

УДК 536.2, 538.9, 53.06

## ОСОБЛИВОСТІ ПРОСТОРОВОГО РОЗПОДІЛУ МЕХАНІЗМІВ ВПЛИВУ СИЛЬНОСТРУМОВИХ РЕЛЯТИВІСТСЬКИХ ЕЛЕКТРОННИХ ПУЧКІВ НА АЛЮМІНІЄВІ СПЛАВИ

С. Є. Донець<sup>1</sup>, П. Р. Хородек<sup>2,3</sup>, В. Ф. Клепиков<sup>1</sup>, А. Г. Кобець<sup>1,2</sup>, В. В. Литвиненко<sup>1</sup>,  
Ю. Ф. Лонін<sup>4</sup>, А. Г. Пономарьов<sup>4</sup>, О. А. Старцев<sup>1</sup>, В. Т. Уваров<sup>4</sup>

<sup>1</sup>*Інститут електрофізики і радіаційних технологій НАН України,  
вул. Гуданова, 13, 61024, Харків, Україна*

<sup>2</sup>*Об'єднаний інститут ядерних досліджень, вул. Жоліо Кюрі, 6, 141980,  
Дубна, Московська область, Російська Федерація*

<sup>3</sup>*Інститут ядерної фізики Польської академії наук,*

*вул. Валерія Еліяша-Радзіковського, 152, 31342 Краків, Польща*

<sup>4</sup>*Національний науковий центр «Харківський фізико-технічний інститут» НАН України,  
вул. Академічна, 1, 61108, Харків, Україна*

**E-mail:** vvlytvynenko@ukr.net

Надійшла до редакції 12.04.2018

У роботі вивчені особливості розподілу по глибині мішені ділянок з різноманітною внутрішньою структурою, яка утворюється в алюмінієвому сплаві 1933 внаслідок опромінення сильнострумовим релятивістським електронним пучком. З застосуванням оптичної та растрової електронної мікроскопії ідентифіковані ділянки, які відповідають повному гальмівному шляху електронів та суміжній ділянці інтенсивного термічного впливу. На більш віддаленій ділянці, що ймовірно підлягала ударно-акустичному впливу пучка методом позитронної анігіляційної спектроскопії ідентифіковано більш високу концентрацію вакансій.

**Ключові слова:** позитронна анігіляційна спектроскопія, сильнострумові електронні пучки, дефекти, алюміній.

## PARTICULARITIES OF SPATIAL DISTRIBUTION OF MECHANISMS OF THE HIGH-CURRENT RELATIVISTIC ELECTRON BEAMS INFLUENCE ON ALUMINUM ALLOYS

Stanislav Donets<sup>1</sup>, Pawel Horodek<sup>2,3</sup>, Viacheslav Klepikov<sup>1</sup>, Andriy Kobets<sup>1,2</sup>,  
Volodymyr Lytvynenko<sup>1</sup>, Yuriy Lonin<sup>4</sup>, Anatoliy Ponomarev<sup>4</sup>,  
Oleksandr Startsev<sup>1</sup>, Viktor Uvarov<sup>4</sup>

<sup>1</sup>*Institute of Electrophysics & Radiation Technologies National Academy of Sciences of Ukraine, 13  
Gudanova Str., 61024, Kharkiv, Ukraine*

<sup>2</sup>*Joint Institute for Nuclear Research, 6 Joliot Curie Str., 141980 Dubna,  
Moscow region, Russian Federation*

<sup>3</sup>*Institute of Nuclear Physics of the Polish Academy of Sciences,  
152 Valery Eliaszy-Radzikowsky Str., 31-342 Krakow, Poland*

<sup>4</sup>*NSC «Kharkiv Institute of Physics and Technology» National Academy of Sciences of Ukraine, 1  
Academic Str., 61108, Kharkiv, Ukraine*

This paper presents a study of spatial distributions of modification mechanisms in the aluminum alloy 1933 after high-current relativistic electron beam irradiation. Having used optical and scanning electron microscopy, some characteristic areas were identified which correspond to the complete electron stopping path and the adjacent zone of intense thermal effect. A higher concentration of vacancies was observed at a more distant regions using the positron annihilation spectroscopy method. It was hypothesized that the effect was caused by the shock-acoustic impact.

**Keywords:** positron annihilation spectroscopy, high-current electron beams, defects, aluminum.

## ОСОБЕННОСТИ ПРОСТРАНСТВЕННОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ МЕХАНИЗМОВ ВЛИЯНИЯ СИЛЬНОТОЧНЫХ РЕЛЯТИВИСТСКИХ ЭЛЕКТРОННЫХ ПУЧКОВ НА АЛЮМИНИЕВЫЕ СПЛАВЫ

С. Е. Донец<sup>1</sup>, П. Р. Хородек<sup>2,3</sup>, В. Ф. Клепиков<sup>1</sup>, А. Г. Кобец<sup>1,2</sup>, В. В. Литвиненко<sup>1</sup>, Ю. Ф. Лонин<sup>4</sup>, А. Г. Пономарев<sup>4</sup>, А. А. Старцев<sup>1</sup>, В. Т. Уваров<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Институт электрофизики и радиационных технологий НАН Украины,  
ул. Гуданова, 13, 61024, Харьков, Украина

<sup>2</sup>Объединенный институт ядерных исследований, ул. Жолио Кюри, 6, 141980,  
Дубна, Московская область, Российская Федерация

<sup>3</sup>Институт ядерной физики Польской академии наук,

ул. Валерия Елиаша-Радзиковского, 152, 31342 Краков, Польша

<sup>4</sup>Национальный научный центр «Харьковский физико-технический институт»  
НАН Украины, ул. Академическая, 1, 61108, Харьков, Украина

В работе изучены особенности распределения по глубине мишени участков с отличающейся внутренней структурой, которая образовалась в алюминиевом сплаве 1933 вследствие облучения сильноточным релятивистским электронным пучком. С применением оптической и растровой электронной микроскопии идентифицированы участки, которые соответствуют полному тормозному пути электронов и смежному участку интенсивного термического влияния. На более удаленном участке, который вероятно был подвергнут ударно-акустическому воздействию пучка методом позитронной аннигиляционной спектроскопии идентифицировано более высокое значение концентрации вакансий.

**Ключевые слова:** позитронная аннигиляционная спектроскопия, сильноточные электронные пучки, дефекты, алюминий.

### ORCID IDs

Stanislav Donets: <https://orcid.org/0000-0002-1258-1434>

Pawel Horodek: <http://orcid.org/0000-0002-8092-6561>

Viacheslav Klepikov: <https://orcid.org/0000-0003-0294-7022>

Andriy Kobets: <https://orcid.org/0000-0003-2185-4606>

Volodymyr Lytvynenko: <https://orcid.org/0000-0003-4850-2555>

Yuriy Lonin: <https://orcid.org/0000-0003-2601-5035>

Anatoliy Ponomarev: <https://orcid.org/0000-0001-6914-6057>

Oleksandr Startsev: <https://orcid.org/0000-0002-0139-2187>

Viktor Uvarov: <https://orcid.org/0000-0002-3435-2077>

### ВСТУП

На даний час суспільство стикається з проблемою пошуку балансу між зростаючими потребами в енергії, впливом на довкілля домінуючих технологій генерації та необхідністю дотримуватися припустимих меж вдатків на розвідку і видобуток сировини. Необхідно вживати заходи стосовно запобігання забрудненню навколишнього середовища, забезпечуючи належну безпеку життєдіяльності людини. Не зважаючи на стрімкий розвиток альтернативних джерел енергії, їх питома вага в балансі виробництва ще не скоро стане домінуючою, тоді як потреби людства в енергоносіях постійно зростають, що також корелюється з постулатами підвищення якості життя і безпеки життєдіяльності. Домі-

нучими способами генерації електроенергії в світі та Україні є атомна і теплова енергетика. В Україні питома вага атомної енергетики складає понад 50 %. Теплова енергетика перебуває в складному стані не тільки через застарілість енергетичного обладнання, але й проблему постачання проектного вугілля, поклади якого знаходяться на тимчасово неконтрольованих територіях.

Основною екологічною проблемою атомної енергетики є утворення радіоактивного відпрацьованого ядерного палива. Серед стратегічних підходів, щодо її подолання протягом декількох десятиріч розглядається конструкція реактора, сполученого з прискорювачем заряджених частинок, який би міг ініціювати реакції поділу в радіонуклідах з

високим періодом напіврозпаду, призводячи утворення стабільних елементів [1]. В той же час непередбачуваність процесів у світовому океані призвела до масштабної аварії на атомній електростанції (АЕС) Фукусіма – 1. [2]. Ця трагічна подія дала підставу для висновку, що аварійні ситуації виникають внаслідок нехтування чинниками, які є малоімовірними або ймовірність яких співвимірна з флуктуаційним фоном. До речі, доцільність перегляду ймовірного підходу до безпеки АЕС детально обговорюється в роботі [3]. Сценарій розвитку аварії полягав в тому, що поштовх магнітудою в 9 балів на відстані близько 150 км від станції, був зареєстрований сейсморегістраторами, що передбачало вимкнення системи аварійного захисту і зупинку реакторів з переходом системи охолодження активної зони на живлення від дизель генераторів. Але цунамі висотою в 14-15 метрів затопило прибережні дизельні ста-

нції, оскільки захисна дамба проектувалась на висоту цунамі близько 6 метрів.

Відсутність охолодження ініціює перебіг паро-цирконієвої реакції [4], яка спричиняє підвищення температури, руйнування стінок тепловидільних елементів, та виділення водню з подальшим його вибухом. Таким чином, розробка ядерно-енергетичних установок майбутнього з більш високим рівнем надійності та безпечності передбачає їх випробування на стійкість в умовах впливу як екстремальних чинників, так і штатних навантажень.

## МАТЕРІАЛ ТА МЕТОДИКА ЕКСПЕРИМЕНТУ

Дослідний зразок – квадратна пластина з алюмінієвого сплаву товщиною ~ 2 мм і довжиною сторони ~ 10 мм має елементний склад зазначений у табл. 1 [1].

Таблиця 1

Склад алюмінієвого сплаву 1933 в % мас.

Елемент	Zn	Mg	Cu	Mn	Fe	Si	Ti	Cr	Zr	Al
%	6.35	1.6	1	0.1	0.2	0.1	0.06	0.05	0.1	~90

Опромінення одним імпульсом здійснено на прискорювачі електронів «ТЕМП-А» ННЦ «Харківський фізико-технічний інститут» за наступних параметрів: тиск в камері  $10^{-5}$  Тор, енергія електронів ~ 0.35 МеВ, струм пучка ~ 2 кА, тривалість опромінення -5 мкс, потужність  $10^{12}$  В/м<sup>2</sup>. Тривалість імпульсу  $\tau_{imp}$  була значно довшою ніж час електрон-фононної релаксації  $\tau_r$  ( $10^{-11}$  с). Гаусоподібний холівський пучок мав внутрішній радіус 15 мм; зовнішній радіус 23 мм. Густина енергії виділена на поверхні була не більше ніж 5 МДж/м<sup>2</sup>. Лінійні розміри пластини були більшими за характерні розміри області взаємодії. Растрову електронну мікроскопію проводили на приладі JEOL – 840. Концентрацію вакансій оцінювали на установці LEPТА Об'єднаного інституту ядерних досліджень, м. Дубна.

## ОБГОВОРЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕНЬ

Внаслідок опромінення зразка сильнострумовим електронним пучком утворився кра-

тер глибиною 0.4 мм в епіцентрі опромінення. Руйнування зразку відбулось у змішаному режимі з елементами як теплового, так і гідродинамічного режимів [6,7], що експериментально підтвердилось одночасною генерацією великої кількості рідкої фази і газоподібних продуктів. На початку обробки, після перевищення характерного порогу потужності пучка, який визначає перехід від десорбції поверхні до руйнування поверхні, абляція зразка відбувається в тепловому режимі. Продукти абляції є переважно газоподібними. Далі, при великих потоках існує певна критична густина енергії  $\varepsilon^*$ , яка залежить від форми, тривалості імпульсу, і також від теплофізичних параметрів матеріалу для обробки. Після досягнення цієї характерної величини відбувається інтенсивне плавлення мішені з вибуховим характером у гідродинамічному режимі.

Здійснено металографічні дослідження поперечного зрізу мішені (рис. 1а) та дослідження застиглої каплі розплаву на поверхні неподалік від кратеру в зоні брустверу

(рис. 1б). Зі шліфу очевидно прослідковуються три відмінні з внутрішньою структурою зони (рис. 1а). Мікрорельєф ударного зламу каплі є ямковий, з безструктурними ділянками, які чергуються. Характер структури каплі подібний до області загартування, горизонтальна (паралельно поверхні) симетрія мікроструктури менше виражена у порівнянні з вертикальною симетрією, що вказує на те, що капля сформувалась шляхом конденсації викинутого оплавленого матеріалу. Структурі каплі характерна незначна пористість, зерна є сильно розорієнтованими. Значних протяжних тріщин не зафіксовано, наявні міжкристалітні руйнування.

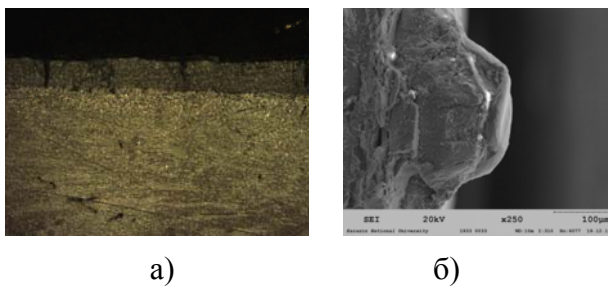


Рис. 1. а) поперечний шліф мішені б) злам застиглої каплі на поверхні опроміненого зразку

Значення поглиненої дози визначає перебіг процесів в опроміюваній мішені. Якщо величина дози є достатньою для локального розплавлення, модифікуючий вплив відбувається лише за тепловим та термопружним механізмами. Якщо ж відбувається розплавлення мішені, тоді додатково має місце гідродинамічний режим. Таким чином, в нашому випадку модифікуючий вплив пучка полягав у змішаному режимі [8], Такий особливий механізм руйнування і модифікації став основною причиною формування унікальної та складної структури опроміненого об'єму. Нами досліджена природа поперечних зламів опроміненого та неопроміненого сплаву (рис. 2).

Зона пучкового переплаву має щільно упаковану, дрібнозернисту, безпорувату мікроструктуру, яка складається з розорієнтованих зерен з лінійними розмірами 1-3 мкм. Її злам є ямковим, а механізм руйнування – квазів'язким. Товщина зони переплаву становить близько 200 мкм. Вона сформувалась

як результат високошвидкісного охолодження і зворотної конденсації ежектованого, абльованого матеріалу. Ця область має певне відшарування від основного матеріалу мішені.

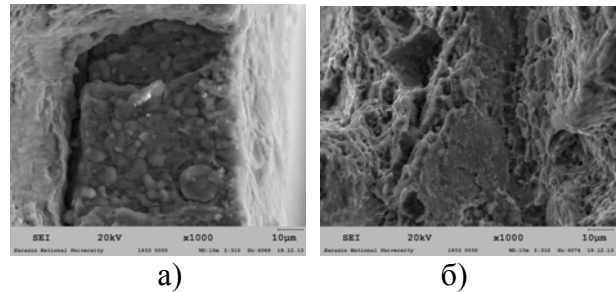


Рис. 2. Злам в зоні пучкового переплаву (а- опромінений матеріал, б – початкова структура)

Область теплового впливу з товщиною до 400 мкм утворилась завдяки впливу швидкої теплової фіксації результатів впливу ударних хвиль на розплав (рис. 3). Ця область модифікованого об'єму характеризується мікропластичним механізмом зламу та безпоруваною дрібнозернистою мікроструктурою сильно оплавлених фасеток з середнім лінійним розміром 1 мкм, без виділеної орієнтації зерен.

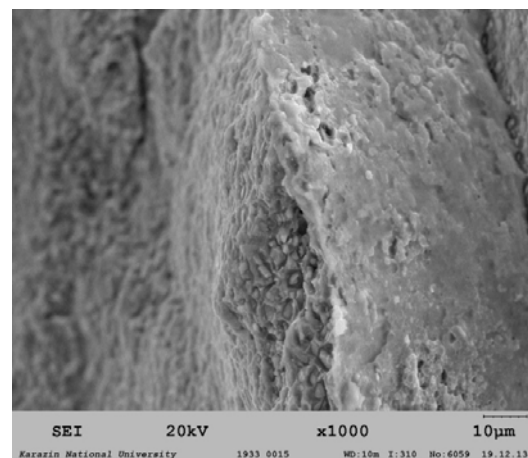


Рис. 3. Злам в зоні теплового впливу пучка

Проведені нами дослідження підтверджують спостереження зроблені в роботі [9], стосовно того, що обробка сильнострумовим пучком утворює зону радіаційного впливу, зону теплового впливу та зону ударно-хвильового впливу. Однак, ми не знайшли суттєвих відмінностей між неопроміненою зоною та зоною ударно-хвильової дії.

В нашому випадку модифікований об'єм складається з зон пучкового переплаву, теплової дії і ударно-хвильової дії, які відрізняються одна від одної своїми мікроструктурою, хімічним складом, механізмом зламу, концентрацією та типом дефектів.

У зоні теплової та ударно-хвильової дії помітні впорядковані шари паралельно поверхні з товщиною 5-30 мкм. Для немодифікованої частини мішені характерна добре організована структура фасеток квазісколу з лінійним розміром фасеток в інтервалі 0.6-1.5 мкм. У мікроструктурі необробленого сплаву помітні ямки, відстань між якими 5-10 мкм, розмір ямок ~ 2-3 мкм, а також гребні відриву з характерною відстанню один від одного ~ 10 мкм.

Зазначена зміна мікроструктури сплаву 1933 свідчить про те, що СРЕП-обробка забезпечує суттєве підвищення мікрров'язких властивостей сплаву 1933.

Разом з тим, є актуальним дослідження ефектів від впливу ударно-акустичних хвиль, що виникають в опромінюваних мішенях в понадпробігових областях. Для цього були проведені дослідження за допомогою позитронно-анігіляційної спектроскопії (ПАС) на комплексі ЛЕРТА (Об'єднаного інституту ядерних досліджень, м. Дубна) [10]. ПАС метод є чутливим до наявності дефектів в матеріалах. Його добре поставлене вимірювання дозволяє детектувати недосконалість кристалічної ґратки розміром з константу ґратки, зокрема, він застосовувався для вивчення дефектів, що утворювались внаслідок опромінення сплавів потоками іонів [7].

Дослідження кутових кореляцій анігіляційних квантів, змін енергій та часу життя є основою трьох технік ПАС [5]. У нашій роботі, ми досліджували лише доплерівське розширення анігіляційних ліній.

Техніка доплерівського розширення анігіляційних ліній використовується для детектування концентрацій таких дефектів як вакансії та їх накопичень. Сигнал від анігіляції захопленого позитрону, що зумовлює розширення 511 кеВ лінії, відносно більший ніж сигнал, що відповідає анігіляції з електронами ядер. Іншими словами, чим більше дефек-

ктів зразку, тим менше розширення 511 кеВ лінії.

Практично, інформація про концентрацію дефектів отримується з аналізу форми анігіляційної лінії, шляхом розрахунку двох важливих параметрів, що називаються відповідно  $s$  і  $w$ . Параметр  $s$  визначає пропорцію анігіляцій позитронів з низькими імпульсами Це тісно зв'язано з концентрацією дефектів в матеріалі. Він визначається як відношення площі поверхні центральної частини 511 кеВ лінії до всієї площі під кривою.

Ефект впливу потоків випромінювання на концентрацію дефектів можна спостерігати за зміною  $s$ -параметру (рис.4).

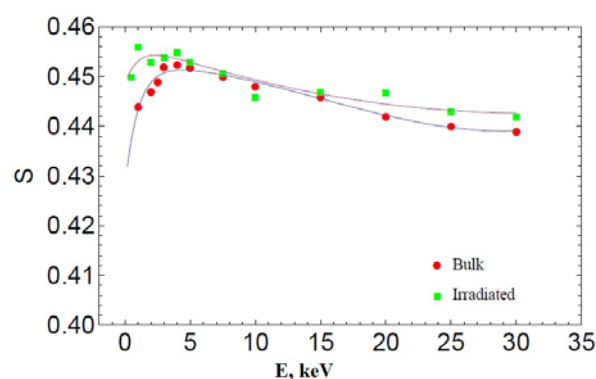


Рис. 4. Залежність  $s$ -параметру доплерівського розширення від енергії позитрону  $E$  для опроміненого та неопроміненого сплаву 1933

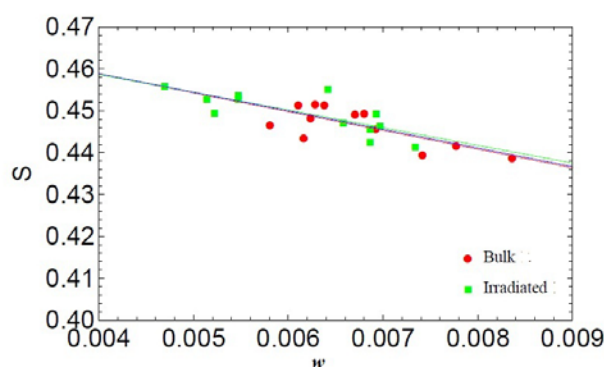


Рис. 5. Залежність  $s$ -параметру від  $w$ -параметру доплерівського розширення для опроміненого та неопроміненого) сплаву 1933

Енергія позитронів відповідає глибині зачуження пучка в тильну частину мішені, при значенні енергії в 10 кеВ глибина становить приблизно 400 нм. На поверхні більше значення  $s$ -параметру пов'язано з дефектами, що були внесені механічної обробкою. На більших глибинах спостерігаємо відмінність

між опроміненим та неопроміненим зразками. Така відмінність може бути пояснена лише ефектом ударно-акустичного впливу СРЕП, оскільки зона термічного впливу обмежена приблизно 600 мкм з протилежного боку мішені. Ці результати корелюються з даними роботи [8], одержаними на аналогічному зразку. Вплив на тильну сторону мішені електронно-пучкового опромінення також в незначній мірі, але проявився на залежності s-параметру від w-параметру (рис. 5).

Ефекти далекодії, що спостерігаються в матеріалах, опромінених, сильнострумовими електронними пучками, такі як, пульсуючий характер зміни значення мікротвердості по глибині мішені пояснюються виникненням уданих хвиль, як результату суперпозиції первинного поля стискаючих напружень з біполярною хвилею напружень, відбитою від тильної сторони [11]. В нашому випадку ми спостерігаємо ознаки впливу пучка на відстані, що майже на порядок перевищує глибину проникнення електронного пучка.

## ВИСНОВКИ

Опромінення конструкційних алюмінієвих сплавів сильнострумовими релятивістськими електронними пучками складається з зони проникнення пучка, яка піддається переплавленню, з зони термічного впливу, де здійснюють вплив на структуру сплаву термопружні ефекти, а також зони ударно-акустичного впливу. Остання зона не має очевидних відмінностей з неопроміненим зразком за структурою, але є відмінною за концентрацією вакансій, що ідентифікується методом позитронно-анігіляційної спектроскопії.

Робота виконана за підтримки гранту Президії НАН України № 62/18-Н.

## ЛІТЕРАТУРА

1. Fridlyander I. N. / Aluminum Alloys // Kiev: Komintech. – 2005. – 365 p.
2. Poida V. P., Pedun D. E., Bryukhovetskii V. V., Poida A. V., Sukhov R. V., Samsonik A. L., Litvinenko V. V. / Structural changes during superplastic deformation of high-strength alloy 1933 of the Al-Mg-Zn-Cu-Zr system// Phys Met Metallogr. – 2013. Vol. – 114(9). P. – 848-858.

3. Бойко В. И., Скворцов В. А., Фортов В. Е., Шаманин И. В.. Взаимодействие импульсных пучков заряженных частиц с веществом. М.: ФИЗМАТЛИТ. 2003, 288 с.
4. Блейхер Г. А., Кривококов В. П., Пашенко О. В. Теплофизические процессы в твердом теле при воздействии мощных импульсных пучков заряженных частиц // Известия Томского политехнического университета. – Т. 303, вып. 2. – Радиационная физика твердого тела и радиационные технологии. – 2000. – С. 71-91.
5. Графутин В. И., Прокопьев Е. П. Применение позитронной аннигиляционной спектроскопии для изучения строения вещества. Успехи физических наук. – 2002. – Т. 172. – С. 67-83.
6. Anisimov S. I., Imas Ya. A., Romanov G. S. and Khodyko Yu.V. / Action of high-power radiation on metals // Springfield. – VA: National Technical Information Service. – 1971, 272 p.
7. Boiko V. I., Valyaev A. N., Pogrebnyak A. D. / Metal modification by high-power pulsed particle beams // PHYS-USP. – 1999. – Vol. 42(11). – P. 1139-1166.
8. Kobets A. G., Horodek P. R., Lonin Yu. F., Lytvynenko V. V., Ponomarev A. G., Startsev O. A., Uvarov V. T. / Melting effect on high current electron beam on aluminum alloy 1933 // Surface Engineering and Applied Electrochemistry. – 2015. – Vol. 51, No. 5. – P. 478-482.
9. Козырь И. Г., Бородин Р. В., Воропаев А. В. и др. Структура и свойства инструментальной стали после обработки электронным пучком и термического отпуска // Физика и химия обработки материалов. – 1998, № 3. – С. 30-33.
10. Horodek P., Kobets A., Meshkov I., Pavlov V., Rudakov A., Sidorin A., Yakovenko S. / Positron annihilation spectroscopy at LEPTA facility// Proceedings of RUPAC. – 2012. – WEPPC044.
11. Ротштейн В. П. Модификация структуры и свойств металлических материалов интенсивными импульсными электронными пучками. Автореф. дисс. докт. ф.-м. н.: 01.04.07.- Томск. – 1995. – 37 с.

## REFERENCES

1. Fridlyander I. N. / Aluminum Alloys // Kiev: Komintech. – 2005. – 365 p.
2. Poida V. P., Pedun D. E., Bryukhovetskii V. V., Poida A. V., Sukhov R. V., Samsonik A. L., Litvinenko V. V. / Structural changes during superplastic deformation of high-strength alloy 1933 of the Al-Mg-Zn-Cu-Zr system// Phys Met Metallogr. – 2013. Vol. – 114(9). P. – 848-858.

3. Boyko V. I., Skvortsov V. A., Fortov V. E., Shamanin I. V.. Vzaimodeystvie impulsnyh puchkov zaryazhennyh chastits s veschestvom. M.: FIZMATLIT. 2003, 288 s.
4. Bleyher G. A., Krivobokov V. P., Paschenko O. V. Teplofizicheskie protsessy v tverdom tele pri vozdeystvii moschnykh impulsnyh puchkov zaryazhennyh chastits // Izvestiya Tomskogo politehnicheskogo universiteta. – Vol. 303, iss. 2. – Radiatsionnaya fizika tverdogo tela i radiatsionnyie tehnologii. – 2000. – P. 71-91.
5. Grafutin V. I., Prokopev E. P. Primenenie pozitronnoy annigilyatsionnoy spektroskopii dlya izucheniya stroeniya veschestva. Uspehi fizicheskikh nauk. – 2002. – T. 172. – S. 67-83.
6. Anisimov S. I., Imas Ya. A., Romanov G. S. and Khodyko Yu.V. / Action of high-power radiation on metals // Springfield. – VA: National Technical Information Service. – 1971, 272 p.
7. Boiko V. I., Valyaev A. N., Pogrebnyak A. D. / Metal modification by high-power pulsed particle beams // PHYS-USP. – 1999. – Vol. 42(11). – P. 1139-1166.
8. Kobets A. G., Horodek P. R., Lonin Yu. F., Lytvynenko V. V., Ponomarev A. G., Startsev O. A., Uvarov V. T. / Melting effect on high current electron beam on aluminum alloy 1933 // Surface Engineering and Applied Electrochemistry. – 2015. – Vol. 51, No. 5. – P. 478-482.
9. Kozyr I. G., Borodin R. V., Voropaev A. V. et al. Struktura i svoystva instrumentalnoy stali posle obrabotki elektronnyim puchkom i termicheskogo otpuska // Fizika i himiya obrabotki materialov. – 1998, No. 3. – P. 30-33.
10. Horodek P., Kobets A., Meshkov I., Pavlov V., Rudakov A., Sidorin A., Yakovenko S. / Positron annihilation spectroscopy at LEPTA facility // Proceedings of RUPAC. – 2012. – WEPPC044.
11. Rotshteyn V. P. Modifikatsiya struktury i svoystv metallicheskih materialov intensivnymi impulsnymi elektronnyimi puchkami. Avtoref. diss. dokt. f.-m. n.: 01.04.07. – Tomsk. – 1995. – 37 s.