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

Энергия электронов ~ 0.5 МэВ.

Ток пучка ≤ 2 кА.

Длительность импульса ~ 5 мкс.

Толщина стенки пучка – 2. . . 3 мм.

Выделяемая плотность энергии ~ 1 кДж/см^2 .

Полная энергия пучка 5...10 кДж.

Давление 10^{-4} . . . 10^{-5} торр.

Внешний диаметр пучка 40 мм.

Общий вид ускорителя

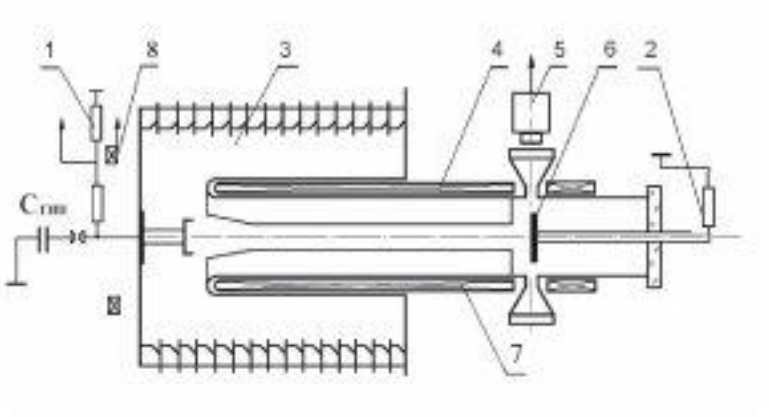
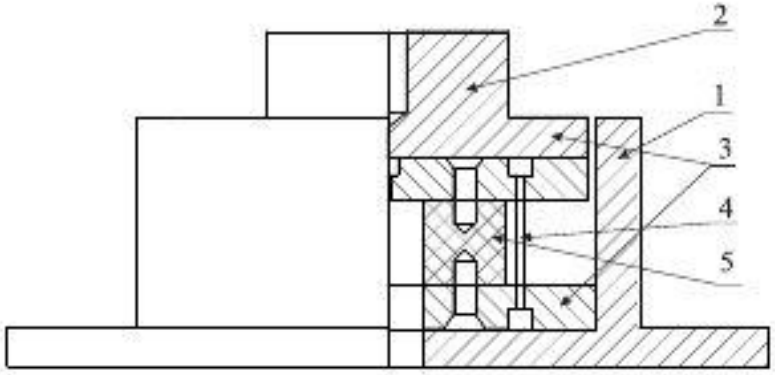


Схема магнитоизолированного диода

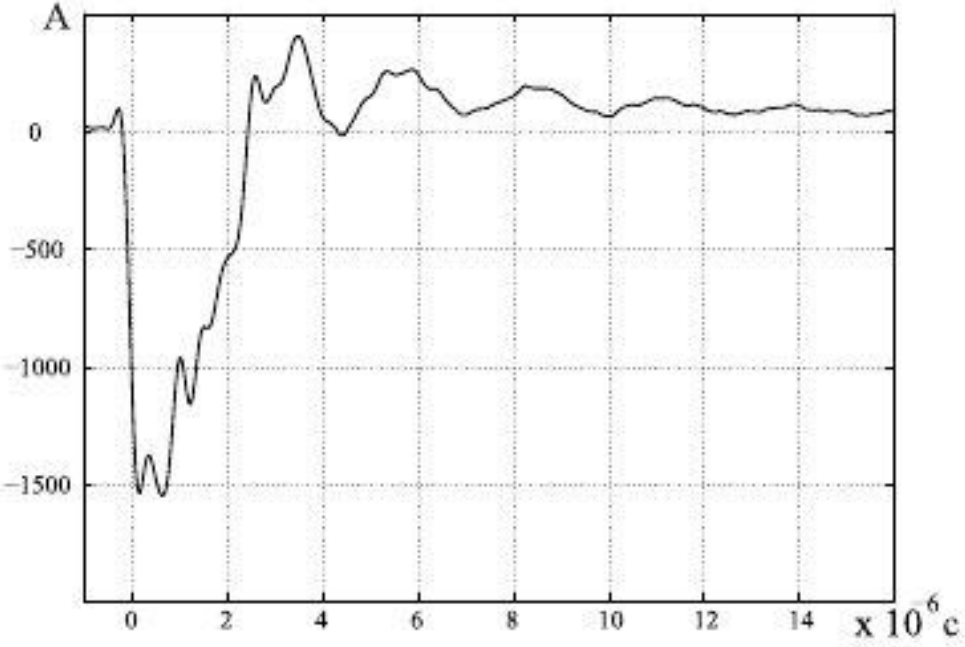
1 – омический делитель напряжения;
2 – токовый шунт;
3 – ускорительная колонка;
4 – соленоид;
5 – ФЭУ;
6 – коллектор;
7 – анодная вставка;
8 – пояс Роговского.

Сильноточный импульсный измерительный шунт



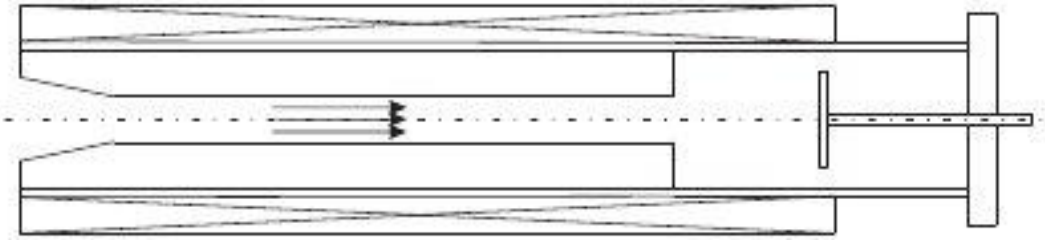
1 – стакан (аллюминий);
2 – крышка (латунь);
3 – диски (латунь);
4 – нихромовые проволочки;
5 – керамический изолятор.

Конструкция измерительного токового шунта



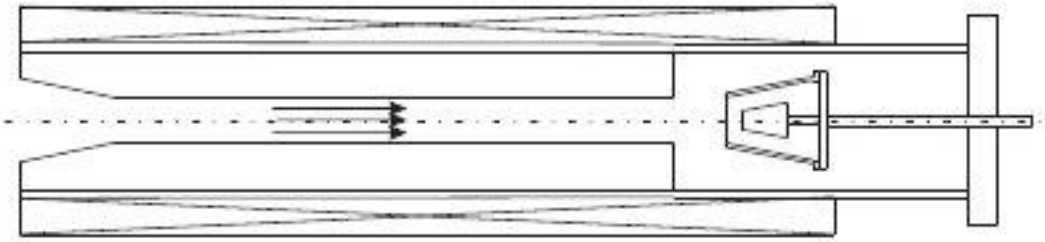
Осциллограмма тока пучка на коллекторе

Управление зоной энерговыделения трубчатого СРЭП в мишени

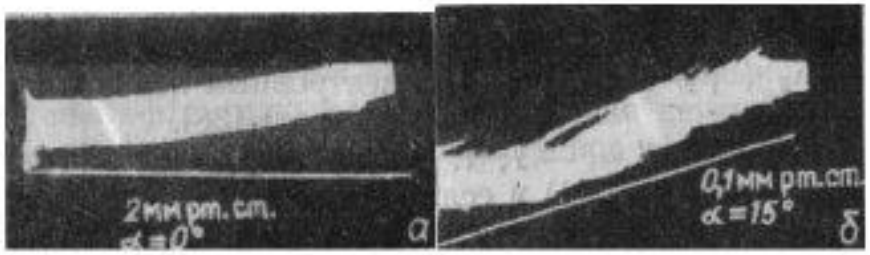


Расчетная область с внутренним конусом

Общий вид отклоняющих конусов



Расчетная область с двумя



Отклонение сильноточного электронного пучка 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:

$$\dot{v} = \frac{q}{m_0} \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} \left(E + v \times B - c^{-2} v \, (vE) \right).$$

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

$$\phi = p, \qquad (x, y, z) \in \Gamma_1.$$

2. Условие Неймана

$$\phi \cdot n = q, \qquad (x, y, z) \in \Gamma_2.$$

3. На границах раздела, где ε скачкообразно меняет значение, применяются условия непрерывности

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

и

$$\varepsilon_+ \nabla \phi_+ \cdot n = \varepsilon_- \nabla \phi_- \cdot n, \qquad (x, y, z) \in \Gamma_c.$$

Управление зоной энерговыделения трубчатого СРЭП в мишени

❷

Векторный магнитный потенциал:

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

с граничными условиями:

1. Условие Дирихле

$$A = P, \qquad (x, y, z) \in \Gamma_1.$$

2. Однородное условие Неймана

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

применяемое на плоскостях симметрии.

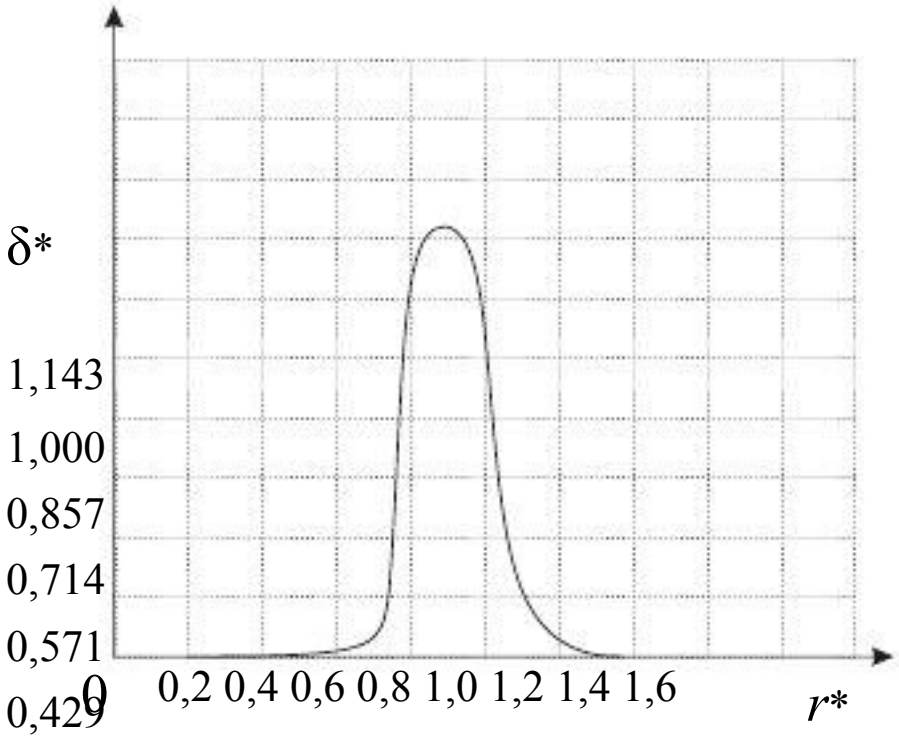
3. На границах раздела, где μ скачкообразно изменяет значение, применяются условия непрерывности

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

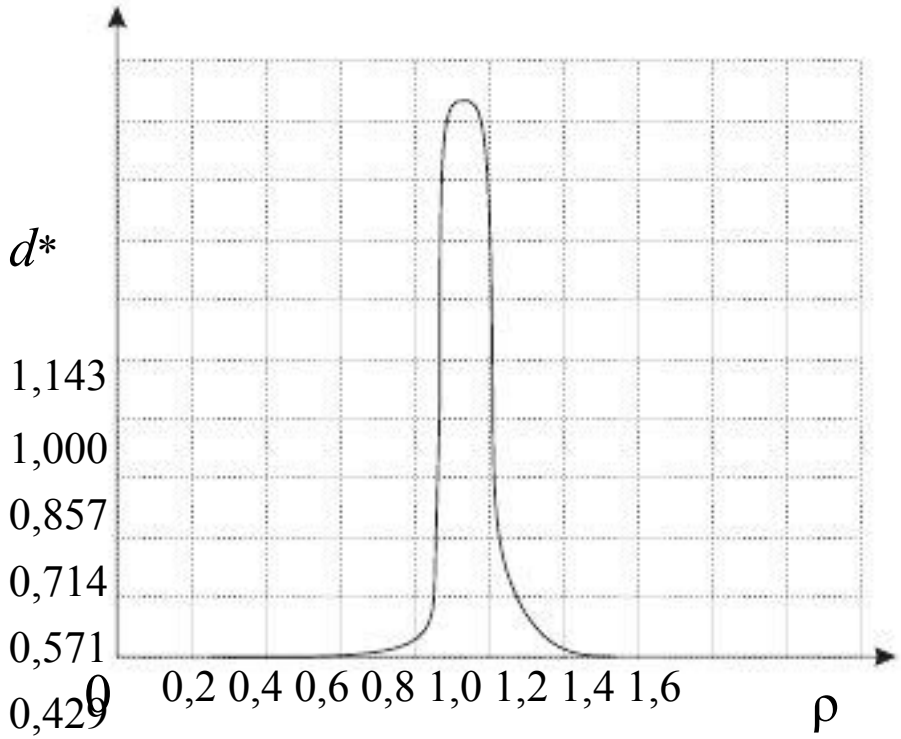
и

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

Управление зоной энерговыделения трубчатого СРЭП в мишени



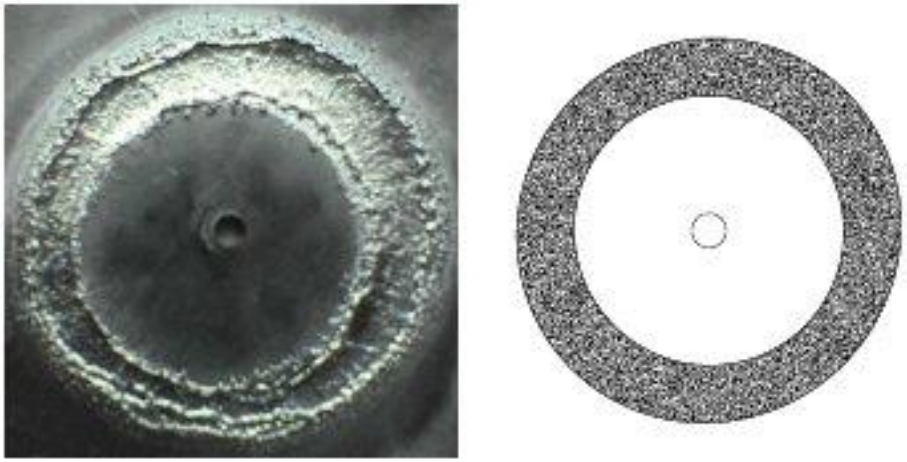
Вставка внутренний конус



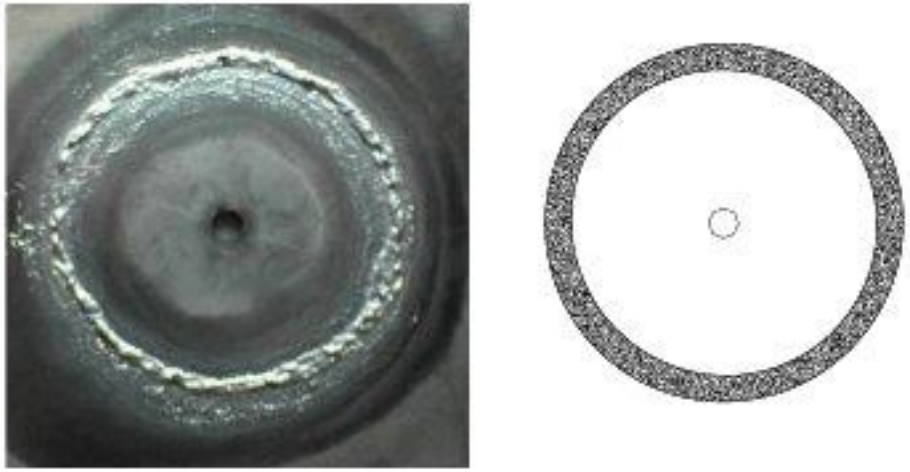
Вставки внутренний и внешний конусы

Расределение плотности тока электронного пучка на поверхности мишени

Управление зоной энерговыделения трубчатого СРЭП в мишени



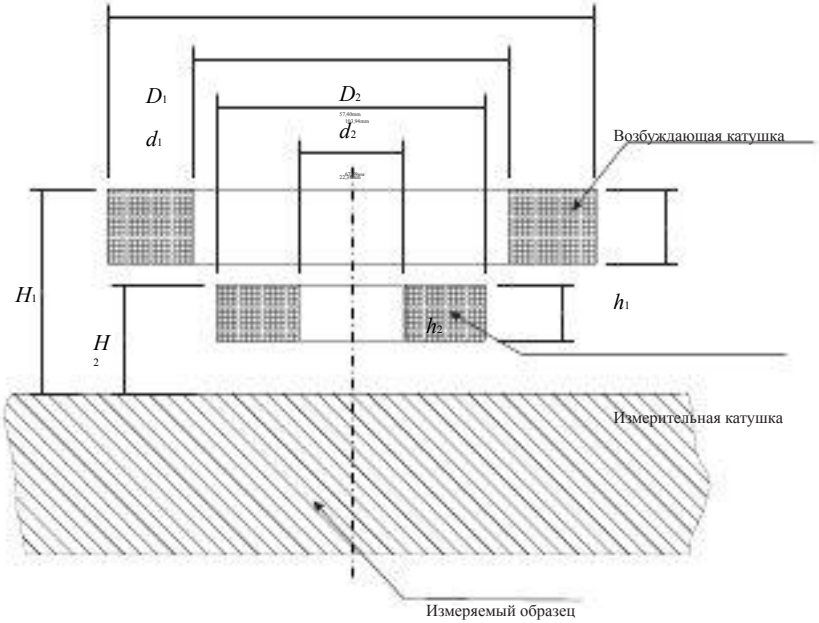
Вставка внутренний конус



Вставки внутренний и внешний конусы

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

Анализ электропроводности облученных неферромагнитных мишеней

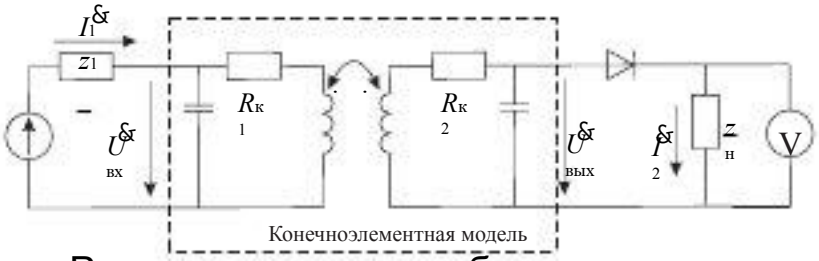


Расчетная модель вихретокового преобразователя

$$\left[j\omega\sigma - \omega^2 \varepsilon_0 \varepsilon_{отн} \dot{A} + \frac{1}{\mu_0 \mu_{отн}} \times \dot{A} \right] = \dot{J}_{стор}$$

$$\dot{I}_1 = \frac{\dot{\varepsilon} - j\omega \frac{N_1}{i=1 S_i} \int \dot{A} \cdot dS}{z_1 + R_1}$$

$$\dot{I}_2 = \frac{j\omega \frac{N_2}{i=1 S_i} \int \dot{A} \cdot dS}{R_2 - z_н}$$



Расчетная схема преобразователя

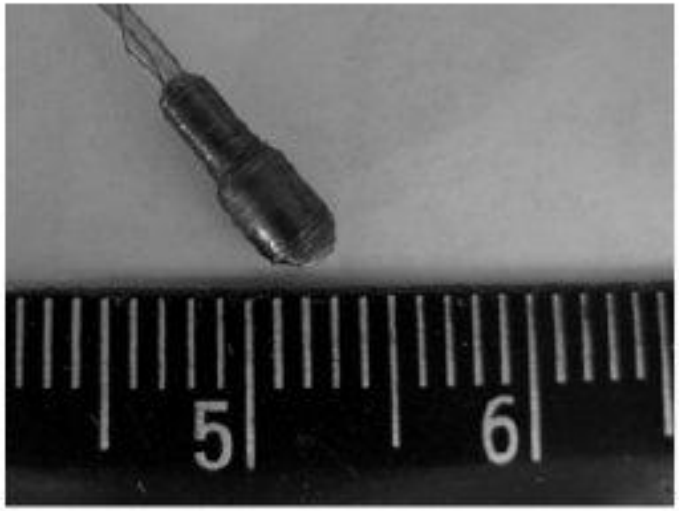
$\dot{\varepsilon}$ – ЭДС генератора;

z_1 – регулируемое сопротивление;

$z_н$ – измерительное сопротивление;

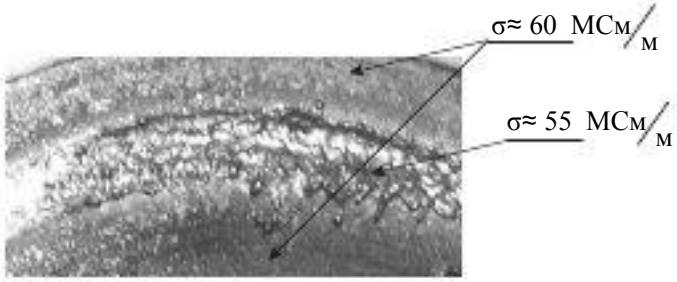
R_1 и R_2 – омические сопротивления катушек.

Анализ электропроводности облученных неферромагнитных мишеней

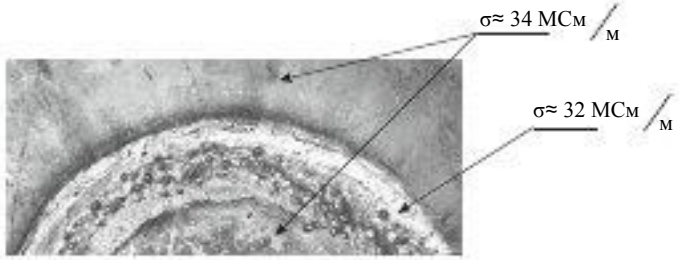


Внешний вид сборки возбуждающей и измерительной катушек

Внешний вид вихретокового датчика

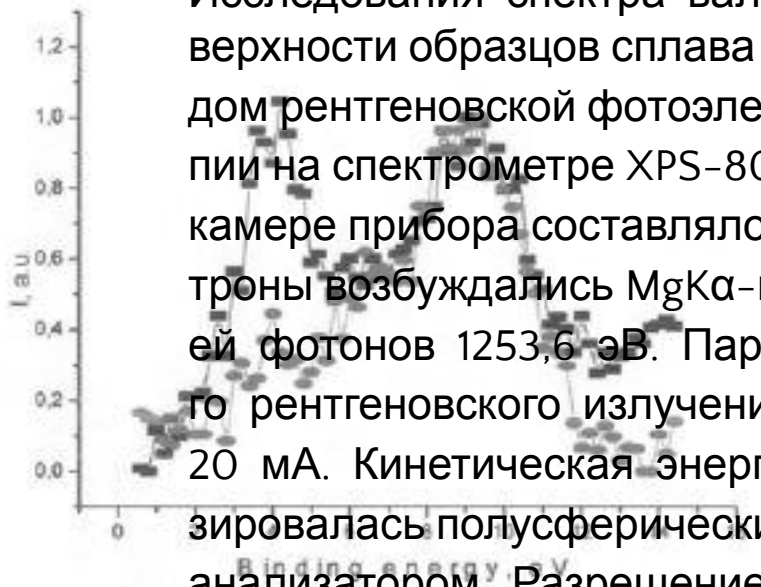


Результат измерения элетропроводности электротехнической меди



Результат измерения элетропроводности сплава Д16

Анализ спектра валентных электронов облученного сплава Д16

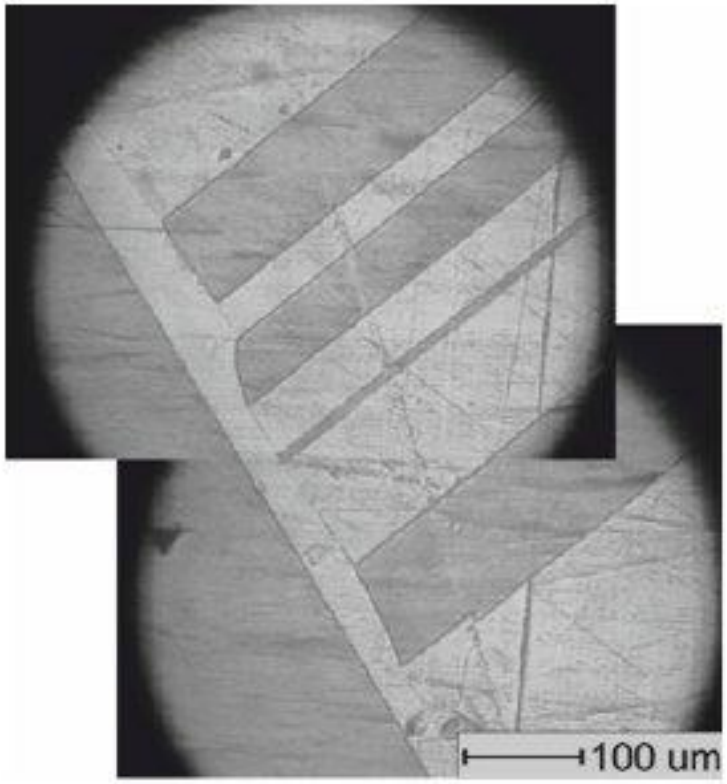


Спектры валентных электронов сплава Д16: пустые прямоугольники – до облучения, прямоугольники – после облучения

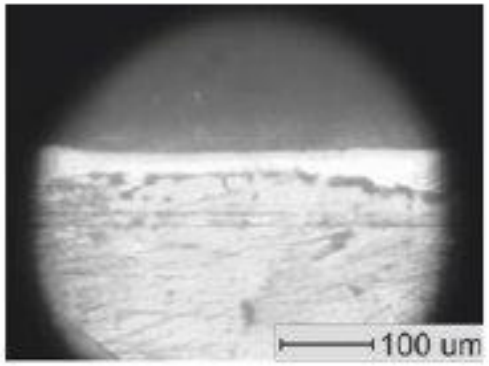
Исследования спектра валентных электронов поверхности образцов сплава Д16 проводились методом рентгеновской фотоэлектронной спектросокопии на спектрометре XPS-800 Kratos. Давление в камере прибора составляло $5 \cdot 10^{-8}$ торр. Фотоэлектроны возбуждались MgKα-излучением с энергией фотонов 1253,6 эВ. Параметры активирующего рентгеновского излучения: U = 15 кВ, J = 20 мА. Кинетическая энергия электронов анализировалась полусферическим электростатическим анализатором. Разрешение спектрометра ~ 1 эВ, точность определения энергии связи ± 0,3 эВ. Спектры были обработаны на компьютере: проводилось вычитание постоянного фона и фона неупругих потерь по методу (Shirley), удаление уширяющего действия рентгеновской линии (итерационная развертка) и разложение сложной линии на составляющие ее компоненты. Толщина анализируемого слоя ~ 5 нм. Перед установкой в вакуум поверхность образца протиралась изопропиловым спиртом. Для уменьшения слоя углеводородных загрязнений образцы подвергались ионной бомбардировке в вакууме (Ar^+, E = 2, 5 кэВ, скорость распыления 100 А/мин).

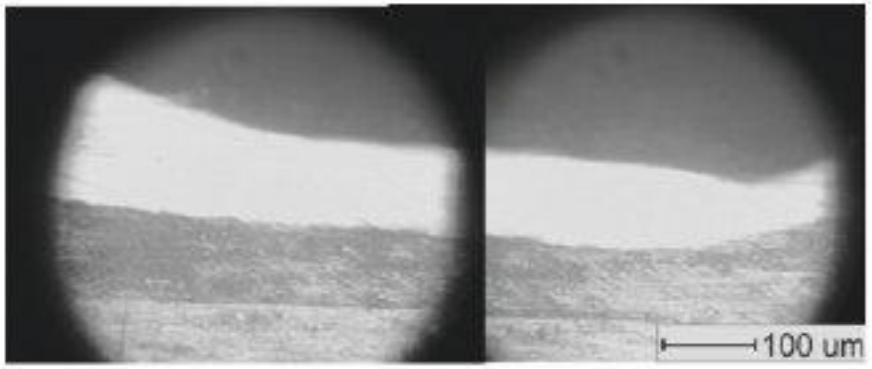
Анализ микроструктуры электротехнической меди

Исходное состояние



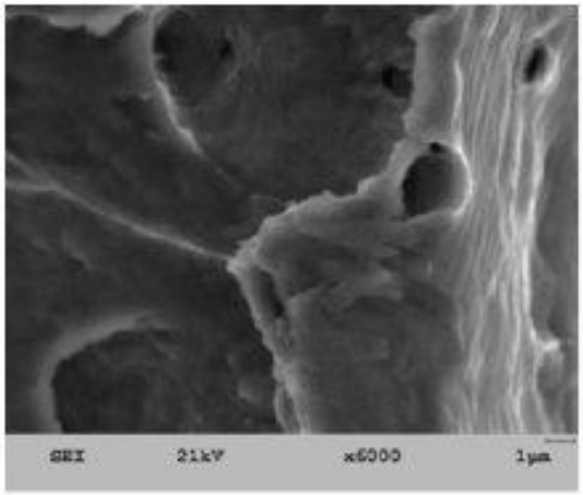
Облученное состояние

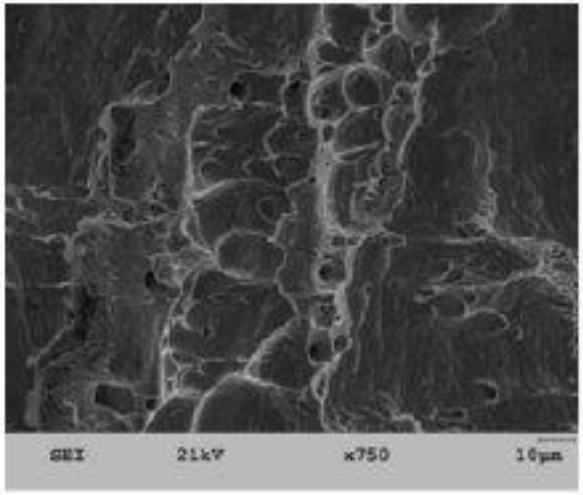




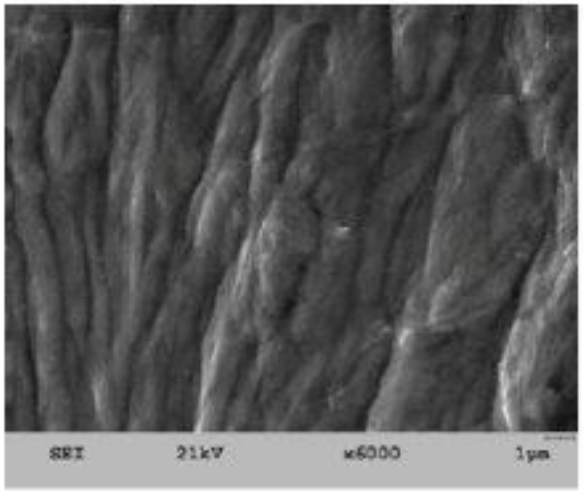
Фрактография электротехнической меди

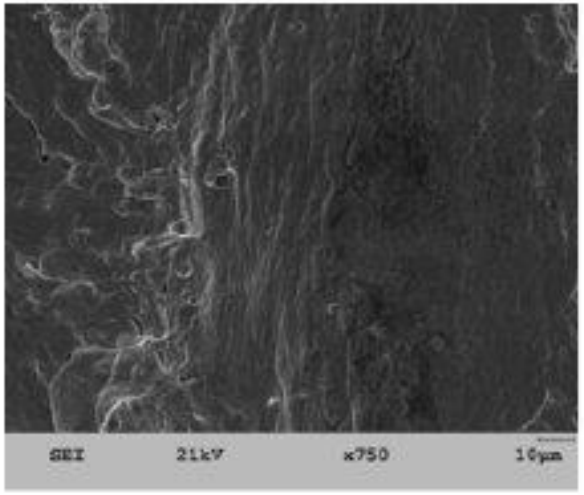
Исходное состояние



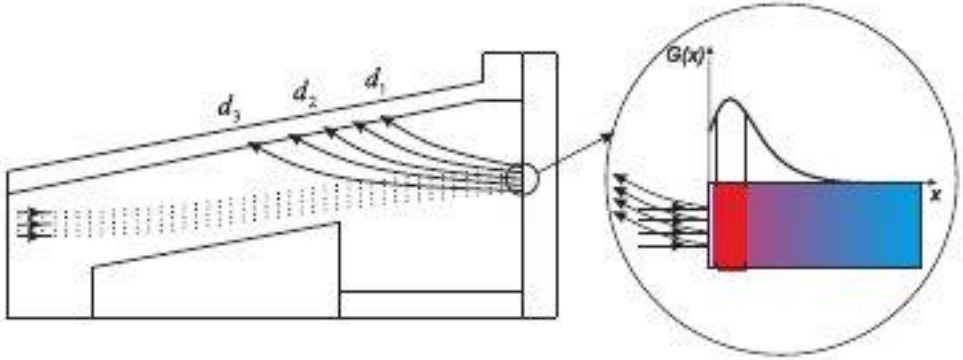


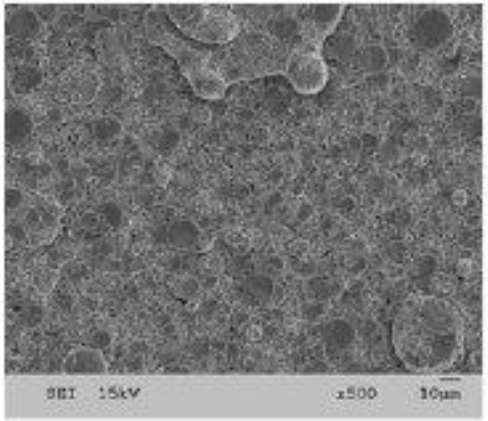
Облученное состояние



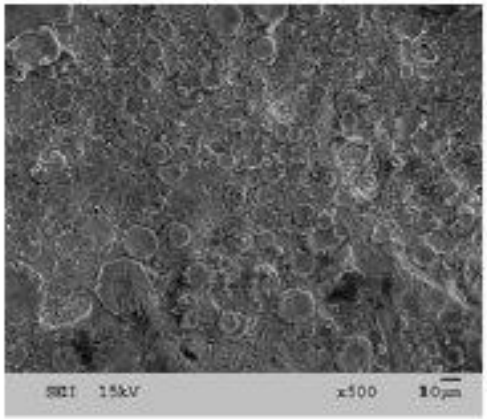


Анализ продуктов конденсации электротехнической меди

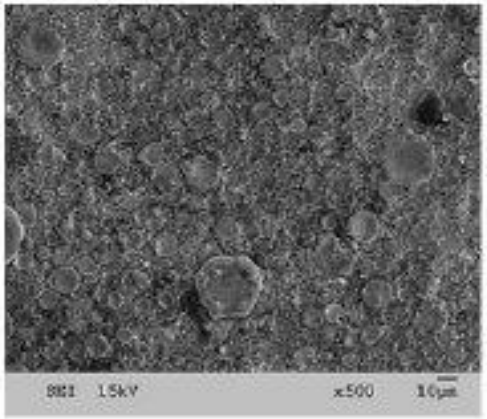




d1



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 микротвёрдости на поперечном сечении образца

Значения микротвердости по глубине мишени, МПа

Область	Облучение со вставкой			Облучение без вставки		
	Зона плавления	Зона термического воздействия	Исходный образец	Зона плавления	Зона термического воздействия	Исходный образец
внутр.	807	889	656	748	788	625
центр.	906	732	494	851	761	681
внешн.	888	732	732	774	807	715

Выводы

Основные результаты можно сформулировать в следующих выводах:

1. Разработана и создана примешенная 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 являются: пространственное распределение поглощенной дозы; расстояние от

Выводы

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