

НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ
ІНСТИТУТ ЕЛЕКТРОФІЗИКИ І РАДІАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ

Донець Станіслав Євгенович



УДК 539.376

**ФІЗИКО-ТЕХНОЛОГІЧНІ ОСНОВИ МОДИФІКАЦІЇ
ВЛАСТИВОСТЕЙ СТАЛЕЙ 12Х21Н5Т, 08Х18Н10Т, СПЛАВУ Д16,
ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНОЇ МІДІ ТРУБЧАСТИМИ
СИЛЬНОСТРУМОВИМИ РЕЛЯТИВІСТСЬКИМИ ЕЛЕКТРОННИМИ
ПУЧКАМИ**

01.04.07 – фізика твердого тіла

АВТОРЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Харків – 2012

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;

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Пойда Володимир Павлович
Харківський національний університет імені В.Н. Каразіна
МОНмолодьспорту України,
професор кафедри експериментальної фізики

доктор технічних наук, професор
Чугай Олег Миколайович
Національний аерокосмічний університет імені М.Є. Жуковського
«Харківський авіаційний інститут» МОНмолодьспорту України,
професор кафедри фізики

Захист відбудеться «21» травня 2012 р. о 16⁰⁰ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.245.01 у Інституті електрофізики і радіаційних технологій НАН України за адресою: 61003, м. Харків, вул. Гамарника, 2, корпус У-3, НТУ «ХПІ» МОНмолодьспорту України, ауд. 204.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Інституту електрофізики і радіаційних технологій НАН України за адресою: 61024, м. Харків, вул. Гуданова, 13.
Відгук на автореферат дисертації надсилати на адресу: 61002, м. Харків, вул. Чернишевська, 28, а/с 8812.

Автореферат розісланий «17» квітня 2012 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради Д 64.245.01



Пойда А.В.

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність дослідження. Розроблення нових технологій на основі трубчастих сильнотрумових релятивістських електронних пучків (СРЕП) стає можливим з появою нового покоління твердотільних сильнотрумових комутаторів і, відповідно, здійсненням частотних режимів слідування імпульсів. Це дає можливість розробити радіаційні технології одержання матеріалів з потрібними електрофізичними і механічними характеристиками для широкої номенклатури виробів. Так, зокрема, відомо, що в результаті обробки СРЕП алюмінієвих сплавів відбувається подрібнення зернової структури і вони стають придатними для здійснення надпластичного формування виробів. У нержавіючих сталей, оброблених сильнотрумовими електронними пучками, підвищується корозійна та ерозійна стійкість, відбувається локальне підвищення мікротвердості. Також в даний час розробляються різноманітні технології створення дисперсних матеріалів субмікронного- та наномасштабу. Значна частина цих технологій заснована на принципах обробки твердих тіл екстремальними концентрованими потоками енергії, величина якої є достатньою для здійснення низки таких послідовних перетворень: тверде тіло, рідкий стан, газо-парова фаза, конденсація. Серед них, зокрема, слід відзначити технології, в яких застосовують електричний вибух дротинок в умовах конденсації в рідинах. Випаровування матеріалу мішеней шляхом впливу СРЕП можна розглядати спорідненим, за певними ознаками, з тими методами обробки, які були названі вище, насамперед це стосується імпульсного введення енергії в матеріал. Разом з тим істотна відмінність полягає в механізмі викиду розплавленої речовини. Ця відмінність обумовлена глибиною розташування зони максимального енерговиділення поглиненої дози. Так для електронних пучків вона розташована в приповерхневій зоні на відстані від поверхні, рівній приблизно третині проективного пробігу частинки в речовині. При електронному опроміненні більша частина поглиненої енергії витрачається на нагрівання решітки, тоді як при лазерному або при електромагнітному випромінюваннях енергопоглинання здійснюється через збудження електронної підсистеми. Таким чином, при опроміненні електронним пучком розплавлена речовина деякий час знаходиться в метастабільному стані до того часу, поки хвиля фазового перетворення з твердого стану в розплав не досягне поверхні мішені і не відбудеться викид розплаву. При цьому продукти конденсації можуть використовуватись як дисперсний матеріал в окремих прикладних застосуваннях, так і відразу наноситись на поверхню, що модифікується.

Для всіх випадків технологічного застосування СРЕП властивою є зміна фізичних характеристик твердотільної мішені так, що, в разі частотного режиму опромі-

нення, постає необхідність встановлення особливостей радіаційно-стимульованих перетворень. Слід зазначити, що, оскільки, густина струму СРЕП характеризується високим значенням (біля 2 кА/см^2) та нерівномірністю в перетині близько 30%, важливою є розробка механізмів керування розподілом поглиненої дози, та встановлення особливостей зміни характеристик мішені в околі впливу пучка.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дослідження, які склали зміст дисертаційної роботи були виконані в Інституті електрофізики та радіаційних технологій НАН України в рамках таких держбюджетних науково-дослідницьких тем: Дослідження ядерних, радіаційних та електрофізичних процесів і розвиток на їх основі ядерних і радіаційних технологій (2005-2007), № держреєстрації 105U000142; Дослідження впливу радіаційних перетворень на експлуатаційні та структурні характеристики металів і сплавів (2008), № держреєстрації 0108U007890; Дослідження явищ розсіяння і поглинання прискорених частинок в ядерних і радіаційних процесах. Розробка наукових основ електрофізичних технологій (2008-2012), № держреєстрації 0108U000212; Вплив структурних параметрів на радіаційну стійкість низьколегованих мідно-хромових і алюмінієвих сплавів для ядерної енергетики (2011-2012), № держреєстрації 0111U008185. В усіх науково-дослідних роботах здобувач брав участь як виконавець.

Мета і завдання досліджень. Метою роботи є: вирішення науково-технічної задачі, яка полягає у встановленні закономірностей модифікації структури і електрофізичних властивостей сплавів Д16, 12Х21Н5Т, 08Х18Н10Т та електротехнічної міді, що опромінюються трубчастим СРЕП в режимі абляції.

Для досягнення цієї мети необхідно було вирішено такі завдання:

- встановити закономірності зміни макроскопічних електрофізичних характеристик мішеней, виготовлених з електротехнічної міді та сплаву Д16, при опроміненні трубчастим СРЕП а також визначити особливості його впливу на електронну структуру;
- встановити особливості зміни зони енерговиділення пучка при взаємодії з електромагнітними полями, які виникають у мішені і приміщеневому оснащенні внаслідок імпульсного характеру трубчастого СРЕП;
- визначити поле розлітання крапельної фази мішеней, які розпилюються трубчастим СРЕП;
- визначити закономірності зміни механічних і структурних властивостей досліджуваних матеріалів в зоні дії трубчастого СРЕП.
- встановити особливості механізмів руйнування зразків досліджуваних матеріалів, опромінених трубчастим СРЕП.

Об'єкт дослідження – зразки, виготовлені з електротехнічної міді, сплавів Д16, 12Х21Н5Т, 08Х18Н10Т, опромінені трубчастим сильнотрумовим релятивістським електронним пучком.

Предмет дослідження - електрофізичні, механічні та структурні властивості мішеней, фазовий склад зразків зі сплавів Д16, 12Х21Н5Т, 08Х18Н10Т та електротехнічної міді, опроміненіх трубчастим сильнотрумовим релятивістським електронним пучком.

Методи дослідження – комплекс експериментальних та аналітичних методів, який включає метод рентгенівської дифракції (рентгенівський дифрактометр ДРОН - 3), метод растрової електронної мікроскопії (растровий електронний мікроскоп JEOL JSM-840), металографічні методи (оптичний мікроскоп МИМ-7, мікротвердомір PMT-3), метод фотоелектронної спектроскопії (спектрометр XPS-800 Kratos), метод сегментації зображень, вихорострумовий метод.

Наукова новизна одержаних результатів:

1. Вперше було запропоновано фізико-технологічне обґрунтування можливості використання ефекту електродинамічної взаємодії з примішеним оснащенням при опроміненні твердотільних мішеней з метою ущільнення стінки трубчастого сильнотрумового релятивістського електронного пучка.

2. Вперше встановлено, що опромінення трубчастим сильнотрумовим електронним пучком приводить до зміни спектра валентних електронів сплаву Д16, яка полягає як у зменшенні зернової структури так і зменшенні енергії зв'язку валентних електронів. Показано, що електропровідність опроміненого сплаву зменшується на 5% в порівнянні з вихідним зразком. При цьому серед чинників, які впливають на провідність матеріалу, може бути як подрібнення зернової структури та сегрегація на поверхні зерен легуючих елементів, так і зміна спектра валентних електронів.

3. Вперше на прикладі зразків нержавіючих сталей 12Х21Н5Т та 08Х18Н10Т встановлено ефект утворення шаруватої структури в околі зони кратеру, що виникає внаслідок опромінення трубчастим сильнотрумовим електронним пучком. Встановлені закономірності перерозподілу легуючих елементів в області, яка була переплавлена під дією пучка. Вивчено особливості зміни мікроструктури сталей в зоні переплаву. Встановлений перерозподіл фазового складу опромінених сталей. Показано, що мікротвердість зразків нержавіючих сталей після опромінення стає не однакою за перетином зразка, так найбільше її значення спостережене для зони термічного впливу, де утворюються мартенситні структури.

4. Вперше встановлені закономірності просторового розподілу крапельної фази при електронно-пучковій абляції мідних мішеней та вивчено зміни, які відбувалися у зерновій структурі електротехнічної міді в околі зони опромінення трубчастим си-

льнострумовим релятивістським електронним пучком. Показано, що структурні зміни, зумовлені опроміненням, проявляються у відмінностях механізмів руйнування ділянок зразка в залежності від їх відстані від поверхні, яка підлягала дії трубчатого СРЕП. Встановлено, що в зоні впливу пучка мікротвердість збільшується на 20%, а електропровідність цього шару зменшується на 7% в порівнянні з вихідним зразком.

Практичне значення одержаних результатів полягає у такому:

Одержані результати з модифікації приповерхневих шарів нержавіючої сталі, зокрема з підвищення її ерозійної стійкості, можуть бути використані для виготовлення електродних систем озонаторів на коронному розряді, які працюють без додаткового охолодження та осушення повітря.

Розраховано та створено примішеневе оснащення, яке дає можливість регулювати розподіл дисипації енергії в твердотільних мішенях, та впливати на процеси генерації ударних хвиль, модифікації поверхні і масопереносу речовини. Розроблено та створено спеціалізоване програмне забезпечення для чисельного моделювання впливу елементів примішеневого оснащення на траєкторії руху прискорених релятивістських електронів. Експериментально та із чисельного експерименту було виявлено ущільнення зони випаровування опроміненої мішені при використанні примішеневого оснащення. Визначені оптимальні параметри основних елементів цього оснащення. Це може мати практичне значення для одержання заданого розподілу густини енергії у мішені.

Розроблено та створено схему вимірювання імпульсів електричного струму, яка дає можливість встановлювати кореляційні залежності з імпульсами динамічних навантажень, які генеруються при опроміненні твердотільних мішеней трубчастими сильнострумовими релятивістськими електронними пучками, головним елементом якої є вимірювальний шунт. Розроблений коаксіальний стрижневий шунт для вимірювання імпульсних струмів у електрофізичних установках дає можливість вимірювати струми амплітудою до 75 кА та фронтом 0,4 нс. Чутливість шунта – 350 мВ/кА. Шунт може бути застосований при впровадженні радіаційних технологій на основі імпульсних пучків електронів для модифікації властивостей електропровідних матеріалів.

Розроблений пристрій для вимірювання електропровідності, принцип дії якого заснований на вихорострумовому методі. З його використанням можна ідентифікувати зміни електропровідності тонких шарів в межах 1%, з просторовим розрізненням 3 мм². Ці результати можуть бути використані для виготовлення контролюючої та вимірювальної апаратури.

Розроблено спеціалізоване програмне забезпечення для кількісної оцінки зображень мікроскопічних знімків, яке дає можливість класифікувати режими конденсації.

сації речовини, що випаровується з мішеней опромінених трубчастими сильнострумовими релятивістськими електронними пучками. Фольги та плівки з нанесеними на них продуктами конденсації твердотільних мішеней, опромінених трубчастим СРЕП можуть бути використанні як біметалічні пристрої для мікропереміщень, як захисні самовідновні пристрої від перегріву та перевищення сили струму.

Практична цінність результатів дисертації підтверджена актами спільних випробувань на підприємствах НВФ «Харків-Прилад», «Харківська електротехнічна компанія», ТОВ «Ергос», які спеціалізуються на виготовленні обладнання, приладової бази та автоматизації електрофізичних та радіаційних процесів.

Особистий внесок дисертанта полягає у безпосередньому одержанні основних результатів експериментів та виконанні їх теоретичного опису. Дисертант особисто розробив та апробував сильнострумовий імпульсний шунт для вимірювання струму СРЕП, та вихорострумовий накладний перетворювач для вимірювання електропровідності зразків. Запропонував методику та розробив програмне забезпечення з обробки знімків продуктів розльоту та конденсації матеріалу мішені. Сформулював задачу з розрахунку траєкторій СРЕП у дрейфовому проміжку для того, щоб можна було вибрати оптимальну геометрію примішеневого оснащення та чисельно її розв'язав. Дисертант особисто підготував та дослідив зразки для металографічних, рентгеноструктурних, мікроскопічних досліджень. Крім того, в усіх опублікованих наукових працях дисертант брав безпосередню участь у проведенні аналізу, тлумаченні та обговоренні результатів експерименту, оприлюдненні результатів досліджень на вітчизняних і міжнародних конференціях та написанні статей.

Апробація результатів дисертації.

Результати досліджень, які склали основу дисертації доповідалися і обговорювалися на: 7-ой Международной конференции. «Физические явления в твердых телах» (Харьков, 2005); XVII Международной конференции по физике радиационных явлений и радиационному материаловедению (Алушта, 2006); Международном симпозиуме «Перспективные материалы и технологии» (Витебск, 2009); XXI International Workshop on Charged Particle Accelerators (Alushta, 2009); Научно-технической конференции «Компьютерное моделирование в наукоёмких технологиях» (Харьков, 2010); Четвертій Міжнародній науковій конференції «Фізико-хімічні основи формування і модифікації мікро- та наноструктур» (Харків, 2010); International conference Stress and texture investigations by means of neutron diffraction (Dubna, 2011); IV Высших курсах стран СНГ для молодых ученых, аспирантов и студентов по современным методам исследований наносистем и материалов «Синхротронные и нейтронные исследования наносистем» (Дубна, 2011).

Публікації. Основні результати досліджень, включених у дисертацію, опубліковані у 14 наукових працях, у тому числі у 7 статтях у спеціалізованих журналах, у 1 праці конференції та у 6 тезах доповідей конференцій.

Структура та обсяг дисертації. Дисертаційна робота складається із вступу, літературного огляду з теми дослідження, чотирьох оригінальних розділів, висновків та списку літератури з 112 найменувань. Дисертація викладена на 151 сторінці, містить 63 рисунок та 12 таблиць.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовано актуальність теми дисертаційної роботи, її зв'язок з науковими програмами і темами, сформульовані мета та основні завдання роботи, наукова новизна та практичне значення одержаних результатів, наведено дані про особистий внесок дисертанта, а також відомості про апробацію роботи та публікації за темою дисертації.

У **першому розділі «Літературний огляд»** проведено аналітичний огляд літератури за темою дисертаційної роботи. Проаналізовано ефекти покращення експлуатаційних властивостей нержавіючих сталей, модифікованих дією сильнострумових електронних пучків, зокрема, корозійної стійкості, мікротвердості. Також проаналізовано їх зв'язок з фізичними характеристиками – зміною зернової структури, фазового складу тощо. Наведено основні методи одержання ультрадисперсних порошків шляхом розпилення матеріалів під дією концентрованих потоків енергії. Проаналізовані відмінності та спорідненості в фізичних процесах, що відбуваються при впливі СРЕП та інших методів передачі енергії (імпульси струму на дротинки, лазерне випромінювання, іонні пучки, плазмові потоки). Описано основні процеси кратероутворення та викиду розплаву металевих мішеней при обробці їх сильнострумовими електронними пучками. Показано, що при взаємодії сильнострумових пучків з конденсованими середовищами мають місце процеси, які змінюють властивості матеріалів в приповерхневому шарі в результаті комплексного впливу радіації, теплової енергії, акустичних хвиль. Зроблено огляд наявних твердотільних комутаторів (SOS-діодів), застосування яких дає можливість здійснити розроблення нових потужних імпульсних прискорювачів, які працюють у частотному режимі. Відсутність в таких пристроях газорозрядних комутаторів знімає обмеження по частоті проходження імпульсів. Зроблено висновок, що використання трубчатих СРЕП для модифікації структури, механічних властивостей, фазового складу та електрофізичних властивостей матеріалів потребує детального систематичного вивчення радіаційно-стимульованих змін в околі зони дії пучка, а також змін комплексу їх фізичних характеристик.

У другому розділі «Матеріали та методики експериментів» наведені основні характеристики досліджуваних матеріалів – електротехнічної міді, нержавіючих сталей 12Х21Н5Т та 08Х18Н10Т.

З метою підвищення густини енергії, що виділяється на поверхні мішені, і забезпечення більшої нерівномірності поля опромінення зразків мішеней, виготовлених із досліджуваних матеріалів, був використаний трубчастий сильноточовий релятивістський електронний пучок, з такими параметрами: енергія електронів $\sim 0,5$ МеВ, струм пучка ≤ 2 кА, тривалість імпульсу близько 5 мкс, зовнішній діаметр пучка становив близько 40 мм, товщина стінки пучка – 2...3 мм, густина енергії, що виділялась на поверхні опроміненої мішені в режимі абляції, досягала ~ 1 кДж/см² (повна енергія пучка – 5...10 кДж). Мішені опромінювалися трьома імпульсами у вакуумній камері прискорювача при тиску $10^{-4} \dots 10^{-5}$ торр.

Для визначення параметрів імпульсного струму електронного пучка був розроблений сильноточовий стрижневий імпульсний шунт. Шунт має такі характеристики: амплітудне значення струму 75 кА, мінімальна тривалість фронту імпульсу 0,6 мкс.

Для того щоб контролювати якість порошків, а саме розміри їх частинок, був запропонований модифікований метод сегментації растрових знімків, одержаних з використанням растрового електронного мікроскопа.

Завдяки використанню цього алгоритму одержано достовірні дані щодо кутового розподілу розлітання частинок у приміщеневому оснащенні в залежності від їх розмірів.

Були обрані фрагменти трьох ділянок осадження продуктів абляції, які знаходяться на різному віддаленні від мішені, що випаровується, та оцінена статистика їх розподілу за розмірами зерен і наявності крапельних включень.

Групування елементів площі покриття за розмірами проводилось з використанням розробленого програмного забезпечення. На ділянці, яка найближче розташована до мішені, краплинна складова вища, ніж у більш віддаленої ділянки. Разом з тим, великі краплі досягають і більш віддалених ділянок камери, тоді як речовина, що виноситься в парогазовій фазі, конденсується переважно поблизу мішені.

Третій розділ «Електрофізичні процеси при модифікації металів та сплавів, опромінених трубчастим сильноточовим релятивістським електронним пучком» дисертаційної роботи присвячений опису конструкції приміщеневого оснащення та його впливу на траєкторії електронного пучка у вакуумному діоді.

Для керування зоною найбільшого енерговиділення було запропоновано приміщеневе оснащення, зовнішній вид елементів якого наведено на рис.1.

Для розрахунку траєкторій трубчастого сильноточного релятивістського електронного пучка був використаний підхід Лагранжа, тобто метод великих частинок. Для розрахунку електромагнітного поля був використаний метод скінчених елементів. Був складений прикладний пакет обчислення електромагнітних полів і траєкторій електронного пучка на мові програмування C++ із застосуванням технологій OpenMP, OpenGL і CUDA. Розрахунок одного проходження пучком дрейфової області прискорювача (довжиною 0,25 м і кількістю частинок близько $10^4 \dots 10^5$) тривав близько години. Модельний електронний трубчастий пучок мав такі параметри: струм пучка 2 кА; енергія частинок 300 кеВ. Було проведено модельні експерименти з різними конфігураціями оснасток з виявлення найбільш оптимальної конструкції, що дає можливість одержувати найбільшу густину енергії на поверхні зразків. Найбільш прийнятною виявилась конфігурація, перетин якої зображено на рис.2. Було встановлено, що оптимальними є такі співвідношення: $d_{in} \approx 0,9d_b$, $l_{in} \approx 3d_b$, $d_{ex} \approx 1,3d_b$, $l_{ex} \approx 3,5d_b$ де d_{in} – діаметр верхньої основи внутрішнього конуса, l_{in} – відстань від верхньої основи внутрішнього конуса до підкладки, d_{ex} – діаметр верхньої основи зовнішнього конуса, l_{ex} – відстань від верхньої основи зовнішнього конуса до підкладки, d_b – діаметр пучка. Обидва конуса встановлюються на струмоприймальному колекторі прискорювача.

Для вимірювання електропровідності опромінених мішеней був розроблений вихорострумний накладний вимірювальний датчик. Він має високу чутливість до зміни електричного опору та дає можливість здійснити вимірювання електропровід-



Рис. 1. Елементи примішенового оснащення.

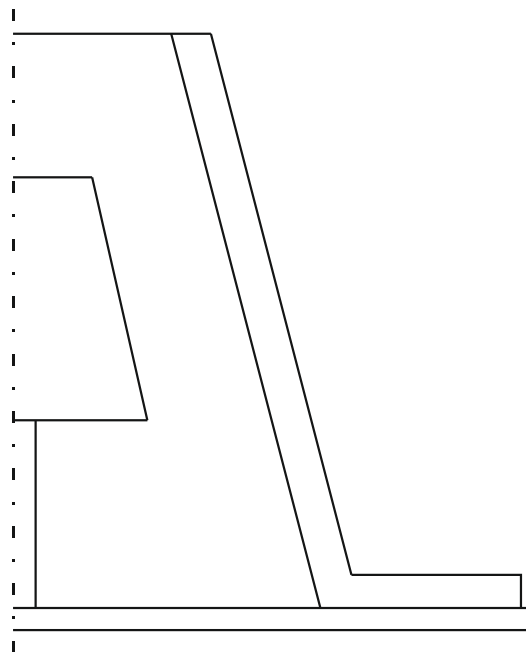


Рис. 2. Перетин обраної примішенового оснащення.

ності тільки приповерхневого опроміненого шару зразків. Окрім того, оскільки багато чинників впливають на електропровідність металів, зокрема, температура, склад, термічна обробка, мікроструктура, розмір зерна, твердість та залишкові напруження, і через це, вихорострумний вимірювач може бути використаний для моніторингу складу і різних твердотільних характеристик за умови якщо вони впливають на електропровідність в достатній мірі, щоб забезпечити необхідний контраст.

У четвертому розділі «Модифікація зразків електротехнічної міді опроміненних трубчастим сильноточним релятивістським електронним пучком» вивчалися структурні перетворення, механічні та електротехнічні характеристики електротехнічної міді, опроміненої трубчастим СРЕП.

Внаслідок переплаву в поверхневій області утворюється шар матеріалу, який погано протравлюється хімічним травником, цей шар більш яскраво виділений у верхніх частинах зображень, наведених на рис.3. У зоні, де спостерігалось плавлення матеріалу, відбулося дуже сильне подрібнення зернової структури. Під переплав-

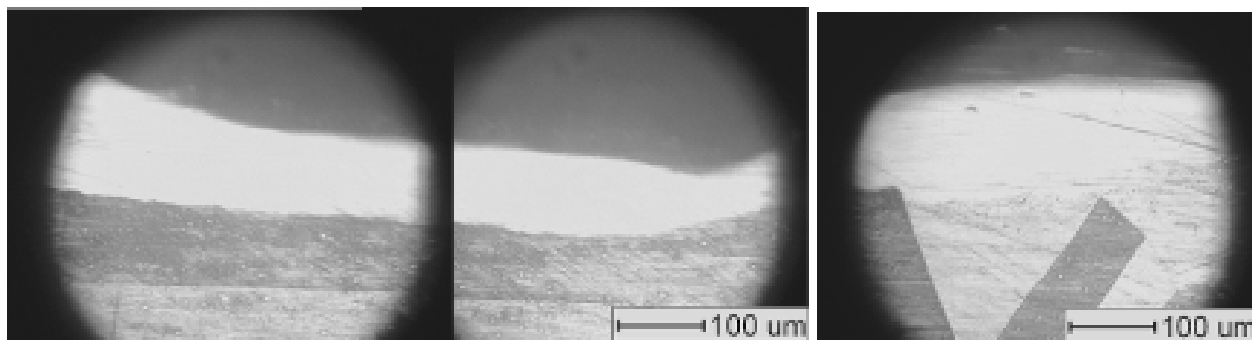


Рис.3. Вид мікроструктури зразка електротехнічної міді, опроміненого трубчастим СРЕП.

леним шаром знаходиться зона термічного впливу, в якій передана пучком енергія вже не достатня для плавлення, однак достатня для проходження твердофазних перетворень. Глибина цієї зони для міді може бути більше глибини зони переплавлення. На деякій глибині від опроміненої поверхні (200...300 мкм) не помітно жодної дії трубчатого СРЕП на зернову структуру зразка.

На рис.4 представлено фрактограми зламів зразків з електротехнічної міді до і після опромінення трубчастим СРЕП. Порівнюючи фрактограми зламів неопроміненого і опроміненого зразків можна відзначити, що для опроміненого зразка чітко виділяються паралельні борозенки рельєфу, які перпендикулярні напрямку трубчатого СРЕП, що є смугами множинного ковзання. У неопроміненому зразку домінуючим механізмом руйнування є в'язке руйнування. Для опроміненого зразка можна виділити схематично три області, в яких механізми руйнування різні, у залежності від того, чи є це зоною переплаву, зоною термічного впливу або зоною, що не піддавалася впливу пучка.

Так для області переплаву помітно крихке руйнування, що є наслідком виникаючих термопружних напружень, спричинених високими градієнтами охолодження. У зоні термічного впливу відбувся наклеп мідного зразка, внаслідок ударно-хвильової дії пучка, що привело до зниження його пластичності. Для більш глибоких областей спостерігається вже пластичний злам. Незважаючи на те, що для міді не характерно крихке руйнування, має місце істотне розходження в механізмах зламу вихідного і обробленого пучком матеріалу.

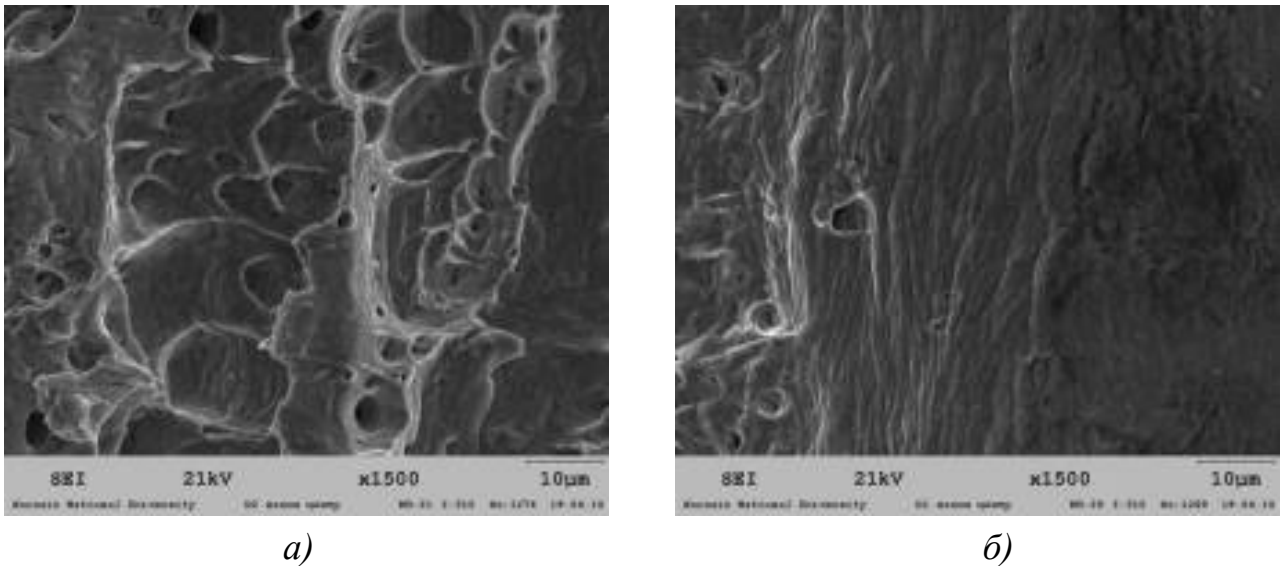


Рис.4. Фрактограми зламів зразків електротехнічної міді при збільшенні $\times 1500$ (а – неопромінений зразок; б - опромінений зразок).

Проведені вимірювання розподілу значень мікротвердості (табл.1) на поперечному зрізі мішені в зоні переплаву (ЗП), у зоні термічного впливу (ЗТВ) пучка, а також неопроміненому зразку показують, що опромінення трубчастим СРЕП, з розробленим приміщеневим оснащенням, дає можливість досягти високих значень зміцнення в зоні переплаву. Це пов'язано з підвищеними значеннями тиску, який виникає в мішені. У зоні термічного впливу відмінність значень мікротвердості вже не настільки однозначна. Досить показовим є більш виражений розкид значень мікротвердості на вихідному матеріалі, що дає підставу зробити висновок про формування внаслідок опромінення рівновісної дрібнозеренної структури.

Таблиця 1

Розподіл значень мікротвердості в різних зонах дії пучка

Область вимірювання	Значення мікротвердості по глибині мішені, МПа		
	ЗП	ЗТВ	вихідна
внутр. зона кратера	807	889	656
центр. зона кратера	906	732	494
зовн. зона кратера	889	732	732

У п'ятому розділі «Модифікація зразків нержавіючих сталей опроміненням трубчастим сильнотрумовим релятивістським електронним пучком» вивчені структурно-фазові перетворення та встановлені характеристики корозійнос-тійких сталей 12X21H5T, 08X18H10T.

На рис.5 і 6 показано поперечний переріз мішеней зразків сталі марок 12X21H5T і 08X18H10T відповідно при одному й тому ж збільшенні. Середня

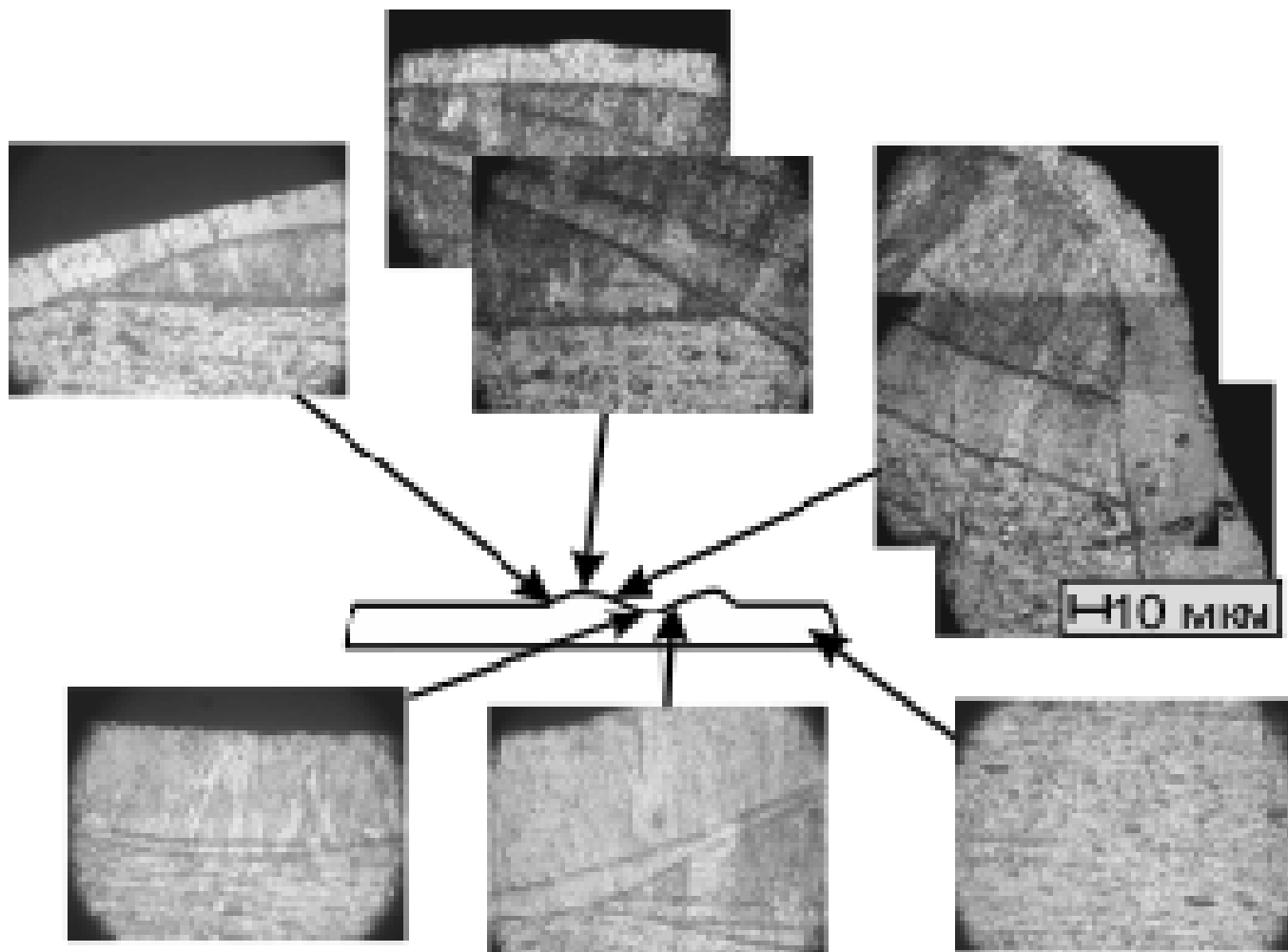


Рис.5. Панорама шліфа сталі марки 12X21H5T.

товщина переплавленого шару складає близько 15 мкм. Його структура істотно від-різняється від серцевини матеріалу. Існує відмінність у товщині зони термічного впливу в залежності від ділянки кратера. У зоні берегів кратера і в зоні наплавів, до-сить товста зона переплаву й дуже незначна зона термічного впливу (перехідна зо-на). Для ділянок донної частини, з яких відбувався викид матеріалу, спостерігається неглибока зона переплаву, яку набагато перевищує зона термічного впливу. Це сто-сується зразків обох досліджених матеріалів. Очевидно, що зона переплаву відпові-дає області максимального поглинання енергії пучка, тоді як у сусідніх областях значення питомої поглиненої енергії було достатнім лише для ініціювання рекрис-

талізації, що і забезпечило утворення більш великої області термічного впливу. Причиною виникнення смуг, що відтворюють криві, якими окреслюються межі кратера, може бути як в накладання зон впливу від попередніх імпульсів, так і в ліквідація по межі ізоліній значень температури, що відповідають межі розчинності легуючих елементів. Не можна виключати можливість спостереження наслідків електропластичного ефекту, який полягає у динамічному впливі імпульсів струму на речовину мішені.

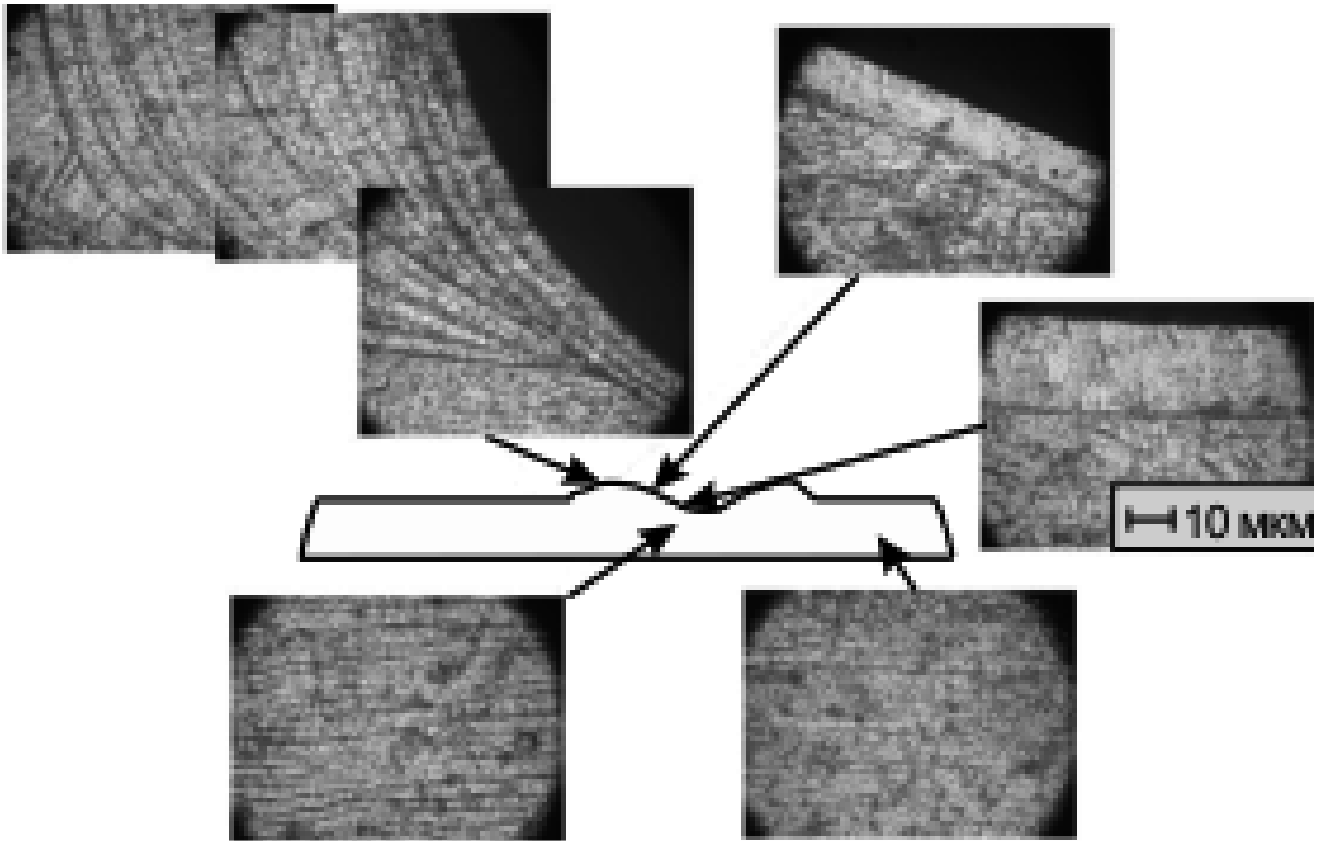


Рис.6. Панорама шліфа сталі марки 08X18H10T.

Результати вимірювання мікротвердості зразків нержавіючих сталей представлені в табл.2. Вони показують загальну тенденцію до збільшення мікротвердості в

Таблиця 2

Значення мікротвердості сталей

Зона	Мікротвердість сталі 12X21H5T, МПа	Мікротвердість сталі 08X18H10T, МПа
Зона комплексного впливу	2530	1900
Зона термічного впливу	3450	2280
Зона плавлення	2900	2120
Неопромінений зразок	3200	2200

зоні термічного впливу, яка викликана утворенням мартенситних структур (на рис.5 і 6 можна бачити мікроструктури голчастого виду). Оскільки імпульсний струм електронного пучка, що проходив через мішень, мав амплітудне значення порядку одиниць кА, то ще одним з можливих чинників, які впливали на структурно-фазові перетворення, є електропластичний ефект, що супроводжував поширення деформаційних (ударних) хвиль в матеріал мішені. Внаслідок цього ефекту очевидно відбулося гальмування γ - α перетворення, причиною якого є підвищення пластичності аустеніту. Електропластичним ефектом також може бути пояснено низьке значення мікротвердості в зоні комплексного впливу.

Кількісний фазовий аналіз (рис.7 та в табл.3) дав можливість виявити, що для двох марок сталей у приповерхневому шарі до опромінення їх

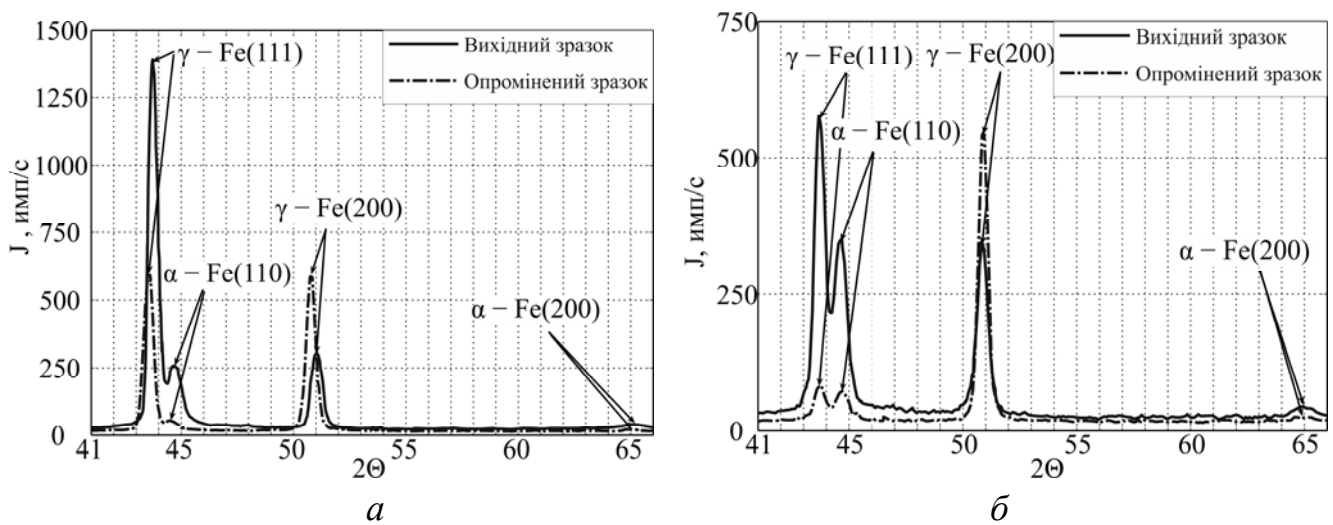


Рис.7. Фрагменти дифрактограм сталей марок 08X18H10T (а) та 12X21H5T (б).

трубчатим СРЕП спостерігалось дві фази α -Fe і γ -Fe. Після опромінення відбувся перерозподіл у співвідношенні фаз у сторону збільшення кількості γ -Fe.

Аналіз фрактограм зламів (рис.8) показав, що переплавлений шар має стовбчасту структуру, наявність якої свідчить про те, що в ньому відбувалася кристалізація з розплаву. У зоні термічного впливу видно фасетки середнім розміром 1 мкм, тоді як у вихідному зразку розмір фасеток на порядок більше для обох марок сталей.

Таблиця 3

Кількісний фазовий аналіз з урахуванням текстуруваності зразка

Марка	Неопромінений зразок		Опромінений зразок	
	Аустеніт, %	Ферит, %	Аустеніт, %	Ферит, %
12X21H5T	85	15	93	7
08X18H10T	87	13	97	3

Для з'ясування зміни вмісту легуючих елементів у приповерхневому шарі було проведено елементний аналіз при дослідженні шліфів опромінених зразків. Дані, одержані в результаті проведення елементного аналізу показують тенденцію до зниження вмісту в приповерхневій області хрому і нікелю. Цей перерозподіл елементного складу призводить до зміни кінетики плавлення сталей під дією електронного пучка.

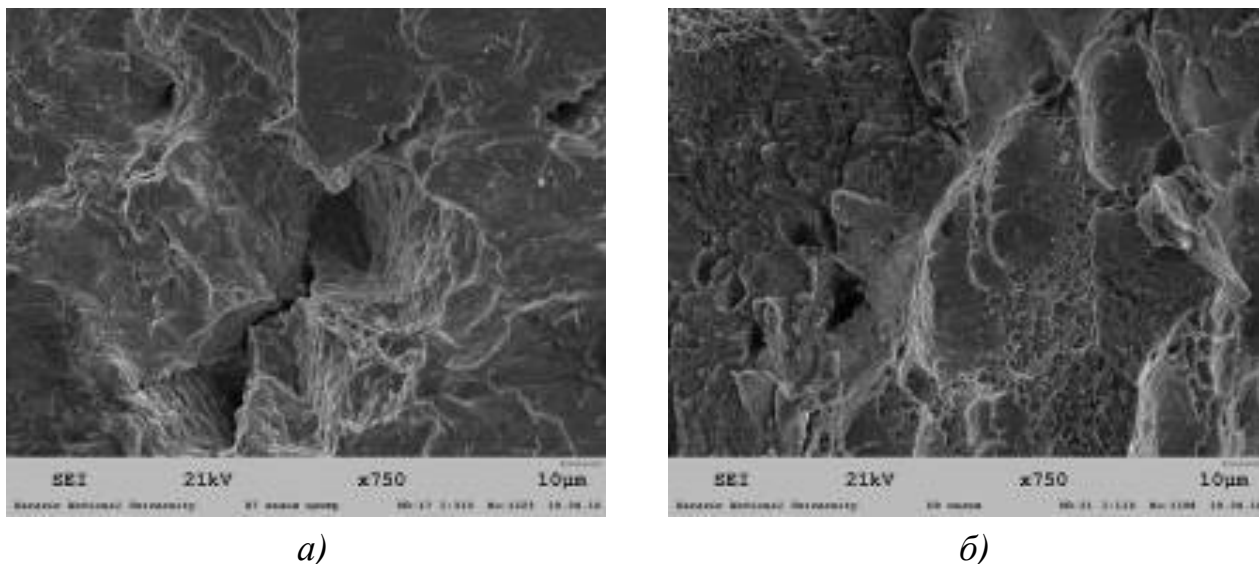


Рис.8. Фрактограма приповерхневої області сталюого зразка при збільшенні 750 (а – неопромінений; б - опромінений).

ВИСНОВКИ

В дисертації вирішено науково-технічну задачу, яка полягає у встановленні закономірностей модифікації структури, визначенні механічних властивостей, фазового складу і електрофізичних властивостей сплавів Д16, 12Х21Н5Т, 08Х18Н10Т та електротехнічної міді, що опромінюються трубчастим сильноточним релятивістським електронним пучком в режимі абляції. Основні наукові і практичні результати є такими:

1. Розроблено і створено при мішеневе оснащення, яке дає можливість регулювати просторовий розподіл енергії випромінювання в приповерхневому шарі зразків, опромінюваних трубчастим сильноточним релятивістським електронним пучком.
2. Розроблено та створено устаткування для вимірювання імпульсного електричного струму, що генерується в мішені, яке дає можливість встановлювати кореляційні залежності з імпульсами динамічних навантажень, що генеруються при опроміненні твердотільних мішеней трубчастим сильноточним релятивістським електронним пучком.

3. Встановлено, що внаслідок опромінення сплаву Д16 трубчастим сильно-струмовим релятивістським електронним пучком, відбувається зміна спектру валентних електронів, що приводить до зменшення значення електропровідності у зоні переплаву на 5%.

4. Встановлено, що при синтезі продуктів абляції, зумовленої опроміненням металевих мішеней трубчастим сильнострумовим електронним пучком, існує низка чинників, які впливають на поле швидкостей викиду речовини, її дисперсність і структуру покриття. Серед встановлених чинників основними є: просторовий розподіл поглиненої дози; відстань від точки конденсації в області випаровування; модифікація структури приповерхневого шару мішені в результаті дії послідовності імпульсів трубчастого сильнострумового релятивістського електронного пучка.

5. Встановлено, що після однократного опромінення електротехнічної міді трубчастим сильнострумовим релятивістським електронним пучком електропровідність переплавленого шару зменшується на 7%. Встановлено розподіл мікротвердості в поперечному перерізі зразка – найбільш зміцнена зона відповідає зоні плавлення і зоні термічного впливу. Показано, що зміни в структурі проявляються у зміні мікротвердості і призводять до відмінностей у механізмах руйнування мідних зразків. Встановлено, що в зоні переплаву мідного зразка переважаючим механізмом руйнування є крихке руйнування, в той же час для іншої частини зразка спостерігається в'язке руйнування.

6. Визначено, що при опроміненні нержавіючої сталі 12Х21Н5Т, 08Х18Н10Т послідовністю імпульсів випромінювання, в околі зони кратера утворюється шарувата структура, смуги якої відповідають розташуванню ізотемпературних ліній. Змінюються механізми руйнування зразків в опроміненій області. Так в зоні переплаву та зоні комплексного впливу переважаючим механізмом є в'язке руйнування, в той же час в зоні термічного впливу переважає крихке руйнування. Вплив трубчастого сильнострумового релятивістського електронного пучка на нержавіючі сталі в режимі абляції призводить до збіднення поверхневого шару легуючими елементами, проходження мартенситних перетворень у приповерхневому шарі (внаслідок високих швидкостей охолодження матеріалу) з підвищеною мікротвердістю, γ - α перетворенням.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ РОБІТ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Арсенюк В.В. Стимулирование неоднородностей в сильнотоочных пучках электронов и их влияние на процессы массопереноса в облучаемых мишенях / В.В. Арсенюк, Н.И. Базалеев, С.Е. Донец, В.Ф. Клепиков, В.В. Литвиненко, Ю.Б. Полторацкий, А.Г. Пономарев, В.В. Уваров, В.Т. Уваров // Вопросы атомной

науки и техники, сер. Физика радиационных повреждений и радиационное материаловедение. – 2007. - №6(91). - С.124-127.

2. **Донец С.Е.** Стержневой шунт для измерения сильных токов с фронтами микросекундной длительности / С.Е. Донец, В.В. Леденев, В.В. Литвиненко // Вестник НТУ ХПИ, тематический выпуск «Техника и электрофизика высоких напряжений». - №44. - 2008. - С.39-44.

3. **Донец С.Е.** Оптимизация энергоснабжения сильноточного релятивистского электронного пучка при модификации поверхности нержавеющей стали / С.Е. Донец, В.Ф. Клепиков, В.В. Литвиненко, А.Г. Пономарев, В.Т. Уваров // Физическая инженерия поверхности. – 2010. – Т.8. – №3. – С.231-235.

4. Лонин. Ю.Ф. Кавитационная стойкость металлических покрытий, наплавленных сильноточным релятивистским электронным пучком / Ю.Ф. Лонин, А.Г. Пономарев, В.Т. Уваров, Н.И. Базалеев **С.Е. Донец**, В.Ф. Клепиков, В.В. Литвиненко, Е.М. Прохоренко // Физическая инженерия поверхности. – 2010. – Т.8. – №4. – С. 326-332.

5. Белозеров В.В. Физико-механические свойства сталей 12Х21Н5Т и 08Х18Н10Т, облученных сильноточным трубчатым релятивистским электронным пучком в режиме абляции / В.В. Белозеров, **С.Е. Донец**, В.Ф. Клепиков, В.Ф. Кившик, В.В. Литвиненко, Ю.Ф. Лонин, А.Г. Пономарев, В.Т. Уваров // Физическая инженерия поверхности. – 2011. – Т.9. – №2. – С.170-175.

6. **Донец С.Е.** Влияние облучения сильноточными релятивистскими электронными пучками на электропроводность сплава Д16 / С.Е. Донец, В.В. Литвиненко, Ю.Б. Полторацкий, А.Г. Пономарев, В.Т. Уваров // Восточно-европейский журнал передовых технологий. – 2011. - №4/5 (52). – С. 14-17.

7. **Донец С.Е.** Абляция медных мишеней при облучении сильноточным трубчатым пучком релятивистских электронов / С.Е. Донец, В.Ф. Кившик, В.Ф. Клепиков, В.В. Литвиненко, А.Г. Пономарев, В.Т. Уваров // Физика и химия обработки материалов. - 2011. - № 2. - С. 8-12.

8. Базалеев Н.И. Особенности формирования зоны радиационного воздействия релятивистского пучка электронов в цилиндрическо – коаксиальном диоде / Н.И. Базалеев, **С.Е. Донец**, В.В. Литвиненко, В.Ф. Клепиков, В.Е. Новиков, А.Г. Пономарев, В.В. Уваров, В.Т. Уваров // Материалы 7-ой Межд. конф. "Физические явления в твердых телах". - Харьков. – 2005. - С 126.

9. Арсенюк В.В. Стимулирование неоднородностей в сильноточных пучках электронов и их влияние на процессы массопереноса в облучаемых мишенях / В.В. Арсенюк, Н.И. Базалеев, **С.Е. Донец**, В.Ф. Клепиков, В.В. Литвиненко, Ю.Б. Полторацкий, А.Г. Пономарев, В.В. Уваров, В.Т. Уваров // Труды XVII

Межд. конф. по физике радиац. явлений и радиац. материаловедению. – Алушта. -2006. - С 70.

10. Базалеев Н.И. Особенности осаждения продуктов газоплазменного факела, возникающего при облучении сильноточными релятивистскими электронными пучками металлических мишеней / Н.И. Базалеев, **С.Е. Донец**, В.Ф. Клепиков, В.В. Литвиненко, А.Г. Пономарев, В.В. Уваров, В.Т. Уваров // Тезисы Межд. симпозиума «Перспективные материалы и технологии». - Витебск. – 2009. – С. 89.

11. **Донец С.Е.** Оптимизация процесса испарения твердотельных мишеней сильноточным релятивистским электронным пучком / С.Е. Донец, В.Ф. Клепиков, В.В. Литвиненко, А.Г. Пономарев, В.Т. Уваров // Abstract, XXI International Workshop on Charged Particle Accelerators. – Alushta. - 2009. - P. 154.

12. **Донец С.Е.** Компьютерный анализ РЭМ изображений продуктов конденсации металлических мишеней, облучаемых сильноточными пучками электронов / С.Е. Донец, В.Ф. Клепиков, В.В. Литвиненко, А.Г. Пономарев, В.Т. Уваров // Труды Научно-технической конференции «Компьютерное моделирование в наукоемких технологиях». – Харьков. – 2010. - С. 92-94.

13. Лонин Ю.Ф. Кавитационная стойкость металлических покрытий, наплавленных сильноточным релятивистским электронным пучком / Ю.Ф. Лонин, А.Г. Пономарев, В.Т. Уваров, Н.И. Базалеев **С.Е. Донец**, В.Ф. Клепиков, В.В. Литвиненко, Е.М. Прохоренко // Матеріали четвертої Міжн. наук. конф. «Фізико-хімічні основи формування і модифікації мікро- та наноструктур». – Харків. – 2010. – С.517.

14. Lytvynenko V.V. Analysis of the mechanisms of the high-current relativistic electron beam influence on metallic materials and rocks / V.V. Lytvynenko, M.I. Bazaleev, **S.E. Donets**, Yu.F. Lonin, A.N. Nikitin, A.G. Ponomarev, V.N. Robuk, V.T. Uvarov, V.V. Uvarov // Stress and texture investigations by means of neutron diffraction: book of abstracts of the international conference. – Dubna: JINR, 2011. – P. 28.

Донец С.Є. Фізико-технологічні основи модифікації властивостей сталей 12Х21Н5Т, 08Х18Н10Т, сплаву Д16, електротехнічної міді трубчастими сильнострумовими релятивістськими електронними пучками. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 01.04.07 – фізика твердого тіла. – Інститут електрофізики і радіаційних технологій НАН України. – м. Харків. – 2012.

Дисертація присвячена встановленню закономірностей модифікації структури, механічних властивостей, фазового складу і електрофізичних властивостей сплавів Д16, 12Х21Н5Т, 08Х18Н10Т та електротехнічної міді, що опромінюються трубчастим СРЕП в режимі абляції. Встановлено, що при синтезі продуктів абляції, зумовленої впливом багаторазової дії сильнотрумових трубчастих пучків електронів на металеві мішені, існує ряд факторів, що впливають на поле швидкостей викидання речовини, його дисперсність і структуру покриття. Для мідних зразків встановлено, що утворюються три зони – зона плавлення, зона термічної дії та зона де зернова структура не відрізняється від неопроміненого зразка. Встановлено розподіл мікротвердості у поперечному перерізі зразка. Показано, що зміни у структурі та мікротвердості призводять до відмінностей характеру зламів зразків. Для зразків з нержавіючої сталі визначено, що у в околі зони кратеру утворюється шарувата структура, смуги якої відповідають розташуванню ізотемпературних ліній. Вплив трубчастого сильнотрумового релятивістського електронного пучка на нержавіючі сталі в режимі абляції призводить до збіднення поверхневого шару легуючими елементами, формуванню структур приповерхневого шару з підвищеною мікротвердістю.

Ключові слова: трубчастий сильнотрумовий релятивістський електронний пучок, модифікація поверхні, мікроструктура, фазові перетворення.

Донец С.Е. Физико-технологические основы модификации свойств сталей 12Х21Н5Т, 08Х18Н10Т, сплава Д16, электротехнической меди трубчатыми сильноточными электронными пучками. - Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 01.04.07 - физика твердого тела. - Институт электрофизики и радиационных технологий НАН Украины. - г. Харьков. - 2012.

Диссертация посвящена установлению закономерностей модификации структурных, механических свойств, фазового состава и электрофизических свойств сплавов Д16, 12Х21Н5Т, 08Х18Н10Т и электротехнической меди, облученных трубчатым СРЕП в режиме абляции.

Разработана, создана и апробирована на практике примененная оснастка, которая позволяет оптимизировать выделение энергии в приповерхностном слое образца. Разработана и создана схема измерения импульсов тока электронного пучка, которая позволяет устанавливать корреляционные зависимости с импульсами динамических нагрузок, генерируемых при облучении твердотельных мишеней трубчатыми СРЕП. Опробована методика определения электропроводности облученных

образцов с помощью разработанного вихретокового накладного преобразователя. Предложена методика определения размера конденсированных частиц и разработано специализированное программное обеспечение, обеспечивающее обработку электронно-микроскопических снимков продуктов конденсации.

Установлено, что при синтезе продуктов абляции, обусловленной влиянием многократного действия сильноточных трубчатых пучков электронов на металлические мишени, существует ряд факторов, влияющих на поле скоростей выброса вещества, его дисперсность и структуру покрытия. Среди установленных факторов основными являются: пространственное распределение поглощенной дозы; расстояние от точки конденсации в области испарения; модификация структуры приповерхностного слоя мишени в результате действия последовательности импульсов трубчатого сильноточного релятивистского электронного пучка.

В результате облучения металлических материалов трубчатым сильноточным релятивистским электронным пучком (на примере сплава Д16) происходит перераспределение в спектре валентных электронов, которое состоит как в уменьшении зёрненной структуры, так и в уменьшении связи валентных электронов. Показано, что электропроводность облученного сплава уменьшается на 5% по сравнению с исходным образцом.

Установлено, что цикл импульсов трубчатого СРЭП на электротехническую медь в режиме абляции приводит к формированию неравномерно упрочненной зоны в приповерхностном слое материала. Показано, что изменения в структуре и микротвердости приводят к различиям характера изломов образцов. Установлено, что в зоне воздействия пучка микротвердость электротехнической меди увеличивается на 20%, а электропроводность данного слоя уменьшается на 7% по сравнению с исходным образцом.

В зоне термического воздействия пучка, примыкающей к области переплава, наблюдаются полосы ликвации, направления которых соответствуют расположению изотемпературных линий. В результате облучения нержавеющей стали в приповерхностных слоях изменяются механизмы разрушения в зависимости от рассматриваемой зоны воздействия пучка. Влияние трубчатого сильноточного релятивистского электронного пучка на нержавеющие стали в режиме абляции приводит к обеднению поверхностного слоя легирующими элементами, формированию структур приповерхностного слоя повышенной микротвердостью.

Ключевые слова: трубчатый сильноточный релятивистский электронный пучок, модификация поверхности, микроструктура, фазовые превращения.

Donets S. E. Physical and technological bases of modifying the properties of steels 12H21N5T, 08Kh18N10T, D16 alloy, electrical copper by tubular high-current electron beams. - Manuscript.

Thesis for a Candidate's degree in technical sciences by specialty 01.04.07 – solid state physics. - Institute of Electrophysics and Radiation Technologies NAS of Ukraine. - Kharkiv. - 2012.

The thesis is devoted to the regularities of the structural modifications, mechanical properties, phase composition and electrical properties of alloys D16, 12H21N5T, 08Kh18N10T and electrical copper irradiated by the tubular high-current relativistic electron beam ablation mode. It is established that the synthesis of products of ablation due to the influence of repeated action of high-current tubular electron beam on metal targets has several factors that affect the velocity field of ejection of matter, its dispersion and the structure of the coating. For copper samples revealed that there are three zones - melting zone, zone of thermal influence and the zone where the grain structure does not differ from non-irradiated sample. Distribution of microhardness in the cross-sectional sample is established. It is shown that changes in the structure and microhardness lead to differences in the nature of fracture patterns. For stainless steel samples is determined that the area in the vicinity of the crater formed by a layered structure, the bands of which correspond to the location isotherm lines. Effect of tubular high-current relativistic electron beam on the stainless steel in the mode of ablation leads to a depletion of the surface layer of alloying elements, formation of the structures of the surface layer with increased microhardness.

Keywords: tubular high-current relativistic electron beam surface modification, microstructure, phase changes.