

**23-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**

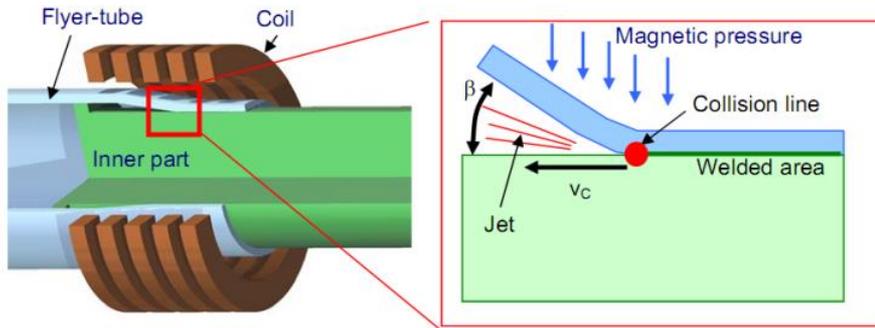
Зайцев Е.Ю.*, Спиринов А.В., Крутиков В.И., Заяц С.В., Паранин С.Н.,
Кайгородов А.С., Колеух Д.С.

ЛПЭ ИЭФ УрО РАН

Введение

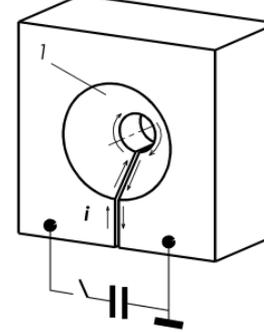


Процесс магнитно-импульсной сварки

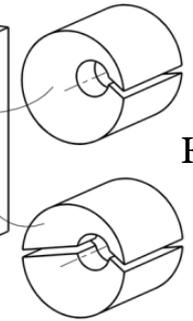
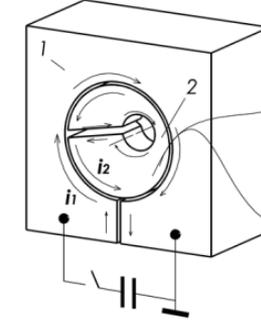


Используемые типы индукторов

Одновитковый индуктор



Индуктор с концентратором магнитного потока (КМП)



КМП

Требования к импульсу поля:

Длительность импульса: 10-100 мкс

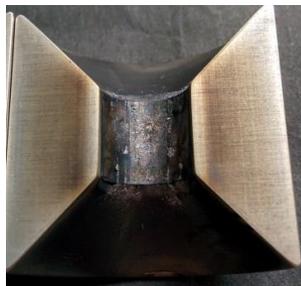
Амплитуда поля: от 40 Тл

Проблема:

Низкая стойкость индукторов



Индуктор из бериллиевой бронзы



Стальной КМП

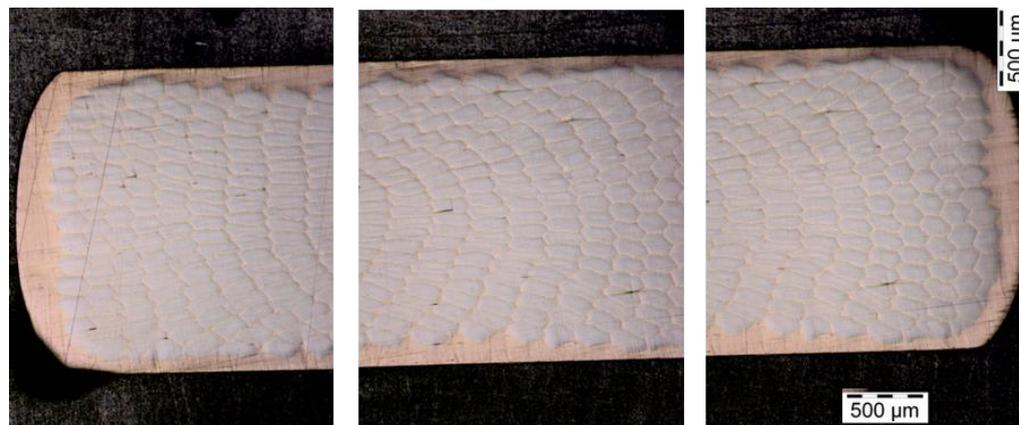
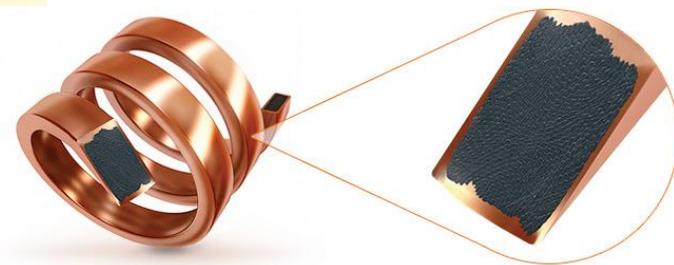
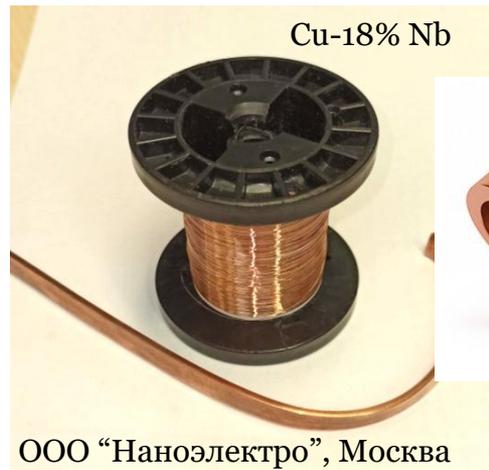


Стальной индуктор

Причина:

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

Наноструктурный медь-ниобиевый сплав



$\rho \approx 120-160\% \text{ IACS}$
 $\sigma_{\text{UTS}} \approx 1 - 1,6 \text{ ГПа}$

Микроскопия поперечного сечения шины 2*8 мм

Цель



Изготовление методами порошковой металлургии компактов из порошка медь-ниобия и определение возможности использования такого материала в сильных магнитных полях (СМП).

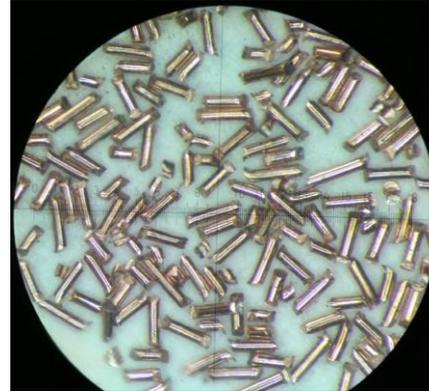
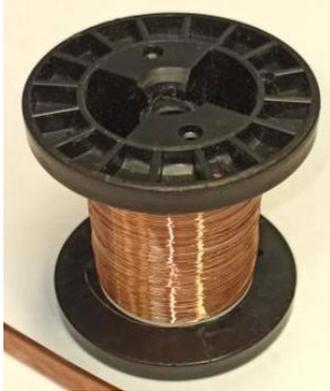
Задачи

1. Получить и исследовать объемный материал на основе наноструктурного сплава Cu-Nb.
2. Исследование свойств материалов при температурах спекания 510-850°C.
3. Испытания при генерации поля 40 Тл микросекундной длительности

Получение порошка



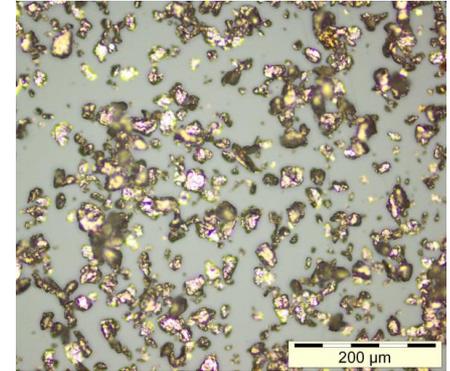
Исходный материал – проволока 0,18 мм



ПОМОЛ

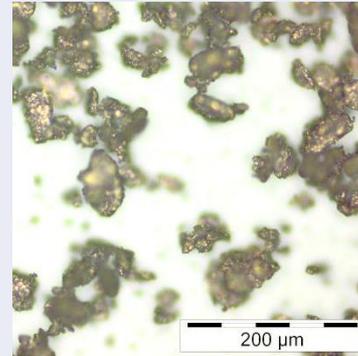
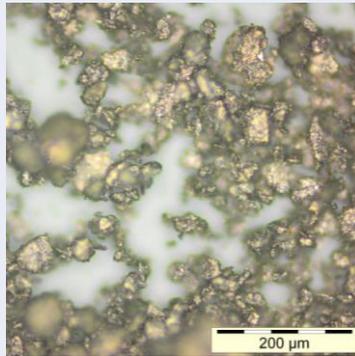
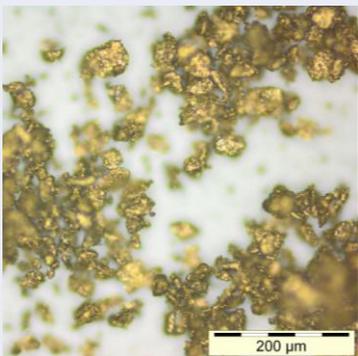


БАЗОВЫЙ порошок Cu-Nb



введение добавок
через помол

Варьирование удельного сопротивления материалов для
формирования двухслойных структур



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

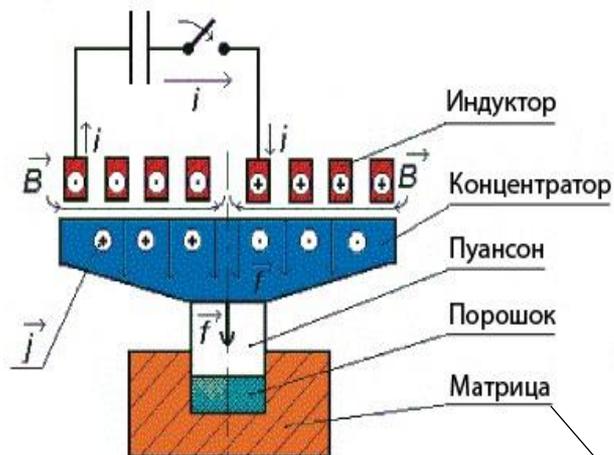
Размер частиц:
Cu-Nb: 20-64 мкм
TiN: < 4 мкм
AlN: < 5 мкм
TiC: < 2 мкм

БП15TiN

БП15TiC

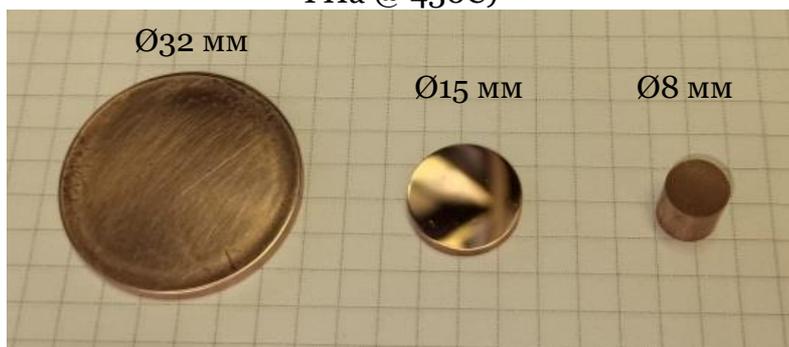
БП15AlN

Получение и подготовка образцов



$t_{\text{имп}}$	500 мкс
T	430°C
U	1,4-2,4 кВ
$P_{\text{мип}}$	До 1,3 ГПа
$P_{\text{вак}}$	10 Па

Сортамент образцов для различных анализов
(получены МИ-прессованием при давлении 1-1,5 ГПа @ 430С)



испытания в КМП,
определение предела
прочности

микромеханические
испытания, РФА

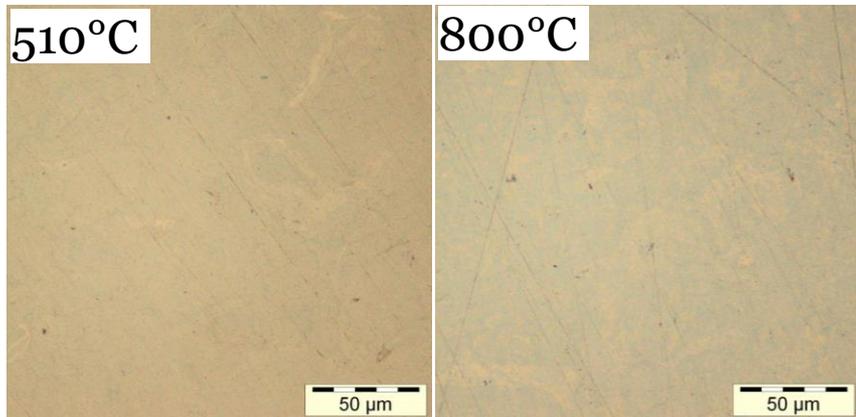
дилатометрия,
удельное сопр.



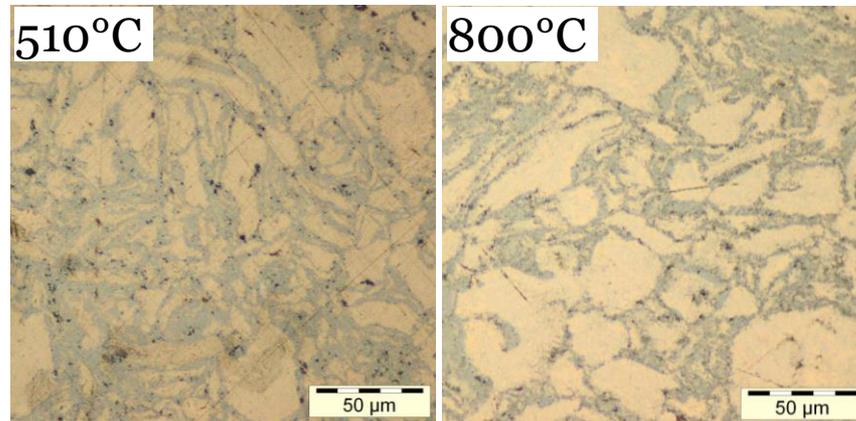
Микроструктура материалов



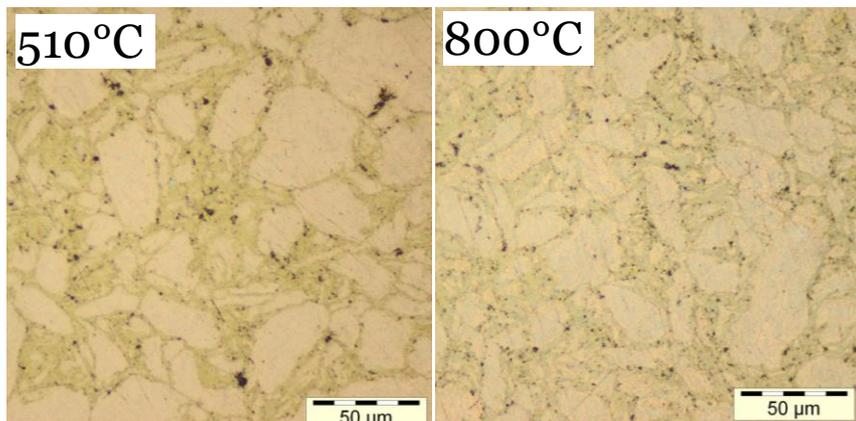
БП



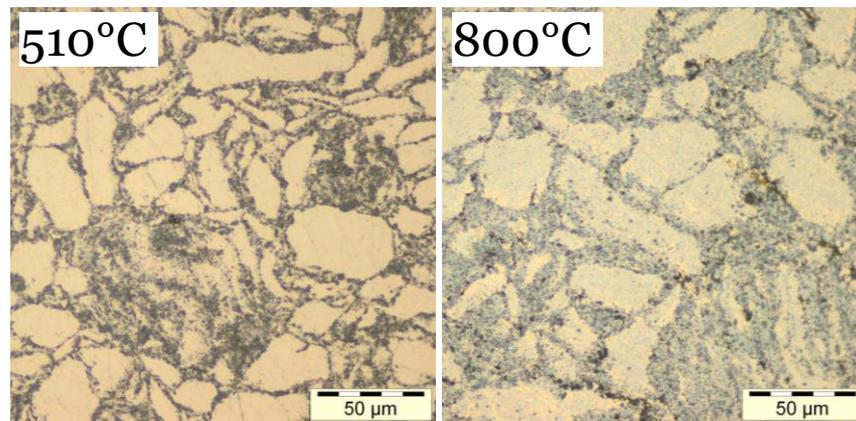
БП+15%TiC



БП+15%TiN



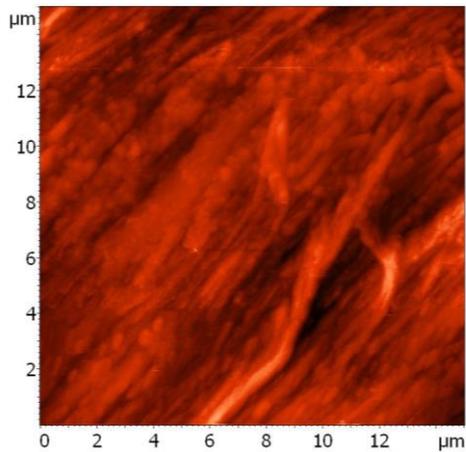
БП+15%AlN



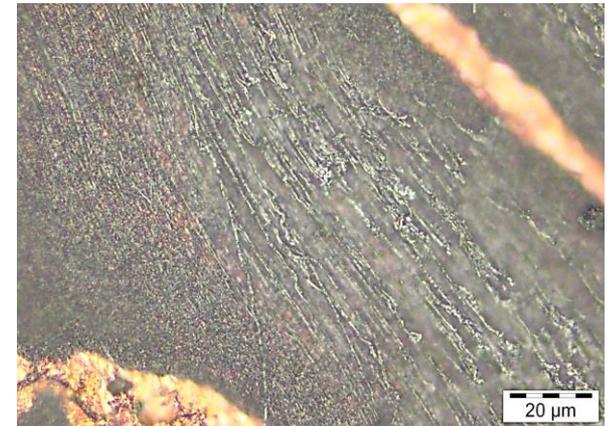
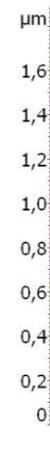
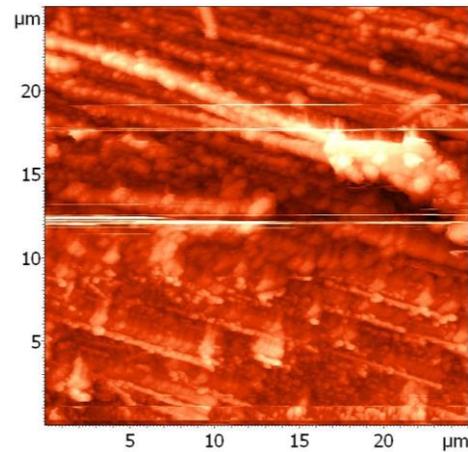
Микроструктура материалов



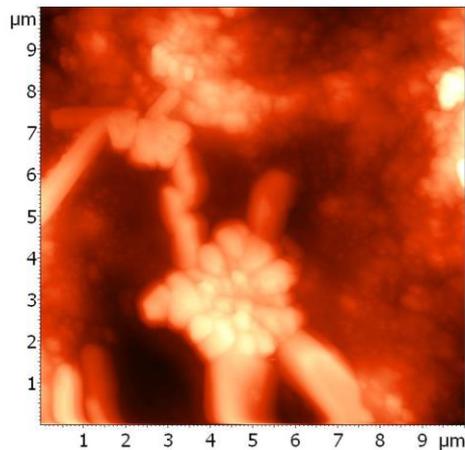
Провод до



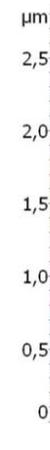
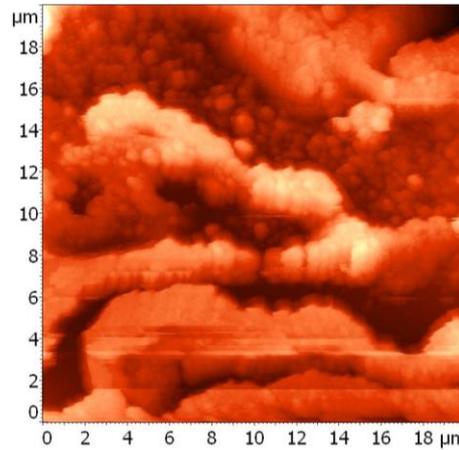
после



Образец БП до

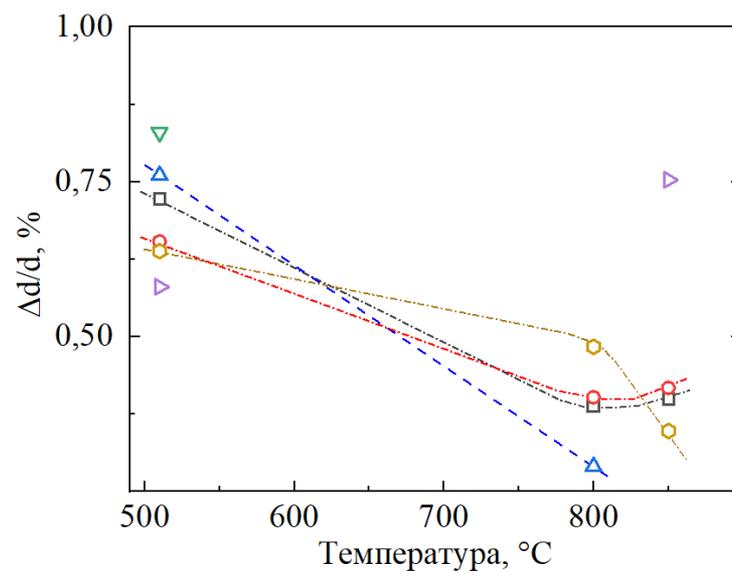
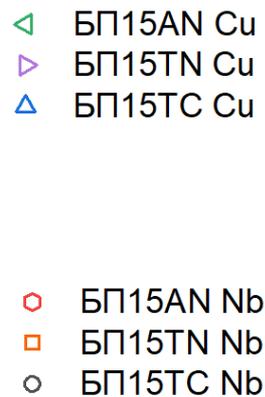
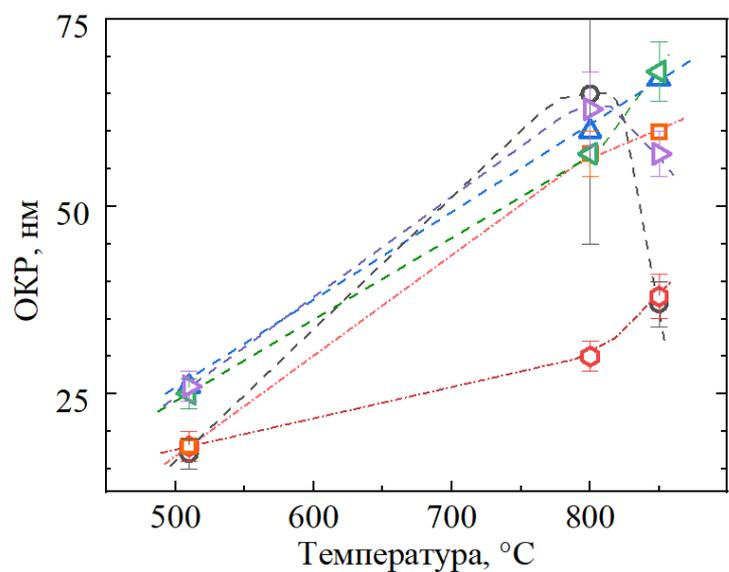
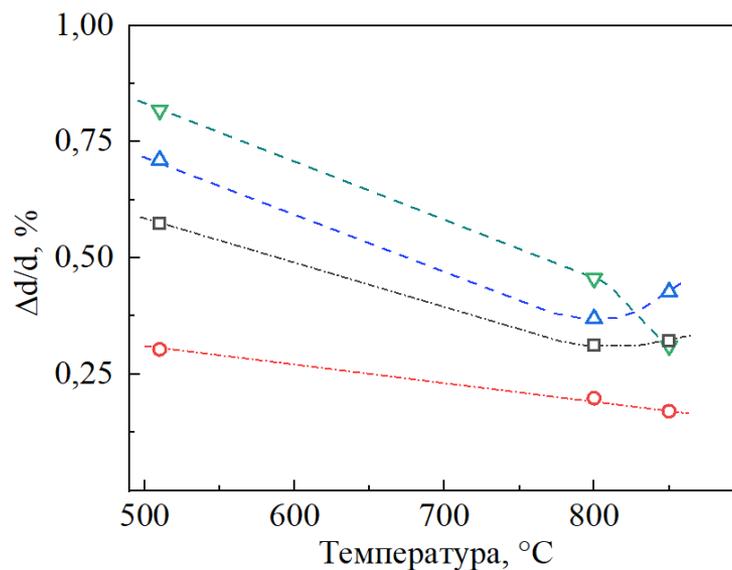
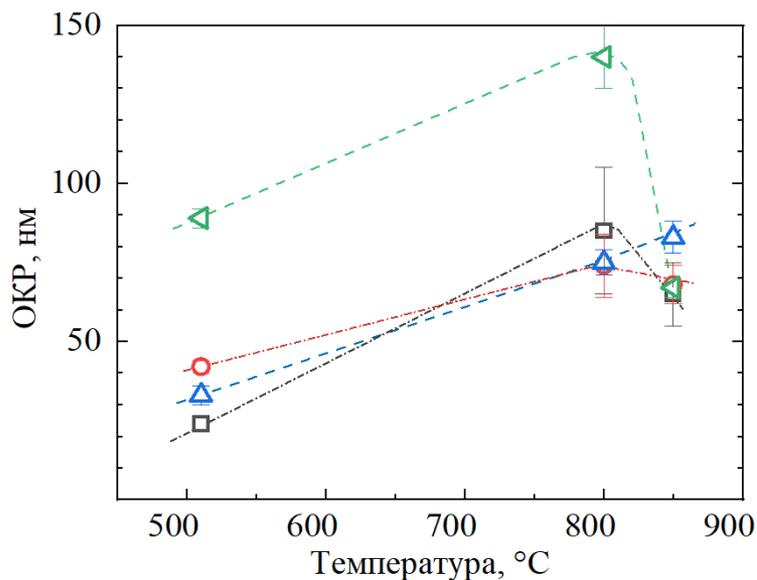


после

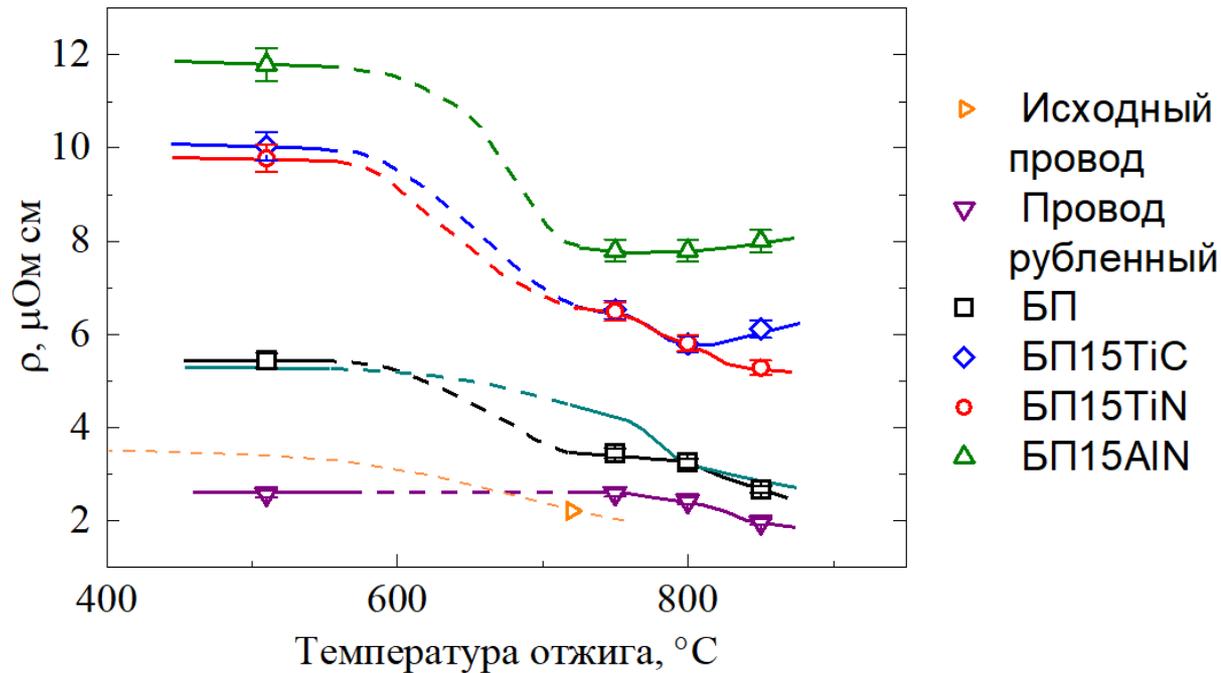


АСМ-изображения
травленных шлифов
образцов до и после
отжига при 800°C.

Структурные характеристики материалов



Удельное сопротивление с температурой отжига

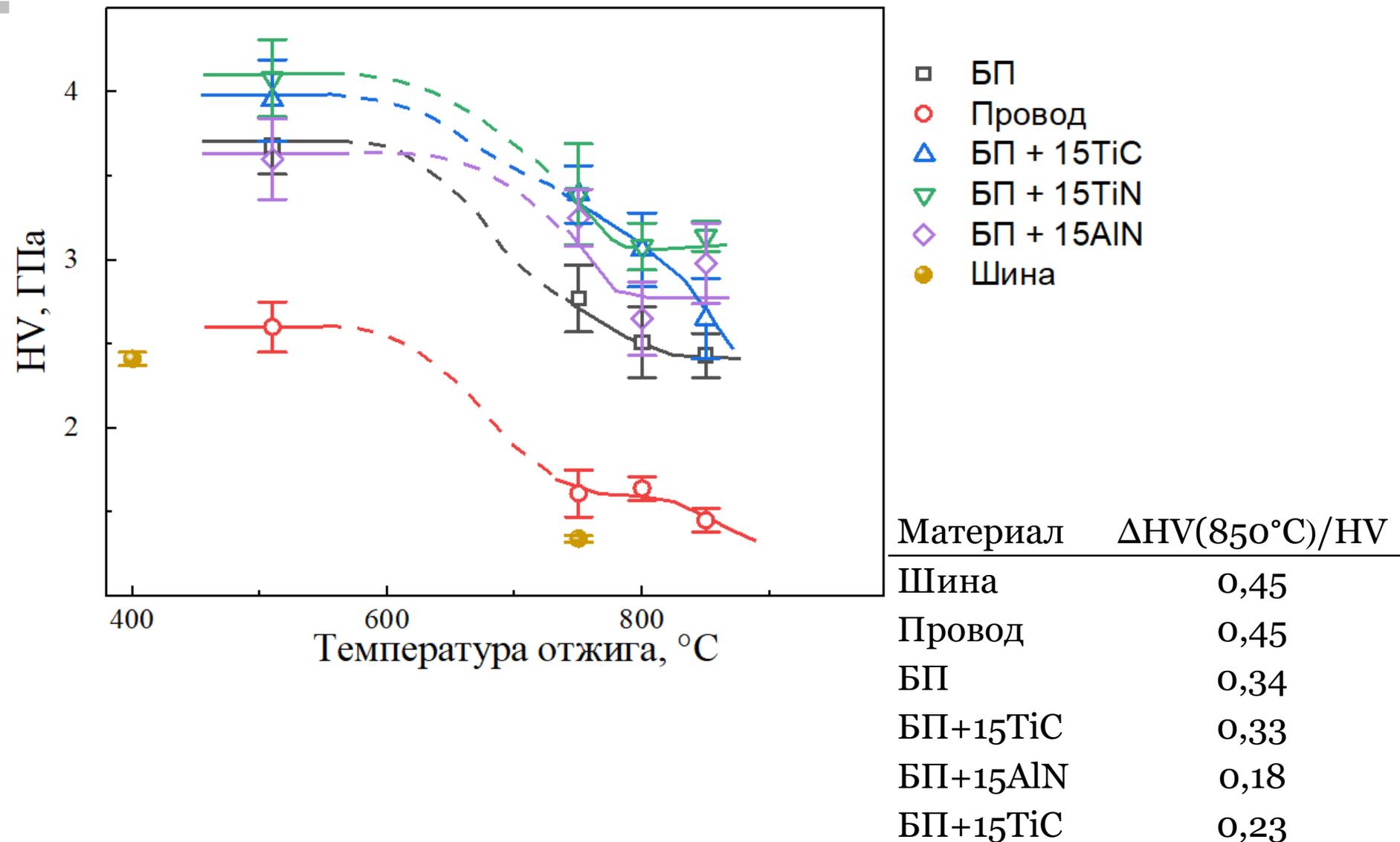


Погрешность определения удельного сопротивления не более 3%

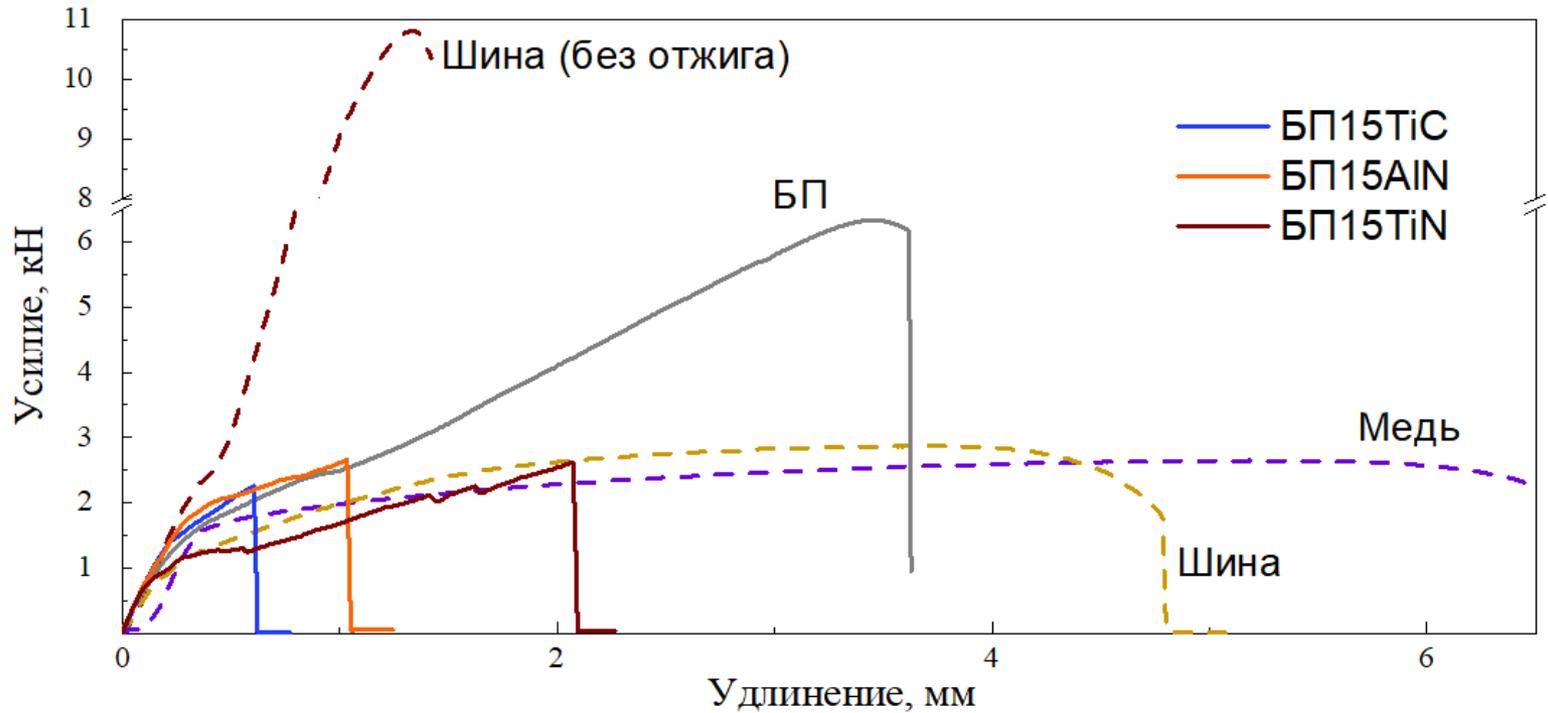
Снижение ρ от начального значения, %

$T_{отж.}, ^\circ C$	БП	БП15TiC	БП15AlN	БП15TiN	Провод
510	-	-	-	-	-
750	36,5	35,0	33,8	33,6	-0,6
800	40,4	42,3	33,9	40,6	6,0
850	51,0	39,2	32,1	46,0	23,5

Микротвердость материалов с температурой отжига



Испытания на разрыв



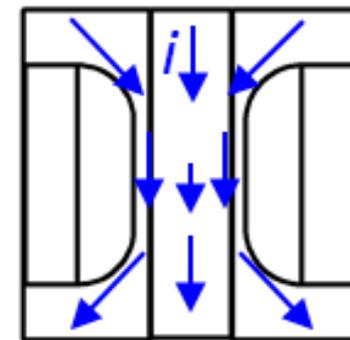
Материал	$T_{\text{отж.}}, ^\circ\text{C}$	$\sigma_{\text{в}}, \text{МПа}$
Медь	—	236
Шина	—	1150
Шина	850	375–395
Провод	850	375–438
БП	850	760–765
БП15TiC	850	244– 523
БП15AlN	850	114–287
БП15TiN	850	278–367

Физико-технический институт
НАН Беларуси, Минск

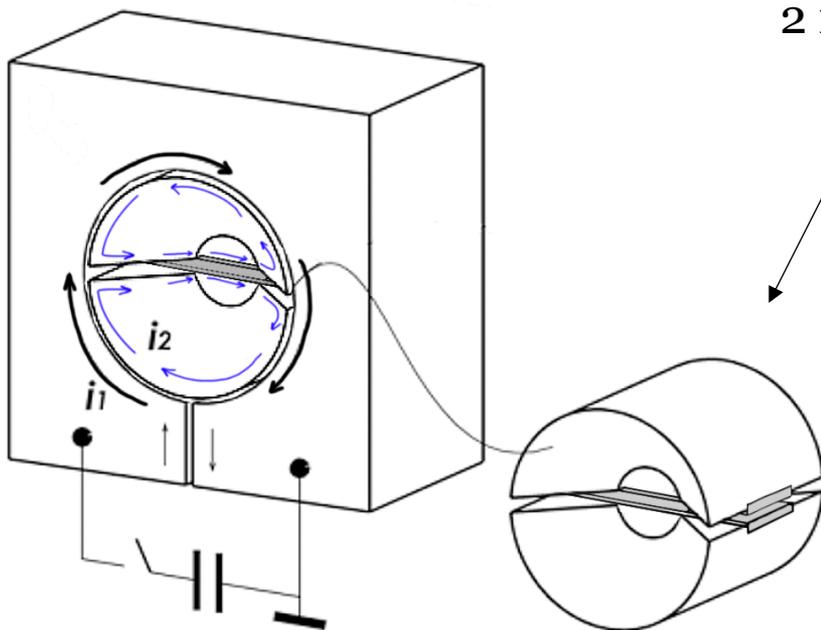
Стойкость при генерации поля 40 Тл



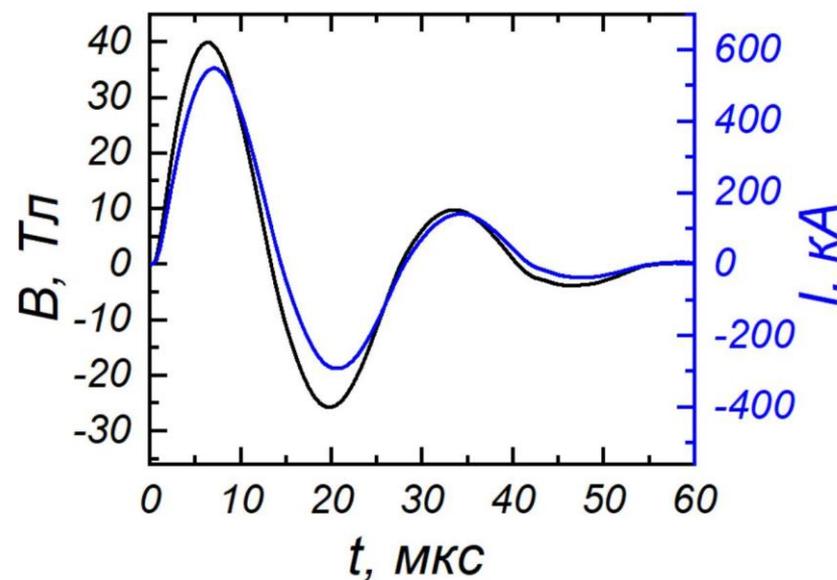
Одновитковый индуктор из стали 30ХГСА с компактами, впаянными в КМП



Расположение образца в половине КМП и распределение токов в такой системе

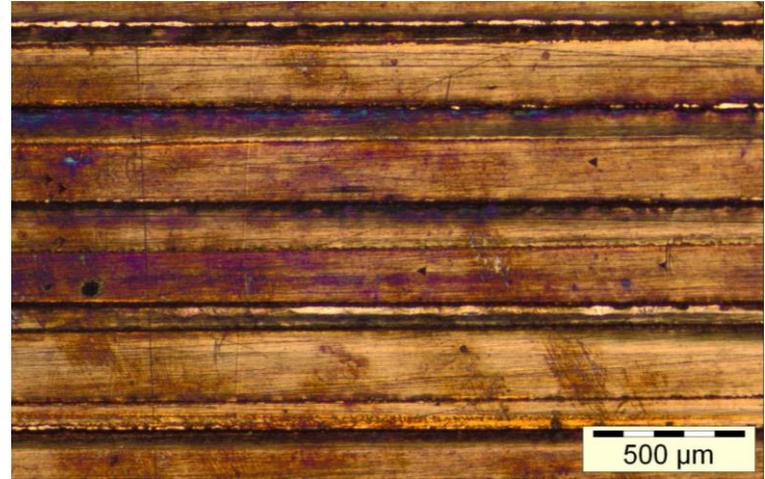
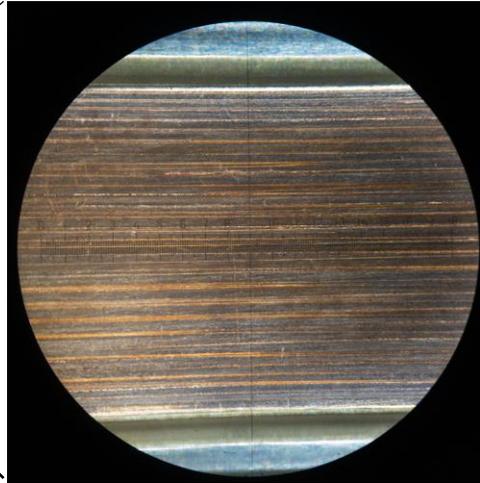
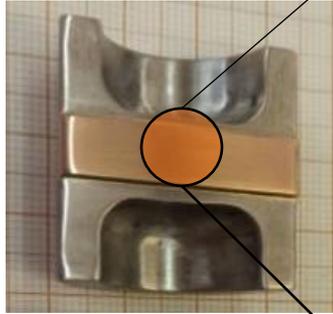


2 шт.

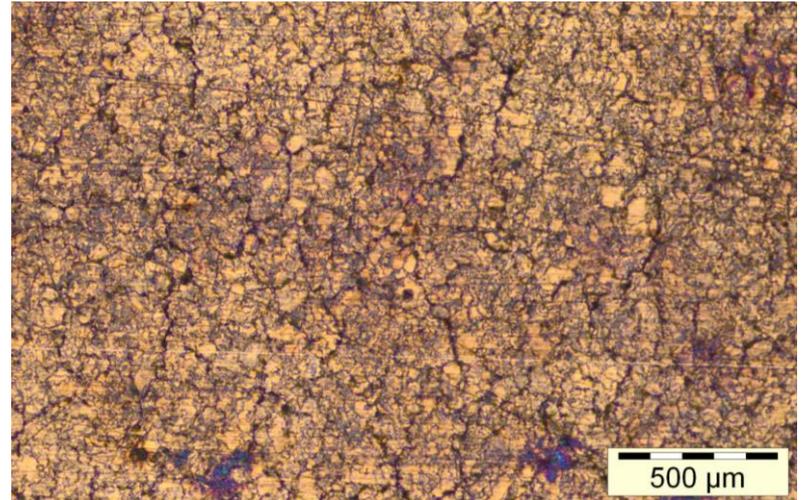
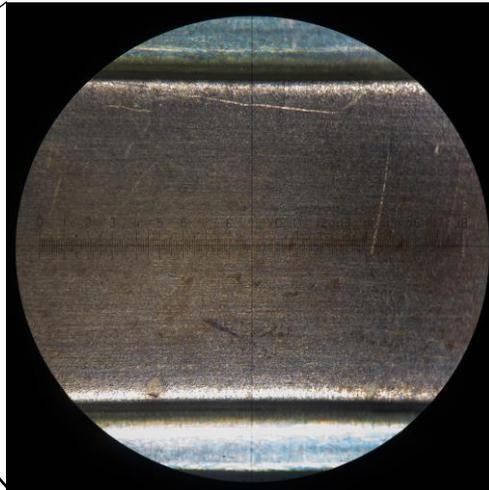
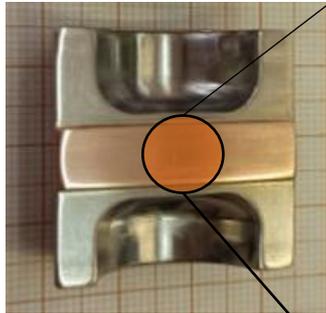


Стойкость при генерации поля 40 Тл

Шина Cu-Nb



100 импульсов



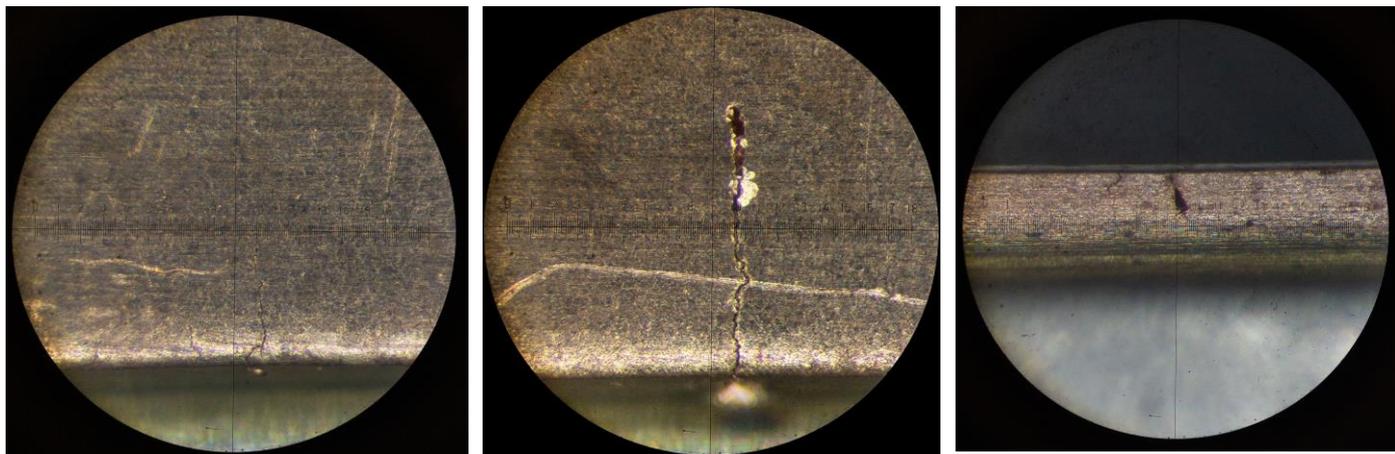
Образец из
базового порошка
(спекание 800°C)

Стойкость при генерации поля



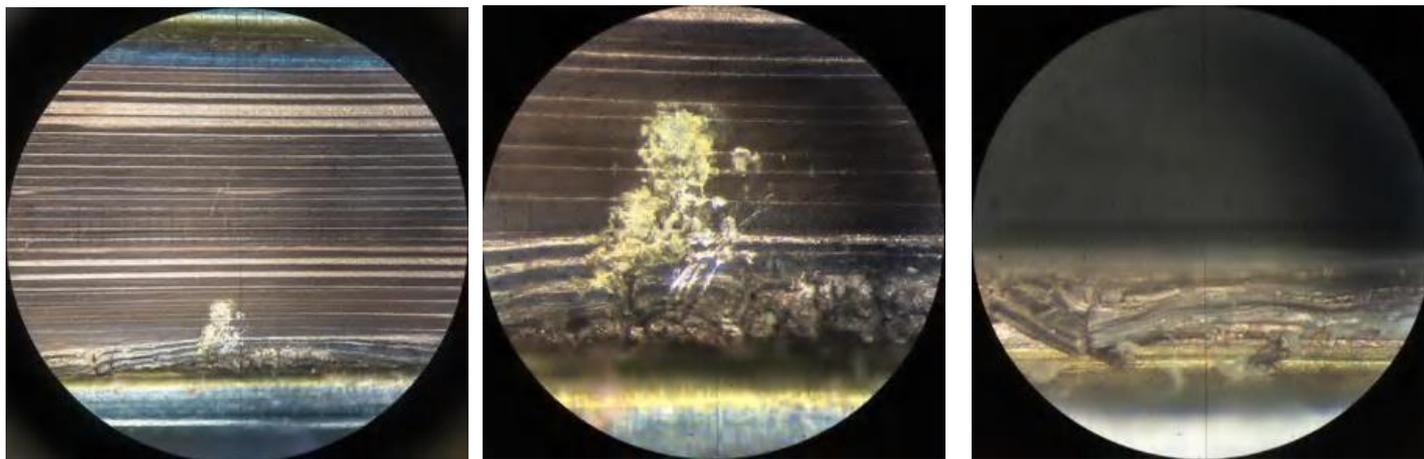
Образец из
базового
порошка
(спекание 850°C)

40 Тл
120 импульсов



Дополнительное
испытание шины.
Поле 50 Тл

10 импульсов



Стойкость при генерации поля 40 Тл

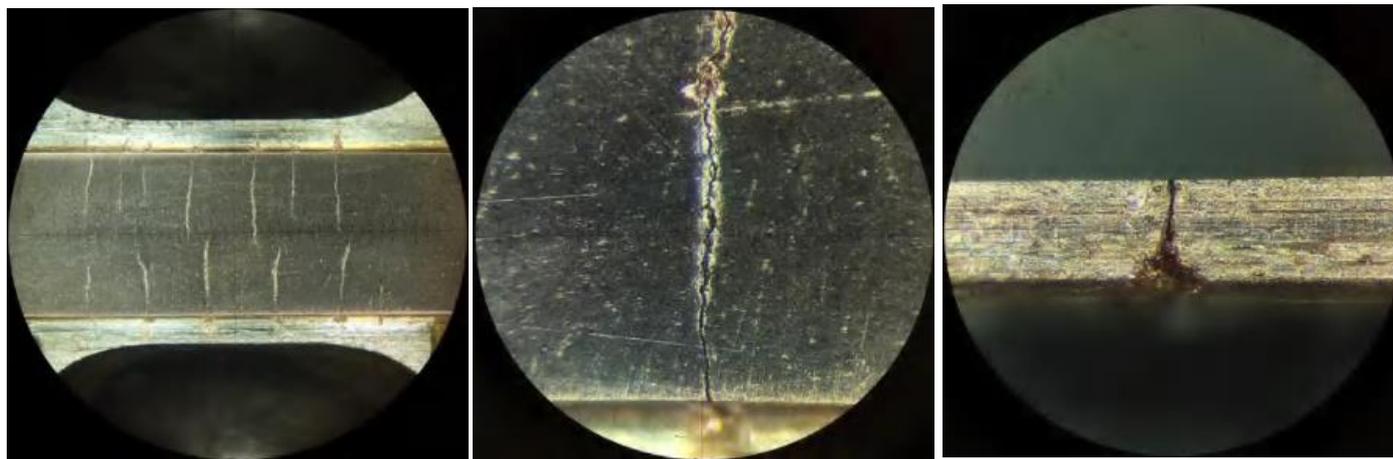


Двухслойный
образец:

Верхний слой
БП 15TiC

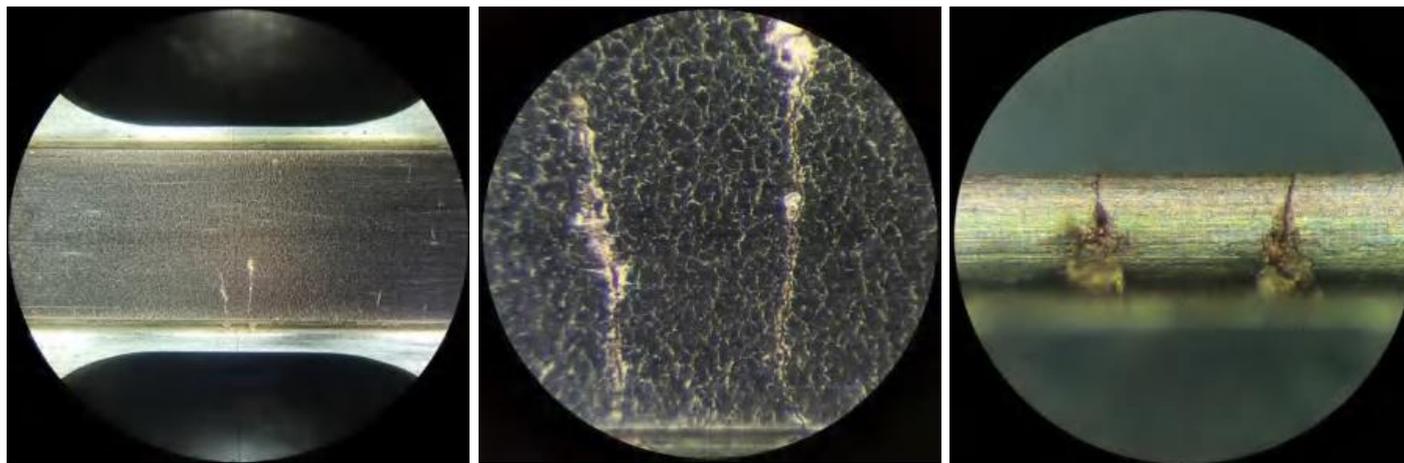
Нижний слой
БП

20 импульсов



Образец из
спрессованного
рубленного
провода

80 импульсов



Образцы спечены при 850°C

Выводы



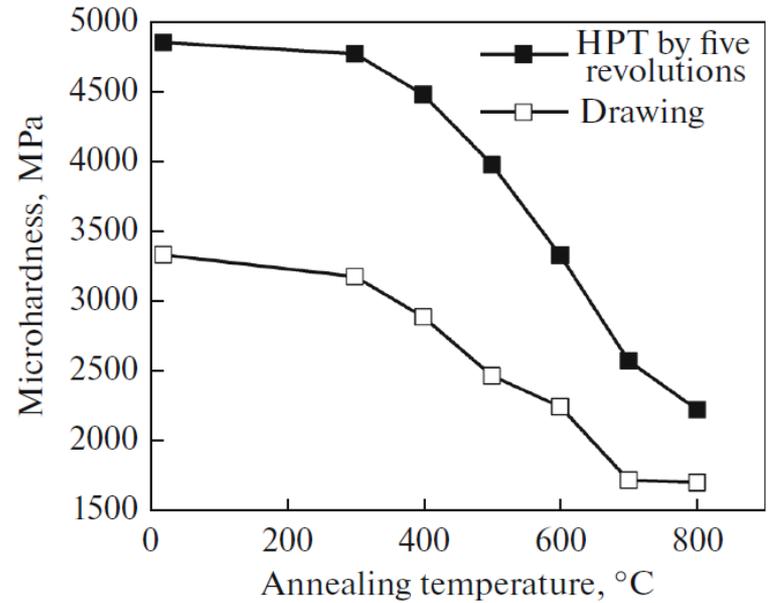
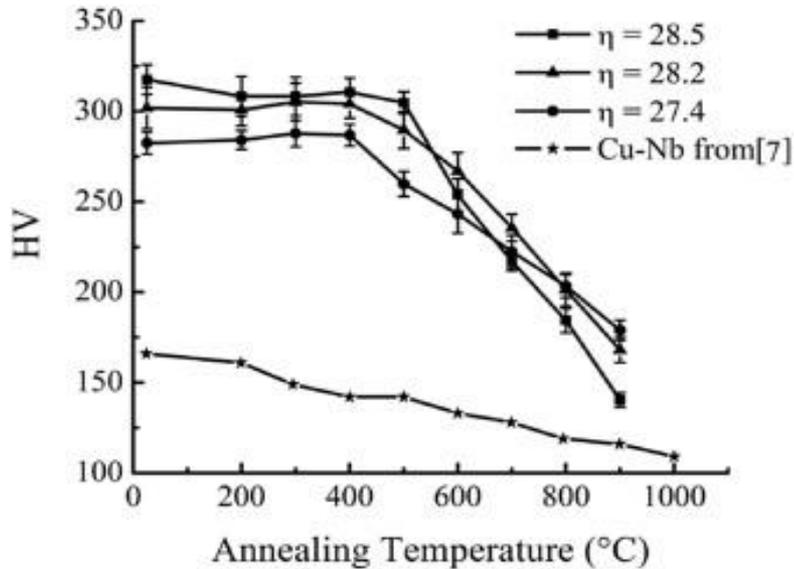
1. Получены материалы на основе порошка наноструктурного Cu-Nb с добавками TiC, TiN, AlN.
2. Структурные изменения в материале при термообработке до 800°C приводят к снижению удельного сопротивления на 30-50%, твердости на 20-50%.
3. Термообработка в 850 °C приводит к возникновению оксидных и карбидных соединений, в особенности для материалов с добавками.
4. Предел прочности на разрыв после термообработки у исходной шины в 2 раза меньше чем у образцов из базового порошка и с добавкой TiC.
5. Проведены сравнительные испытания волокнистого нанокompозита Cu-18%Nb (коммерческая шина), однослойных структур на основе мелкодисперсного порошка Cu-Nb и двухслойной структуры с высокорезистивным слоем, содержащим добавку 15 % TiC.



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

Spirin A.V., Paranin 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.

Механические свойства материалов



L.P. Deng et.al., “*Thermal stability of Cu-Nb microcomposite wires*”, Acta Materialia. 101, 181-188 (2015)
H.R.Z. Sandim et.al., “*Annealing effects on the microstructure and texture of a multifilamentary Cu-Nb composite wire*”, Scripta Materialia, 51(11), 1099–1104 (2004)
E. N. Popovaa, * and I. L. Deryaginaa, “*Evolution of Structure of Cu-Nb Composite under High-Pressure Torsion and Subsequent Annealing*”, Physics of Metals and Metallography, 2020, Vol. 121, No. 12, pp. 1182–1187.