

**24-я Конференция молодых ученых
ИЭФ УрО РАН**

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

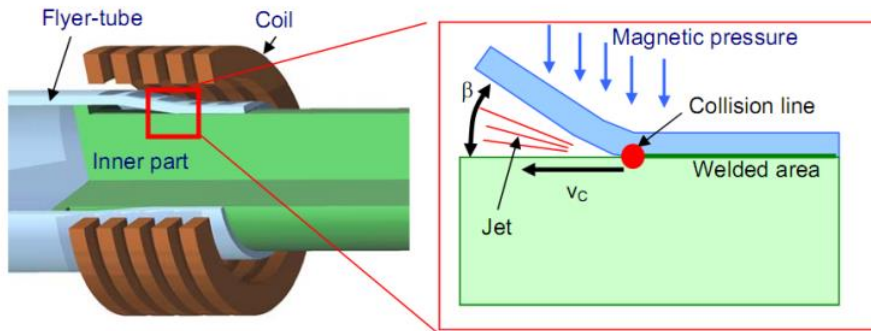
Зайцев Е.Ю.*, Спирин А.В., Крутиков В.И., Заяц С.В., Паранин С.Н.,
Кайгородов А.С., Колеух Д.С.

ЛПЭ ИЭФ УрО РАН

Введение

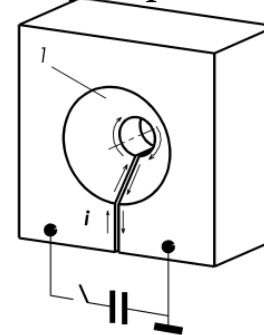


Процесс магнитно-импульсной сварки

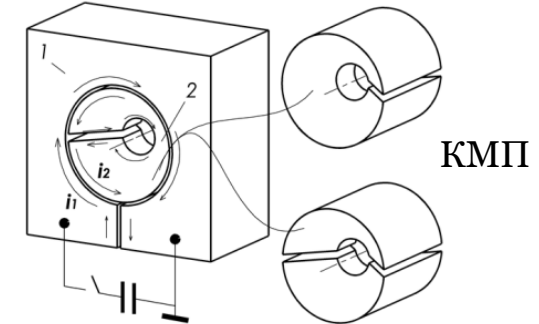


Используемые типы индукторов

Одновитковый индуктор



Индуктор с концентратором магнитного потока (КМП)



Требования к импульсу поля:

Длительность импульса: 10-100 мкс

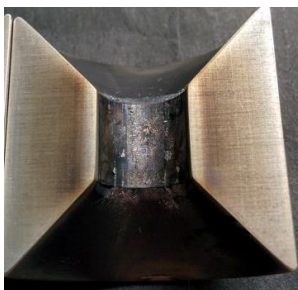
Амплитуда поля: 30-50 Тл

Проблема:

Низкая стойкость индукторов



Индуктор из
бериллиевой
бронзы



Стальной КМП



Стальной
индуктор

Причина:

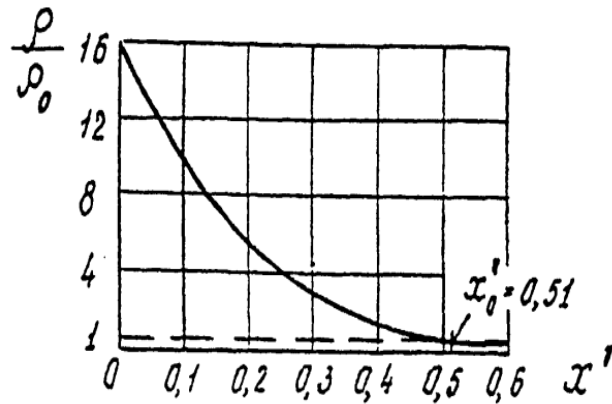
Высокие термомеханические нагрузки на поверхности: (1) высокое «магнитное давление», (2) перегрев поверхности. Магнитное давление до 1 ГПа, $T \sim 600-800^\circ\text{C}$.

Метод снижения энерговыделения на поверхности индуктора



Теоретический анализ

Пример непрерывного распределения удельного сопротивления [1]



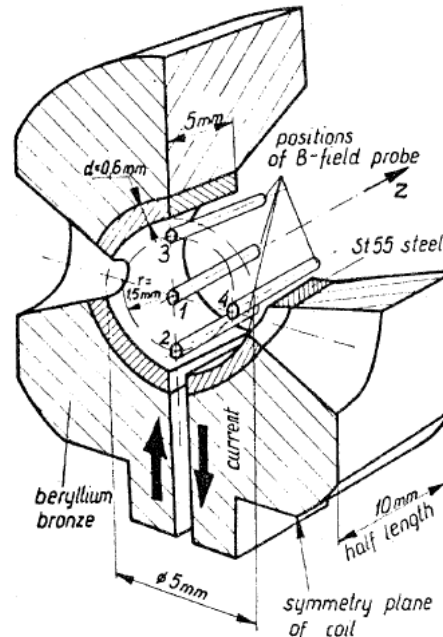
$$B_e(t) = B_0 \cdot \exp(t/t_0) \quad \chi$$

$$\Delta q(x, t) = \frac{B_e^2(t)}{\mu_0} \cdot \frac{1}{[\sqrt{\ln(\rho_1/\rho_0) + 1}]^2}$$

Exam.: $\rho_1/\rho_0 = 5 \rightarrow \chi = 0.194$

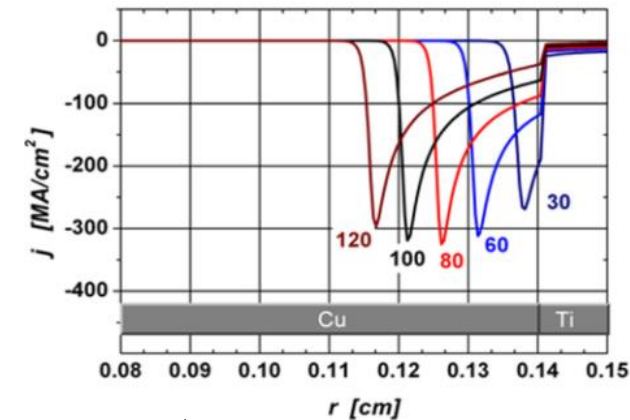
Эксперименты

Двухслойный индуктор [2]
“Бронза / Сталь”



Двухслойный провод [3]
“Медь / Титан”

Зависимость плотности тока от радиуса



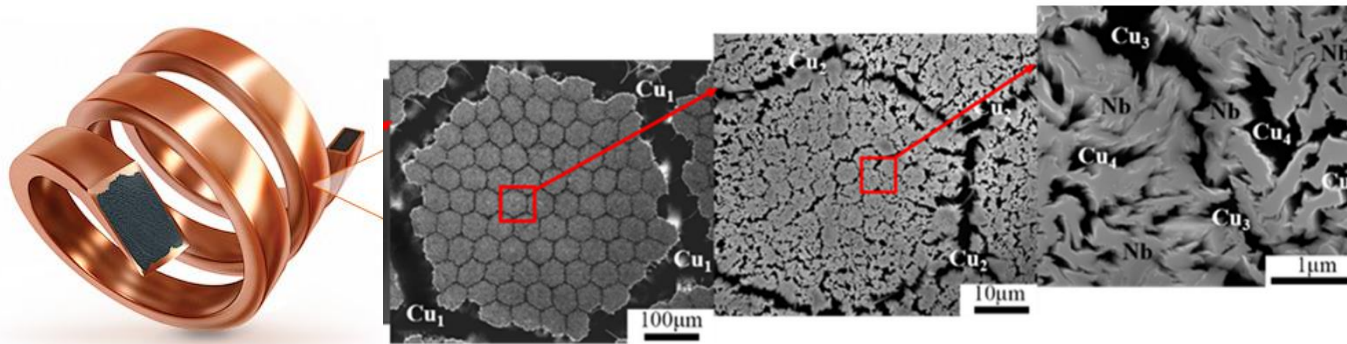
Двухслойные структуры

[1] Shneerson G.A. 1992 Technical Physics Letters 18 (6) 18

[2] Farinski A, et al. 1981 IEEE Trans. on Magnetics 17(5) 1935

[3] Chaikovsky S.A., et al. 2014 Physics of Plasmas 21 042706

Наноструктурный медь-ниобиевый сплав

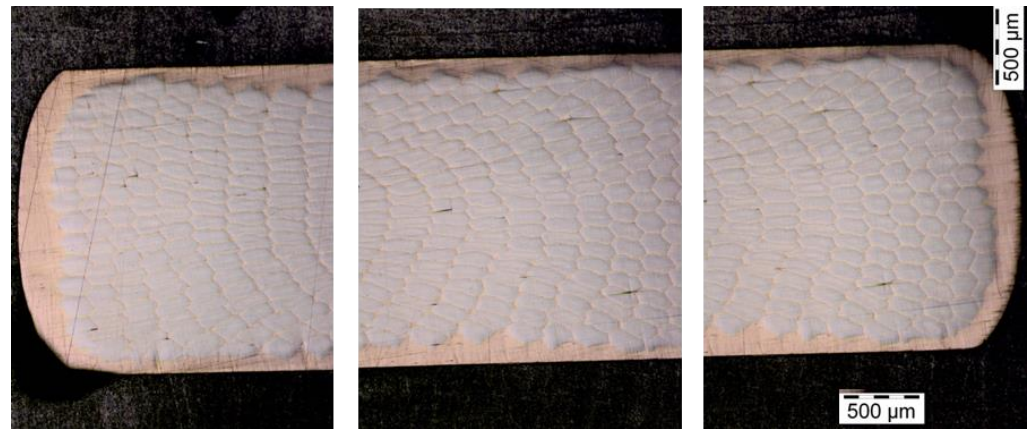


Xiang S. et.al., “Texture Evolution and Nanohardness in Cu-Nb Composite Wires” // Materials, 2021, V. 14(18), 5294.
DOI: 10.3390/ma14185294

Проводимость: 40-70% IACS
Предел прочности: 1 - 1,6 ГПа



ООО “Русатом МеталТех” (Москва)



Микроскопия поперечного сечения шины 2*8 мм

Цель



Изготовление методами порошковой металлургии компактов из порошка медь-ниобия и определение оптимального состава и режима термообработки для использования такого материала в сильных магнитных полях (СМП).

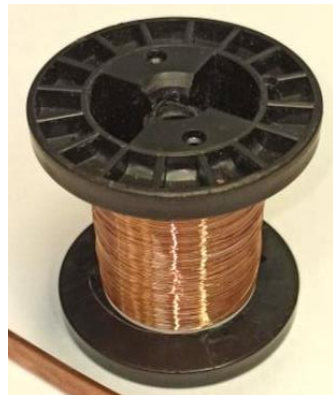
Задачи

1. Получить и исследовать объемный материал на основе наноструктурного сплава Cu-Nb.
2. Исследование свойств материалов при температурах спекания 500-850°C.
3. Испытания при генерации поля 40 Тл микросекундной длительности

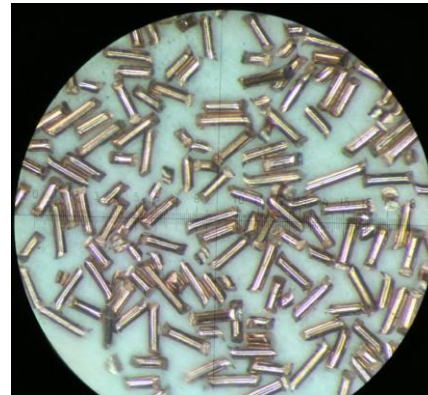
Получение порошка



Исходный материал – проволока 0,18 мм



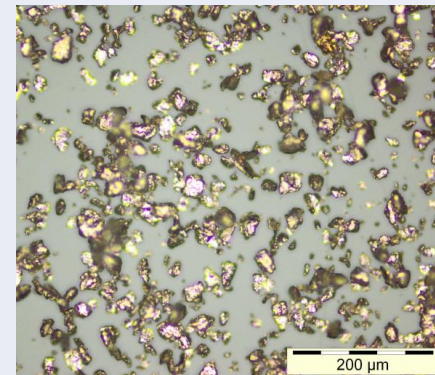
Сечка из провода



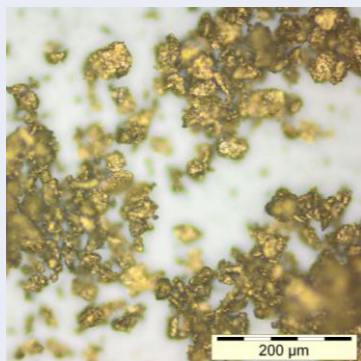
ПОМОЛ



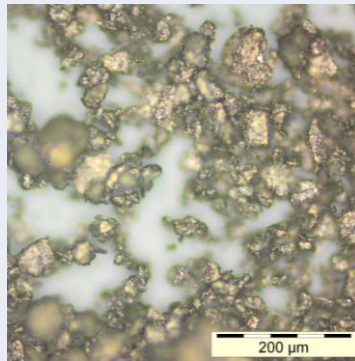
БАЗОВЫЙ порошок Cu-Nb



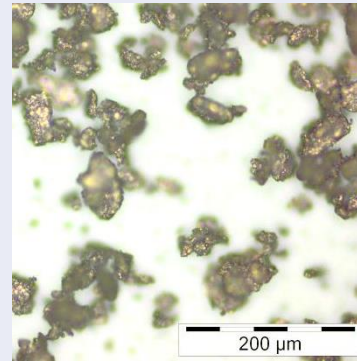
Варьирование удельного сопротивления материалов для формирования двухслойных структур



БП 15TiN



БП 15TiC



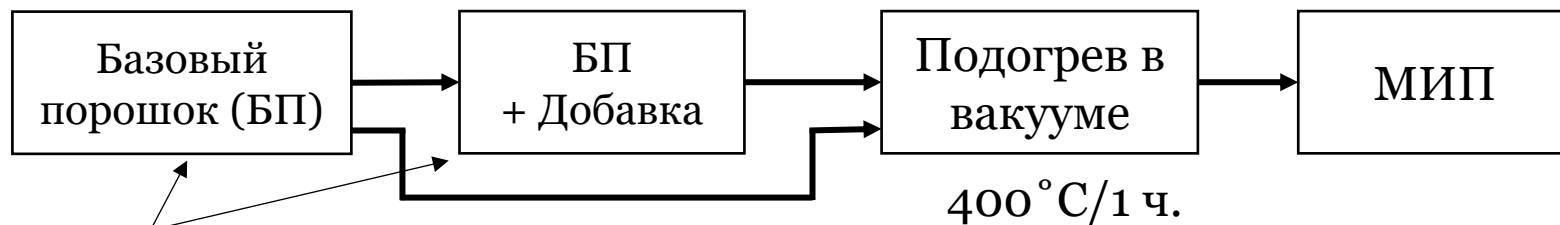
БП 15AlN

Для двухслойных структур возможно введение добавок:

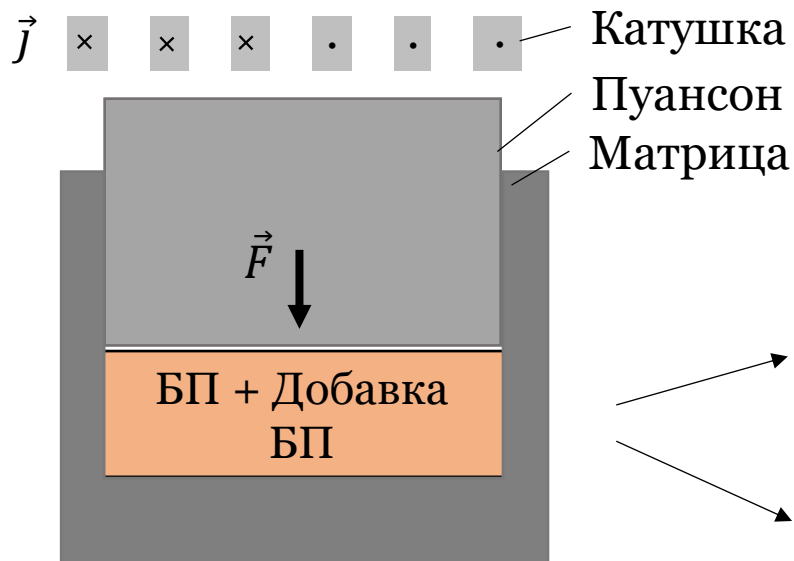
Cu-Nb + X об.% TiC
Cu-Nb + 15 об.% TiN
Cu-Nb + 15 об.% AlN

Размер частиц:
Cu-Nb: 20-64 мкм
TiN: < 4 мкм
AlN: < 5 мкм
TiC: < 2 мкм

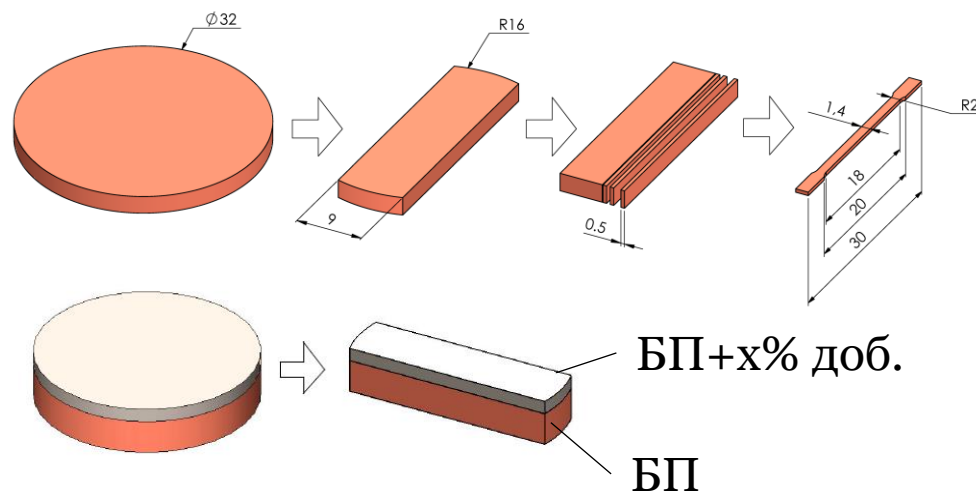
Получение и подготовка образцов



20-64 мкм



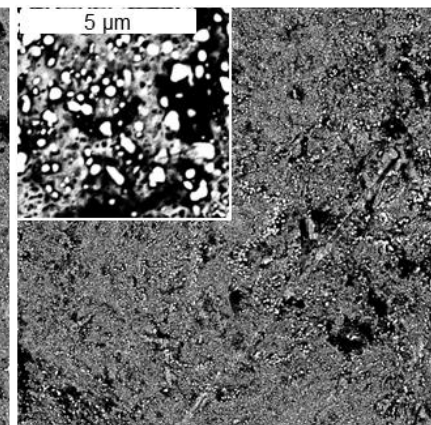
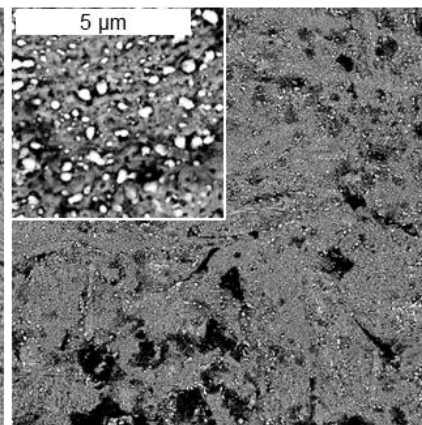
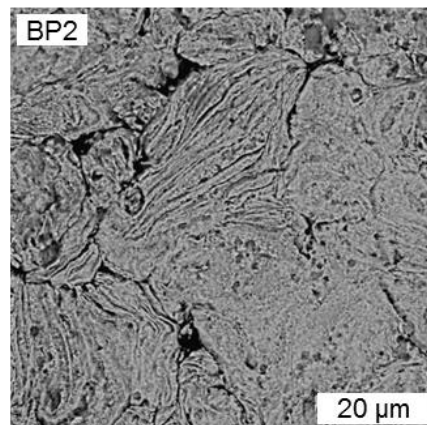
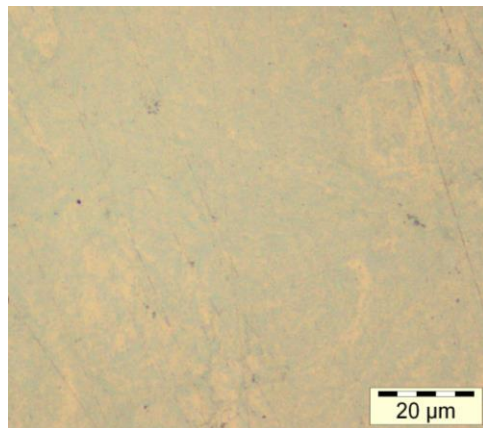
$t_{\text{имп.}}$	500 мкс
T	400 °C
$P_{\text{МИП}}$	До 1,3 ГПа
$P_{\text{вак}}$	10 Па



Микроструктура материалов



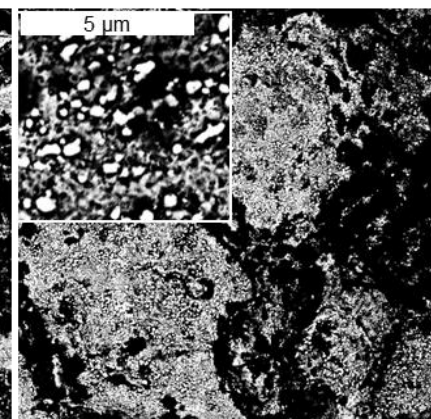
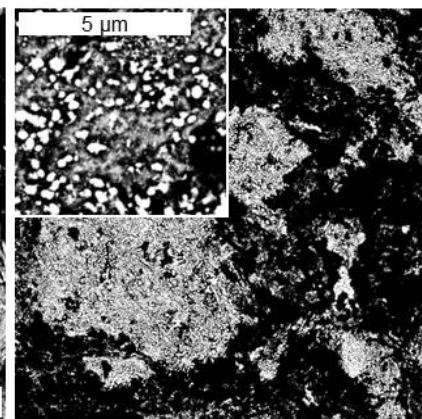
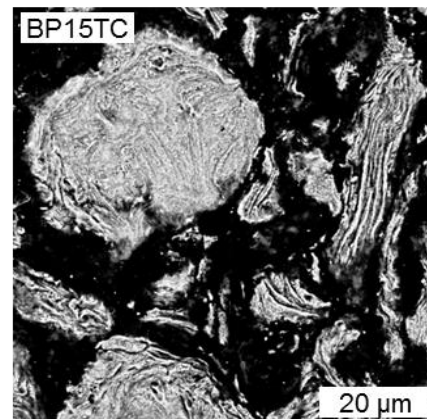
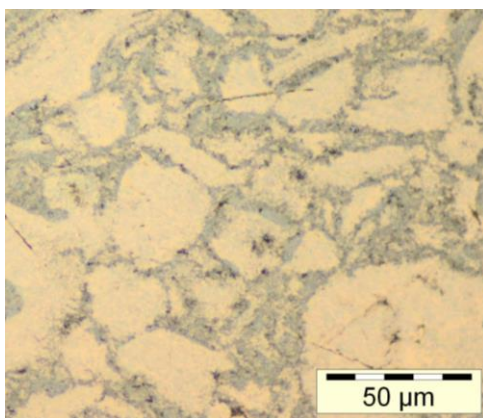
БП



компакт

отжиг 800°C/1ч

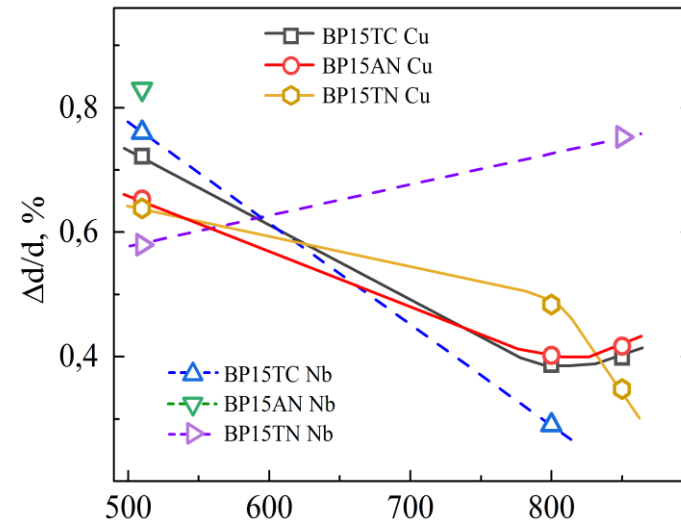
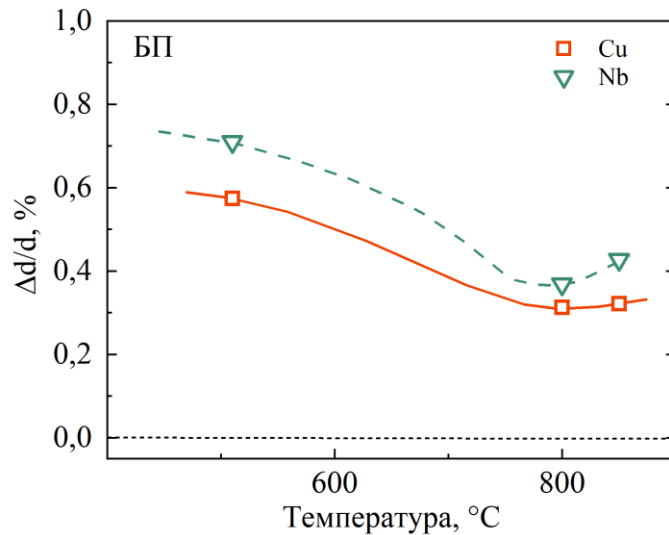
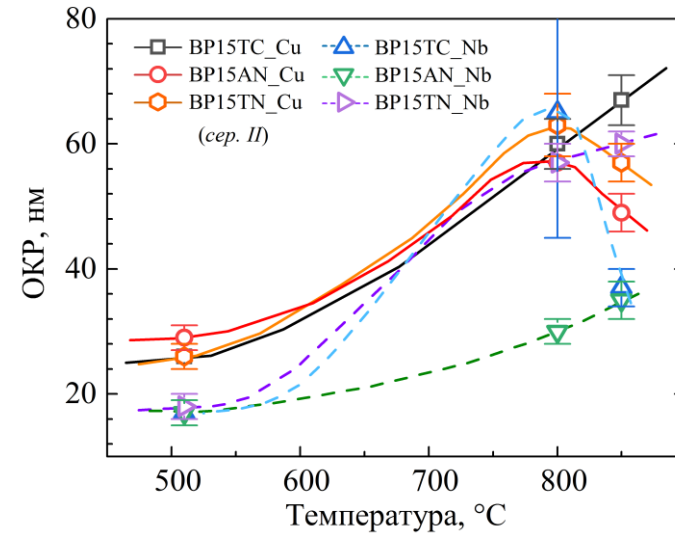
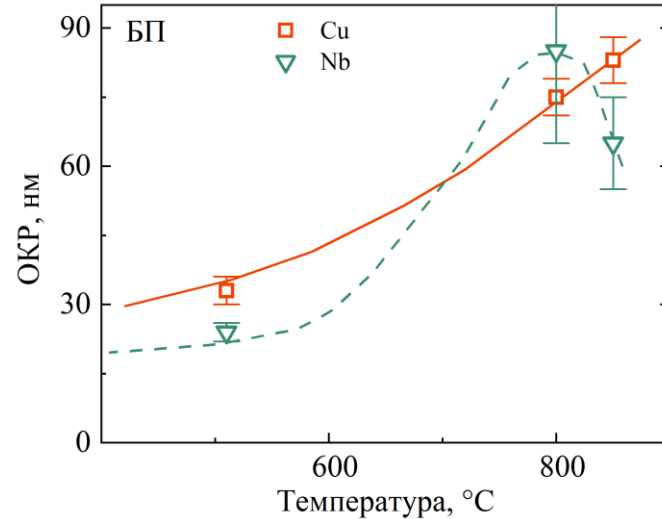
отжиг 850°C/1ч



БП + 15% TiC

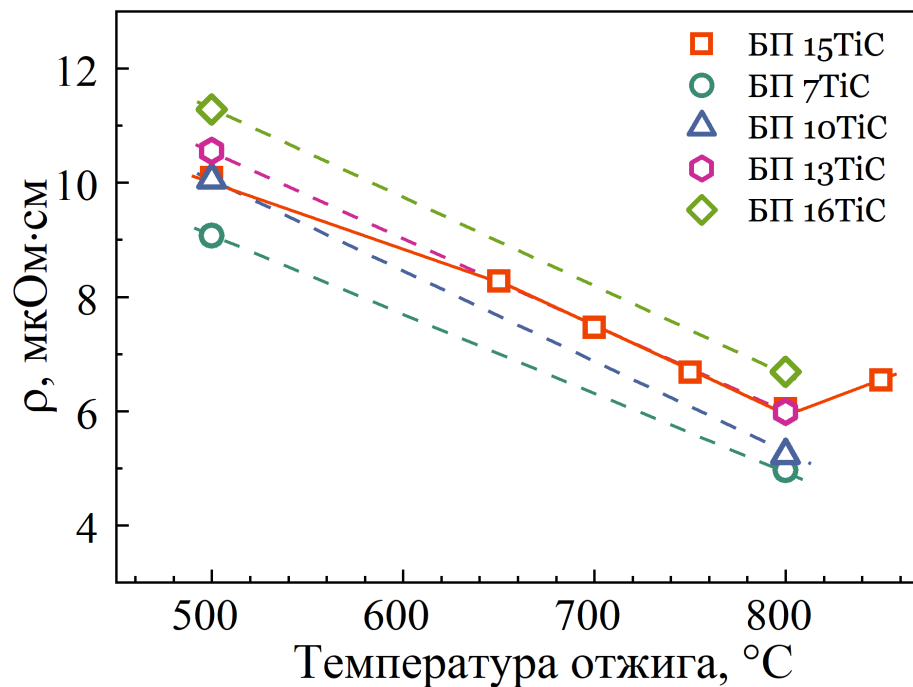
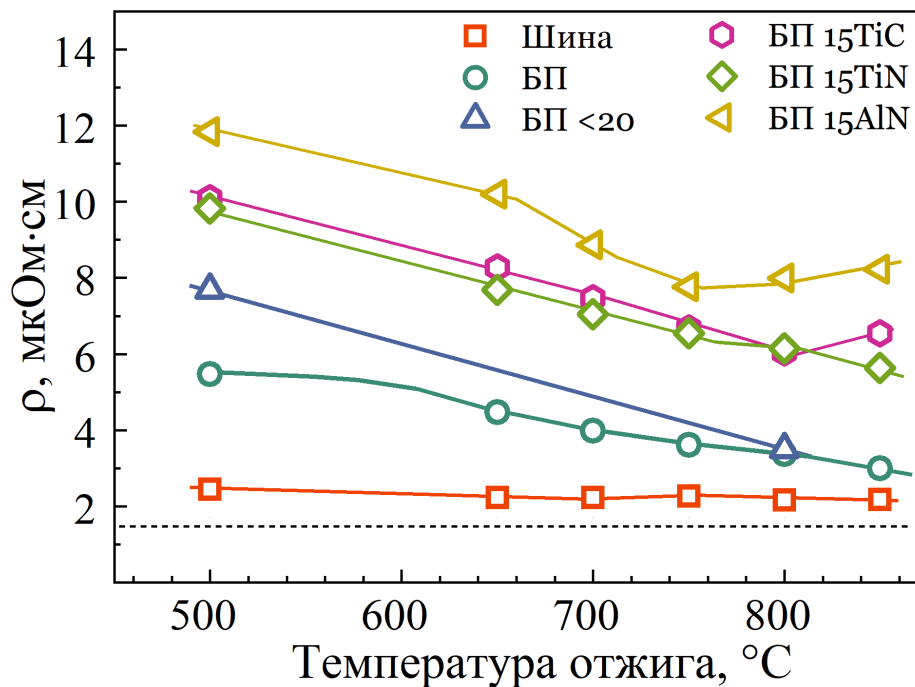
СЭМ-изображения (режим BSE) образцов базового материала BP2 (сверху) и с добавкой 15 об.% TiC (снизу) после различной термообработки. Поверхность после травления.

Структурные характеристики материалов



Температуры 800-850°C – образование фаз Cu_2O , NbO , Nb_2C

Удельное сопротивление с температурой отжига

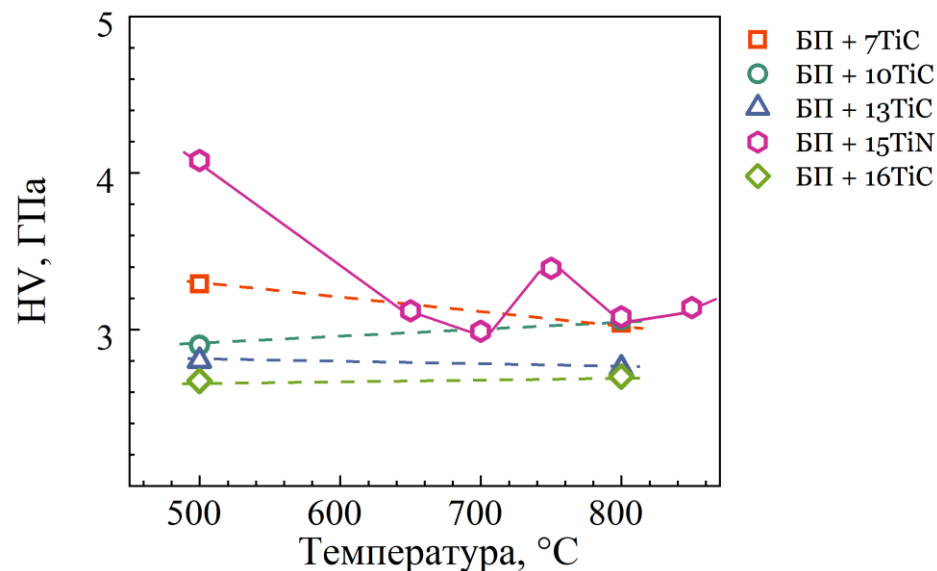
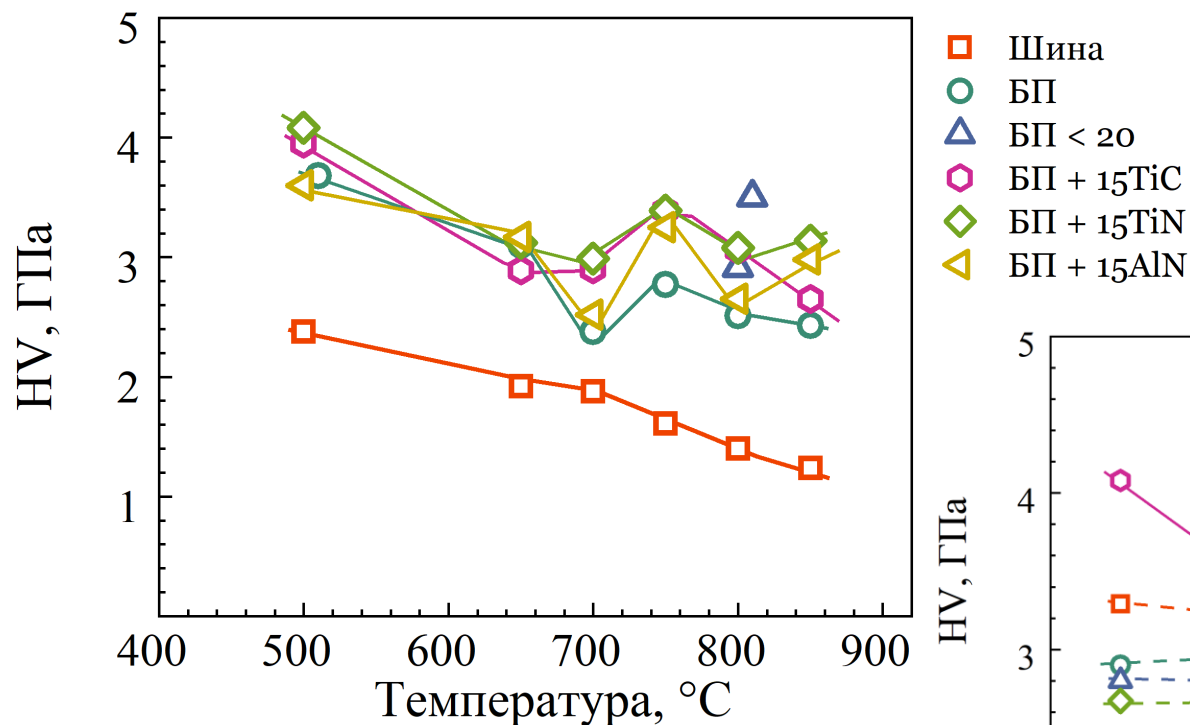


Снижение ρ от начального значения, %

Т _{отж.} , °C	Шина	БП	БП <20	БП 15TiC	БП 15TiN	БП 15AlN
650	9	18		18	22	14
700	9	27		26	28	25
750	7	34		34	33	34
800	12	38	56	40	37	33
850	11	45		35	43	31

Погрешность определения удельного сопротивления не более 3%

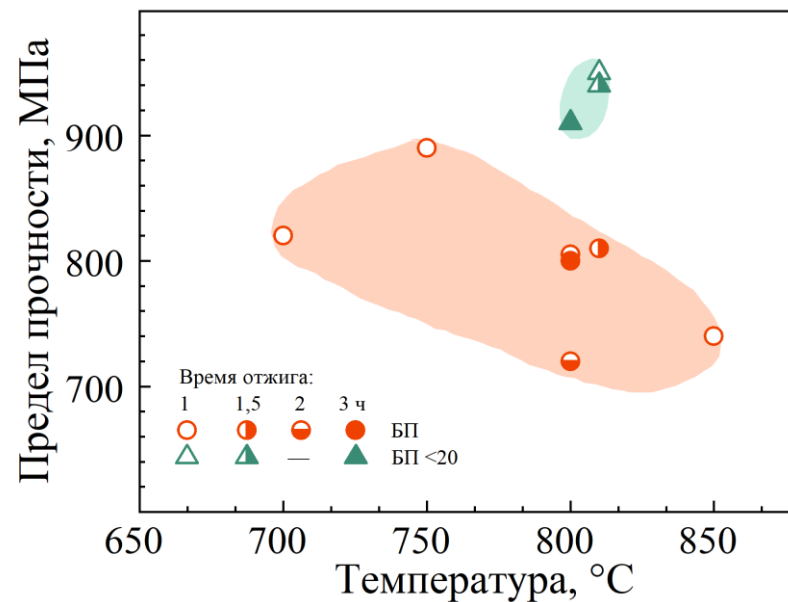
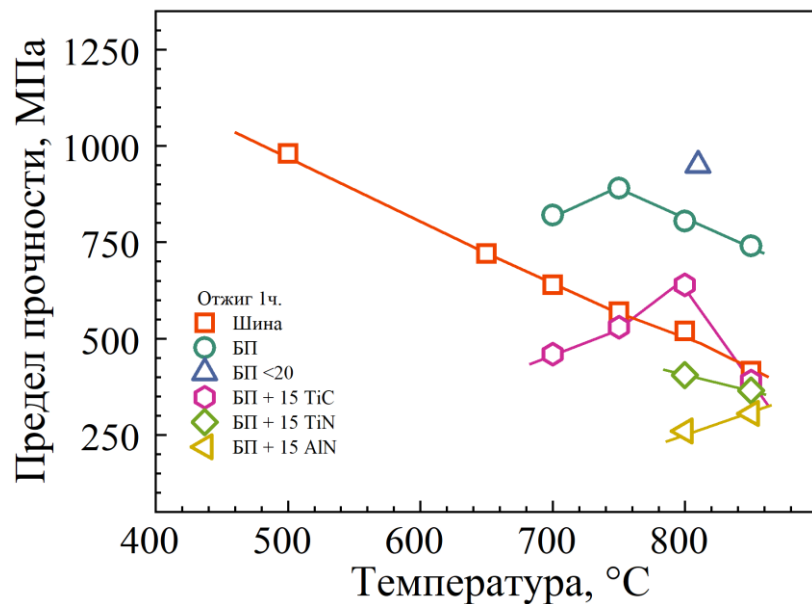
Микротвердость материалов с температурой отжига



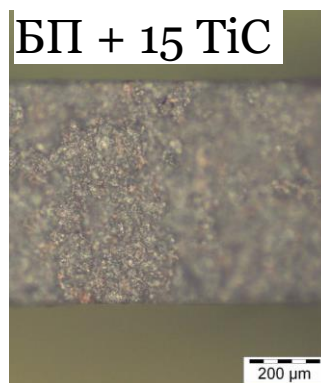
Максимальное снижение твердости, %

Шина	БП	БП+15TiC	БП+15TiN	БП+15AlN
52	36	26	33	26

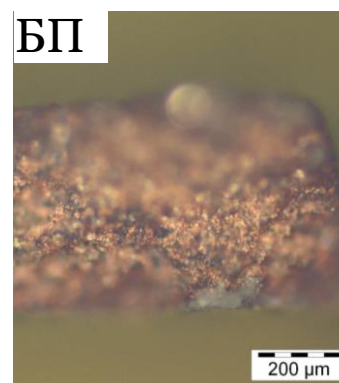
Испытания на растяжение



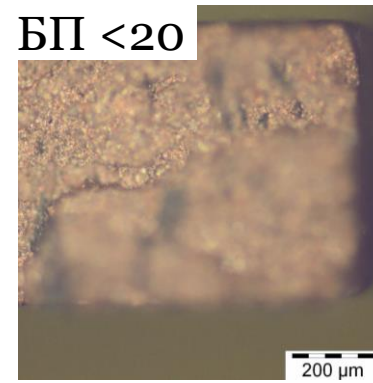
Разрывная машина



$\sigma_B = 640$ МПа
(800 °C / 1 ч.)

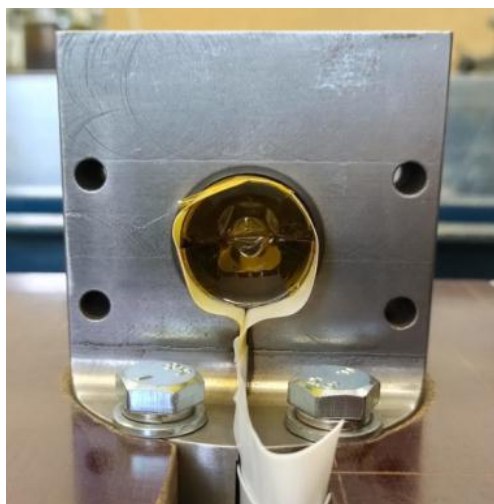


$\sigma_B = 890$ МПа
(750 °C / 1 ч.)

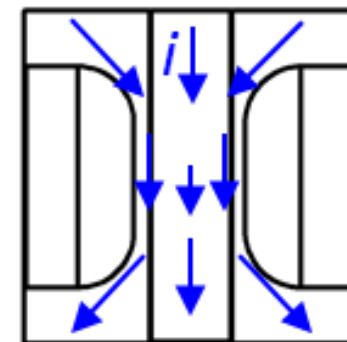


$\sigma_B = 950$ МПа
(810 °C / 1 ч.)

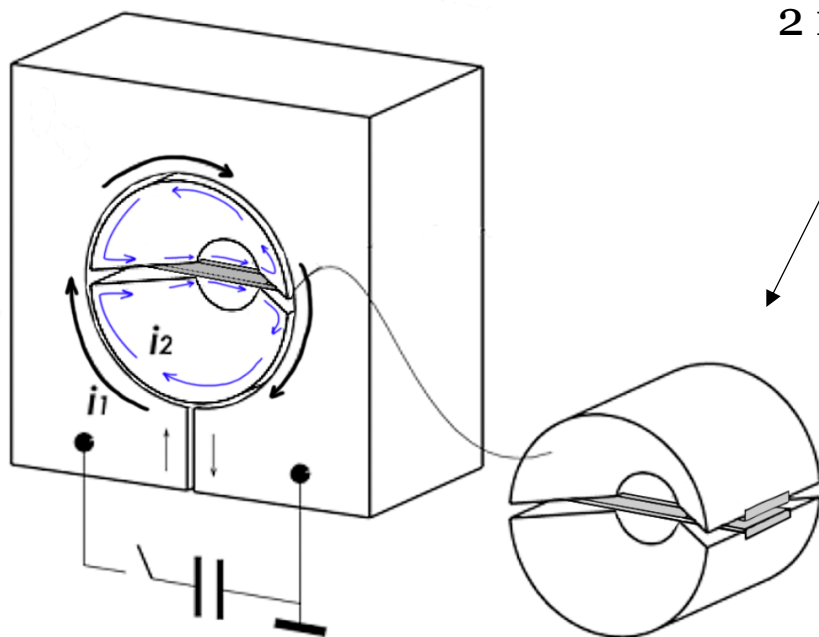
Стойкость при генерации поля 40 Тл



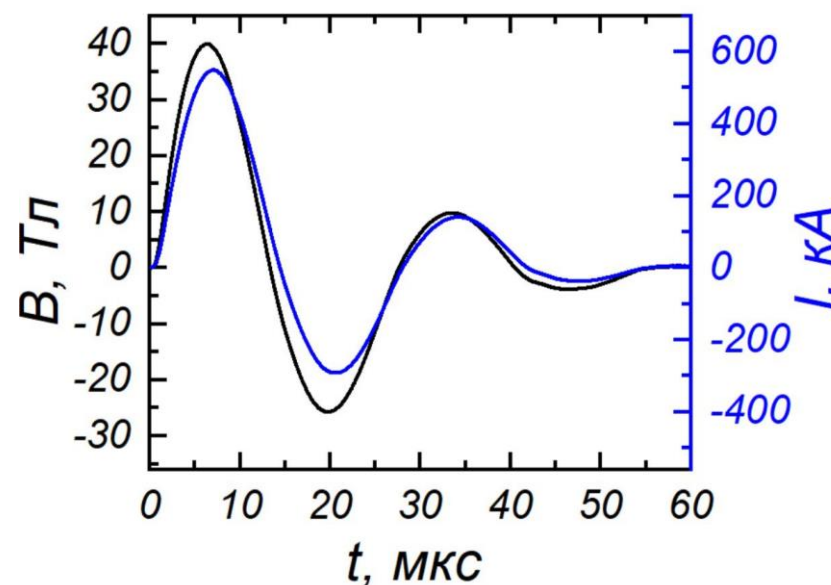
Одновитковый индуктор из стали 30ХГСА с компактами, впаянными в КМП



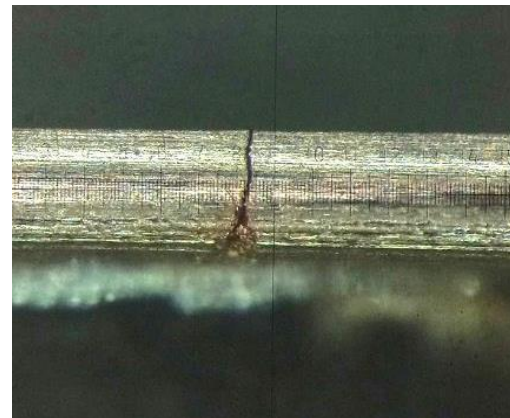
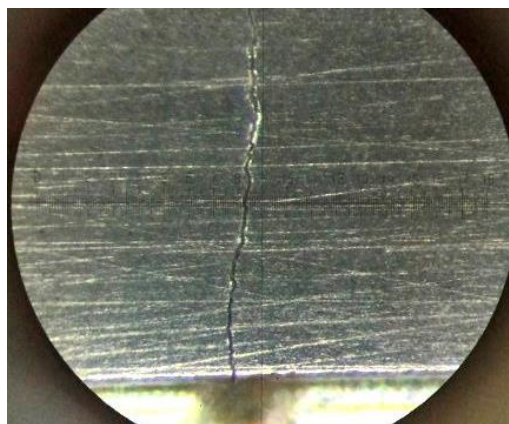
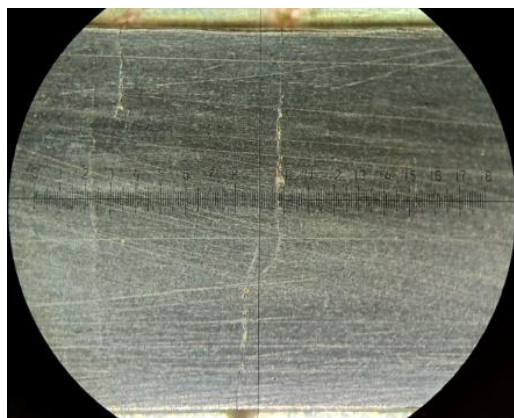
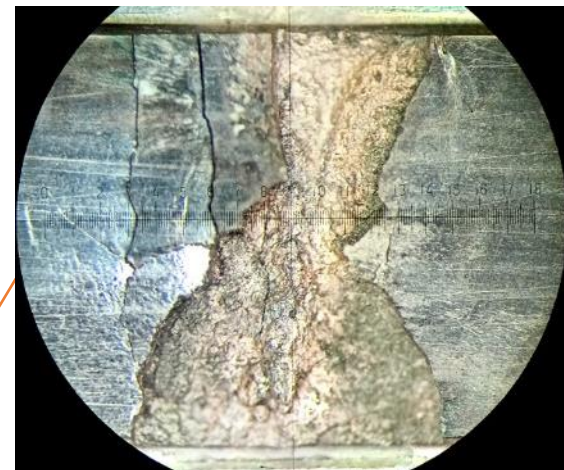
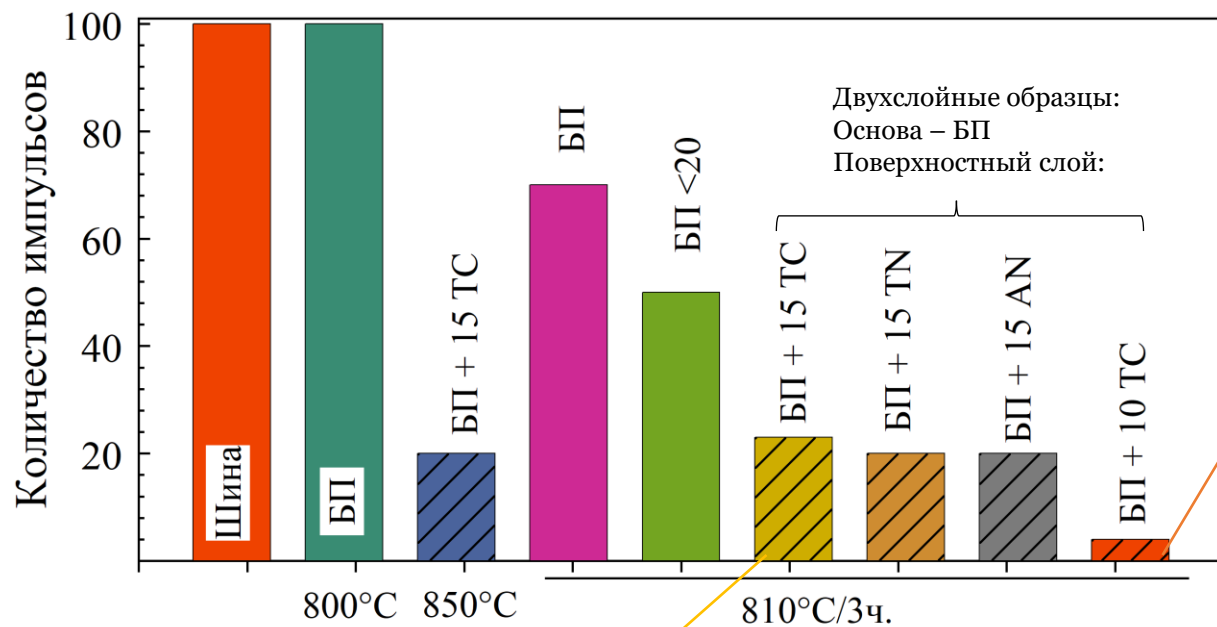
Расположение образца в половине КМП и распределение токов в такой системе



2 шт.



Стойкость при генерации поля 40 Тл



1. Получены материалы на основе порошка наноструктурного Cu-Nb.
2. Структурные изменения в материале при термообработке до 850°C приводят к снижению удельного сопротивления на 30-50%, твердости на 20-50%.
3. Термообработка в 850 °C приводит к возникновению оксидных и карбидных соединений.
4. Оптимальная температура отжига с точки зрения механических свойств – 750-800 °C/1ч
5. Проведены сравнительные испытания волокнистого нанокompозита Cu-18%Nb (коммерческая шина) и двухслойных материалов.
6. Для лучших образцов порошковых материалов ресурс при генерации поля 40 Тл сравним с ресурсом коммерческой шины



Работа выполнена при частичном финансировании проектов РФФИ и БРФФИ, РФФИ и РОСАТОМ (№ 20-58-00029, 20-21-00050).

1. Spirin A.V., Paragin S.N., Krutikov V.I., Zaytsev E.Y., Khrustov V.R., Kaigorodov A.S., Koleuh D.S. Durability study of Bulk Cu-Nb composites in High Magnetic Fields of Microsecond Duration // MG 2020 Proceedings book, Biarritz, France. – 2022. – P.118-121.
2. Zaytsev E, Spirin A., Krutikov V., Paragin S., Zayats S., Kaigorodov A., Koleukh D., Kebets A. Development of material based on nanostructured Cu-Nb alloy for high magnetic field coils of microsecond duration // EFRE 2022 Proceedings book, Tomsk, Russia. – 2022. – P.375-381.

