

М.І. Базалеев<sup>1</sup>, В.В. Брюховецький<sup>1</sup>, Ю.О. Касаткін<sup>1</sup>, В.Ф. Клепиков<sup>1</sup>,  
В.В. Литвиненко<sup>1</sup>, В.Т. Уваров<sup>2</sup>, А.Г. Пономарьов<sup>2</sup>

## Механізми перерозподілу елементів та модифікація властивостей в приповерхневому прошарку дюралюмінію, переплавленому імпульсним релятивістським електронним пучком

<sup>1</sup>Інститут електрофізики і радіаційних технологій НАН України

61002, м. Харків, вул. Чернишевська, 28, а/с 8812, тел.: (057) 704-13-60, e-mail: [ntcefo@yahoo.com](mailto:ntcefo@yahoo.com)

<sup>2</sup>Національний науковий центр "Харківський фізико-технічний інститут" НАН України 61108, м. Харків, вул. Академічна, 1,  
тел.: (057) 335-66-07, e-mail: [nsc@kipt.kharkov.ua](mailto:nsc@kipt.kharkov.ua)

Вивчено вплив дії опромінення імпульсним сильнострумовим релятивістським електронним пучком на модифікацію властивостей приповерхневого прошарку дюралюмінію. Показано, що опромінення дюралюмінію з переплавом поверхневого прошарку, створює поверхню, розсічену тріщинами на конгломерати, що мають залишкові напруження в переплавленому прошарку. Виявлено зміну елементного складу опроміненої поверхні. Значне збільшення концентрації магнію в приповерхневому прошарку пояснено високою поверхневою активністю цього елемента.

Стаття поступила до редакції 14.06.2008; прийнята до друку 15.06.2009.

### Вступ

Наразі велике значення надається правильному вибору матеріалів з оптимальними властивостями в різноманітних умовах їх експлуатації. Серед таких матеріалів особливе місце посідають алюмінієві сплави, які широко використовуються в ядерній енергетиці, авіаційній та інших галузях промисловості, що пояснюється прагненням використовувати в конструкціях міцний і одночасно пластичний матеріал, вигідний з економічної точки зору. В той же час властивості приповерхневих прошарків металів і сплавів дуже часто відіграють визначальну роль за умов використання їх як конструкційних матеріалів. Обробка ж виробів концентрованими потоками енергії дає можливість цілеспрямовано модифікувати їх властивості.

Як енергетичні потоки для поверхневої обробки матеріалів дуже часто використовуються пучки електронів, плазмові потоки та лазерне випромінювання. Механізмом їх впливу є швидкий нагрів поверхні (в деяких випадках аж до переплаву) на різні глибини в залежності від енергії та виду випромінювання з наступним швидким охолодженням. Слід зазначити, що особливістю таких способів модифікації поверхні є утворення перехідної зони з погіршеними характеристиками між модифікованим та вихідним матеріалом. Крім цього, завдяки неоднорідності в розподілі енергії в

перерізі пучка, значення модифікуючих параметрів, наприклад, мікротвердості, можуть мати різні величини на поверхні об'єкту, що опромінюється [1,2]. Під дією потужних мікросекундних пучків в твердотільній мішені створюються осциляції тиску, які проявляються у хвилеподібних змінах мікротвердості вздовж зони впливу пучка [3]. При цьому як джерело виникнення осциляцій розглядається хвиля стискування, що виникає внаслідок утворення всередині мішені парогазової порожнини.

В деяких випадках для одержання нових конструкційних матеріалів обробку концентрованими потоками енергії суміщають з введенням легуючих добавок [4]. Сама ж дія пучку може призводити не лише до структурних змін в приповерхневому прошарку, але і до фазових змін. Таким чином, вельми актуальним є вивчення впливу термоініційованих і динамічних дій на характер сегрегації домішок і фазових перетворень в матеріалі мішені при дії опромінення.

### І. Методика експерименту

Пластини дюралюмінію (4,8 %Cu; 1,5 %Mg; 0,8 %Mn; домішки Fe і Si до 0,5 %; основа Al) товщиною 4 мм піддавались опроміненню імпульсним сильнострумовим релятивістським

електронним пучком з густиною потужності  $10^7$  Вт/см<sup>2</sup> та тривалістю імпульсу  $3 \cdot 10^6$  с. Як відомо [5], сильноструміві релятивістські електронні пучки з такою густиною потужності дозволяють ввести енергію на велику глибину, швидко і досить рівномірно нагріти та переплавити приповерхневий прошарок глибиною до 100 мкм на порівняно великій за площею ділянці.

Вивчення мікроструктури опромінених та неопромінених зразків проводили за допомогою світлової мікроскопії, застосовуючи стандартні методи кількісної металографії. Мікротвердість як опромінених, так і неопромінених зразків вимірювали за допомогою мікротвердоміру ПМТ-3М.

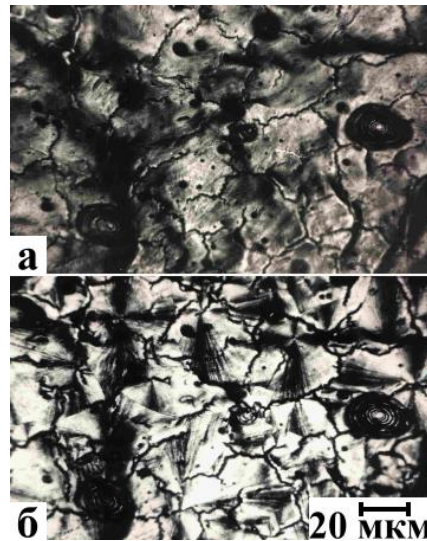
Дослідження елементного складу поверхневого прошарку сплаву проводилось методом вторинної іонної мас-спектрометрії на діагностичному приладі "Еліон-2" в вакуумі близько  $2 \cdot 10^{-6}$  Па. Чутливість елементного аналізу була не меншою  $10^{-3}$  ат.%. Розпилення поверхні, що досліджувалась, проводили пучком іонів аргону з енергією 4 кеВ, струмом ( $10^{-6}$ - $10^{-5}$ ) А на глибину до 1 мкм.

## II. Результати та їх обговорення

Як вже зазначалося, застосування релятивістського імпульсного електронного пучку дозволяє одержувати властивості, відмінні від тих, які одержують при дії стаціонарного електронного опромінення. Як відомо [5], в результаті впливу сильнострумівого релятивістського електронного пучку відбувається швидко нагрівання поверхні і її охолодження за рахунок відведення тепла всередину зразка. Можливе також закалювання поверхневого прошарку імпульсним сильнострумівим релятивістським електронним пучком в режимі без оплавлення, що дозволяє зміцнювати поверхневі прошарки штампованого інструменту без післягартувального короблення.

В цій роботі досліджувались властивості поверхні зразка дюралюмінію, дія на яку релятивістського імпульсного електронного пучку приводила до її переплавлення. На рис. 1, а приведено вигляд поверхні пластини сплаву Д16 після опромінення імпульсним релятивістським електронним пучком. Зразок є не шліфованим і зберігає звичайний поверхневий рельєф, в якому є записаною історія кристалізації розплавленої пучком поверхні зразка. Як видно, поверхнева структура прошарку, що закристалізувався, розсічена тріщинами на конгломерати, середній розмір яких складає близько 40 мкм.

Як відомо, при опроміненні матеріалів сильнострумівим релятивістським електронним пучком в матеріалі розповсюджується ударна хвиля стиснення. Наявність в опромінену середовищі досить потужної ударної хвилі призводять до руйнування матеріалу. Основними характеристиками ударної хвилі, що обумовлюють зміни в твердому тілі, є амплітуда тиску, швидкість розповсюдження



**Рис. 1.** Вигляд поверхні опромінених пластин сплаву Д16: а) у звичайному світлі; б) в поляризованому світлі.

фронту хвилі і його ширина. При проходженні ударної хвилі великі пластичні деформації, які при цьому відбуваються, можуть суттєво підвищити густину дислокацій, наслідком чого є збільшення пружної енергії взаємодії (латентної енергії) дислокаційного скупчення – ансамблю дислокацій [5]. Рух різних груп дислокацій приводить до виникнення потоку дефектів, які здійснюють переніс латентної енергії. Концентрація енергії в місцях максимальних градієнтів пластичної деформації призводить до значних можливих механізмів релаксації, наслідком яких є перебудова дислокаційної структури [6]. В цьому випадку латентна енергія перетворюється в поверхневу енергію мікротріщин, які і спостерігаються на поверхні зразка, що піддавався дії опромінення.

Зображення тієї ж самої поверхні пластини сплаву Д16 після опромінення імпульсним релятивістським електронним пучком на рис. 1, б приведено в поляризованому світлі. Такий вигляд поверхні в поляризованому світлі, певно, є результатом наявності залишкових напружень в переплавленому прошарку пластини.

Візуальній огляд зразків дозволив також виявити деяку зміну і видимого забарвлення опроміненої поверхні. На відміну від вихідної поверхні зразка сплаву, поверхня, що була оплавлена, має матовий сіроголубий відтінок, що непрямо може свідчити про зміну поверхневих властивостей опроміненого зразка. Кристалізація розплавленого прошарку в умовах великого градієнту температур і високих тисків відбувається в нерівноважних умовах і може привести до отримання дрібнокристалічної або аморфної структури (при швидкості охолодження  $>10^6$  град/с) [7]. При цьому можна очікувати деякого перерозподілу компонентів сплаву поблизу поверхні. А все це, безумовно, призведе до зміни властивостей приповерхневих прошарків.

Такі зміни, викликані дією електронного пучку,

Таблиця 1

Співвідношення між інтенсивностями піків елементів дюралюмінію до і після опромінення

Елемент	Al <sup>++</sup>	Mg <sup>+</sup>	Cu <sup>+</sup>	Zn <sup>+</sup>	Fe <sup>+</sup>	Mn <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Na <sup>+</sup>
I <sub>вих.</sub> , мм	63	30	19	7	95	72	65	55
I <sub>опром.</sub> , мм	50	420,0	46	15	168	144	150	162
I <sub>вих./I<sub>опром.</sub></sub>	0,8	14	2,4	2,1	1,8	2,0	2,3	3,0

призводять до того, що мікротвердість поверхні опромінених зразків сплаву після опромінення збільшується приблизно на ~20%.

В таблиці 1 приведено співвідношення між інтенсивностями піків елементів дюралюмінію до і після опромінення, одержані з мас-спектрів, знятих з поверхні опромінених і неопромінених зразків сплаву Д16. Їх співставлення вказує на значні зміни елементного складу після опромінення сильнострумовим релятивістським електронним пучком. Слід звернути особливу увагу на те, що інтенсивність піку магнію опроміненої пучком поверхні зросла в 14 разів у порівнянні з вихідною поверхнею. В значно меншій мірі але також збільшилися концентрації і інших елементів на поверхні опроміненого зразка сплаву Д16 (міді, марганцю, заліза та ін).

Пояснити зміну концентрацій легуючих елементів і домішок на поверхні опроміненого зразка у порівнянні з поверхнею зразка, що не опромінювався, можна декількома чинниками. Так відомо, що при великих швидкостях кристалізації може спостерігатися слаба сегрегація домішок, оскільки їх перерозподіл лімітується дифузією в рідкій фазі. Однак на відстанях, які є співставними з довжиною дифузійного масопереносу цим ефектом нехтувати не можна. Також в зміну елементного складу поверхневих прошарків може робити внесок і витіснення межю тверде тіло – розплав, що рухається, різного роду термодинамічно стійких сполук типа силікатів, алюмінатів та ін. Зміни елементного складу опроміненої поверхні можна очікувати і у зв'язку з тим, що поверхня нагрітого у вакуумі розплаву в процесі випаровування збіднюється найбільш летучими компонентами.

Найбільш же ймовірною причиною зміни елементного складу опроміненої поверхні на нашу думку може бути таке. Так відомо [8], що при опроміненні електронами важливу роль відіграє ефект розпилювання поверхневого прошарку включень фаз. В структурі сплаву Д16 можуть бути присутні включення фаз, що містять магній: Al<sub>3</sub>Mg<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>CuMg, Mg<sub>2</sub>Si [9]. Розчинена в результаті опромінення речовина може повторно випадати з розчину в околі материнської частинки. І, хоча енергії електронів (0,5 МеВ) ще не достатньо для вибивання атомів з вузлів ґратки, все ж інтенсивність пучка, яка приводить до поверхневого плавлення пластин і створює ударну хвилю, може призводити до подрібнення і розпилення включень фаз. Таким чином деяка частина магнію, який стехіометрично входив до складу вищезазначених фаз, стане

розчиною у твердому розчині. Таким чином твердий розчин на основі алюмінію стане більш збагаченим магнієм, а магній в рідкому алюмінії є поверхнево активним елементом. Відомо [10], що ведення 1 % ат. Mg зменшує поверхневий натяг рідкого алюмінію (860 мН/м) на 170 мН/м. Тому слід очікувати, що його концентрація в поверхневому переплавленому прошарку буде значно вищою, ніж середня його концентрація в сплаві. Цим і можна пояснити значне збільшення концентрації магнію на поверхні опроміненого зразка сплаву Д16.

## Висновки

1. Опромінення дюралюмінію сильнострумовим релятивістським електронним пучком з перепадом поверхневого прошарку, створює поверхню, що розсічена тріщинами на конгломерати, середній розмір яких складає близько 40 мкм та має залишкові напруження в переплавленому прошарку.

2. Дія електронного пучку, призводять до того, що мікротвердість поверхні опромінених зразків сплаву після опромінення збільшується приблизно на ~20% та відбувається зміна елементного складу опроміненої поверхні.

3. Значне збільшення концентрації магнію в при поверхневому прошарку може бути обумовлене високою поверхневою активністю цього елементу.

**Базалєєв М.І.** – к.т.н., заст. дир. Інститут електрофізики і радіаційних технологій НАН України;

**Брюховецький В.В.** – д.ф.-м.н., с.н.с. Інститут електрофізики і радіаційних технологій НАН України;

**Касаткін Ю.О.** – к.ф.-м.н., п.н.с. Інститут електрофізики і радіаційних технологій НАН України;

**Клепиков В.Ф.** – д.ф.-м.н., чл.-кор. НАНУ, дирек. Інститут електрофізики і радіаційних технологій НАН України;

**Литвиненко В.В.** – д.т.н., уч. секр. Інститут електрофізики і радіаційних технологій НАН України;

**Уваров В.Т.** – к.ф.-м.н., зав. лаб. Національний науковий центр "Харківський фізико-технічний інститут" НАН України;

**Пономарьов А.Г.** – с.н.с., Національний науковий центр "Харківський фізико-технічний інститут" НАН України.

- [1] А.В. Лазаренко, В.А. Иванов, В.Т. Ковалев. Термообработка металлов импульсным электронным пучком. Доклады IV Всесоюзного совещания по применению ускорителей заряженных частиц в народном хозяйстве. Ленинград, сс. 97-102 (1982).
- [2] I.M. Neklyudov, V.B. Yuferov, L.G. Sorokovoj et al. The powerful pulsed electron beam effect on the metallic surfaces // *ВАНТ. Серия «Ядерно-физические иссл»*, 5(39). сс. 191-193 (2001).
- [3] Yu.E. Kolyada. Formation of a layered structure of a metal strengthening zone under irradiation with the pulsed high-current electron beam // *ВАНТ. Серия «Ядерно-физические иссл»*, 3(38). сс. 184-186 (2001).
- [4] И.М. Неклюдов, В.В. Воеводин. Принципы модификации конструкционных материалов путем легирования и механико-термической обработки. Труды научно-практического симпозиума "Оборудование и технологии термической обработки металлов и сплавов в машиностроении". Харьков. сс. 59-64 (2000).
- [5] В.Т. Уваров, Ю.В. Ткач, Н.П. Гадецкий и др. Получение сильнооточных пучков микросекундной длительности с высоким КПД. Препринт ХФТИ. Харьков. 40 с. (1984).
- [6] В.И. Владимиров. Физическая природа разрушения металлов. Металлургия, М. 428 с. (1989).
- [7] Ю.К. Ковнеристый, Э.К. Осипов, Е.А. Трофимов. Физико-химические основы создания аморфных металлических сплавов. Наука, М. 145 с. (1983).
- [8] Л.Н. Лариков. Влияние облучения на фазовые превращения. // *ВАНТ. Серия «Физика радиационных повреждений и радиационное материаловедение»*, 3(17). сс. 32-43 (1981).
- [9] А.М. Захаров. Промышленные сплавы цветных металлов. Фазовый состав и структурные составляющие. Металлургия, М. 256 с. (1980).
- [10] А.М. Корольков. Литейные свойства металлов и сплавов. Наука, М. 199 с. (1967).

М.І. Bazaleev<sup>1</sup>, V.V. Bryukhovetsky<sup>1</sup>, Yu.O. Kasatkin<sup>1</sup>, V.F. Klepikov<sup>1</sup>, V.V. Lytvynenko<sup>1</sup>,  
V.T. Uvarov<sup>2</sup>, A.G. Ponomarev<sup>2</sup>

## Mechanisms of Element Redistribution and Modification of Duraluminum Properties in Near-Surface Layer Remelted by Impulse Relativistic Electron Beam

<sup>1</sup>*Institut of Electrophysics & Radiation Technologies, NAS of Ukraine  
28 Chernyshevsky Str., P.O.BOX 8812, UA-61002 Kharkiv, Ukraine*

<sup>2</sup>*National Scientific Center "Kharkiv Institute of Physics and Technology", NAS of Ukraine  
1 Akademicheskaya Str., UA-61108 Kharkiv, Ukraine*

The influence of pulse relativistic electron beam irradiation on the near-surface duraluminum properties are studied. It is shown that duraluminums surface remelting by using irradiation bring to surface dissect of glomeration with residual tension. The element composition of the irradiated surface was changed. Essential increasing of magnium concentration in near-surface layers was explained as arising due to high surface activity of this element.

**Key words:** pulse relativistic electron beam, remelting, element redistribution.