

Национальная академия наук Украины  
Институт электрофизики и радиационных технологий

Модификация структурных, электрофизических и механических свойств  
металлических материалов, облученных трубчатым  
сильноточным релятивистским электронным пучком

Донец Станислав  
Евгеньевич

СИН-НАНО - 2012

# Особенности процессов модификации металлов и сплавов пучками электронов

В настоящее время предметом интенсивных исследований являются процессы изменения свойств материалов под воздействием концентрированных потоков энергии: лазерное излучение, плазменные потоки, пучки заряженных частиц. Повышенный интерес к прикладному использованию сильноточных

релятивистских

трубчатых пучков электронов активизировался в связи с развитием сильноточных твердотельных коммутаторов, позволяющих реализовывать частотные режимы обработки.

В радиационных технологиях на базе пучков электронов в качестве инструмента управления используются, как правило, внешние магнитные поля. Поскольку сильноточные импульсные пучки требуют использования магнитных полей с более высокими значениями напряженности, а также согласованности во времени воздействия этих полей, представляется целесообразным учет механизмов фокусировки пучка в результате взаимодействия с полями наводимыми в примишенной оснастке. Также важно изучить возможность использования этих эффектов для задачи управления зоной энерговыделения пучка

При электронно пучковой модификации электропроводящих материалов в

# Особенности процессов модификации металлов и сплавов пучками электронов

Воздействие трубчатого СРЭП на металлическую мишень приводит к абляционному выбросу материала, что может рассматриваться как способ получения дисперсных материалов. Следует заметить, что данные пучки представляют интерес не только как модифицирующий инструмент, но и как тестовый, т.е. моделирующий действие на материал экстремальных факторов (взрывы, ударные, температурные, радиационные воздействия) с целью определения его стойкости.

# Ускоритель электронов



Внешний диаметр пучка 40 мм.

Общий вид ускорителя

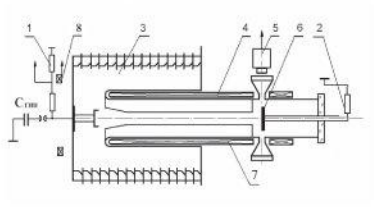
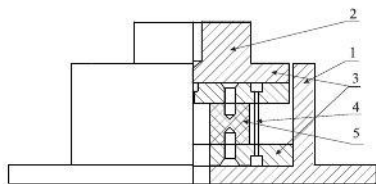


Схема магнитоизолированного диода

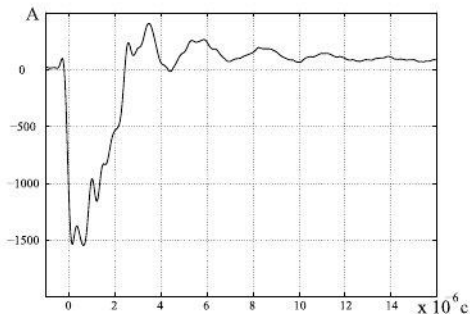
- 1 – омический делитель напряжения;
- 2 – токовый шунт;
- 3 – ускорительная колонка;
- 4 – соленоид;
- 5 – ФЭУ;
- 6 – коллектор;
- 7 – анодная вставка;
- 8 – пояс Роговского.

# Сильноточный импульсный измерительный шунт

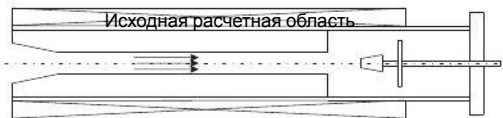
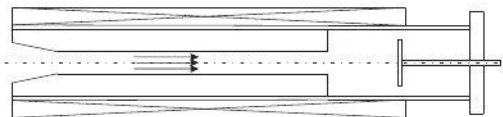


- 1 – стакан (алюминий);
- 2 – крышка (латунь);
- 3 – диски (латунь);
- 4 – нихромовые проволочки;
- 5 – керамический изолятор.

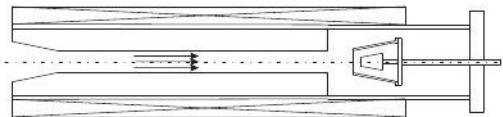
Конструкция измерительного токового шунта



# Управление зоной энерговыведения трубчатого СРЭП в мишени



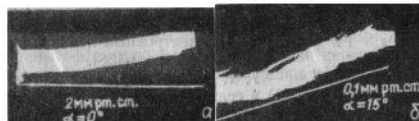
Расчетная область с внутренним конусом



Расчетная область с двумя



Общий вид отклоняющих конусов



Отклонение сильноточного электронного

лучка от проводящей поверхности

## Управление зоной энерговыделения трубчатого СРЭП в мишени

Для численного моделирования был выбран метод "больших частиц"(PIC).

Уравнение движения одной релятивистской частицы из всего ансамбля:

$$\dot{\mathbf{v}} = \frac{q}{m_0} \left( 1 - \frac{v^2}{c^2} \right)^{-3/2} \left( \mathbf{E} + \mathbf{v} \times \mathbf{B} - c^{-2} \mathbf{v} \cdot \mathbf{v} \mathbf{E} \right)$$

Основные расчетные уравнения для определения электромагнитного поля (для векторного потенциала принята нормировка по Кулону):

- Скалярный потенциал электрического поля:

$$\varepsilon \nabla^2 \phi = -\rho.$$

с граничными условиями:

1. Условие Дирихле

$$\phi = \rho, \quad (x, y, z) \in \Gamma_1.$$

2. Условие Неймана

$$\phi \cdot \mathbf{n} = q, \quad (x, y, z) \in \Gamma_2.$$

3. На границах раздела, где  $\varepsilon$  скачкообразно ~~изменяет~~ ~~значение~~, применяются условия непрерывности

$$\phi_+ = \phi_-, \quad (x, y, z) \in \Gamma_c,$$

и

$$\varepsilon_+ \phi_+ \cdot \mathbf{n} = \varepsilon_- \phi_- \cdot \mathbf{n}, \quad (x, y, z) \in \Gamma_c.$$

# Управление зоной энерговыделения трубчатого СРЭП в мишени

2

Векторный магнитный потенциал:

$$-\frac{1}{\mu} \nabla^2 A + \sigma \frac{\partial A}{\partial t} + \varepsilon \frac{\partial^2 A}{\partial t^2} = -\sigma \phi - \varepsilon \frac{\partial \phi}{\partial t} + \rho v.$$

с граничными условиями:

1. Условие Дирихле

$$A = P,$$

$$(x, y, z) \in \Gamma_1.$$

2. Однородное условие Неймана

$$n \times \nabla A = 0, \quad (x, y, z) \in \Gamma_2,$$

применяемое на плоскостях симметрии.

3. На границах раздела, где  $\mu$  скачкообразно изменяет значение, применяются условия непрерывности

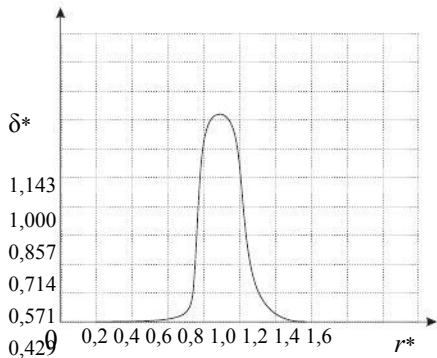
$$n \times A_+ = n \times A_-, \quad (x, y, z) \in \Gamma_c,$$

и

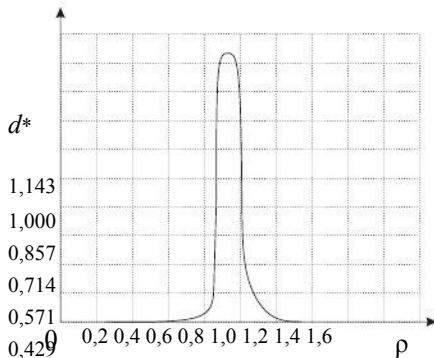
$$\frac{1}{\mu_+} n \times \nabla A_+ = \frac{1}{\mu_-} n \times \nabla A_-, \quad (x, y, z) \in \Gamma_c.$$



# Управление зоной энерговыведения трубчатого СРЭП в мишени



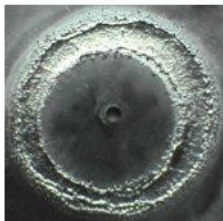
Вставка внутренний конус



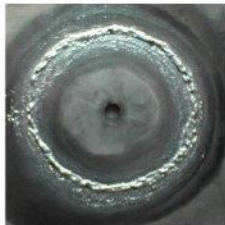
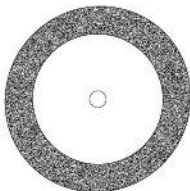
Вставки внутренний и внешний конусы

Распределение плотности тока электронного пучка на поверхности мишени

## Управление зоной энерговыведения трубчатого СРЭП в мишени



Вставка внутренний конус

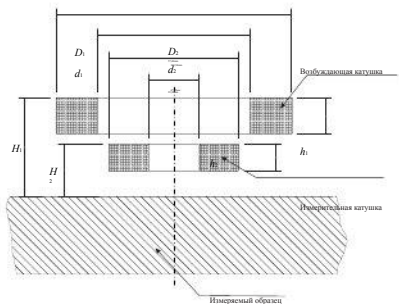


Вставки внутренний и внешний конусы

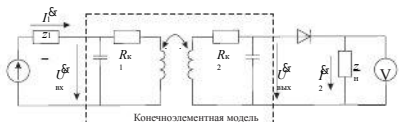


Реальный и рассчитанный следы пучка на поверхности мишеней (в одном масштабе)

# Анализ электропроводности облученных неферромагнитных мишеней



Расчетная модель вихретокового преобразователя



Расчетная схема преобразователя

$$I_2 = \frac{j\omega \sigma - \omega^2 \epsilon_0 \epsilon_{0T} A + \dots}{\epsilon - j\omega \frac{N_1}{A \cdot dS} \dots} \times \frac{1}{\mu_0 \mu_{0T}} \times A \dots = I_{\text{стор}}$$

$$I_2 = \frac{i=1S_1}{z_1 + R_1} \dots$$

$$I_2 = \frac{i=1S_1}{z_2 + R_2} \dots$$

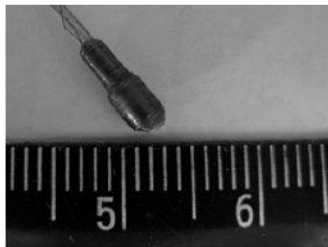
$\mathcal{E}$  – ЭДС генератора;

$z_1$  – регулируемое сопротивление;

$z_2$  – измерительное сопротивление;

$R_1$  и  $R_2$  – омические сопротивления катушек.

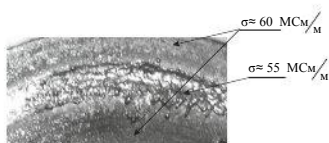
# Анализ электропроводности облученных неферромагнитных мишеней



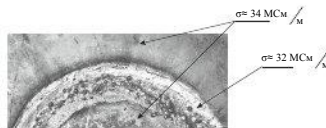
Внешний вид сборки возбуждающей и измерительной катушек



Внешний вид вихретокового датчика

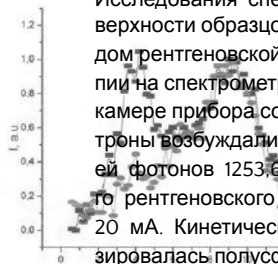


Результат измерения электропроводности электротехнической меди



Результат измерения электропроводности сплава Д16

## Анализ спектра валентных электронов облученного сплава Д16



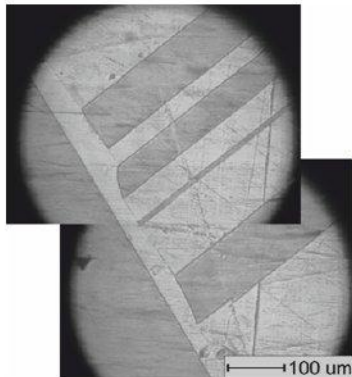
Исследования спектра валентных электронов поверхности образцов сплава Д16 проводились методом рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии на спектрометре XPS-800 Kratos. Давление в камере прибора составляло  $5 \cdot 10^{-8}$  торр. Фотоэлектроны возбуждались MgK $\alpha$ -излучением с энергией фотонов 1253,6 эВ. Параметры активирующего рентгеновского излучения:  $U = 15$  кВ,  $J = 20$  мА. Кинетическая энергия электронов анализировалась полусферическим электростатическим анализатором. Разрешение спектрометра  $\sim 1$  эВ,

точность определения энергии связи  $\sim 0,1$  эВ. Спектры валентных электронов сплава Д16 обрабатывались на компьютере по методу (Shirley), удаление прямоугольники – после облучения ушибряющего действия рентгеновской линии (итерационная развертка) и разложение сложной линии на составляющие ее компоненты. Толщина анализируемого слоя  $\sim 5$  нм. Перед установкой в вакуум поверхность образца протиралась изопропиловым спиртом. Для уменьшения слоя углеродородных загрязнений образцы подвергались ионной бомбардировке в вакууме ( $Ar^+$ ,  $E = 2, 5$  кэВ, скорость распыления 100 А/мин).

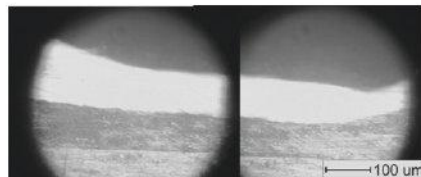
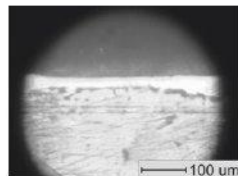
Спектры валентных электронов сплава Д16 обрабатывались на компьютере по методу (Shirley), удаление прямоугольники – после облучения ушибряющего действия рентгеновской линии (итерационная развертка) и разложение сложной линии на составляющие ее компоненты. Толщина анализируемого слоя  $\sim 5$  нм. Перед установкой в вакуум поверхность образца протиралась изопропиловым спиртом. Для уменьшения слоя углеродородных загрязнений образцы подвергались ионной бомбардировке в вакууме ( $Ar^+$ ,  $E = 2, 5$  кэВ, скорость распыления 100 А/мин).

# Анализ микроструктуры электротехнической меди

Исходное состояние

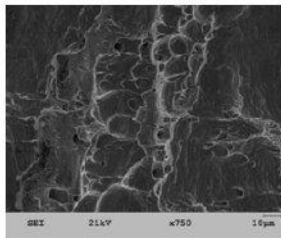
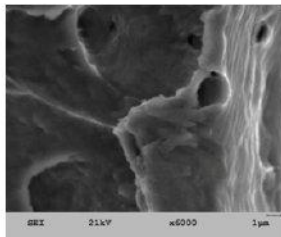


Облученное состояние

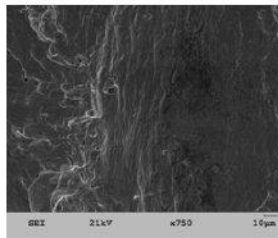
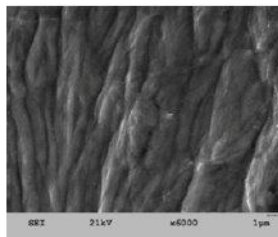


# Фрактография электротехнической меди

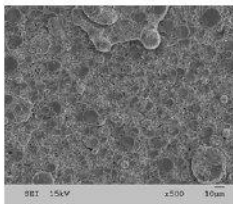
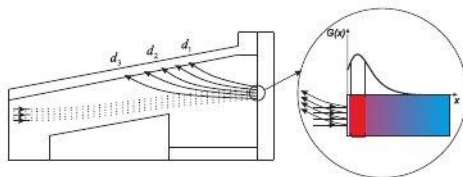
Исходное состояние



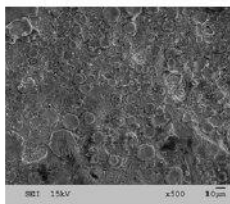
Облученное состояние



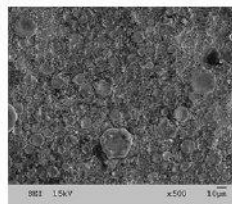
# Анализ продуктов конденсации электротехнической меди



d1



d2



d3

Размер, мкм	<2	3–4	5–6	7–15	16–30	>30
d1	48%	26%	19%	5%	1,5%	0,5%
d2	64%	22%	12%	1,7%	0,2%	0,1%
d3	56%	23%	15%	5%	0,7%	0,3%



# Анализ микротвердости электротехнической меди

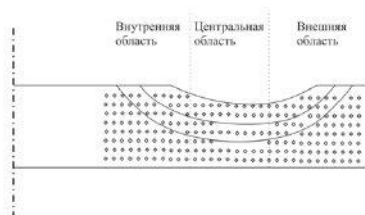


Схема измерения микротвердости на поперечном сечении образца

Область	МПа					
	Облучение со вставкой			Облучение без вставки		
	Зона плавления	Значения микротвердости по глубине образца	Зона плавления	Зона плавления	Исходный образец	
внутр.	80	65	748	62		
центр.	7	6	851	5		
внешн.	90	494	774	681		
	6	732	7	715		

# Выводы

Основные результаты можно сформулировать в следующих выводах:

- 1 Разработана и создана примененная оснастка, которая позволяет регулировать пространственное распределение энергии излучения в приповерхностном слое образцов, облучаемых трубчатым сильноточным релятивистским электронным пучком.
- 2 Разработано и создано устройство для измерения импульсного электрического тока, генерируемого в мишени, которое позволяет устанавливать корреляционные зависимости с импульсами динамических нагрузок, возникающих при облучении твердотельных мишеней трубчатым сильноточным релятивистским электронным пучком.
- 3 Установлено, что вследствие облучения сплава Д16 трубчатым сильноточным релятивистским электронным пучком, происходит изменение спектра валентных электронов, что проявляется в уменьшении значения электропроводности в зоне переплава на 5%.
- 4 Установлено, что при синтезе продуктов абляции, возникающих при облучении трубчатым сильноточным электронным пучком металлических мишеней, существует ряд факторов, влияющих на поле скоростей выброса вещества, его дисперсность и структуру покрытия. Среди установленных факторов основными

5

Установлено, что после однократного облучения электротехнической меди трубчатым сильноточным релятивистским электронным пучком электропроводность переплавленного слоя уменьшается на 7%. Определено распределение микротвердости в поперечном сечении образца – наиболее упрочненная зона соответствует зоне плавления и зоне термического влияния. Показано, что изменения в структуре проявляются в изменении микротвердости

и приводят к различиям в характере изломов медных образцов. В зоне переплава медного образца преобладающий механизм разрушения – хрупкое разрушение,

в тоже время, для остальной части образца наблюдается вязкое разрушение.

Спасибо за внимание