

УДК 621.98.044.7; 669.2.017; 620.18

**А. В. Кебец<sup>1</sup>, Ю. И. Кривонос<sup>1</sup>, Т. Ю. Бучик<sup>1</sup>,  
С. Н. Паранин<sup>2</sup>**, доктор технических наук, **А. В. Спириин<sup>2</sup>**, кандидат технических наук  
<sup>1</sup>Государственное научное учреждение «Физико-технический институт Национальной академии наук  
Беларуси», ул. Академика Купревича, 10, 220084 Минск, Республика Беларусь,  
+375 (44) 718 04 69, jury\_kriv@mail.ru

<sup>2</sup>Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт электрофизики Уральского отделения  
Российской академии наук, ул. Амундсена, 106, 620016 Екатеринбург, Российская Федерация, +7 (343) 267 87 96

## ИССЛЕДОВАНИЕ МОДЕЛЬНЫХ ИНДУКТОРНЫХ СИСТЕМ НА ОСНОВЕ ВОЛОКНИСТОГО НАНОКОМПОЗИТА МЕЛКОДИСПЕРСНОГО СПЛАВА МЕДЬ-НИОБИЙ

Приведены результаты экспериментальных исследований прочностных и электропроводящих свойств материала для изготовления высокопрочных индукторных систем с использованием технологии прессования смесей элементов мелкодисперсного наноструктурного провода с порошком меди, спрессованных в компакт на магнитно-импульсном прессе с последующей термообработкой. Показана область применения индукторных систем на производстве. Результаты проведенных исследований на модельных индукторных системах при генерации сильного магнитного поля на разных частотах показали, что применение мелкодисперсного сплава Cu-Nb позволяет повысить стойкость токопровода в 3 раза по сравнению с токопроводом из медной шины и создавать индукторы с высоким ресурсом для обработки металлов давлением: штамповки тонколистовых материалов и формовки изделий сложной формы; процессы получения прочных, плотных и герметичных соединений трубчатых заготовок.

**Ключевые слова:** магнитно-импульсная обработка; сильное импульсное магнитное поле; индуктор; наноккомпозит.

Рис. 6. Табл. 1. Библиогр.: 7 назв.

**A. V. Kebets<sup>1</sup>, Y. I. Krivonos<sup>1</sup>, T. Y. Buchik<sup>1</sup>,  
S. N. Paraniin<sup>2</sup>**, DSc of Technical Sciences, **A. V. Spirin<sup>2</sup>**, PhD in Technical Sciences  
<sup>1</sup>State scientific institution “Physical-Technical Institute of the National Academy of Sciences of Belarus”  
10 Academician Kuprevich Str., 220084 Minsk, the Republic of Belarus, +375 (44) 718 04 69, jury\_kriv@mail.ru  
<sup>2</sup>The Institute of Electrophysics of the Ural Division of the Russian Academy of Sciences  
106 Amundsen Str., 620016 Yekaterinburg, Russian Federation, +7 (343) 267 87 96

## STUDY OF MODEL INDUCTOR SYSTEMS BASED ON A FIBROUS NANOCOMPOSITE OF A FINELY DISPERSED COPPER-NIOBIUM ALLOY

The results of experimental studies of the strength and conductive properties of the material for the manufacture of high-strength inductor systems using the technology of elements pressing mixtures of fine nanostructured wire with copper powder pressed into a compact on a magnetic pulse press with subsequent heat treatment are presented. The inductor systems application area in production is shown. The results of the conducted research on model inductor systems when generating a strong magnetic field at different frequencies has showed that the use of a fine Cu-Nb alloy allows to increase the resistance of the current line in 3 times, compared with a copper bus bar current line and allows to create inductors with a high resource for metal processing by pressure: stamping of thin-sheet materials and molding of complex shape products; processes for obtaining strong, dense and hermetic joints of tubular blanks.

**Key words:** magnetic pulse processing; strong pulsed magnetic field; inductor; nanocomposite.

Fig. 6. Table. 1. Ref.: 7 titles.

**Введение.** В арсенале современных технологий обработки материалов давлением магнитно-импульсной обработке металлов (МИОМ) принадлежит определенное место прежде всего как методу бесконтактного силового воздействия на металл путем непосредственного преобразования электрической энергии в работу деформации.

Метод МИОМ с минимальными затратами на проектирование и изготовление формообразующего инструмента и короткими сроками освоения нового производства позволяет выполнять различные технологические операции листовой штамповки: вырубки-пробивки, формовки-вытяжки, отбортовки, чеканки-калибровки, резки, обжима и раздачи тонкостенных труб, а также операции получения неразъемных и подвижных соединений, сварки давлением разнородных металлов [1].

В Беларуси функционируют производственные участки МИОМ на ОАО «МЗКТ», ОАО «БелАЗ», ОАО «МАЗ», ОАО «БПОВЦ», оснащенные магнитно-импульсными прессами, разработанными в ФТИ НАН Беларуси, требующими эффективного, долговечного инструмента, в состав которого входит индукторная система, генерирующая импульсное магнитное поле необходимой напряженности, длительности и конфигурации.

Магнитно-импульсная обработка (далее — МИО) реализуется в результате взаимодействия импульсного магнитного поля индуктора-инструмента с наведенными в металлической заготовке вихревыми токами. Характерные значения индукции магнитного поля составляют 30...60 Тл, а длительность полупериода импульса поля — 5...100 мкс. Для генерации сильных импульсных магнитных полей (далее — СМП) с указанными параметрами используют индукторы трех типов: 1) многовитковые спиральные; 2) одновитковые соленоиды; 3) индукторы с концентратором магнитного потока.

Последние представляют собой модификацию импульсного трансформатора со вторичной обмоткой в виде массивного одновиткового соленоида — концентратора потока и используются для увеличения плотности магнитного потока в заданной области пространства. Спиральные соленоиды применяют чаще всего в процессах прессования, когда наилучший эффект достигается при длительности импульсов около 100 мкс [2]. Для получения импульсов магнитного поля с длительностью полупериода 5...20 мкс и амплитудой индукции 40...60 Тл применяют индукторы одновитковые или с концентратором потока и первичной обмоткой, имеющей малое число витков. Индуктор с концентратором потока позволяет конструировать большое разнообразие геометрических конфигураций и в работах по МИО встречается чаще всего [1]. Для формования листовых деталей применяют плоские индукторы со спиральной или произвольной укладкой витков. Ресурс индукторов в таких условиях оказывается невысоким, поскольку материал индуктора подвергается интенсивным термомеханическим нагрузкам.

При протекании импульсного тока через индуктор основная его часть концентрируется в поверхностном слое проводника — скин-слое, толщина которого определяется электропроводностью материала индуктора, формой и длительностью импульса тока. Закономерности распределения индукции магнитного поля, плотности тока, температуры и механических напряжений по глубине токонесущего слоя обусловлены диффузией магнитного поля. Корректное описание диффузии СМП требует учета нагрева проводника за счет выделения джоулева тепла. Решение данной задачи может быть получено только численными методами. Однако уже в работе [3] в рамках метода скин-слоя для среды с однородной электропроводностью показано, что плотность тепловой энергии, выделяемой в проводнике, примерно равна плотности энергии магнитного поля у его поверхности. При этом температура, до которой нагревается скин-слой, определяется теплоемкостью материала и в первом приближении не зависит от его начальной электропроводности. К примеру, в магнитном поле с индукцией 50 Тл и длительностью 15 мкс температура поверхности стального индуктора может достигать 600 °С за один импульс. Для массивного проводника, в котором ток протекает лишь в поверхностном слое, вызывая его нагрев, при неизменной температуре оставшейся части проводника термическое расширение и последующее охлаждение в поверхностном слое приводят к возникновению растягивающих усилий в стали, превосходящих предел прочности, и, как следствие, к растрескиванию поверхности. Величина температурных механических напряжений в поверхностном слое проводника может значительно превосходить «магнитное давление» и зависит от длительности и формы импульса индукции. При этом

пространственная область действия интенсивных температурных напряжений ограничена тонким слоем с толщиной порядка глубины проникновения поля. Процесс разрушения соленоида в своей начальной стадии происходит в приповерхностном слое и обусловлен периодически возникающими температурными напряжениями высокой интенсивности, достигающими предела прочности материала. Такой механизм разрушения хорошо известен как малоцикловая усталость — появление на поверхности микротрещин. В последующих актах генерации поля трещины стремительно развиваются вследствие известного в аппаратуре сильных токов «эффекта пилы» [4; 5].

Помимо высоких тепловых нагрузок рабочая поверхность соленоида (или концентратора) подвергается высоким механическим напряжениям, сопоставимым с уровнем перехода материала в состояние пластического течения. Например, магнитное поле индукцией 50 Тл создает давление до 1 ГПа. В совокупности данные факторы и определяют основные проблемы при генерации СМП: разрушение индуктора из-за пластической деформации металла в рабочей области, растрескивания в результате малоциклового усталости, термического растрескивания (свойственно твердым материалам); все это к тому же сопровождается неоднородным высокотемпературным окислением [4; 5]. Проблема создания эффективных индукторных систем для получения сверхсильных импульсных магнитных полей возникла в начале прошлого века при исследовании многих разделов физики твердого тела, ядерной физики, при решении проблем термоядерного синтеза. Созданные в 50-е годы индукторные системы дали исследователям возможность получить магнитные поля с индукцией до 50 Тл, при которой большинство металлов теряют прочность и переходят в стадию плавления или испарения. В связи с этим проблема выбора или разработка нового материала индуктора является ключевой задачей.

Для многократной генерации коротких импульсов СМП материал индуктора должен оптимально сочетать различные свойства: высокую электропроводность, прочность, ударную вязкость, теплоёмкость, температуру плавления и стойкость к окислению при высоких температурах, также важен низкий коэффициент термического расширения и высокие температуры термообработки, если таковые используются.

Низкие прочность и термическая стойкость индукторных систем с токопроводящими элементами из легированных бронз, имеющих высокое электросопротивление, являются основной причиной, сдерживающей широкое использование технологии МИО в производственной практике.

**Материалы и методы исследования.** В данной работе была поставлена задача использования проводов из волокнистого нанокompозита Cu-Nb для изготовления индукторов.

Из класса композитных материалов особый интерес по своим характеристикам представляет наноструктурный композит Cu-Nb с близкой к меди проводимостью (50...60 % IACS) и высоким сопротивлением разрыву (1,1—1,2 ГПа) [6; 7], разработанный и выпускаемый в виде шины с сечением 7,96 мм<sup>2</sup> в ООО «НПП «Нанозлектро» (Москва), который совершил прорыв в мировой практике получения сверхсильных магнитных полей.

Для проведения прочностных испытаний использовались образцы из волокнистого нанокompозита в составе, заявленном производителем: Cu-18 масс.%Nb. Это состав сплава в исходной отливке, которую дальше многократно волочат в медных оболочках для формирования многожильной сотовой структуры провода. Для получения материала с последующим помолом был использован провод диаметром 0,18 мм от того же производителя и того же состава в исходном сплаве.

Для помола провода его необходимо было дезинтегрировать на фрагменты. Для этих целей был разработан и изготовлен лабораторный аппарат, работающий по принципу гильотины и выполненный на основе электромагнитного привода. Рабочими элементами аппарата

являются ножи из твердого сплава ВК8, один неподвижный, другой подвижный. Аппарат работает в автоматическом режиме с регулируемой частотой срабатывания ножа 1...10 Гц и имеет механизм подачи провода со скоростью до 5 мм/с. Согласованное действие механизма подачи и гильотины обеспечивается драйвером на микроконтроллере. После рубки была получена сечка, состоящая из фрагментов провода длиной 0,5...1,0 мм, которая подвергалась механической очистке от загрязнений и отмывке в бензин-ацетоновой смеси в ультразвуковой ванне.

Далее полученную сечку провода подвергали помолу в шаровой мельнице планетарного типа.

*Получение компактных образцов методом магнитно-импульсного прессования.* Компактирование образцов мелкодисперсного состава после помола полученной сечки осуществляли одноосным магнитно-импульсным прессованием в диски различного диаметра: 8 и 32 мм. Для этого использовали установку магнитно-импульсного прессования, представляющую собой генератор импульсных токов на основе емкостного накопителя, рабочий инструмент — индуктор. При протекании через индуктор импульсного тока под действием давления импульсного магнитного поля индуктора происходит ускорение проводящей части пресса — концентратора, формирующего импульс силы (давления), воздействующий на порошок — метод электромагнитного молота. Длительность импульса тока через индуктор для данной установки составляет 500 мкс, амплитуда давления в порошке достигает 1,5 ГПа и ограничивается в основном прочностью пресс-инструмента. Управление давлением в процессе прессования осуществляется варьированием энергии накопителя (амплитуды разрядного тока и, соответственно, амплитуды магнитного поля), определяемой зарядным напряжением. Прессование осуществляли в жестких матрицах из закаленной конструкционной стали.

На образцах размером 8 × 12 мм проводили измерения удельного сопротивления на сжатие до и после термической обработки. Из дисков диаметром 32 мм изготавливали образцы для испытаний на растяжение (рисунок 1).

Термическая обработка компактных образцов проводилась в вакуумной печи. Для изучения эволюции структурных, прочностных и электрических характеристик получаемых материалов отжиг компактных образцов из сечки провода и помольного состава производили при различных температурах: 700, 800, 850 и 900 °С, скорость нагрева — около 15 °С/мин с выдержкой на максимальной температуре 1 ч. Максимальная температура длительной обработки — 850 °С, кратковременной — до 950 °С, достигаемый уровень вакуума —  $2 \times 10^{-5}$  торр.

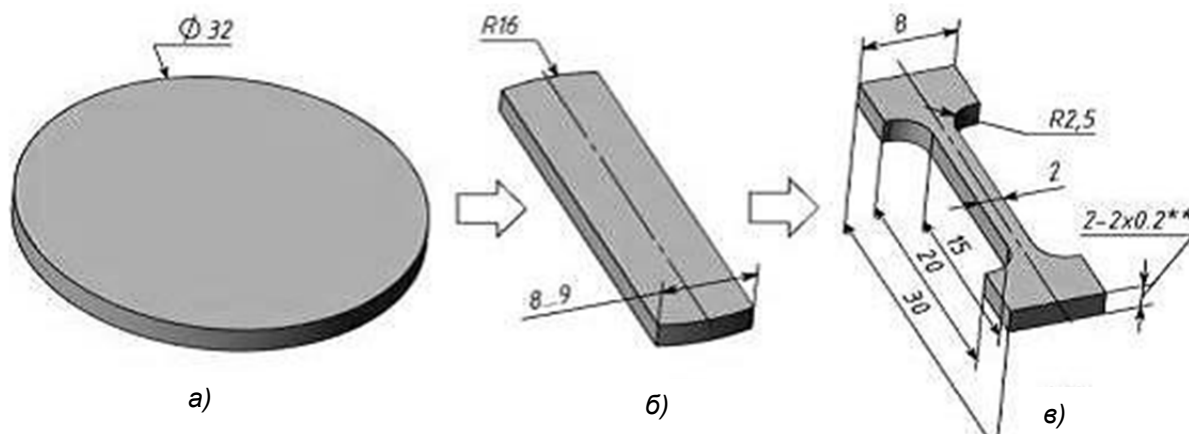
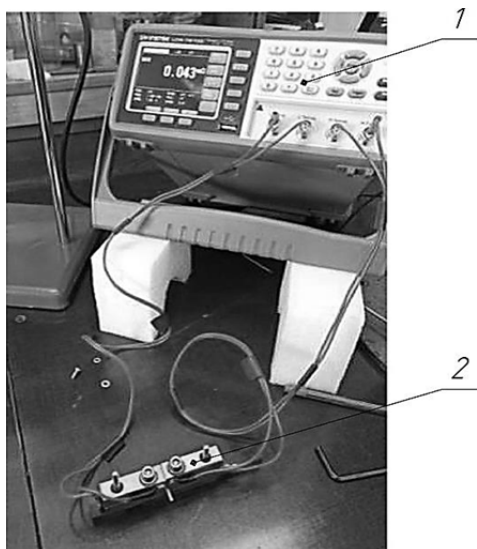


Рисунок 1. — Схема приготовления образцов для тестов на растяжение



**Рисунок 2. — Стенд для измерения удельного сопротивления**

*Методика измерения электрических характеристик образцов.* Для измерения удельного электросопротивления шины, провода и плоских пластин использовали прецизионный измеритель импеданса LCR-76100 (GW Instek, Тайвань) 1 с пределом измерения сопротивления на постоянном токе и разрешением 10 мкОм. Базовая погрешность прибора составляет 0,05 %. Для измерения образцов малых размеров стандартные 4-зондовые клещи прибора были заменены на 4-контактный держатель образцов, выполненный из массивных латунных клеммников 2 прямоугольной формы (рисунок 2).

Токовые и потенциальные клеммы держателя изолированы друг от друга. Клеммы жестко закреплены на одном основании с возможностью варьирования расстояния между ними для подстройки под конкретный образец.

*Исследование прочностных характеристик образцов.* Применен разрушающий метод испытания на растяжение. Данный метод используется для оценки проч-

ности образцов в условиях нагружения, которые подобны нагрузкам при эксплуатации индукторов. Выбрана стандартная схема испытания образцов из высокопрочной шины Cu-Nb на растяжение по ГОСТ 1497.

Способность образцов противостоять разрушающей силе обеспечивает количественную меру пластичности и прочности материала.

Испытания экспериментальных образцов проводились на универсальной испытательной машине Time WDW-100E с регистрацией характеристик.

Испытанию подвергали экспериментальные образцы, изготовленные из дисков диаметром 32 мм, спрессованные из сечки провода до и после термической их обработки, в сравнении с образцами исходной шины производства ООО «НПП «Наноэлектро». Для сравнения также был исследован образец из меди той же геометрии.

По полученным значениям сопротивления образцов вычисляли прочностные характеристики материала.

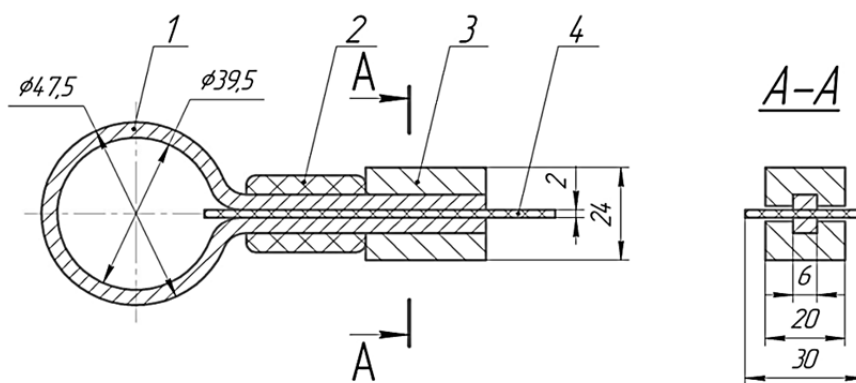
*Индукторная система из высокопрочной шины.* При разработке конструкции индукторных систем, основным элементом которой является одно- или многovitковая токопроводящая спираль, необходимо учитывать предельные режимы ее работы в момент прохождения по виткам импульса тока в десятки и сотни килоампер, сопровождаемого импульсами давления от электродинамических сил до 2...5 ГПа и выделением тепла на спирали.

Для исследования стойкости провода из мелкодисперсных сплавов Cu-Nb изготавливали модельные образцы одновиткового индуктора (рисунки 3, 4).

Испытания проводили на генераторе импульсных токов ГИТ-10, обеспечивающем приложении напряжения к испытываемым элементам модельных индукторов в диапазоне от 5 до 12 кВ с частотой разрядного тока от 5 до 30 кГц.

С учетом вышеизложенного разработана конструкция экспериментальной многovitковой цилиндрической индукторной системы рабочим диаметром 20 мм (рисунок 5).

При использовании технологических процессов МИО производительностью до 100 импульсов в минуту многovitковая спираль индуктора испытывает значительный разогрев до 200...300 °С, что является пределом электрической и механической стойкости межвитковой изоляции и может быть причиной выхода из строя индуктора. Для преодоления этого температурного порога приходится применять принудительное охлаждение спиралей — воздушное или жидкостное. В последнем случае провод спирали выполняется из волокнистого нанокompозита мелкодисперсного сплава Cu-Nb в виде полого провода квадратного сечения с содержанием ниобия (Nb) в сплаве на уровне 15...20 % с толщиной стенки 0,8 мм (рисунок 6).



1 — токопровод; 2 — силовой бандаж; 3 — выводы индуктора; 4 — изоляционная прокладка

Рисунок 3. — Эскиз одновиткового индуктора

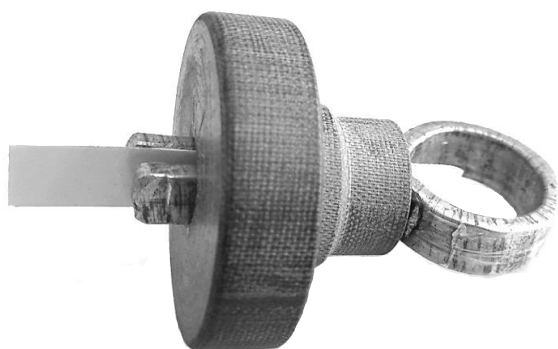


Рисунок 4. — Одновитковый модельный индуктор

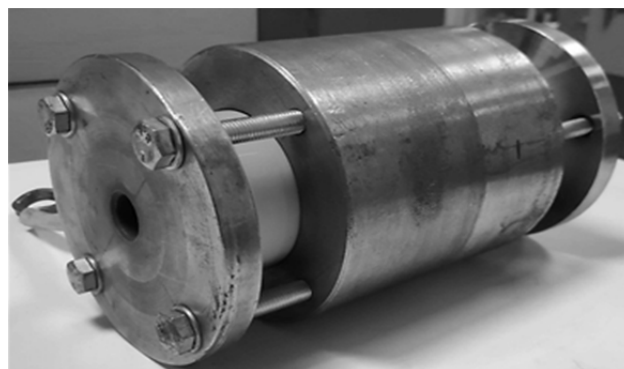


Рисунок 5. — Система индукторная

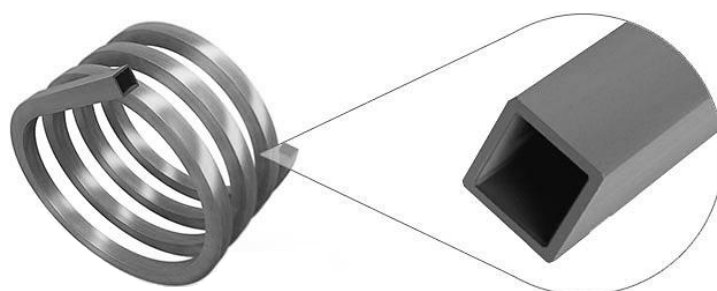


Рисунок 6. — Конструкция спирали из полого провода

**Результаты исследования и их обсуждение.** В соответствии с методикой измерения электрических характеристик образцов были получены следующие результаты. Величина измеряемого сопротивления составляла 0,6...0,7 мОм. Хотя прибор LCR-76100 имеет встроенную функцию установки «0» показаний, тем не менее была проведена коррекция его показаний при коротком замыкании клеммников, при этом показания прибора составили ~40 мкОм. На эту величину была проведена коррекция показаний прибора при измерениях образцов малого размера. Погрешность определения удельного сопротивления не превышала 0,5...1,0 % для образцов провода и шины, 4...5 % — для тонких пластин, изготовленных из компактного образца диаметром 32 мм.

Проведенные исследования механических свойств образцов полученного компакта Cu-Nb, а также шины представлены в таблице 1.

Т а б л и ц а 1. — Результаты испытаний на растяжение образцов

Материал образца	Маркировка (номер) образца	Температура отжига $T_{отж}$ , °С	Сечение образца $A$ , мм <sup>2</sup>	Усилие разрыва образца $F_m$ , кН	Сопротивление разрыву $\sigma_{пр}$ , МПа
Cu-18%Nb	6504 (001)	850	6,93	2,57	370
Cu-18%Nb	6505 (002)	850	6,26	2,87	460
Cu-18%Nb	6506 (003)	850	5,85	2,27	390
Cu-26%Nb	6297 (004)	850	5,74	6,39	1 110
Cu-26%Nb	6366 (005)	850	7,18	5,27	735
Шина Cu-18%Nb	Ш-2 (006)	—	9,40	10,81	1 150
Шина Cu-18%Nb	Ш-4 (007)	850	7,96	2,73	345
Шина Cu-18%Nb	Ш-5 (008)	850	7,96	2,87	360

Результаты механических испытаний мелкодисперсных образцов показали, что наибольшим сопротивлением разрыву характеризуется шина Cu-18%Nb ООО «НПП «Нано-электро» (Москва), ее сопротивление составило 1 150 МПа. Экспериментальные образцы, спрессованные из сечки провода, имели хрупкий характер разрушения.

Для решения этой проблемы была разработана новая технология изготовления образцов с добавлением в сечку медного порошка с последующим магнитно-импульсным прессованием и спеканием до компактного состояния.

Наибольшим сопротивлением разрыву характеризуется порошковый компакт Cu-26%Nb № 6297 (004), его прочность составила 1 110 МПа, что в 5 раз больше прочности образцов из меди, которую используют чаще всего для изготовления индукторных систем.

В ходе испытаний индукторная система из меди выдержала энергию разряда 3 кДж до разрушения, индукторная система на основе мелкодисперсного сплава Cu-Nb — 9 кДж до разрушения.

Оценка результатов проведенных исследований на модельных индукторных системах при генерации СМП на разных частотах показала, что применение мелкодисперсного сплава Cu-Nb при одинаковых энергетических характеристиках нагружения при частоте 10 кГц позволяет повысить стойкость токопровода в 3 раза по сравнению с токопроводом из медной шины.

**Заключение.** Примененный вариант метода магнитно-импульсного прессования и спекания композитного материала из смеси сечки нанокompозитного провода с медным порошком позволилкратно повысить прочность и дает возможность использовать композит Cu-Nb при изготовлении спиралей индукторных систем для магнитно-импульсной штамповки в виде многовитковых спиралей и концентраторов магнитного поля.

Полученные результаты позволят создавать индукторы с высоким ресурсом для МИО металлов давлением: штамповки тонколистовых материалов и формовки изделий сложной формы; процессы получения прочных, плотных и герметичных соединений трубчатых заготовок; проведение опрессовки кабельных наконечников многожильных проводов сечением до 300 мм<sup>2</sup> для изделий карьерной техники; получение сварных соединений разнородных материалов на твердотельном уровне; использование магнитно-плазменной сварки в сложных конструкциях автомобильной, аэрокосмической техники, в приборостроении, а также упрочнения металлических изделий на производственных участках МИО предприятий Беларуси.

**Список цитированных источников**

1. *Белый, И. В.* Справочник по магнитно-импульсной обработке металлов / И. В. Белый, С. М. Фертик, Л. Т. Хименко. — Харьков : Вища шк., 1977. — 168 с.
2. *Magnetic Pulsed Compaction of Nanosized Powders* / G. Sh. Boltachev [et al.]. — NY : Nova Science Publishers, Inc., 2010. — 86 p.
3. *Сахаров, А. Д.* Взрывомагнитные генераторы / А. Д. Сахаров // УФН. — 1966. — Т. 88, вып. 4. — С. 725—734.
4. *Кнопфель, Г.* Сверхсильные импульсные магнитные поля / Г. Кнопфель. — М. : Мир, 1972. — 392 с.
5. *Лагутин, А. С.* Сильные импульсные магнитные поля в физическом эксперименте / А. С. Лагутин, В. И. Ожогин. — М. : Энергоатомиздат, 1988. — 198 с.
6. *Bevk, J.* Anomalous increase in strength of in-situ formed Cu-Nb multifilamentary composites / J. Bevk, J. P. Hardisson, J. L. Bell // J. Appl. Phys. — 1978. — Vol. 49, № 12. — P. 6031—6038.
7. *Cu-Nb and Cu / Stainless Steel Winding Materials for High Field Pulsed Magnets* / V. Pansyrny [et. al.] // IEEE Trans. on Appl. Supercond. — 2000. — Vol. 10, № 1. — 1263 p.

Поступила в редакцию 22.09.2022.