

НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ  
**ІНСТИТУТ ЕЛЕКТРОФІЗИКИ І РАДІАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ**

**Старцев Олександр Анатолійович**



УДК 621.9.048.7

**ДИНАМІКА СТРУКТУРНО-ФАЗОВИХ ПЕРЕТВОРЕНЬ В  
СПЛАВАХ НА ОСНОВІ ТИТАНУ VT1-0, ЦИРКОНІЮ Zr1%Nb і  
АЛЮМІНІЮ 1933 ПІД ВПЛИВОМ СИЛЬНОСТРУМОВИХ  
РЕЛЯТИВІСТСЬКИХ ЕЛЕКТРОННИХ ПУЧКІВ**

01.04.07 – фізика твердого тіла

**АВТОРЕФЕРАТ**

дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата фізико-математичних наук

**Харків – 2017**

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Інституті електрофізики і радіаційних технологій НАН України,  
м. Харків

**Науковий керівник** доктор технічних наук, старший науковий співробітник  
**Литвиненко Володимир Вікторович,**  
Інститут електрофізики і радіаційних технологій НАН України,  
заступник директора з наукової роботи

**Офіційні опоненти:** доктор фізико-математичних наук, професор  
**Рохманов Микола Якович,**  
Харківський національний аграрний університет  
імені В.В. Докучаєва МОН України,  
завідувач кафедри фізики і вищої математики

кандидат фізико-математичних наук

**Турбін Петро Васильович,**  
Науковий фізико-технологічний центр МОН і НАН України,  
заступник директора з наукової роботи

Захист відбудеться «26» грудня 2017 р. о 14<sup>00</sup> годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.245.01 в Інституті електрофізики і радіаційних технологій НАН України за адресою: 61003, м. Харків, пров. Подільський, 2, корпус У-3, НТУ «ХП», ауд. 204.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Інституту електрофізики і радіаційних технологій НАН України за адресою: 61024, м. Харків, вул. Гуданова, 13 і за посиланням:

<http://www.iert.kharkov.ua/ru/Acamedic%20Council.html>.

**Відгук на автореферат дисертації надсилати на адресу: 61002, м. Харків, вул. Чернишевська, 28, а/с 8812.**

Автореферат розісланий «23» листопада 2017 р.

Учений секретар  
спеціалізованої вченої ради Д 64.245.01



Пойда А.В.

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність дослідження.** Взаємодія сильноточкових релятивістських електронних пучків (СРЕП) з металами і сплавами протягом багатьох років становить інтерес як для фундаментальної, так і прикладної науки. Особливістю взаємодії таких пучків з твердими тілами є паритетна комплексність впливу радіаційних, температурних та акустичних чинників. Разом з тим, СРЕП є унікальним інструментом, який забезпечує інжекцію енергії в об'єм опромінюваної мішені протягом дії імпульсу, таким чином, що максимальне енерговиділення розташовується в підповерхневій області. Імпульсний характер процесів, за умов виділення потужності на поверхні близько  $10^{10}$  -  $10^{12}$  Вт/м<sup>2</sup> зумовлює розплавлення поверхні мішені, викид розплавленої речовини (абляції), наступну їх конденсацію, інтенсивний теплообмін та низку термо- і радіаційно-акустичних процесів. Така виражена нерівноважність умов протікання відкриває перспективи для розвитку прикладних напрямків, таких як нанесення покриттів, модифікація властивостей матеріалу опроміненої мішені, імітування дії екстремальних чинників на конструкційні матеріали. Це, в свою чергу, ставить задачу розробки адекватних фізичних моделей, що здатні кількісно описувати низку процесів, що відбуваються внаслідок дії СРЕП. Незважаючи на наявність моделей, що описують механізми радіаційно-стимульованих перетворень в умовах імпульсного сильноточкового впливу, залишається актуальною задача їх адаптації до заданого інтервалу енергій частинок, струму пучка, часових параметрів імпульсу а також верифікації шляхом аналізу одержуваних експериментальних даних. Істотним чинником є також унікальність обладнання, здатного генерувати імпульси електронних пучків. Більш широкого прикладного застосування набули сильноточкові електронні пучки з енергіями 20-50 кеВ, є дані стосовно використання пучків з енергіями 100-150 кеВ. Збільшення ж енергії до значень 350-400 кеВ дає можливість більш виразно проявитись згаданому ефекту максимального підповерхневого енерговиділення, і відповідно, проявитись терморадіаційному, термопружному та абляційному ефектам, що, в свою чергу збільшує глибину, на якій відбуваються перетворення в мішені.

Отже вирішення названого комплексу задач дасть змогу зробити внесок в поглиблення розуміння механізмів, які зумовлюють структурно-фазові перетворення в опромінюваних мішенях.

### **Зв'язок роботи з науковими програмами планами темами.**

Дослідження, які склали зміст дисертаційної роботи були виконані в Інституті електрофізики і радіаційних технологій НАН України в рамках таких держбюджетних науково-дослідницьких тем: «Дослідження процесів розсіяння за участю електронів, важких іонів та легких ядер середніх енергій в умовах прояву складних рефракційних ефектів і аномального розсіяння назад; розробка фундаментальних основ радіаційних нанотехнологій» (2013-2017), № держреєстрації 0113U001143; «Критичні явища в сильновзаємодіючих анізотропних системах» (2012-2013), № держреєстрації 0112U007382; «Моделювання поведінки цирконієвих сплавів під дією потоків випромінювань» (2015-2016) № держреєстрації 0115U005231; «Дослідження критичних явищ в ядерних системах і матеріалах на установках ОІЯД (LEPТА, NICA, ИЦ-100, ИБР-2М) і ЦЕРН (Експеримент ATLAS)» (2014-2015), № держреєстрації 0114U004168. В усіх науково-дослідних роботах здобувач брав участь як виконавець.

**Мета та задачі дослідження.** Мета дисертаційної роботи – побудова фізичних моделей, здатних описувати комплекс механізмів радіаційних процесів, які

відбуваються в металах різних значень густини та теплофізичних властивостей при дії на них сильнострумowego релятивістського електронного пучка.

*Для виконання поставленої мети необхідно було виконати низку експериментальних та теоретико-розрахункових робіт.*

1. Обґрунтувати вибір матеріалів мішеней, які б задовольняли умовам відмінних значень густини та теплофізичних властивостей, що дає можливість реалізувати різні глибини проникнення випромінювання та визначити внесок температурних, акустичних та радіаційних механізмів, і при цьому мали конструктивне значення. Провести експерименти з опромінення мішеней.

2. Провести металографічні та електронно-мікроскопічні дослідження опромінених мішеней. Дослідити їх механічні властивості. Вивчити прояв ефекту опромінення в понадпробігових областях мішеней.

3. Розробити модель абляційної фази руйнування опромінюваної мішені, в якій виокремлені механізми викиду та здійснено їх узгодження з характером структурних перетворень в мішені.

4. Розробити модель, що описує розподіл полів напружень, зумовлених термопружним ефектом, внаслідок об'ємного виділення в мішені енергії імпульсу електронного пучка та застосувати її щодо процесу нанесення міді на алюмінієву підкладку.

5. Розробити чисельно-розрахункову фізичну модель, яка здатна кількісно оцінювати характер структури опромінених мішеней по значенню фрактальної розмірності РЕМ зображень поверхонь зламів.

*Об'єкт досліджень* – процеси взаємодії сильнострумowych релятивістських електронних пучків з титановим сплавом VT1-0, алюмінієвим сплавом 1933, цирконієвим сплавом Zr1%Nb.

*Предмет досліджень* – моделі, що описують механізми радіаційно-стимульованих перетворень в опромінюваних мішенях, структура та механічні властивості мішеней після опромінення.

**Методи дослідження:** опромінення сильнострумowym електронним релятивістським пучком електронів на прискорювачі ТЕМП – ННЦ «ХФТІ» НАН України з енергією частинок 350 - 400 кеВ, струмом пучка 2 кА, тривалістю імпульсу 5 мкс; дослідження опромінених мішеней на растровому електронному мікроскопі JEOL JSM 840; металографічні дослідження; мікро та наноіндентування; позитронно-електронна анігіляційна спектроскопія, комп'ютерне моделювання.

### **Наукова новизна здобутих результатів.**

1. Розроблена фізична модель еволюції радіаційних перетворень в металевій мішені, що опромінюється сильнострумowym пучком релятивістських електронів. Описана часова динаміка впливу термопружного ефекту на опромінювану речовину. Підтверджена узгодженість моделі з експериментально встановленими перетвореннями внутрішнього структурно-фазового стану зразка зі сплаву VT1-0. Суттєвим для створення нових матеріалів за допомогою концентрованих потоків енергії є умова виникнення перегрітої рідини, що є причиною вибухового фазового переходу, та забезпечення охолодження, достатнього для фіксації метастабільних та аморфних фаз для досягнення необхідних механіко-технічних показників.

2. Встановлено, що при опроміненні цирконієвого сплаву Zr1%Nb СРЕП з енергією частинок 350 кеВ та густиною потоку не більше 40 Дж/см<sup>2</sup> приводить до збільшення мікротвердості і модуля пружності зразка на 17%, тоді як збільшення густини потоку до 200 Дж/см<sup>2</sup>, спричиняє зменшення цих значень на 12% порівняно з неопроміненою поверхнею. Це зумовлено ростом зерен, генерацією тріщин внаслідок релаксації залишкових напружень і окислення поверхні.

3. Вперше розроблені фізичні моделі часової динаміки абляції та термопружного ефекту в опромінюваних сплавах застосовані для нового процесу нанесення алюмінію на мідну підкладку. Цей процес полягає в одночасному, протягом дії одного імпульсу, впливові пучка як на матеріал, що наноситься, так і на матеріал підкладки. Встановлено, що вплив пучка на підкладку виконує функцію активації поверхні та забезпечує більш високу якість адгезії покриття. Текстура покриття визначається напрямком гідродинамічного переносу матеріалу, що видаляється в режимі абляції з наступною конденсацією на підкладці.

4. Встановлено, що опромінення промислового алюмінієвого сплаву 1933 сильнострумовим релятивістським електронним пучком мікросекундної тривалості спричинило зміну зернової структури в області переплаву та зоні термічного впливу, також встановлено ефект перерозподілу легуючих елементів Mg, Zn, Cu в бік приповерхневої зони. Встановлено ефект зміни концентрації дефектів в понадпробіговій зоні мішені.

5. Застосовано метод визначення фрактальної розмірності до зламів опромінених мішеней з титанового сплаву VT1-0 та алюмінієвого сплаву 1933. Встановлено, що зони з відмінностями в структурній будові, які утворюються внаслідок впливу електронного пучка, мають відмінні значення фрактальної розмірності, що є кількісним інструментом оцінки ефективності модифікуючої дії пучка.

**Практичне значення роботи.** Розроблені методика та програмний пакет, які дають можливість розраховувати фрактальну розмірність поверхонь досліджуваних об'єктів та давати кількісну оцінку зміни розміру та орієнтації зернової структури. Запропоновано спосіб нанесення алюмінію на мідь, що дає можливість одержувати біметалевий матеріал для формування електричних контактів. Одержані результати дають змогу удосконалити тестові радіаційні впливи на конструкційні матеріали енергетичних установок наступних поколінь. Серед цих напрямів важливе місце посідають реалізація керованого термоядерного синтезу та створення реакторів на швидких нейтронах. Успішна реалізація цих проектів залежить, як від вирішення задач фізики плазми та ядерної фізики, так і задач фізики твердого тіла. Останні полягають в необхідності вивчення процесів, які відбуваються в твердих тілах під впливом екстремальних чинників (інтенсивні потоки заряджених частинок, високі температури, високі тиски, корозійно-активні середовища та ін.) та напрацюванні рекомендацій стосовно можливості покращення властивостей ядерних конструкційних матеріалів.

**Особистий внесок здобувача.** Здобувач особисто розробив фізичну модель абляції твердотільних мішеней, виготовлених із досліджуваних сплавів, для умов опромінення сильнострумовим релятивістським електронним пучком прискорювача ННЦ «Харківський фізико-технічний інститут» НАН України. Розробив фізичну модель для розрахунку термопружного ефекту в опромінюваних мішенях та модель динаміки теплового поля і розподілу поглиненої дози під дією мікросекундних імпульсів СРЕП. Всі названі моделі лягли в основу методу чисельного розрахунку, програмний пакет для якого написаний здобувачем особисто. Здобувач також брав участь в експериментах з опромінення мішеней в складі групи дослідників та проводив металографічні, електронно-мікроскопічні та механічні дослідження. Автор брав участь у оформленні результатів досліджень у вигляді статей та тез доповідей.

**Апробація результатів дисертації.** Матеріали дисертаційної роботи пройшли апробацію на таких конференціях та семінарах: Студентська наукова конференція з прикладної фізики "5 хатки-11", Харків, 2011; Студентська наукова конференція з

прикладної фізики "5 хатки-12", Харків, 2012; Міжнародна конференція студентів та молодих науковців з теоретичної та експериментальної фізики «Еврика», Львів, 2012; I Міжнародна науково-технічна конференція «Сучасні проблеми фізики, хімії та біології «ФізХімБіо», м. Севастополь, 2012; XII Международная научно-техническая уральская школа-семинар металлургов - молодых ученых, Екатеринбург, 2012; Международная конференция «Многомасштабное моделирование структур, строение вещества, наноматериалы и нанотехнологии», г. Тула, 2013; International Conference Nanomaterials: application and properties. Lviv, 2014; XIII конференція по физике высоких энергий, ядерной физике и ускорителям, Харьков, 2015; International research & practice conference «Nanotechnology&Nanomaterials» (Nano2015), Lviv, 2015; XIII Международная конференция «Плазменная электроника и новые методы ускорения» Харьков, 2015.

**Публікації.** Основні результати дисертаційної роботи опубліковано в 15 наукових працях. З них: 6 статей у наукових фахових виданнях, 5 з яких входять до міжнародної бази Scopus; 9 тез та матеріалів фахових конференцій і семінарів.

**Структура і зміст роботи.** Дисертація складається із анотації, вступу, п'яти розділів, висновків та списку використаних джерел. Роботу викладено на 139 сторінках, вона містить 42 рисунки і 8 таблиць.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовано актуальність наукової задачі, яка вирішується в роботі, вказано зв'язок з науковими планами, програмами та темами організації місця виконання роботи, викладено мету та задачі дослідження, визначено об'єкт та предмет дослідження, методи дослідження, сформульовані новизна та практичне значення роботи, вказані відомості щодо апробації роботи, зазначено особистий внесок здобувача, описана структура та обсяг дисертації.

В першому розділі «**Аналіз фізичних процесів взаємодії сильнострумів релятивістських пучків електронів з металами**» наведено огляд фізичних моделей, які описують ефекти масопереносу в опромінюваних мішенях.

Зокрема приділяється увага динаміці фазового переходу тверде тіло-рідина пара під опроміненням СРЕП. Проводиться порівняння існуючих підходів з раніше одержаними експериментальними результатами з дослідження газоплазмового факелу, який утворюється при опроміненні металів та сплавів. Оскільки дані експерименти проводились на прискорювачі, який використовувався в цій роботі, по динаміці розвитку газоплазмового факелу можна було зробити висновок щодо кінетики абляційного викиду речовини, а також особливостей просторового розподілу потоку речовини, що випаровувалась. Це дало підстави сформулювати коректний тип моделі абляції, який враховує зміну теплофізичних характеристик в процесі поглинання енергії імпульсу випромінювання, активаційне збудження фононної системи ударно-акустичним імпульсом, гідродинамічні процеси. Обґрунтовується необхідність урахування змішаного теплового та гідродинамічного механізмів абляції. Проведено порівняння перебігу абляції, зумовленої дією різних за фізичною природою концентрованих потоків енергії. Виконано літературний огляд щодо структурно-фазових перетворень в твердих тілах, опромінюваних інтенсивними електронними пучками. Проаналізовано особливості структурно-фазових перетворень в сплавах, опромінених сильнострумівими імпульсними пучками електронів різними потоками енергій на прискорювачі ТЕМП-А, на якому проводяться експерименти для досліджень механізмів формування радіаційних дефектів. Здійснено аналіз моделей, які описують термопружний ефект в

опромінюваних середовищах, як один з основних механізмів формування радіаційно-стимульованого ефекту. Узагальнено літературні дані щодо встановлення фрактального характеру ділянок руйнування твердих тіл під дією електронних пучків. Обґрунтовано постановку задачі дисертаційної роботи.

В другому розділі «**Методологія проведення експериментів та обчислень**» наведено опис устаткування, методів дослідження та обчислювальних процедур. Опромінювання зразків проводилось на сильнострумовому прискорювачі електронів ТЕМП-А (ННЦ «Харківський фізико-технічний інститут» НАН України), енергія електронів становила 350 кеВ, струм пучка 2 кА, тривалість фронту імпульсу  $\tau \sim 5$  мкс. Джерелом живлення прискорювача є генератор імпульсів напруг за схемою Аркадьєва-Маркса. Опромінення мішеней пучком холівської або суцільної форми було здійснено протягом одного імпульсу, у вакуумній камері прискорювача при тиску  $10^{-4} \dots 10^{-5}$  Тор. Попередній візуальний і морфологічний аналіз опроміненого зразку здійснювався за допомогою оптичного мікроскопу Bresser BioLux NV. Злами опромінених мішеней досліджували за допомогою методу растрової електронної мікроскопії (растровий електронний мікроскоп JEOL JSM-840), металографічні дослідження проводили на мікроскоп МІМ-7, мікротвердість визначали на мікротвердомірі ПМТ-3. Злами проведено при кімнатній температурі. Аналіз густини дислокацій проводили методом позитронно-електронної анігіляційної спектроскопії на установці Об'єднаного інституту ядерних досліджень LEPTA (Low Energy Particle Toroidal Accumulator) з криогенним джерелом позитронів на базі радіоактивного ізотопу  $^{22}\text{Na}$ .

Описано особливості методів побудови комп'ютерних моделей для проведення розрахунків фізичних процесів в опромінюваних об'єктах. Виконано порівняльний аналіз застосування чисельних методів і можливостей комплексної симуляції фізичних процесів руйнування металів інтенсивними поверхневими і об'ємними джерелами. Проаналізовано застосування традиційної чисельної парадигми моделювання теплової задачі взаємодії СРЕП з металами, з використанням методу скінченних різниць. Показано важливість використання різницевого методу згладжування коефіцієнтів скрізного рахунку без явного виділення границь фаз для відслідковування фазових переходів. Обґрунтовано переваги застосування методу варіаційного аналізу як основного, з елементами методів скінченних елементів і скінченних різниць на адаптивних часово-просторових сітках для поставлених задач абляції.

Проаналізовано застосування методів оцінки фрактальної розмірності щодо поверхонь матеріалів, оброблених інтенсивними потоками випромінювань та їх кореляції з їх фізичними характеристиками.

Програмний код тестових моделей реалізований на Free Pascal в програмному середовищі open source Lazarus 2.60, а також у програмному пакеті FreeFEM.

В третьому розділі «**Динаміка фазових перетворень у сплаві ВТ1-0, опроміненому релятивістським пучком електронів**» вивчено особливості механізмів впливу СРЕП на титановий сплав ВТ1-0 і сформульовано загальні підходи його описання для однорідних металів та сплавів.

Наведено розвинення фізичної моделі інтенсивної абляції, яка здатна враховувати процеси зумовлені абляцією мішені за динамікою тепловиділення та генерації механічних напружень.

Щоб оцінити індуковане температурне поле і поле механічних напружень в об'ємі твердого тіла, зумовлених абляцією під дією СРЕП, було розв'язано необхідну термо-механічну задачу у рамках термоеластичності для однорідного тіла, що було верифіковано використовуючи експериментальні дані. По-перше, було

знехтувано можливими флуктуаціями струму пучка через його переріз. Для спрощення розрахунків, розглядаємо задачу у двовимірній координатній площині зразка  $\{x,y\}$  (Рис.1), де вісь  $x$  означає глибину зразка і вісь  $y$  означає ширину, чи вироджений просторовий розподіл електронного пучка по поверхні опромінення. Модельний зразок є однорідною пластиною  $\{0..H_x \times 0..H_y\}$  в  $\Omega \in R^2$ , де ширина зразка є більшою за його товщину  $H_y > H_x$ . Пластина опромінюється електронним пучком перпендикулярно до її поверхні  $\Gamma_1$ .

Класичне рівняння Фур'є поширення тепла в твердому тілі має нефізичну властивість поширення теплових хвиль у середовищі з довільною швидкістю. Таким чином, з огляду на високі швидкості нагрівання а також значення тиску, вважається необхідним введення в розгляд релаксаційного теплового рівняння значення часу  $\tau_r$ , зумовленого скінченністю швидкості поширення температурного поля в металі (1):

$$\bar{q}(\bar{r}, t + \tau_r) = -k\nabla T(\bar{r}, t + \tau_r), \quad (1)$$

де  $k$  є коефіцієнтом теплопровідності. Тривалість імпульсу опромінення є значно більшим за час електрон-фононої релаксації  $\tau_p \gg \tau_r$  ( $\tau_r \leq 10^{-12}$  s). В моделі також прийнято, що встановлена рівновага між електронною й іонною підсистемами. Далі, застосовано закон Максвелла-Катанео (2), як варіація класичного рівняння Фур'є при  $\tau_r > 0$ :

$$\bar{q}(\bar{r}, t + \tau_r) = -k\nabla T(\bar{r}, t) - \tau_r \frac{\partial \bar{q}}{\partial t} - k\tau_r \nabla_r \frac{\partial T}{\partial t}, \quad (2)$$

Для закону збереження (3), вводимо функцію потужності теплового джерела  $Q$ . Рівняння для температурного поля визначається гіперболічним диференціальним (4):

$$\frac{\partial T(\bar{r}, t)}{\partial t} = -\frac{\nabla \cdot \bar{q}}{\rho c} + \frac{Q}{\rho c}, \quad (3)$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \tau_r \frac{\partial^2 T}{\partial t^2} = \frac{1}{\rho c} \left\{ \nabla \cdot (k\nabla T) + \tau_r \nabla \cdot \left( k\nabla \frac{\partial T}{\partial t} \right) + Q + \tau_r \frac{\partial Q}{\partial t} \right\}, \quad (4)$$

де  $c$  – теплоємність,  $\rho$  – густина.

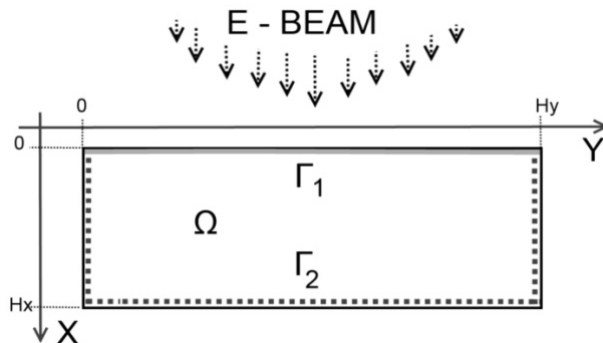


Рис.1. Двовимірна схематична ілюстрація геометрії простору задачі абляції.

Спочатку, зразок знаходиться при початковій температурі  $T_0$ . Граничні умови для температурного поля базуються на припущенні, що температура на зворотній



неопромінюваній поверхні зразка  $\Gamma_2$  є постійною (5), а  $\Gamma_1$  є опромінюваною поверхнею у вакуумі (6):

$$T(\bar{r}, 0)|_{\Gamma_2} = T_0; \quad (5)$$

$$k \frac{\partial T(\bar{r}, t)}{\partial t} \Big|_{\Gamma_1} + m^2 \sigma_R \varepsilon_R (T^4 - T_0^4) = Q_e(\bar{r}, t)|_{\Gamma_1}, \quad (6)$$

де  $\varepsilon_R$  є інтегральною випромінюваністю,  $\sigma_R$  – стала Стефана, і  $m$  – показник рефракції.  $Q_e$  є поверхневою густиною теплового потоку абсорбованого мішенню. Механічні напруження, які генеруються в полі енерговиділення, є високими, і вони повинні бути враховані, особливо для епіцентру опромінення. Таким чином, щоб оцінити індуковані теплові деформації в однорідному ізотропному тілі, вводимо класичну систему рівнянь пружності з об'ємною силою  $f$  спричиненою тепловим розширенням (7):

$$\begin{cases} \nabla \cdot \sigma_{ij}(u, T) + f_i = 0 \\ f_i = \nabla \cdot ((3\lambda + 2\mu)\alpha_T (T - T_0)\delta_{ij}) \\ \nabla \cdot \sigma_{ij}(u, T) = 2\mu\varepsilon_{ij} + \delta_{ij}\lambda\varepsilon_{ii} \\ \varepsilon_{ij}(u) = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \end{cases} \quad (7)$$

де  $\sigma$  є тензором механічних напружень,  $\varepsilon$  – тензор деформацій у наближенні малих величин,  $\bar{u}$  є вектором зміщень,  $\lambda$ ,  $\mu$  – ізотемпературні коефіцієнти Ламе,  $\alpha_T$  – лінійний коефіцієнт теплового розширення, і символ Кронекера  $\delta_{ij}$ . Вище приведені рівняння мають бути розв'язані з врахуванням граничних умов (8, 9), де  $g$  є поверхневою силою на одиницю поверхні  $dS$ , спричиненою газо-плазмовим факелом,  $\bar{n}$  є вектором нормальним до поверхні  $dS$ ,  $\eta_{eff}$  – відношення теплоємностей твердого тіла і генерованого газо-плазмового середовища.  $\omega_{loc}$  визначає локальну об'ємну густину абсорбції енергії твердим тілом. Враховуємо, що зразок міцно закріплений на колекторі прискорювача електронів, тому можемо знехтувати зміщеннями на поверхні  $\Gamma_2$ .

$$\sigma_{ij} n_i \Big|_{\Gamma_1} = g_i = -n_i \omega_{loc} (\eta_{eff} - 1), \quad (8)$$

$$u \Big|_{\Gamma_2} = 0. \quad (9)$$

Функцію потужності теплового радіаційно-стимульованого джерела  $Q$  представлено в (10) як суму енергії виділеної електронним пучком у мішені  $Q_e$ , а також кореляційного доданку  $Q_\sigma$ , який враховує внесок впливу деформації на розподіл температури.  $Q_e$  визначено через густину струму  $j$  на повну опромінену поверхню  $S_{irr}$ , лінійну втрату енергії електронів  $\frac{\partial E}{\partial x}$ . Лінійну втрату енергії

електронів розраховано напівемпіричним методом Ганна, що спрощує класичний розрахунок за загальновідомою формулою Реліха-Карлсона. При електронно-пучковій абляції характерна глибина поглинання енергії носить чіткий об'ємний характер, і максимум енерговиділення знаходиться на третині лінійної глибини

проникнення пучка, а її врахування значно змінює природу руйнування матеріалу ніж у випадку інтенсивних лазерних чи іонних потоків. Саме ця «об'ємність» зумовлює швидкий нагрів і розплавлення не тільки на поверхні, але і в глибині матеріалу, що цілком змінює характер абляції. У даній задачі, електронний пучок описано гаусовою функцією густини струму  $j$  рівнянням, де  $J$  є інтегральним струмом падаючого пучка,  $d_i$  – просторовими і часовими стандартними дивіаціями розподілів, та  $\xi, i$  – позиціями піків струму за часом та простором.

$$\left\{ \begin{array}{l} Q = Q_e + Q_\sigma \\ Q_e(\bar{r}, t) = j(\bar{r}, t) \frac{\partial E}{\partial x} + q_{cond} \\ j(\bar{r}, t) = \frac{J}{S_{irr}} \prod_{i=y,t} \frac{1}{\sqrt{2\pi d_i^2}} e^{-\frac{(\xi - \xi_i)^2}{2d_i^2}} \\ q_{cond} \approx \theta m_{abl} (c \delta T + \sum_h L_h) \\ m_{abl} \approx \int \rho dV \Big|_{T > T_{melt}, (*)} \end{array} \right. , \quad (10)$$

де  $m_{abl}$  – є масою абльованого матеріалу,  $T_{melt}$  температура плавлення,  $\theta$  коефіцієнт зворотньої конденсації,  $L_h$  є латентними теплотами на одиницю об'єму,  $D = 1 \text{ c}^{-2}$ ,  $\varphi$  є параметром затримки конденсації на мішень продуктів абляції ( $\varphi \sim \tau/2$ ). На границях фаз розв'язується система рівнянь Стефана за заданими умовами (11):

$$\left\{ \begin{array}{l} T_{j-1}(\xi - \Delta, t) - T_j(\xi + \Delta, t) = T_{tran,k} \\ \chi_{j-1} \frac{\partial T_{j-1}}{\partial r} - \chi_j \frac{\partial T_j}{\partial r} = L_h \rho \frac{d\xi}{dt} \\ \tilde{C} = C + \sum_h L_h \delta(T - T_{tran,h}) \end{array} \right. , \quad (11)$$

де  $\xi$  є фронтом фазового переходу що відбувається за переходу температури  $T_{tran,h}$ ,  $\chi$  – температуропровідність. Залежність температури фазового переходу від тиску не береться до уваги. Термодинамічні величини (теплоємність, теплопровідність, густина) були згладжені на неявних фазових фронтах в околицях напівширин  $\Delta$  згідно підходу, як приведено виразом на прикладі згладженої теплоємності  $\tilde{C}$ . Таким чином, розрахункові сітки стабілізуються шляхом збереження консервативності.

Поверхневий прошарок матеріалу перешкоджає на початку дії імпульсу опромінення, ежекції метастабільного розплаву з об'єму. Руйнування цього прошарку відбувається за умови рівності локальної міцності  $\Omega$  та індукованому стрибку механічних напружень  $|E|$  за наближенням Ожерелкової:

$$|E| \approx \max(\sigma_{xx}) = (3\lambda + 2\mu)\alpha_T (T(x, t) - T_0(x, 0)). \quad (12)$$

$Q_\sigma$  описує функцію зміни температури у відповідь зміни деформації зразка, що було прийнято у наближенні Карташова для однорідного твердого тіла під дією впливу теплового шоку. Це відображено у рівнянні (13), що встановлює зв'язок між зростанням температури і швидкості деформації в окремому об'ємі.

$$Q_\sigma = -(3\lambda + 2\mu)\alpha_T T_0 \dot{\epsilon}_{ii}. \quad (13)$$

$Q_e$  і  $Q_\sigma$  є взаємозалежними величинами, а модель абляції є системою із зворотнім зв'язком. Густина абсорбованої енергії  $\omega_{loc}$  локальним об'ємом  $dV$  в певний момент електро-променевої обробки визначається наступним рівнянням (14):

$$\omega_{loc} = \epsilon \int_0^t \frac{\int_{dV} Q_e(\vec{r}, t) dV}{\int_{dV}} dt, \quad (14)$$

де  $\epsilon$  – коефіцієнт абсорбції електронів. Для випадку дії СРЕП на метал, взаємодія пучок-мішень є надзвичайно складною, і ця величина  $\epsilon$  не може бути визначеною точно. На даний час, єдиним методом визначення цієї величини є шлях експериментального вимірювання відношення повного падаючого струму пучка  $J$  і пройденого через мішень струму  $Y$  з наносекундною роздільною здатністю за часом. Також можна ввести коефіцієнт екранування пучка продуктами абляції, але зважаючи на великий струм і релятивістськість пучка, ним можна знехтувати, чи прийняти рівним  $\epsilon \sim 0.9..1$ . У даній роботі було застосовано величини коефіцієнту абсорбції електронів за відносним порівнянням з німецьким прискорювачем електронів *JUDITH I* і розрахунком методом Монте-Карло у програмному пакеті *CASINO v2.48*. На цьому, побудову загальної термоеластичної модель абляції моделі для однорідних металів і сплавів завершено.

Далі, було проведено чисельні розрахунки, коди яких доступні за посиланням <https://github.com/oleksandrstartsev>. Спочатку, важливим було тестування розгляду динаміки температурного поля без урахування механічних напружень, в теплофізичному наближенні та проведення верифікації з використанням промислового сплаву ВТ1-0. Диференційно-різницева задача розв'язана шляхом застосування схеми Кранка-Ніколсона на ортогональній неструктурованій сітці з кроком по часу, при цьому промодельовано вплив різних граничних умов на швидкість охолодження. Оскільки основним складником сплаву ВТ1-0 є титан (понад 99%мас.), використано термодинамічні коефіцієнти титану.

Взаємодія СРЕП із мішенню призвела до сильної пластичної деформації останньої. Проведений попередній металографічний аналіз поперечного зрізу допоміг визначити максимальну глибину кратера  $\sim 0,4$  мм, що становить близько двох характерних глибин поглинання  $R_{surf}^{50\%} = 0,2$  мм. Це свідчить про стимульовану емісію речовини основи внаслідок абляційних процесів.

На границі кратера знаходяться брусфери висотою до 50 мкм, внутрішня основа яких складається з рівноосних зерен розміром  $l = 20-40$  мкм, що подібне до мікроструктури неопроміненої мішені, але із численними внутрішньозерновими розорієнтованими тріщинами. Більш детальним є аналіз фрактограм поперечного злому, який дозволив виділити три характерні області (Рис.2, 3, 4): переплаву (А), перехідну (В) та немодифіковану (С). Товщина шару А у центрі кратера 100 мкм, на периферії до 300 мкм. Товщина шару В становить до 1,1 мм. Для області С характерний ямковий рельєф руйнування рівноосної  $\alpha$ -фази за механізмом в'язкого злому. Для області В характерний крихкий механізм руйнування, яскраво простежуються білі шари паралельно поверхні, область є безпористою сильно компактованою  $\beta$ -фазою, із незначними міжзерновими крихкими руйнуваннями. Дана область сформована під впливом швидкої теплової фіксації результатів ударно-хвильової дії на розплав. Область А сформована внаслідок швидкісного охолодження розплаву та конденсації газово-крапельної хмари, що призвело до

значних термомеханічних напружень, зумовивши накопичення структурних дефектів. В області А також наявні сліди ударно-хвильової дії у вигляді поверхонь різної густини. Відбувається відрив від основи зерен через швидке теплове розширення, і наступним компактифікуванням ударними хвилями.

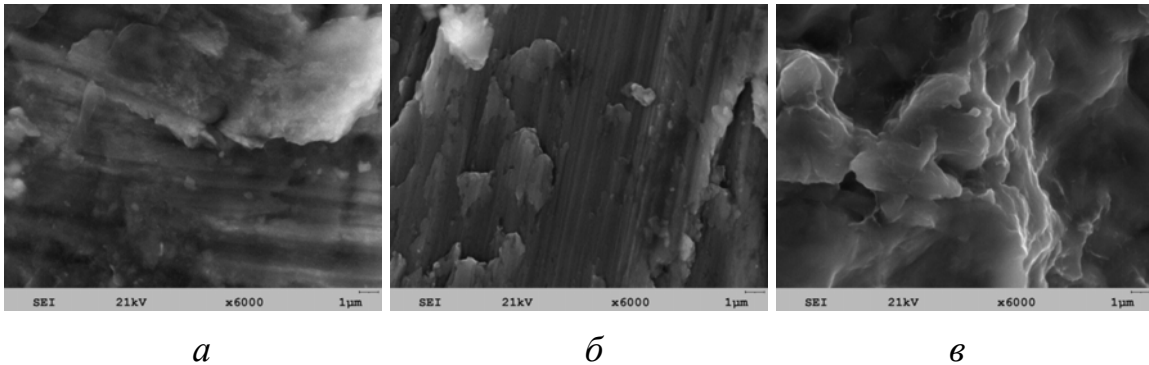


Рис.2. Фрактограми титанового сплаву VT1-0: (а) – загартована зона, (б) – зона теплової дії, (в) – неопромінений матеріал.

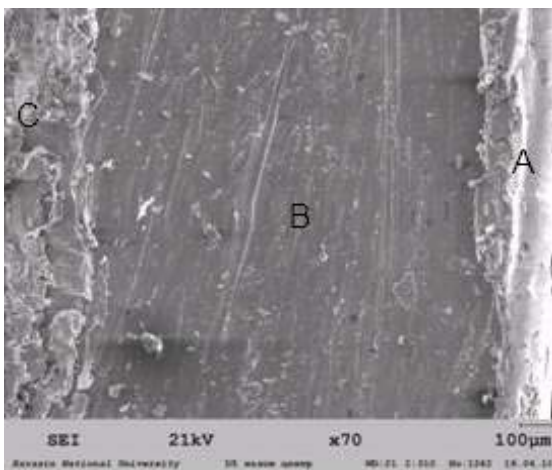


Рис.3. Поперечний злом у центрі кратера опроміненого зразка VT1-0.

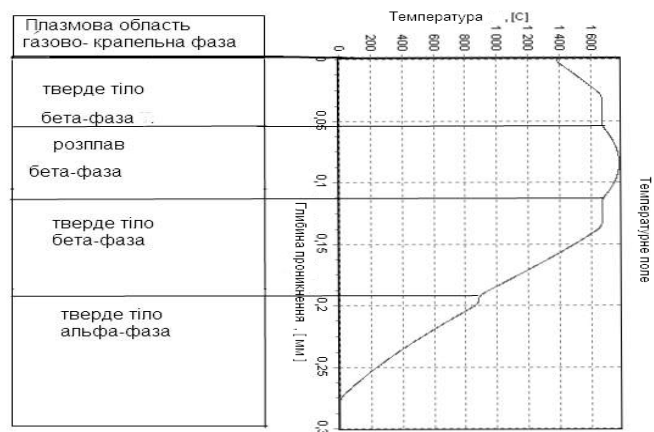


Рис.4. Шарова будова матеріалу після опромінення  $j=6\text{МА/м}^2$ .

Характерна глибина проникнення менша ніж глибина кратеру, згідно металографічних досліджень. Це пояснюється саме термомеханічним механізмом абляції: величина напружень може перевищити границю динамічної міцності на розрив матеріалу мішені, створюючи передумови для утворення тріщини і розпилення рідини із області розплаву (Рис.4, область розплаву  $\beta$ -фази). Слід зазначити, що перевищення порогу фазового вибуху, можливе за швидкості нагрівання  $\nu = 0,5\text{ ГК/с}$ , тоді фазовий вибух, із урахуванням неоднорідності пучка та його можливої філаментатії, є цілком ймовірним. Розрахована максимальна можлива швидкість нагрівання перевищує  $\nu=3,1\text{ ГК/с}$  (у даному наближенні). Швидкість охолодження знаходимо за граничної умови (15). У найпростішому випадку, можна знехтувати конвекцією, а за граничну умову прийняти  $T|_{x=0} = 0$ , тоді одержимо наступний профіль охолодження поверхні мішені (Рис.6, а). Дане

наближення не враховує того, що абляційні процеси продовжуються деякий час після опромінення, при цьому температура поверхні не знижується суттєво. У даному випадку (Рис.6, б), за краєву умову можна прийняти (15):

$$\chi \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=0} + \beta T(x,t) \Big|_{x=0} = \frac{q^{\max} t}{\tau} (t - \tau), \quad (15)$$

де  $q^{\max}$  – максимальне значення густини теплового потоку,  $\beta$  – коефіцієнт теплообміну. За такої умови, температура буде ще зростати залежно від густини потоку протягом (30...300) нс після завершення опромінення.

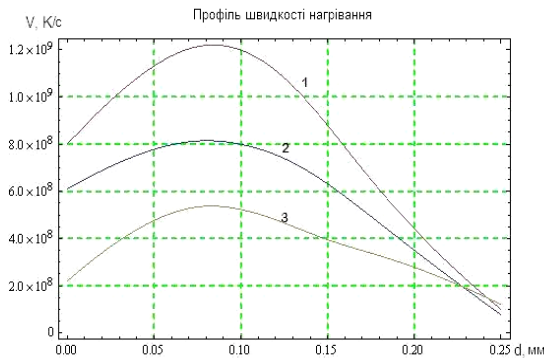


Рис.5. Профіль нагрівання при  $j = 8 \text{ MA/m}^2$ , де час опромінення: 1 – 100 нс; 2 – 1 мкс; 3 – 2 мкс.

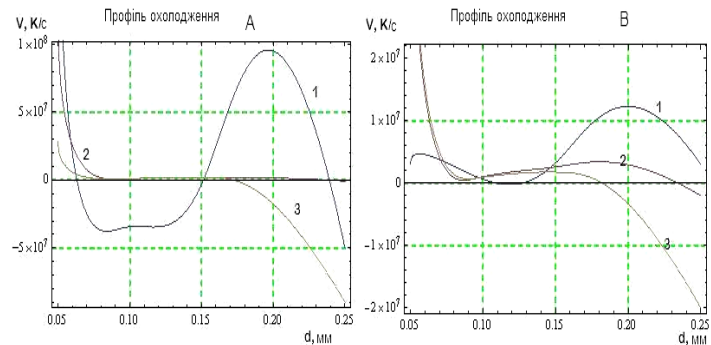


Рис.6. Профіль охолодження при  $j = 4 \text{ MA/m}^2$ , де час дифузії температурного поля: 1 – 6 мкс; 2 – 10 мкс, 3 – 20 мкс. А-профіль без врахування продовження абляційних процесів після опромінення, В-профіль з їх врахуванням.

При розгляді повної термоеластичної моделі СРЕП зі сплавом ВТ1-0, розрахунки фізичних величин були додатково стабілізовані відслідкуванням збереження консервативності системи і усередненням по кластерам методом  $k$ -середніх. Одержано розподіли температурного поля і зміщень у титановій пластині після опромінення як зображено на Рис.6, 7. Чисельні розрахунки вказали на екстремальні швидкості нагрівання ( $10^6..10^8$ ) К/с в епіцентрі опромінення, і ( $10^4..10^6$ ) К/с в периферійних зонах опромінення. Високі температурні градієнти величиною до  $10^7$  К/м згенеровані на глибині 1000 мкм від поверхні. Після закінчення опромінення, швидкість охолодження і температурний градієнт були  $10^7$  К/с і  $10^8$  К/м в загартованій зоні, ( $10^2..10^4$ ) К/с і  $10^4$  К/м в зоні теплової дії. Температурні деформації відзеркалюють згенероване поле температур. Максимальні деформації (100..120) мкм досягнуті в епіцентрі під час нагрівання, але вони були релаксовані розплавленням і відпалом. Відносно невеликі залишкові механічні напруження оцінені в 150 МПа. Поверхневі напруження стиску збалансовані напруженнями розтягу в об'ємі, і виникнення тріщин не було спрогнозовано, що підтвердилось експериментально. Аналіз нанотвердості опроміненого ВТ1-0 показав, що приповерхневий шар товщиною  $\sim 100$  мкм набув вищу твердість на 30% у порівнянні з неопроміненим матеріалом. Модуль Юнга також дещо зріс – на 12%.

Таким чином, СРЕП опромінення спричинило крихкість в опроміненій зоні, значним чином загартованого матеріалу.

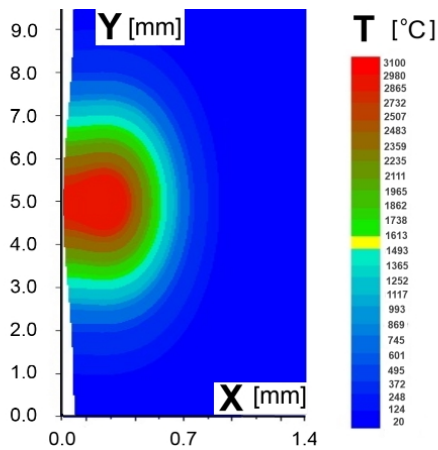


Рис.7. Розподіл температури в титані після завершення опромінення.

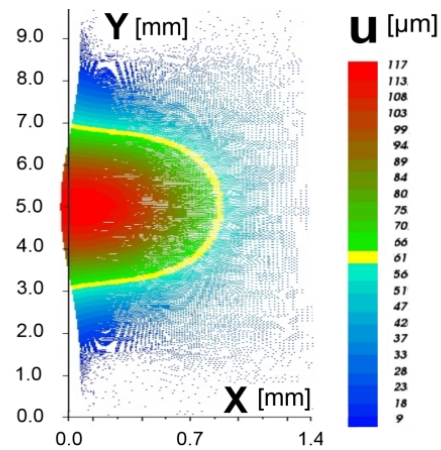


Рис.8. Зміщення в титані після завершення опромінення.

В четвертому розділі «**Моделювання радіаційних перетворень в цирконієвому сплаві Zr1%Nb**» приведені результати досліджень радіаційно-стимульованої модифікації структури сплаву Zr1%Nb. Опромінення за допомогою СРЕП призвело до формування неоднорідної приповерхневої мікроструктури.

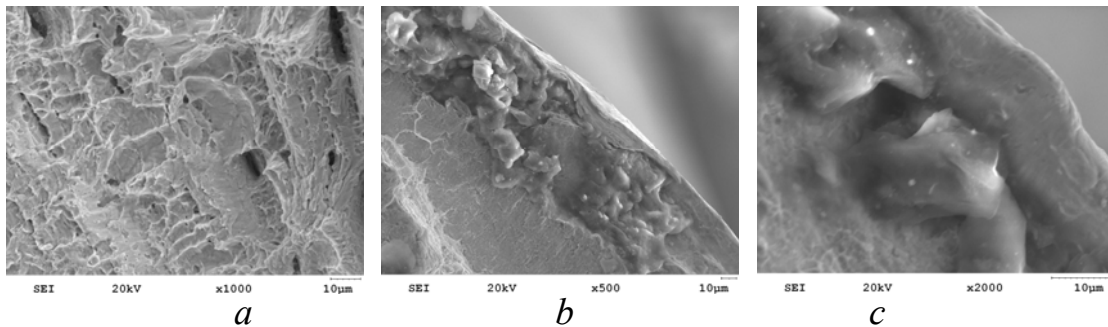


Рис.9. Фрактограми сплаву Zr1%Nb: (a) – неопромінений матеріал, (b) – епіцентр опромінення, і (c) – периферія зони опромінення.

Товщина оплавленого модифікованого матеріалу в епіцентрі кратеру сягає 80 мкм. Утворена мікроструктура складається із застиглих крапель розміром 30..50 мкм без визначеної направленості. Фрактографічний аналіз показав, що немодифікований Zr1%Nb сплав має в'язкий злам з малими борознами, порожнинами і великими ямками, розлами з незавершеними краями, чи малими ямками з завершеними краями відколу. Це демонструє транскристалітний механізм руйнування (Рис.9, а). Поверхні злому містять локальні елементи розривної топології. Мікроструктура немодифікованого матеріалу складається із рівноосних зерен з лінійним розміром 3..5 мкм. Опромінений матеріал проявив крихкий механізм руйнування (Рис.9, б). У зоні теплової дії в епіцентрі, тріщини поширювались границями зерен. Мікроструктура утворена великими зернами розміром 10..20 мкм. В периферійній зоні також утворився прошарок на поверхні товщиною 10 мкм, який має в'язкий механізм руйнування. Ймовірною причиною формування даного прошарку є швидка конденсація парів абляції з епіцентру, в умовах несприятливих для росту зерен. Але, таке покриття утворилось лише на частково оплавленій поверхні, що підтвердилось доброю когезією покриття.



Зростання мікротвердості на 17% у порівнянні з неопроміненим матеріалом було зафіксовано для опроміненого матеріалу на периферії електронно-пучкової обробки, де флюенс не переважав  $40 \text{ Дж/см}^2$ . Це викликано швидкими процесами загартування після завершення дії пучка, що призвело до формування компактифікованої структури з транскристалітним механізмом руйнування. Даний результат є потенційно корисним для практичного застосування. Зона переплаву має нижчу мікротвердість на 12% у порівнянні з необробленим матеріалом, як наслідок росту зерен і релаксації залишкових механічних напружень.

Також було проведено чисельне моделювання експерименту за моделлю термоеластичності, яка наведена в попередньому розділі. Розрахована глибина проникнення пучка є більшою за реальну глибину проплавлення, завдяки ядерно-фізичним, термодинамічним і механічним властивостям даного сплаву. Приповерхнєве плавлення, яке є типовим для легких металів і сплавів, не переважає в механізмах руйнування. Поверхнева абляція захищає товщу матеріалу від руйнування як тепловий і радіаційний ізолятор.

В п'ятому розділі «Модифікуючий вплив сильнотривового релятивістського електронного опромінення на алюмінієвий сплав 1933» досліджено абляційні процеси на поверхні алюмінієвого сплаву 1933 опроміненого СРЕП, та нанесення алюмінію на мідь.

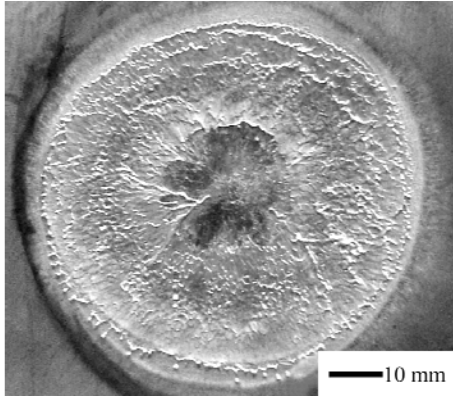


Рис.10. Поверхня мішені сплаву 1933, опроміненої СРЕП.

Опромінений зразок зображений на Рис.10, а фрактограми зламу на Рис.11. Було визначено, що модифікований матеріал складається із зон загартування, теплової і ударно-хвильової дії. Загартована зона товщиною до 200 мкм містить рівноосні зерна розміром 1–3 мкм. Злам характеризується квазікрихким механізмом руйнування (Рис.11, а). Зона загартування утворилась у результаті зворотної конденсації і швидкісного охолодження продуктів абляції. Зона теплового і ударно-хвильового впливу прослідковується додатково на товщину до 400 мкм. Вона характеризується мікрів'язким механізмом руйнування, має безпорову щільну структуру

оплавлених фасеток з лінійним розміром 1 мкм. На противагу, немодифікованому матеріалу (Рис.11, в) характеризується фасетками квазісколу з розміром в інтервалі 0.6–1.5 мкм. Таким чином, вплив СРЕП на алюмінієвий сплав 1933 спричиняє зміну зеренної структури.

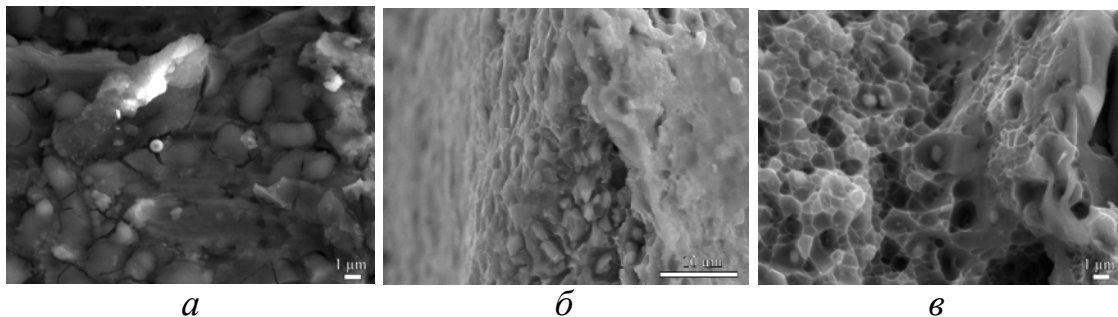


Рис.11. Фрактограми опроміненого зразку алюмінієвого сплаву: (а) загартована зона; (б) зона переплаву і ударно-хвильової дії; (в) неопромінений матеріал.

Також проведено чисельне моделювання опромінення пластини сплаву алюмінію 1933 згідно зазначеної термоеластичної моделі абляції. Проплавлення

сягало 0.8 мм в епіцентрі дії опромінення з максимальним потоком до  $10^9$  Вт/см<sup>2</sup>. Розрахована товщина зони загартування не перевищує 300 мкм на периферії (потік не перевищує  $10^6$  Вт/см<sup>2</sup>) і 160 мкм в епіцентрі опромінення.

Нанотвердість зросла після модифікації з початкових 1.5 ГПа немодифікованого матеріалу до 1.65 ГПа в зоні загартування. У зоні переплаву і ударно-хвильової дії нанотвердість знизилась до 1.36 ГПа. Це пов'язано з перерозподілом легуючих елементів і зміною зеренної мікроструктури сплаву у об'ємі. Електронно-зондовий аналіз показав збагачення зони загартування Zn і Mg (Рис.12). Величини для Cu знаходяться на порозі інструментальної похибки. Також проведено електрон-позитронний аналіз тильної сторони пластини сплаву 1933 після опромінення для дослідження ефектів далекодії СРЕП шляхом генерації дефектів у твердому тілі за допомогою радіаційно-стимульованого ударно-хвильового механізму (Рис.13, а). Параметр Доплера  $s$  зростає з енергією  $E$  внаслідок наявності шару оксиду на поверхні. Спад піку в інтервалі 2–10 кеВ відображає рівень кристалічності і акумуляцію дефектів чи залишкових механічних напружень на поверхні. Мала зміна  $s$  відносно  $w$  показує незначне збільшення дефектів типу вакансій (нахил інтерполяційних кривавих на Рис.13, б).

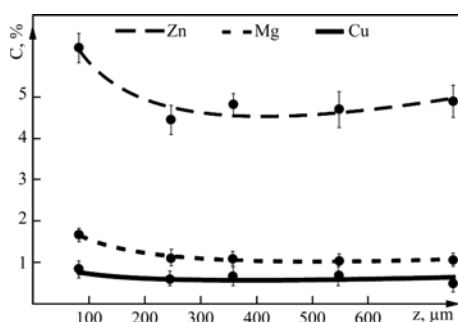


Рис.12. Профіль розподілу легуючих елементів в приповерхневому об'ємі опроміненого матеріалу.

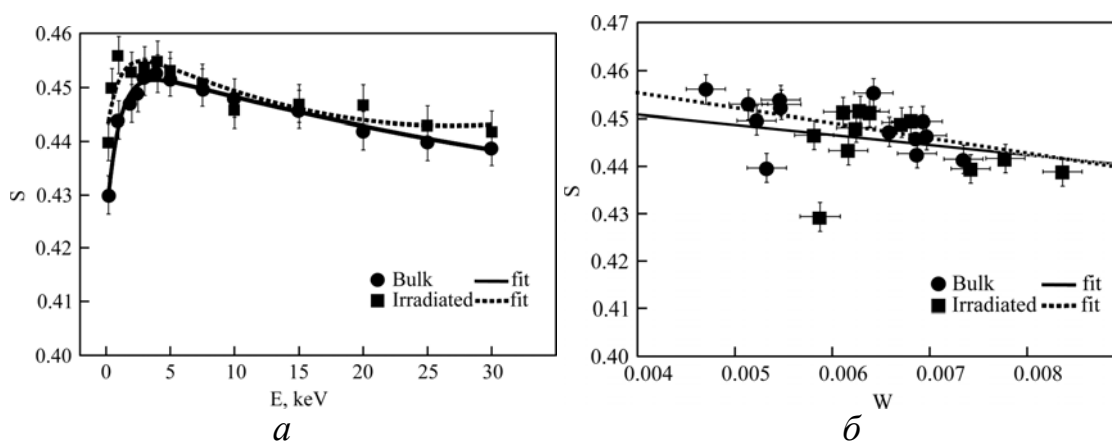


Рис.13. Електрон-позитронний анігіляційний аналіз. Залежність  $s$ -параметру: (а) від  $E$  енергії позитронів, і (б) від  $w$ -параметру для немодифікованого об'єму і опроміненого матеріалу 1933 зі зворотньої сторони мішені.

Додатково було також досліджено можливість конденсації алюмінію на мідь сильнострумовим пучком електронів. Було проведено опромінювання алюмінієвої пластини СРЕП для генерації абляційних продуктів з метою їх конденсації на мідну підкладку флюенсом приблизно 200 Дж/см<sup>2</sup>. В свою чергу, мідна підкладка термічно активується і злегка оплавляється дотичним опроміненням електронного



пучка з флюенсом енергії  $10..40 \text{ Дж/см}^2$ . Основною перевагою даного методу нанесення покриття є підготовка як матеріалів для нанесення самої підкладки, так і транспорт матеріалів на поверхню підкладки під час дії одного імпульсу пучка. Одна із сторін підкладки залишається вільною, що забезпечує її цілісність шляхом відхилення під дією пучка. Конденсація газо-плазмової хмарини на підкладку спричинила формування покриття Al-Cu з доброю адгезією до матеріалу основи. Товщина покриття становить 30 мкм, яке складається з видовжених зерен з розмірами  $20..40 \text{ мкм}$  у довжину та  $6..12 \text{ мкм}$  у ширину. Покриття має підвищену мікротвердість  $6.7 \text{ ГПа}$  в зоні конденсації ядра газо-плазмової хмарини. Приблизно 30% ежектованого матеріалу з поверхні алюмінієвої пластини сконденсувалось на мідній підкладці. Механізм руйнування зламів покриття є крихким з помітною поруватістю. Електронно-зондовий аналіз показав, що розподілення елементного складу покриття не є рівномірним по поверхні. У зоні конденсації ядра газо-плазмової хмарини, склад становить  $25\% \text{Cu} - 75\% \text{Al}$  ( $\pm 5\%$ , %мас.), а в периферійній –  $25..90\% \text{Cu}$  ( $\pm 5\%$ , %мас.). Деламінації покриття від підкладки не помічено, окрім незначних тріщин паралельних поверхні, як наслідок релаксації механічних напружень. Зазначено, що гомогенізація поверхні для зменшення шорсткості та пористості можуть бути застосовані під час наступних обробок низькоінтенсивним електронним опроміненням.

Також було проведено вивчення фрактального характеру мікроструктури зламів сплавів ВТ1-0 та 1933 в рамках статистичної оцінки фрактальної розмірності. Для оцінки фрактальної розмірності  $D_{frac}$  фрактограм (Рис.14), було опрацьовано фотографії скануючої електронної мікроскопії зазначених матеріалів до і після опромінення. Кожна фотографія у відтинках сірого була опрацьована модифікованим методом Кларка: класичний метод Кларка, восьмипиксельний, максимальних різниць, середніх різниць, оцінки регресії з лінійним, квадратичним кроком на вікнах з геометричним, арифметичним і дільниковим зсувом. Оптимальним методом детекції неоднорідностей в даних фрактограмах, було вибрано метод геометричних квадратних вікон зі змінною величиною сторони з ударним кроком сканування даних на основі класичного методу Кларка.

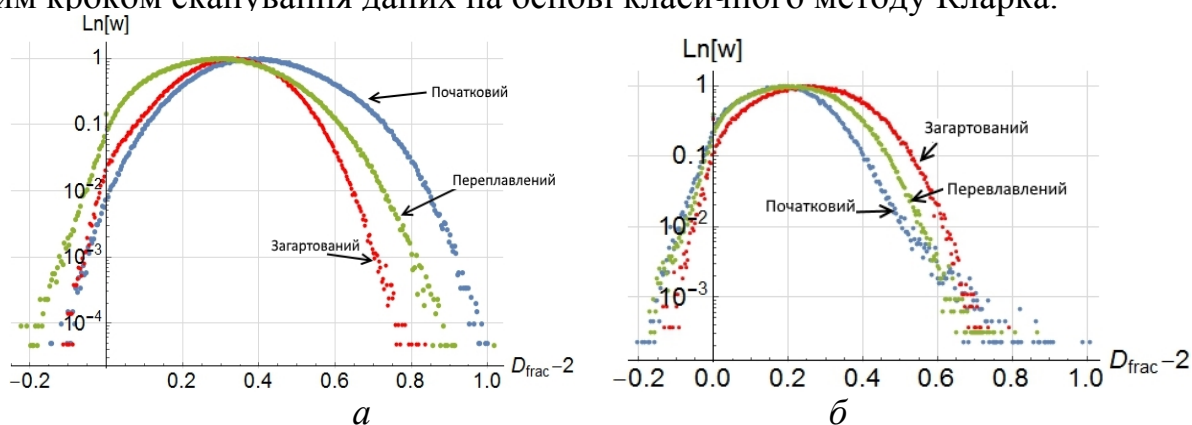


Рис.14. Логарифмічна нормалізована ймовірність розподілу  $w$  фрактальної розмірності  $D_{frac}$  для (а) сплаву 1933 і (б) сплаву ВТ1-0 для матеріалів немодифікованої, загартованої зон і зони переплаву-теплової дії.

Основою ідеї фрактального підходу є те, що варіації інтенсивності фотографій мікроструктури носять колективний характер, який залежить від розподілу зерен, тріщин, і, назагал, форм і розмірів найрізноманітніших елементів мікроструктури. Тому, визначення статистичної кореляції в якості фрактальної розмірності має спільну природу з фізико-механічними властивостями. Було встановлено, що

фрактальна розмірність  $D_{frac}$  в модифікованій зоні алюмінію зменшилась на 10..20% як результат виродження локальної комплексності мікроструктури (Рис.14). У випадку сплаву VT1-0, фрактальна розмірність  $D_{frac}$  дещо зросла внаслідок появи стріацій, більш складних геометричних форм мікроструктури, у порівнянні з немодифікованим матеріалом. Проведені розрахунки показали, що існує кореляція між фрактальністю та змінами топології зламів матеріалу.

## ВИСНОВКИ

В роботі вирішено наукову задачу створення моделей, що описують просторовий розподіл та часову динаміку зміни агрегатного та структурного стану сплавів VT1-0, Zr1%Nb, 1933, які опромінюються імпульсним релятивістським електронним пучком мікросекундної тривалості, та узгоджуються з експериментально знайденим розподілом фізичних властивостей.

1. Створено фізичну модель, що описує динаміку радіаційно-стимульованих перетворень в сплавах, які опромінюються сильнострумовим пучком релятивістських електронів. Описано стадії утворення перегрітої речовини, абляційного викиду та конденсації розплаву. Змодельовано динамічний вплив, зумовлений термопружним ефектом, що виникає при опроміненні сплавів. Експериментально підтверджено утворення області зі змішаними фазами в сплаві VT1-0, товщина якої відповідає середній глибині проникнення електронів, де забезпечується температурні градієнти охолодження порядку  $10^8$  K/c.

2. Встановлено, що відмінність в поглиненій дозі опромінення, яка зумовлена нерівномірністю розподілу густини струму електронного пучка вздовж перетину суттєво відображається на механічних характеристиках цирконієвого сплаву Zr1%Nb. Опромінення цирконієвого сплаву з енергією частинок 350 keV та густиною потоку не більше 40 Дж/см<sup>2</sup> приводить до збільшення мікротвердості зразка на 17%, що пояснюється помірністю напружень стиску внаслідок різкого охолодження, які не перевищують межу міцності. Збільшення густини потоку до 200 Дж/см<sup>2</sup>, спричиняє зменшення цих значень на 12% порівняно з неопроміненою поверхнею, оскільки спричинені структурними перетвореннями внутрішні напруження призводять до утворення тріщин та наступного окислення поверхні.

3. Розроблені узгоджені фізичні моделі, що враховують розподіл поглиненої дози, її трансформації в теплове поле та поле внутрішніх напружень в опромінюваних сплавах застосовані для нового процесу нанесення алюмінію на мідну підкладку. Процес полягає в одночасному, протягом дії одного імпульсу, впливові пучка як на матеріал, що наноситься, так і на матеріал підкладки. Встановлено, що найкраща адгезійна міцність досягається в зоні, де, згідно розрахунків, відбувається частковий розплав поверхні підкладки і там же спостерігається найвище значення нанотвердості.

4. Встановлено, що особливістю модифікуючого впливу сильнострумового релятивістського електронного пучка на промисловий алюмінієвий сплав 1933 є утворення зон з субмікронною зеренною структурою в області поглинання енергії пучка переплаву та зоні термічного впливу. Також встановлено суттєвий перерозподіл легуючих елементів Mg, Zn, Cu в бік збагачення приповерхневої зони. Засобами позитронної анігіляційної спектроскопії встановлено ефект зміни концентрації дефектів в понадпробіговій зоні мішені, що підтверджує наявність акустико-механічного впливу.

5. Встановлено, що значення логарифмічної нормалізованої ймовірності розподілу фрактальної розмірності зламів в опромінених мішенях з титанового сплаву VT1-0 та алюмінієвого сплаву 1933 мають спільні максимуми для ділянок

вихідної структури, зони переплаву пучком та зони термічного впливу. Абсолютні ж значення максимальної фрактальної розмірності відрізняються для обох сплавів. Також для кожного сплаву відрізняється розподіл фрактальної розмірності між початковою структурою та зонами переплаву пучком і термічного впливу.

## СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Литвиненко В.В., Моделювання теплової дії сильнострумowego релятивістського електронного пучка на титановий сплав VT1-0 / В.В. Литвиненко, А.Г. Пономарьов, В.Т. Уваров, **О.А. Старцев** // Вісник Харківського університету, серія "Ядра, частинки, поля", № 1001.- Вип. 2 (54), 2012.- С.104-109.

2. Donets S.Ye., Aluminum surface coating of copper using high-current electron beam / S.Ye. Donets, V.F. Klepikov, Yu.F. Lonin, V.V. Lytvynenko, A.G. Ponomarev, **О.А. Startsev**, V.V. Uvarov // Problems of Atomic Science and Technology.- № 4(98).- 2015.- pp.302-305.

3. Klepikov V.F., Physical and mechanical properties of titanium alloy VT1-0 after high-current electron beam irradiation / V.F. Klepikov, Yu.F. Lonin, A.G. Ponomarev, **О.А. Startsev** V.T. Uvarov // Problems of Atomic Science and Technology.-№ 2(96).- 2015.- pp.39-42.

4. Kobets A.G., Melting effect on high current electron beam on aluminum alloy 1933 / A.G. Kobets, P.R. Horodek, Yu.F. Lonin, V.V. Lytvynenko, A.G. Ponomarev, **О.А. Startsev**, V.T. Uvarov // Surface Engineering and Applied Electrochemistry, vol.51.- № 5.-2015.- pp. 478-482.

5. Klepikov V.F., Behavior of Zr1%Nb Alloy Under Swift Kr Ion and Intense Electron Irradiation/ V.F. Klepikov, Yu.F. Lonin, V.V. Lytvynenko, A.G. Ponomarev, **О.А. Startsev**, V.T. Uvarov // Journal of Nano- and Electronic Physics.- vol.7.- № 4.- 2015.-040166 (7pp).

6. Klepikov V.F., Fractality of Fractures of Aluminum and Titanium Alloys Irradiated by Intensive Electron Beam / V.F. Klepikov, Yu.F. Lonin, V.V. Lytvynenko, A.G. Ponomarev, **О.А. Startsev**, V.T. Uvarov, // Journal of Nano-Electronic Physics.- vol. 8.- № 3.-2016 p. 03009 (5pp).

7. Старцев О.А. Модифікуючі і тестові впливи сильнострумowego релятивістського електронного пучка на титановий сплав VT1-0 / **О.А. Старцев**, О.Г. Троценко // Тези Студентської наукова конференція з прикладної фізики "5хатки-11"-Харків:ХНУ імені В.Н. Каразіна.- 2011.- с.38-40.

8. Старцев О.А., Модель структурно-фазових перетворень під впливом електронно-пучкової абляції в металах / **О.А. Старцев** // Тези Студентської наукова конференція з прикладної фізики "5хатки-12"-Харків:ХНУ імені В.Н. Каразіна.- 2012.-с.32.

9. Старцев А.А. Моделирование структурно-фазовых превращений в металлах, под воздействием сильноточного электронного пучка / **А.А. Старцев** // Сборник научных трудов XII Межд. научно-тех. уральской школы-семинара металлосведомо-молодых ученых.- Екатеринбург, 2012.- с.367-369.

10. Lytvynenko V.V., Phase and structural transformation in titanium induced by electron beam ablation phenomenon / V.V. Lytvynenko, **О.А. Startsev** // Mater. I Int. Sci.-Tech. conf. Modern issues in physics, chemistry and biology "Phys ChemBio".- Sevastopol.- 2012.- p.48-51.

11. Литвиненко В.В., Моделювання динаміки температурного поля під час електронно-пучкової абляції мішені / В.В. Литвиненко, **О.А. Старцев** // Тези Міжн.

конференція студентів та молодих науковців з теор. та експ. фізики «Еврика».- 2012.- 19-22 квітня.- Львів.- Д17.

12. Литвиненко В.В., Моделирование электронно-пучковой абляции сплава 1933 / В.В. Литвиненко, А.Г. Пономарьов, **А.А. Старцев**, В.Т. Уваров // *Материалы II Межд. Конф. Многомасштабное моделирование структур, строение вещества, наноматериалы и нанотехнологии.*- Тула.- 2013.- с.224-231.

13. Kobets A.G., Modification of aluminum alloy 1933 by the high-current electron beam irradiation / A.G. Kobets, P.R. Horodek, V.V. Lytvynenko, U.F. Lonin, A.G. Ponomarev, **O.A. Startsev**, V.T. Uvarov // *Proc. of the Int. Conf. Nanomaterials: application and properties.*-Lviv.-2014.-vol.3.-No 1.-2014.- 01001 (3pp).

14. Klepikov V.F., Fractal analysis of fracture surfaces of titanium and aluminum modified by the high-current quasirelativistic electron beam irradiation / V.F. Klepikov, V.V. Lytvynenko, Yu.F. Lonin, A.G. Ponomarev, **O.A. Startsev**, V.T. Uvarov // *Abstr. Book Int. research & practice conf. Nanotechnology & Nanomaterials (Nano2015).*- Lviv,-2015.-p.308.

15. Донець С.Є., Наплавлення алюмінію на мідь сильнострумовим електронним пучком/ С.Є. Донець, В.Ф. Клепиков, В.В. Литвиненко, Ю.Ф. Лонін, А.Г. Пономарьов, **О.А. Старцев**, В.Т. Уваров // Тезиси докладов XIII Межд. Конф. по физике высоких энергий, ядерной физике и ускорителям.-Харьков.- 16-20 марта 2015.- с.63.

## АНОТАЦІЯ

**Старцев О.А. Динаміка структурно-фазових перетворень в сплавах на основі титану ВТ1-0, цирконію Zr1%Nb і алюмінію 1933 під впливом сильнострумових релятивістських електронних пучків. – Рукопис.**

*Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата фізикоматематичних наук за спеціальністю 01.04.07 – фізика твердого тіла. – Інститут електрофізики і радіаційних технологій НАН України. – Харків. – 2017.*

Дисертація присвячена дослідженню впливу опромінення мікросекундним сильнострумовим релятивістським електронним пучком на сплави титану ВТ1-0, цирконію Zr1%Nb і алюмінію 1933. Експериментальні дослідження за допомогою методів оптичної мікроскопії, скануючої електронної мікроскопії, електронно-зондового аналізу, електрон-позитронної анігіляції виявили, що опромінення даних матеріалів призводить до інтенсивної абляції мішеней та утворення приповерхневих мікроструктур із новими фізико-механічними властивостями. У модифікованих зонах матеріалів спостережено ріст зерна, зміну механізмів руйнування до більш крихкого. Зони загартування матеріалів мають підвищену твердість у порівнянні з немодифікованими матеріалами. Для сплаву 1933 виявлено перерозподіл легуючих елементів у сторону збагачення поверхні. Встановлено ефект зміни концентрації дефектів в понадпробіговій зоні мішені що пояснюється ударно-хвильовою дією сильнострумового електронного пучка. Розвинено термоеластину модель абляції однорідного твердого тіла для опису електронно-пучкової абляції. Згідно із побудованою моделлю проведено моделювання взаємодії сильнострумового пучка з матеріалами, одержано динаміку температурного поля, поля механічних деформацій. Дані моделювання були використані для трактування експериментальних результатів. Також досліджено перспективність нанесення алюмінію на мідну підкладку. Спостережено формування Al-Cu покриття з твердістю 6,7 ГПа. Досліджено фрактальну природу поперечних зламів модифікованих матеріалів. Встановлені залежності між обчисленими полями фрактальної розмірності та змінами топології зламів матеріалів.

**Ключові слова:** електронний пучок, інтенсивне опромінення, абляція, структурно-фазові перетворення, алюміній, титан, цирконій, фрактали.

**ABSTRACT**

**Startsev O.A. Dynamics of the structural and phase transformations in alloys of titanium VT-1, zirconium Zr1%Nb and aluminum 1933 affected by high-current relativistic electron beams. – Manuscript.**

*Thesis for scientific degree of the candidate of science in physics and mathematics in the specialty 01.04.07 – Solid State Physics. – Institute of Electrophysics and Radiation Technologies of NAS of Ukraine. – Kharkiv. – 2017.*

The thesis is dedicated to the investigation of influence of irradiation in vacuum on the alloys of titanium VT1-0, zirconium Zr1%Nb and aluminum 1933 by a high-current relativistic electron beam with an energy around 350 keV, pulse length of 5  $\mu$ s, and fluence in the range of 10-200 J/cm<sup>2</sup>. Experimental studies employing methods of optical microscopy, scanning electron microscopy, electron-probe analysis, electron-positron annihilation analyzes, showed that irradiation of these materials leads to intense ablation of targets and to formation of near-surface microstructures with new physical and mechanical properties. The modified areas of materials are characterized by the growth of grains, mechanisms of destruction changed to more fragile than for the non-modified material. For the modified surface zone there were observed the quenched, melted and heat-affected zones, and a shock wave affected zone, which are characterized by different microstructure not only due to different irradiation effects, but as well due to the post-irradiation fast cooling, solidification tensions and residual heat supply. The quenched zones of materials have an increased hardness compared to the unmodified materials. The irradiation resulted in a significant enrichment of the 1933 surface by alloying elements Mg, Zn, Cu particularly in the subsurface quenched zone, compared to the non-irradiated sample. The long-range effect was observed in terms of the defect concentration outside of irradiated and melted volume of the aluminum target. This phenomenon was assumed to be determined by the influence of the shock-wave effect of the high-current electron beam. The intense electron beam irradiation affected the type of defects towards increasing the number of vacancy defects. Another influence of the shock-wave effect was detected as a compactification of the melted material as was observed for the titanium alloy. Embrittlement was noticed for the irradiated zirconium alloy in the melted zone, which was considered to be a result of a combined effect of grain growth, cracks generation by relaxation of residual thermal stress and probable light surface oxidation. The thermoelastic model of ablation for homogeneous solids was developed to describe an intense electron-beam ablation. The model was primary based on the hyperbolic relaxation heat transfer equation, the weakly coupled theory of thermoelasticity, energy loss of electrons and the Stefan problem. Numerically stable implementation of the model was performed using finite difference method for discretization in time and finite element approximation for space based on the classic Galerkin method. Simulations of the interaction of the high-current beam with the studied materials were carried out according to the constructed model. Dynamics of the temperature and mechanical deformation fields were obtained. Those simulations were used to interpret experimental results. There was found a good agreement between the calculated depths of a melted and heat-affected zone with experimentally observed values. Advantage of aluminum surface alloying of copper was also studied utilizing an exposure by high-current electron beam. There was first tested a perspective method of the surface coating by irradiation of the aluminum plate in the intense ablative mode in order to generate damage products enough for deposition on the copper foil, which was thermally activated by the tangent impact of the e-beam,

impinging at low angle to the copper surface, while significantly decreasing fluence. The underwent condensation of the dense Al gas-plasma cloud core resulted in formation of the compacted Al-Cu coating with smooth surface and good adhesion to the bulk copper. The formed Al-Cu coating has a hardness of 6.7 GPa. Fractal nature of transverse fractures of modified materials was investigated. Fractality was estimated in terms of the statistical self-affinity of the limited discrete data, which was represented by the grayscale scanning electron microscopy images of corresponding fractures. Calculations were done using modified triangular prism methods. The electron beam irradiation resulted in a significant modification of the collective fracture behavior of the irradiated materials. The correlations between the calculated fields of fractal dimension and the topological changes of fractures were established.

**Keywords:** electron beam, intense irradiation, ablation, structural and phase transformation, aluminum, titanium, zirconium, fractals.

### АННОТАЦИЯ

**Старцев А.А. Динамика структурно-фазовых превращений в сплавах на основе титана VT1-0, циркония Zr1% Nb и алюминия 1933 под влиянием сильноточных релятивистских электронных пучков. – Рукопись.**

*Диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-механических наук по специальности 01.04.07 – физика твердого тела. – Институт электрофизики и радиационных технологий НАН Украины. – Харьков. – 2017.*

Диссертация посвящена исследованию влияния облучения сильноточным релятивистским электронным пучком микросекундной длительности на сплавы титана VT1-0, циркония Zr1%Nb и алюминия 1933. Экспериментальные исследования с помощью методов оптической микроскопии, сканирующей электронной микроскопии, электронно-зондового анализа, электрон-позитронной аннигиляции обнаружили, что облучение данных материалов приводит к интенсивной абляции мишеней и образования приповерхностных микроструктур с новыми физико-механическими свойствами. В модифицированных зонах материалов наблюдались рост зерна и изменение механизмов разрушения к более хрупкому. Зоны закалки материалов имеют повышенную твердость по сравнению с немодифицированными материалами. Для сплава 1933 обнаружено перераспределение легирующих элементов в сторону обогащения поверхности. Установлено эффект изменения концентрации дефектов в зоне мишени выше пробега пучка, что объясняется ударно-волновым воздействием сильноточного электронного пучка. Построено термоэластическую модель абляции однородного твердого тела для описания электронно-пучковой абляции. Согласно построенной модели, проведено моделирование взаимодействия сильноточного пучка с материалами, получены соответствующие динамики температурного поля, поля механических деформаций. Данные моделирования были использованы для трактовки экспериментальных результатов. Также исследована перспективность нанесения алюминия на медную подложку. Обнаружено формирование Al-Cu покрытия с твердостью 6,7 ГПа. Также исследована фрактальная природа изломов модифицированных материалов. Установлены зависимости между рассчитанными полями фрактальной размерности и изменениями топологии изломов материалов.

**Ключевые слова:** электронный пучок, интенсивное облучение, абляция, структурно-фазовые превращения, алюминий, титан, цирконий, фракталы.