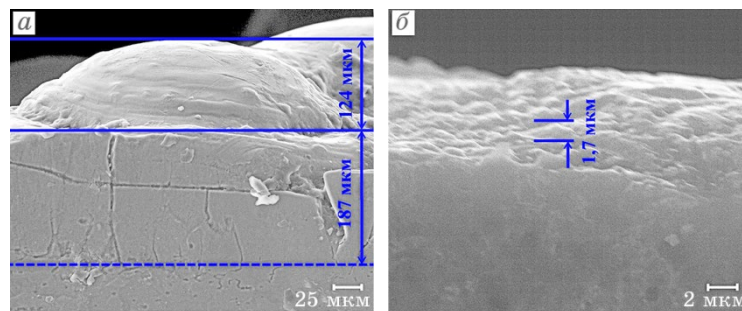
**Рис. 2.** Мікроструктура поверхні опроміненої пластини стопу 6111: вибрана ділянка для проведення енергодисперсійної аналізи (а), розподіл хімічних елементів в режимі картування (б, в).

**Fig. 2.** The microstructure of the surface of the irradiated plate of the 6111 alloy: selected area for carrying-out EDS analysis (a), distribution of chemical elements in the mapping mode (b, c).

**ТАБЛИЦЯ 2.** Результати енергодисперсійної аналізи виділеної ділянки на рис. 2, а.**TABLE 2.** EDS analysis results of zone 1 in Fig. 2, a.

№ ділянки	Вміст елементів, % мас.						
	O	Mg	Al	Si	Mn	Fe	Cu
1	3,41	1,77	94,14	0,35	0,04	0,06	0,22

Як було видно з рисунків 1, б, в поверхнева структура прошарку, що закристалізувався після опромінення, розсічена тріщинами на конгломерати, середній розмір яких складає близько 200 мкм. Середня відстань між краями тріщин складає приблизно 2 мкм. Наявність таких тріщин є характерною і для інших алюмінієвих стопів, опромінених ІЕП з такими ж параметрами [2, 3, 5, 9]. На рисунку 4 показано збільшений фрагмент такої тріщини. Розтрікування поверхневого шару свідчить про наявність значних внутрішніх напружень, що виникають в отопленому шарі в момент його затвердіння. Як видно з рис. 3, а, тріщин мають зигзагоподібні ділянки. Зигзагоподібне поширення тріщин, ймовірно, пов'язане з локальною неоднорідністю характеристик міцності та пластичності перетопленого шару в різних його мікрооб'ємах і, зокрема, з локальною неоднорідністю розподілу легувальних елементів в матеріалі поверхневого шару під час його затвердіння. Очевидно, релаксація внутрішніх напружень, що виникли в результаті впливу опромінення на поверхню пластини зі стопу 6111, була не повною мірою здійснена в ході кристалізації отопленого поверхневого шару, тому внутрішні напруження, що залишилися, стали причиною утворення тріщин. Аналіза виду внутрішньої поверхні тріщин (рис. 4,

**Рис. 3.** Топографія ділянок поверхні стопу 6111, що утворилася під час опромінення ІЕП.**Fig. 3.** Topography of the surface areas of the 6111 alloy that are formed during the pulsed electron beam irradiation.



б) дає підстави говорити про те, що утворення тріщини в поверхневому модифікованому шарі відбувалося по межах зерен.

Вважається, що одним з основних негативних ефектів, викликаних обробленням імпульсним енергетичним пучком, є утворення кратерів на поверхні, яке зазвичай розцінюється як погіршення поверхні [20, 21]. Зазначається, що наслідками утворення кратерів є збільшення шерсткості поверхні та утворення в приповерхневому шарі локальних областей із сильно нерівномірними деформаційно-напруженими станами. Однак за належних умов оброблення утворення кратерів можна використати для видалення домішок у поверхневому шарі за допомогою так званого ефекту «селективного очищення» [22], що може покращити корозійну стійкість. Таким чином, вивчення цього явища є надзвичайно важливим для отримання максимального потенціалу від використання техніки ІЕП. На рисунку 5 приведено вид типового кратеру на опроміненій ІЕП поверхні алюмінійового стопу 6111. Кратер має воронкоподібну кільцеву форму з дном параболічної форми. Діаметр приведенного на рис. 5 кратера приблизно складає величину 60 мкм. Слід зазначити, що діаметри кратерів на модифікованій ІЕП поверхні стопу 6111 є різними, але їх діапазон лежить в інтервалі приблизно від 10 до 100 мкм. Наразі серед дослідників основною гіпотезою утворення кратерів за оброблення ІЕП є неоднорідне локальне топлення в приповерхневих прошарках матеріялу мішені під час опромінення та наступне за ним виверження розтопленого матеріялу через тверду зовнішню поверхню [20]. Є і інші думки відносно механізму утворення кратерів [23]. Для більш глибокого розуміння цього явища потрібні нові більш детальні дослідження.

Хемічний склад є одним з основних показників структури металу після оброблення його поверхні ІЕП. Розподіл хемічних елементів (Al, Si, Mg, Mn) в режимі картування в структурних складових поперечного перерізу опроміненої мішені з стопу 6111 показано на

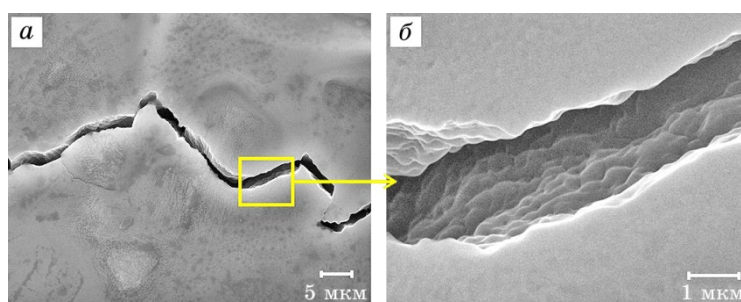


Рис. 4. Тріщина на поверхні перетопленого шару стопу 6111.

Fig. 4. Crack on the surface of the remolten layer of the 6111 alloy.

рис. 6. Для виявлення впливу опромінення ІЕП на концентрацію легуючих елементів у твердому розчині на основі алюмінію стопу 6111 було проведено кількісну енергодисперсійну аналізу вибраних ділянок на поперечному перерізі отопленої зони і для порівняння в зоні, яка не була перетоплена дією ІЕП.

На рисунку 6, а показані ці ділянки. Як для основного металу, так і для перетопленого електронним пучком поверхневого шару, ділянки для проведення енергодисперсійної аналізи вибиралися випадковим чином. Хімічні склади зазначених на рис. 6, а ділянок, наведені в табл. 3. Кожне значення, представлене в табл. 2, є середнім значенням для випадково вибраних ділянок. Аналізуючи і порівнюючи дані з табл. 3, можна зробити ряд висновків про перерозподіл легувальних елементів в твердому розчині на основі алюмінію в результаті дії ІЕП. В першу чергу звертає увагу на себе факт зменшення в опроміненому шарі кількості атомів Mg. Мабуть, це сталося з тієї причини, що поверхня нагрітого в вакуумі розтопу в процесі випаровування збіднюється найбільш летючими компонентами, до яких, в першу чергу, належить Mg. В обраних ділянках обробленого ІЕП шару кількість атомів Si, Cu, Fe і Mn, навпаки, дещо зростає. Це, мабуть, обумовлено частковим або повним розчиненням або отопленням, а потім перемішуванням в розтопі присутніх в початковому стані стопу частинок інтерметалідних фаз. Таким чином, після оброблення ІЕП в перетопленому шарі утворюється новий твердий розчин на основі алюмінію. Звертає на себе увагу факт значного збільшення в новому твердому розчині атомів Si. Однією з причин такого збільшення може бути топлення великих частинок кремнію за оброблення ІЕП. Як видно з рисунку 6, в, для структурного стану стопу 6111 характерним є наявність крупних частинок Si. Діаметр частинок кремнію досягає 30 мкм, а розташу-

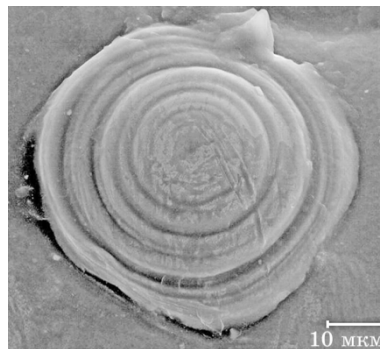
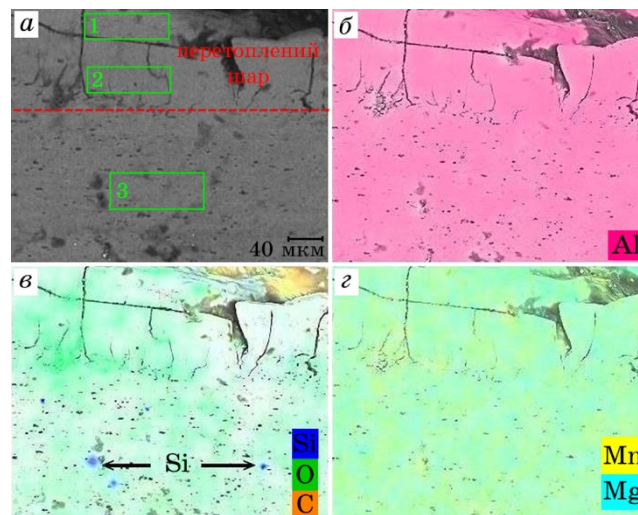


Рис. 5. Кратер на поверхні перетопленого шару стопу 6111.

Fig. 5. SEM image of crater on the surface of the remolten layer of the 6111 alloy.



**Рис. 6.** Мікроструктура поперечного перерізу опроміненої пластини стопу 6111: ділянки для проведення енергодисперсійної аналізи (а), розподіл хемічних елементів в режимі картування (б, в, г).

**Fig. 6.** Microstructure of the cross section of the irradiated plate of the 6111 alloy: selected area for carrying-out energy-dispersive analysis (a), distribution of chemical elements in the mapping mode (b, v, z).

вання цих частинок на площі шліфа є неоднорідним. В перетопленій зоні такі частинки вже не спостерігаються і Силіцій має вже однорідний розподіл.

Встановлено, що внаслідок впливу ІЕП відбувається зміцнення поверхневого шару алюмінійового стопу 6111, що характеризується збільшенням мікротвердості цього шару більш ніж на 30%. Так мікротвердість пластин стопу 6111 у початковому стані становить величину  $70HV_{0,50}$ . Мікротвердість перетопленого ІЕП поверхневого шару збільшується і складає величину  $101HV_{0,50}$ . Знаючи мікротвердість стопу, можна робити висновки і про інші його механічні властивості. Існують способи наближеного визначення межі плинності матеріялу та величини його пластичності за даними про мікротвердість. Поєднання твердості, міцності та пластичності повніше характеризує механічну поведінку матеріялу, ніж тільки твердість. Так стосовно стопів системи Al–Mg–Si, до яких належить і досліджений в роботі стоп 6111, перетворення з межі плинності  $\sigma_y$  (у МПа) до мікротвердості  $HV$  (у VPN) може бути здійснено за допомогою формули [24]:

$$HV = 0,33\sigma_y + 16,0. \quad (1)$$

**ТАБЛИЦЯ 3.** Результати енергодисперсійної аналізи вибраних ділянок (рис. 6, а).**TABLE 3.** EDS analysis results of the zones selected in Fig. 6, a.

№ ділянки	Вміст елементів, % мас.					
	Mg	Al	Si	Mn	Fe	Cu
1	0,57	98,56	0,40	0,07	0,13	0,31
2	0,61	98,53	0,37	0,07	0,11	0,31
3	0,85	98,71	0,13	0,03	0,07	0,21

Відповідно до (1) мікротвердість модифікованого шару  $101HV_{0,50}$  повинна відповідати значенню межі плинності приблизно 257 МПа. Як було вказано вище, межа плинності зразків цього стопу у початковому стані була 152 МПа.

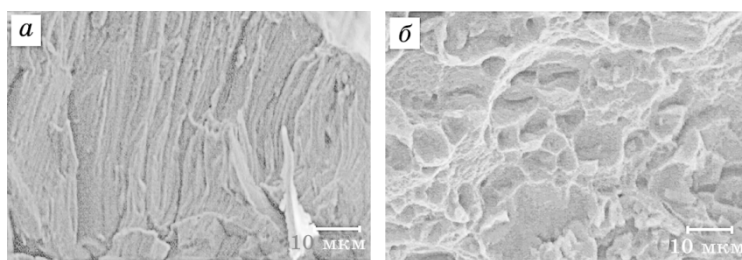
В роботі [24] були розвинені уявлення та методики визначення характеристики пластичності при вимірюванні мікротвердості. Пластичність розглядається як частина пластичної деформації у загальній пружно-пластичній деформації. Вона відповідає фізичному визначенню пластичності як здатності матеріалу до пластичної деформації. Визначити таку характеристика у вигляді безрозмірного параметра  $\delta_H$  можна шляхом проведення розрахунків за формулою [25]

$$\delta_H = 1 - 14,3(1 - \nu - 2\nu^2)HV / E, \quad (2)$$

де  $\nu$  — коефіцієнт Пуассона,  $E$  — модуль Юнга.

Величина вказаної характеристика пластичності  $\delta_H$  змінюється від 0 при суто пружній деформації до 1 для повністю пластичної деформації. Згідно (2) пластичність стопу 6111 у початковому стані складає величину 0,92. Після опромінення ІЕП пластичність поверхневого модифікованого шару змінюється і складає величину 0,89. Тобто пластичність перетопленого ІЕП поверхневого шару зменшується. Згідно [25], необхідною умовою для виявлення пластичності різних матеріалів є значення  $\delta_H \approx 0,9$  або більше за цю величину. При менших значеннях  $\delta_H$  матеріал вже буде крихким. Тобто значення  $\delta_H \approx 0,9$  відповідає в'язкокрихкому переходу для більшості матеріалів. Тому, згідно цих результатів, перетоплений ІЕП шар буде вже крихким, на відміну від його стану до опромінення.

На рисунку 7 приведено фрагменти фрактограми зламу опроміненого зразка стопу 6111. Порівнюючи вид фрагментів зламів неопроміненої і опроміненої частини зразка, можна зазначити, що для опроміненого поверхневого шару характер зламу є крихким, а у неопроміненої частини зразку домінуювальним механізмом руйну-



**Рис. 7.** Фрактограми зламу стопу 6111, модифікованого дією ІЕП: перетоплений прошарок (а), неперетоплена частина опроміненої пластини (б).

**Fig. 7.** Fracture patterns of cross-sectional view of the 6111 alloy, which was modified under the influence of pulsed electron beam: remolten intercalated layer (a), non-melted part of the irradiated plate (b).

вання є в'язке руйнування. Ці спостереження добре узгоджуються з даними про безрозмірний параметр пластичності  $\delta_n$ . Таким чином, опромінений поверхневий шар стопу 6111 стає значно міцнішим але пластичність його зменшується.

## 5. ВИСНОВКИ

В цій роботі були вивчені особливості морфології поверхневого рельєфу алюмінієвого стопу 6111 після модифікації його дією імпульсного пучка електронів. Основні висновки можна сформулювати так.

Дія імпульсного пучка електронів на пластину стопу 6111 призводить до отоплення його поверхневого прошарку і зміни топографічного малюнку поверхні. Новоутворена поверхня має хвилястий тип з напівсферичними виступами, висота яких сягає понад 100 мкм. Локальна шерсткість поверхні не перевищує 1,7 мкм. На поверхні перетопленого прошарку формується рельєф із сіткою мікротріщин і кратерами. Тріщини ділять поверхню на конгломерати, середній розмір яких складає близько 200 мкм. Середня відстань між внутрішніми краями тріщин складає приблизно 2 мкм. Кратери мають воронкоподібну кільцеву форму з дном параболічної форми. Діапазон діаметрів кратерів знаходиться в інтервалі від 10 до 100 мкм.

В результаті дії ІЕП в перетопленому прошарку спостерігається зменшення кількості атомів Mg, а кількість атомів Si, Cu, Fe і Mn, навпаки, дещо зростає. Такий перерозподіл легуючих елементів спричинений випаровуванням в вакуумі найбільш летючих компонентів та розчиненням і перемішуванням в розтопі частинок інтерметалідних фаз.

За даними про мікротвердість визначені межа плинності та величина пластичності модифікованого дією ІЕП поверхневого шару стопу 6111. Встановлено, що опромінений шар стає значно міцнішим, але пластичність його зменшується.

Роботу виконано за підтримки держбюджетної програми «Підтримка розвитку пріоритетних напрямів наукових досліджень» (КПКВК 6541230).

## ЦИТОВАНА ЛІТЕРАТУРА

1. D. I. Proscurovsky and A. D. Pogrebnyak, *phys. status solidi (a)*, **145**, No. 1: 9 (1994).
2. V. V. Bryukhovetsky, V. F. Klepikov, V. V. Lytvynenko, D. E. Myla, V. P. Poyda, A. V. Poyda, V. T. Uvarov, Yu. F. Lonin, and A. G. Ponomarev, *Nuclear Inst. and Methods in Physics Research B*, **499**: 25 (2021).
3. V. V. Bryukhovetsky, V. V. Lytvynenko, D. E. Myla, V. A. Bychko, Yu. F. Lonin, A. G. Ponomarev, and V. T. Uvarov, *Physics and Chemistry of Solid State*, **22**, No. 4: 655 (2021).
4. Y. Hao, B. Gao, G. F. Tu, S. W. Li, C. Dong, and Z. G. Zhang, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B*, **269**: 1499 (2011); B. Gao, S. Hao, J. Zou, W. Wu, G. Tu, and C. Dong, *Surf. Coatings Technology*, **201**: 6297 (2007).
5. D. E. Myla, V. V. Bryukhovetsky, V. V. Lytvynenko, V. P. Poyda, A. V. Poyda, V. F. Klepikov, V. T. Uvarov, Yu. F. Lonin, and A. G. Ponomarev, *Problems of Atomic Science and Technology*, No. 2 (126): 33 (2020).
6. Y. Qin, C. Dong, Z. Song, S. Hao, X. Me, J. Li, X. Wang, J. Zou, and Th. Grosdidier, *J. Vacuum Science and Technology A*, **27**, Iss. 3: 430 (2009).
7. V. V. Bryukhovetsky, A. V. Poyda, V. P. Poyda, and D. E. Milaya, *Problems of Atomic Science and Technology*, No. 2 (120): 67 (2019).
8. V. V. Bryukhovetskiy, N. I. Bazaleev, V. F. Klepikov, V. V. Litvinenko, O. E. Bryukhovetskaya, E. M. Prokhorenko, V. T. Uvarov, and A. G. Ponomar'ov, *Problems of Atomic Science and Technology*, No. 2 (72): 28 (2011).
9. V. V. Bryukhovetsky, V. V. Lytvynenko, D. E. Myla, Yu. F. Lonin, A. G. Ponomarev, and V. T. Uvarov, *J. Nano- and Electronic Physics*, **13**, No. 6: 06025 (2021).
10. V. B. Tarel'nik, V. S. Martsinkovskii, and A. N. Zhukov, *Chemical and Petroleum Engineering*, **53**, No. 1–2: 114 (2017).
11. V. Tarel'nyk, V. Martsynkovskyy, O. Gaponova, I. Konoplianchenko, A. Belous, V. Gerasimenko, and M. Zakharov, *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, **233**, No. 1: 012048 (2017).
12. W. S. Miller, L. Zhuang, J. Bottema, A. J. Wittebrood, P. De Smet, A. Haszler, and A. Vierregge, *Mater. Sci. Eng. A*, **280**: 37 (2000).
13. P. E. Fortin, M. J. Bull, and D. M. Moore, *SAE International Congress Exposition*: 830096 (1983).
14. S. Esmaeili, X. Wang, D. J. Lloyd, and W. J. Poole, *Metall Mater. Trans. A*, **34**: 751 (2003).

15. В. В. Брюховецкий, В. П. Пойда, А. В. Пойда, Д. Р. Аврамец, Р. И. Кузнецова, А. П. Крышталь, А. Л. Самсонник, К. А. Махмуд, *Металлофиз. новейшие технол.*, **31**, № 9: 1289 (2009).
16. D. Zaguliaev, Y. Ivanov, S. Konovalov, V. Shlyarov, D. Yakupov, and A. Leonov, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B*: **488**: 23 (2021).
17. S. Hao, P. Wu, J. Zou, T. Grosdidier, and C. Dong, *Appl. Surf. Sci.*, **253**: 5349 (2007).
18. L. P. H. Jeurgens, W. G. Sloof, F. D. Tichelaar, and E. J. Mittemeijer, *J. Appl. Phys.*, **92**, No. 3: 1649 (2002).
19. А. В. Пойда, В. В. Брюховецкий, Д. Л. Воронов, Р. И. Кузнецова, В. Ф. Клепиков, *Металлофиз. новейшие технол.*, **27**, № 3: 319 (2005).
20. Y. Qin, Ch. Dong, X. Wang, Sh. Hao, A. Wu, J. Zou, and Y. Liu, *J. Vacuum Science Technology A*, **21**: 1934 (2003).
21. K. M. Zhang, J. X. Zou, T. Grosdidier, and C. Dong, *J. Vacuum Science Technology A*, **27**: 1217 (2009).
22. J. X. Zou, T. Grosdidier, K. M. Zhang, and C. Dong, *Acta Mater.*, **54**: 5409 (2006).
23. H. Zhong, J. Zhang, J. Shen, G. Liang, S. Zhang, M. Xu, X. Yu, S. Yan, G. E. Remnev, and X. Le, *Vacuum*, **179**: 109541 (2020).
24. O. R. Myhr, Ø. Grong, and S. J. Andersen, *Acta Mater.*, **49**, No. 1: 65 (2001).
25. Yu. V. Milman, B. A. Galanov, and S. I. Chugunova, *Acta Met. Mater.*, **41**, No. 9: 2523 (1993).

## REFERENCES

1. D. I. Proscurovsky and A. D. Pogrebnyak, *phys. status solidi (a)*, **145**, No. 1: 9 (1994).
2. V. V. Bryukhovetsky, V. F. Klepikov, V. V. Lytvynenko, D. E. Myla, V. P. Poyda, A. V. Poyda, V. T. Uvarov, Yu. F. Lonin, and A. G. Ponomarev, *Nuclear Inst. and Methods in Physics Research B*, **499**: 25 (2021).
3. V. V. Bryukhovetsky, V. V. Lytvynenko, D. E. Myla, V. A. Bychko, Yu. F. Lonin, A. G. Ponomarev, and V. T. Uvarov, *Physics and Chemistry of Solid State*, **22**, No. 4: 655 (2021).
4. Y. Hao, B. Gao, G. F. Tu, S. W. Li, C. Dong, and Z. G. Zhang, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B*, **269**: 1499 (2011); B. Gao, S. Hao, J. Zou, W. Wu, G. Tu, and C. Dong, *Surf. Coatings Technology*, **201**: 6297 (2007).
5. D. E. Myla, V. V. Bryukhovetsky, V. V. Lytvynenko, V. P. Poyda, A. V. Poyda, V. F. Klepikov, V. T. Uvarov, Yu. F. Lonin, and A. G. Ponomarev, *Problems of Atomic Science and Technology*, No. 2 (126): 33 (2020).
6. Y. Qin, C. Dong, Z. Song, S. Hao, X. Me, J. Li, X. Wang, J. Zou, and Th. Grosdidier, *J. Vacuum Science and Technology A*, **27**, Iss. 3: 430 (2009).
7. V. V. Bryukhovetsky, A. V. Poyda, V. P. Poyda, and D. E. Milaya, *Problems of Atomic Science and Technology*, No. 2 (120): 67 (2019).
8. V. V. Bryukhovetskiy, N. I. Bazaleev, V. F. Klepikov, V. V. Litvinenko, O. E. Bryukhovetskaya, E. M. Prokhorenko, V. T. Uvarov, and A. G. Ponomar'ov, *Problems of Atomic Science and Technology*, No. 2 (72): 28 (2011).

9. V. V. Bryukhovetsky, V. V. Lytvynenko, D. E. Myla, Yu. F. Lonin, A. G. Ponomarev, and V. T. Uvarov, *J. Nano- and Electronic Physics*, **13**, No. 6: 06025 (2021).
10. V. B. Tarel'nik, V. S. Martsinkovskii, and A. N. Zhukov, *Chemical and Petroleum Engineering*, **53**, No. 1–2: 114 (2017).
11. V. Tarelnyk, V. Martsynkovskyy, O. Gaponova, I. Konoplianchenko, A. Belous, V. Gerasimenko, and M. Zakharov, *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, **233**, No. 1: 012048 (2017).
12. W. S. Miller, L. Zhuang, J. Bottema, A. J. Wittebrood, P. De Smet, A. Haszler, and A. Vierregge, *Mater. Sci. Eng. A*, **280**: 37 (2000).
13. P. E. Fortin, M. J. Bull, and D. M. Moore, *SAE International Congress Exposition: 830096* (1983).
14. S. Esmaeili, X. Wang, D. J. Lloyd, and W. J. Poole, *Metall Mater. Trans. A*, **34**: 751 (2003).
15. V. V. Bryukhovetskiy, V. P. Poyda, A. V. Poyda, D. R. Avramets, R. I. Kuznetsova, A. P. Kryshchal', A. L. Samsonnik, and K. A. Makhmud, *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*, **31**, No. 9: 1289 (2009) (in Russian).
16. D. Zaguliaev, Y. Ivanov, S. Konovalov, V. Shlyarov, D. Yakupov, and A. Leonov, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B*: **488**: 23 (2021).
17. S. Hao, P. Wu, J. Zou, T. Grosdidier, and C. Dong, *Appl. Surf. Sci.*, **253**: 5349 (2007).
18. L. P. H. Jeurgens, W. G. Sloof, F. D. Tichelaar, and E. J. Mittemeijer, *J. Appl. Phys.*, **92**, No. 3: 1649 (2002).
19. A. V. Poyda, V. V. Bryukhovetskiy, D. L. Voronov, R. I. Kuznetsova, and V. F. Klepikov, *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*, **27**, No. 3: 319 (2005) (in Russian).
20. Y. Qin, Ch. Dong, X. Wang, Sh. Hao, A. Wu, J. Zou, and Y. Liu, *J. Vacuum Science Technology A*, **21**: 1934 (2003).
21. K. M. Zhang, J. X. Zou, T. Grosdidier, and C. Dong, *J. Vacuum Science Technology A*, **27**: 1217 (2009).
22. J. X. Zou, T. Grosdidier, K. M. Zhang, and C. Dong, *Acta Mater.*, **54**: 5409 (2006).
23. H. Zhong, J. Zhang, J. Shen, G. Liang, S. Zhang, M. Xu, X. Yu, S. Yan, G. E. Remnev, and X. Le, *Vacuum*, **179**: 109541 (2020).
24. O. R. Myhr, Ø. Grong, and S. J. Andersen, *Acta Mater.*, **49**, No. 1: 65 (2001).
25. Yu. V. Milman, B. A. Galanov, and S. I. Chugunova, *Acta Met. Mater.*, **41**, No. 9: 2523 (1993).