

25-я Конференция молодых ученых ИЭФ УрО РАН

#### Разработка концентратора магнитного потока с использованием наноструктурного Cu-Nb композита для магнитно-импульсной сварки

Зайцев Е.Ю.\*, Спирин А.В., Крутиков В.И., Паранин С.Н.,

ЛПЭ ИЭФ УрО РАН

### Введение



#### Процесс магнитно-импульсной сварки (МИС)



Требования к импульсу поля:

Длительность импульса: 10-100 мкс Амплитуда поля: 30-50 Тл

#### Проблема:

#### Низкая стойкость индукторов

Снижение азимутальной однородности поля



бериллиевой

бронзы







Стальной индуктор

#### Используемые типы индукторов



#### Причина:

Высокие термомеханические нагрузки на поверхности: (1) высокое «магнитное давление», (2) перегрев поверхности. Магнитное давление до 1 ГПа, T ~ 600-800°C.

### Наноструктурный медь-ниобиевый сплав 🕢



Микроскопия поперечного сечения шины 2\*8 мм

Разработка концентратора магнитного потока с использованием наноструктурного Cu-Nb композита для магнитно-импульсной сварки

ООО "Русатом МеталТех" (Москва)

### Цель



Исследование применимости и эффективности использования наноструктурного композита Cu-Nb в индукторах для МИ-сварки

# Задачи

- 1. Разработка модельного индуктора/концентратора на основе стали с интегрированным рабочим элементом из композитного шины Cu-Nb
- Определить характеристики разработанной системы: эффективность генерации СМП и азимутальную однородность такого поля.
- 3. Сравнить характеристики концентратора из стали и Cu-Nb, сопоставить результаты сварки ФМ стали в них

## Формирование поля в рабочем канале 💬



Разработка концентратора магнитного потока с использованием наноструктурного Cu-Nb композита для магнитно-импульсной сварки

# Реализация конструкции КМП

#### 0. Отжиг шины Cu-18% Nb 2\*8 мм



1. Формовка шины при комнатной температуре









2. Подготовка тела КМП из стали ЗОХГСА 3. Пайка шин и тела КМП припоем ПСр-40

Процесс приводит не только к снижению прочности, но и уменьшению удельного сопротивления:

 $ho \approx 2,4$  мкОм\*см  $\sigma_{\rm B} \approx 890~{\rm M}\Pi a, ~\sigma_{\rm O2} \approx 520{\rm M}\Pi a$ 

## Реализация конструкции КМП



4. Сборка КМП



Финальные размеры разработанных КМП

### Однородность поля

Ansys Maxwell 3D:



# Эффективность генерации поля



Одновитковый индуктор (ЗоХГСА)

- Внутренний диаметр 31 мм
- Длина рабочего канала 30 мм



Индуктивный датчик:

- CuBe2 стержень (8,55 мм)
- Катушка: <u>5</u> мм<sup>2</sup>



#### Схема измерения

$$B = \frac{1}{S} \int_0^t V dt$$

	Cu-Nb (2 части)	Cu-Nb (4 части)	30ХГСА (2 части)
<u>В<sub>m</sub></u> , Тл/МА І <sub>m</sub> , Тл	56,3	50,6	43

## Сжатие медной трубки



### Сжатие



#### Cu-Nb (2 части)



Cu-Nb (4 части)



Поперечное сечение образцов, полученных при В = 50 Тл, Т/2 = 14 мкс

	D <sub>o</sub>	D <sub>min</sub>	D <sub>max</sub>	η, %
Cu-Nb (2 части)	9,55	4,9	6,7	27
Cu-Nb (4 части)	9,55	5,2	5,7	7

# Сварка стали STS410



Поле, определяемое по величине разрядного тока:

В=40-50 Тл

Лучшие результаты получены при 48-49 Тл





Геометрия соединяемых деталей







12/15

Бо́льшие диаметры соответствуют положению зазоров КМП

## Сварка стали STS410

13/15

Cu-Nb (2 части)

Cu-Nb (4 части)



**B**<sub>2</sub>

<L1>, MM L2, MM Отн. разница, %

**В**<sub>1</sub> соответствует максимуму магнитного поля в рабочем канале, **В**<sub>2</sub> минимуму:

 $B_1 > B_2$ 

Cu-Nb 2	5,38	6,02	11
Cu-Nb 4	6,46	6,37	1,4
зохгса	6,64	5,66	16

## Выводы



- 1. Впервые получены результаты по применению наноструктурного Cu-Nb композита для генерации сильных магнитных полей микросекундной длительности.
- 2. Измеренная эффективность генерации магнитного поля составила 56 Тл/МА и 50 Тл/МА для двух- и четырехсоставного КМП соответственно.
- 3. Неоднородность сжатия, рассчитанная для медных трубок составила 27 и 7 % для двух- и четырехсоставного КМП соответственно.
- 4. Изучено влияние неоднородностей поля на длину сварных соединений при МИС стали STS410. Разница длин соединений в экстремумах поля составила приблизительно 11 и 1,4 % для двух-и четырехсоставного КМП соответственно.
- 5. На текущий момент оба модельных индуктора выдержали около 20 импульсов поля 40-50 Тл.

#### Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (РНФ). №22-79-00307

- 1. Krutikov, V.; Spirin, A; Zaytsev, E.; Petrova, S.; Paranin, S. Conditions for solid-state joining of thin-walled ferritic-martensitic steel pipes with end plugs made by magnetic pulse welding. Letters on Materials 14 (1), 2024 pp. 21-26 https://doi.org/10.22226/2410-3535-2024-1-21-26
- 2. Zaytsev, E.; Krutikov, V.; Spirin, A.; Paranin, S. Development of Multi-part Field-Shapers for Magnetic-Pulse Welding Using Nanostructured Cu-Nb Composite. Preprints 2024, 2024031582. https://doi.org/10.20944/preprints202403.1582.v1

### Исследуемые подходы



Разработка концентратора магнитного потока с использованием наноструктурного Cu-Nb композита для магнитно-импульсной сварки

## Исследуемые подходы



Поиск оптимальной геометрии КМП для повышения радиальной однородности магнитного поля в рабочем канале, общей прочности системы и отношения  $B_m/I_m$ 

#### Исследуемые подходы





Получение и исследование свойств материалов на основе наноструктурного Cu-Nb сплава для индукторов сильного магнитного поля микросекундной длительности