

УДК: 62-294

## ОСНОВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ ИНДУКТОРОВ ДЛЯ МАГНИТНО-ИМПУЛЬСНОЙ ОБРАБОТКИ. ПОВЫШЕНИЕ ИХ ПРОЧНОСТИ И РЕСУРСА

© 2021 В.А.Глушенков<sup>1,3</sup>, И.В. Зверев<sup>2</sup>, В.И.Песоцкий<sup>1</sup><sup>1</sup> Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева, Самара, Россия<sup>2</sup> Императорский Тульский оружейный завод, Тула, Россия<sup>3</sup> Самарский федеральный исследовательский центр Российской академии наук, Самара, Россия

Статья поступила в редакцию 29.06.2021

В статье рассматриваются факторы термосилового воздействия на элементы индукторов, используемых в качестве инструмента при магнитно-импульсной обработке. Даны характерные причины выхода их из строя. Сформулированы основные направления совершенствования индукторов для обеспечения их эффективности и ресурса. Все направления проиллюстрированы конкретными примерами. Создание высокостойких индукторов открывает дорогу использованию магнитно-импульсной обработки в серийном производстве.

**Ключевые слова:** магнитно-импульсная обработка, индукторы, машиностроение, термосиловое воздействие.

DOI: 10.37313/1990-5378-2021-23-6-67-71

### ИНДУКТОРЫ ДЛЯ МАГНИТНО-ИМПУЛЬСНОЙ ОБРАБОТКИ

Основным инструментом, генерирующим импульсное магнитное поле при магнитно-импульсной обработке, является индуктор [1], подключенный к магнитно-импульсной установке [2, 3].

Магнитно-импульсная обработка широко используется в машиностроении при выполнении технологических процессов штамповки, сборки, сварки, литья и других [3, 4]. Наибольшее их применение находит на предприятиях мелкосерийных производств при создании, например, авиакосмической техники.

Одной из причин, сдерживающих выход магнитно-импульсной обработки в серийное производство, является недостаточная стойкость индукторов, их низкий ресурс. Вот почему, совершенствование конструкции индукторов, технологий их изготовления, оптимизация режимов эксплуатации является актуальной задачей.

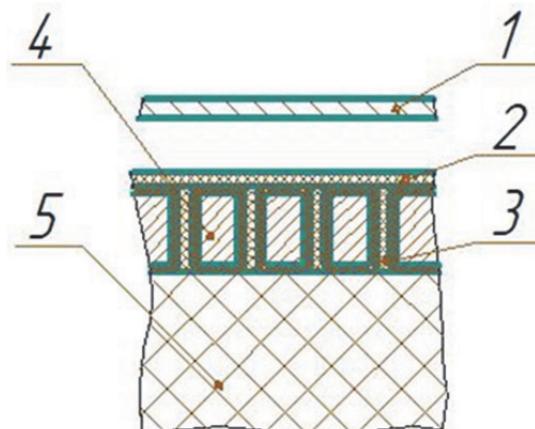
Основными элементами индукторов для МИОМ являются: основание, токопровод, межвитковая и главная изоляция (рис. 1).

Перечисленные основные элементы имеются в конструкциях практически всех типов индукторов (на обжим, на раздачу, плоский и т.д.).

**Глушенков Владимир Александрович, кандидат технических наук, профессор кафедры обработки металлов давлением, заведующий лабораторией «Биоинженерия».**  
E-mail: vgl@ssau.ru

**Зверев Иван Вячеславович, заместитель начальника производства многопрофильной обработки.**  
E-mail: ouiviz@mail.ru

**Песоцкий Вячеслав Иванович, ведущий инженер.**  
E-mail: VIP\_vvz@mail.ru



**Рис. 1.** Фрагмент многовиткового индуктора:  
1 – деформируемая заготовка; 2 – главная изоляция;  
3 – межвитковая изоляция; 4 – токопровод;  
5 – основание

### ФАКТОРЫ ТЕРМОСИЛОВОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ЭЛЕМЕНТЫ ИНДУКТОРА

**Электрическое напряжение.** К виткам индуктора прикладывается напряжение заряда конденсаторной батареи «U». Межвитковое напряжение  $U_M = U/n$ , где  $n$  – число витков индуктора. На это напряжение и рассчитывается возможный технологический зазор между витками. Между токопроводом и деформируемой заготовкой электрическое напряжение равно «U». Это напряжение определяет толщину слоя главной изоляции.

Так, при напряжении заряда конденсаторной батареи  $U = 15 \text{ kV}$  и числе витков индуктора  $n = 5$  межвитковая изоляция должна выдержать

3 кВ, а главная все 15 кВ. Если использовать в качестве изоляционного материала полиимидный скотч (термоскотч) с диэлектрической прочностью при комнатной температуре 40 кВ на 1 мм, то толщина межвитковой изоляции составит не менее 0,3 мм (с учетом коэффициента запаса), а главная - не менее 0,5 мм.

**Температурный фактор.** При разряде батареи конденсаторов на индуктор по его виткам протекает импульсный ток «I» в десятки-сотни килоампер. Выделяемое при этом тепло определяется по формуле:

$$Q = \frac{I^2 \rho l}{S} d\tau,$$

где  $\rho$  – удельное электрическое сопротивление материала токопровода;

$l$  – длина токопровода;

$S$  – площадь сечения токопровода;

$d\tau$  – время, в течение которого течёт ток.

Повышение температуры нагрева медного токопровода после импульса тока порядка 100 кА составит, например, 40 – 60 °С. Если импульсы разряда батареи конденсаторов следуют один за другим, а отвод тепла из-за наличия межвитковой и главной изоляции затруднён, то температура нагрева спиралей индуктора постоянно возрастает и может достичь несколько сот градусов. Диэлектрические свойства изоляции падают, что приводит к высоковольтному её пробою. Кроме того, надо учесть возможный локальный перегрев токопровода из-за неравномерности протекания тока по его сечению (поверхностный и кольцевой эффекты, эффект близости).

**Силовое воздействие.** Витки индуктора испытывают реактивное усилие  $F_r$  деформируемой заготовки. Чем больше энергия разряда батареи конденсаторов (подводимая к индуктору), тем большей прочностью должен обладать токопровод. Кроме того, следует учитывать электродинамические силы, возникающие в элементах токопровода при протекании по нему импульсного тока. Направления действия этих сил определяется направлением протекания тока. Так, в витках токопровода ток течёт в одном и том же направлении, как следствие, витки притягиваются друг к другу, возникают кратковременные осевые усилия  $F_z$  (рис. 2); в изгибных местах токопровода действуют силы отталкивания, стре-

мящиеся выпрямить токопровод. В двух параллельных шинах выводов индуктора (токи текут в противоположном направлении) возникающие электродинамические усилия  $F$  приводят к отталкиванию их друг от друга [6].

$$F = 10^{-7} \cdot I_d^2 \cdot k_d \cdot k_\phi = 2 \cdot 10^{-7} \cdot I_d^2 \cdot \frac{b}{d} \cdot k_\phi,$$

где  $F$  – электродинамическая сила, Н;

$I_d$  – действующий ток, А;

$k_d$  – коэффициент контура электродинамических сил;

$k_\phi$  – коэффициент формы;

$b$  – длина проводника, м;

$d$  – межосевое расстояние проводников, м.

При многократном (циклическом) нагружении возможен ударный характер взаимодействия витков токопровода между собой (осевые усилия), которое может способствовать разрушению межвитковой изоляции.

Силовые воздействия на токопровод могут усугубляться дополнительным возникновением реактивных сил, определяемых особенностями геометрических форм заготовки, индуктора, готовой детали (конус, неприкрытые заготовкой витки, переменность сечения и др.).

На фотографиях (рис. 3) показаны примеры разрушения индукторов под воздействием описанных термосиловых факторов: деформация витков, электрический пробой межвитковой или главной изоляции, разрушение бандажа токоподводов (выводов) индуктора.

Отрицательное влияние перечисленных факторов термосилового воздействия являются причиной преждевременного выхода индукторов из строя, обуславливают недостаточные их стойкость и надёжность, что сдерживает использование магнитно-импульсных технологий в серийном производстве.

## ОСНОВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ ИНДУКТОРОВ

На рисунке 4 приведены основные направления работ по созданию индукторов с улучшенными эксплуатационными свойствами: надёжностью и ресурсом.

Одно из предлагаемых конструкторских решений – создание охлаждаемых индукторов с

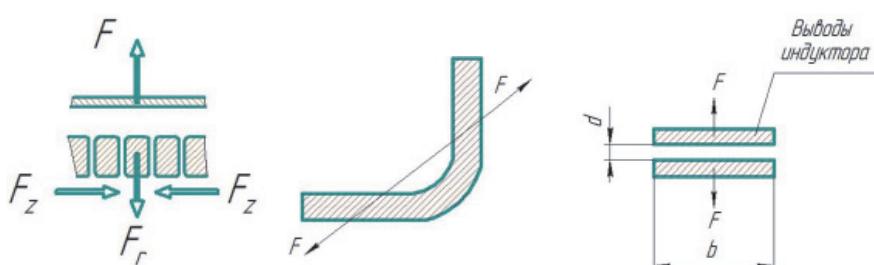
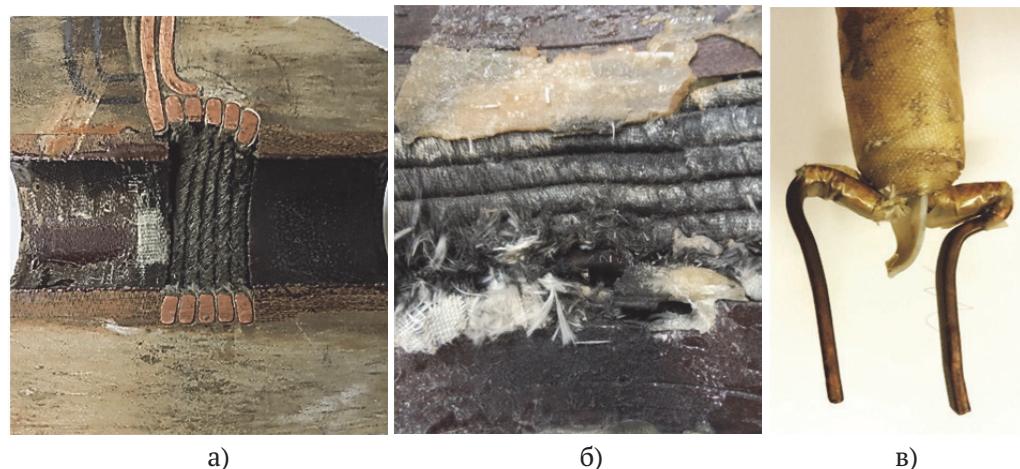
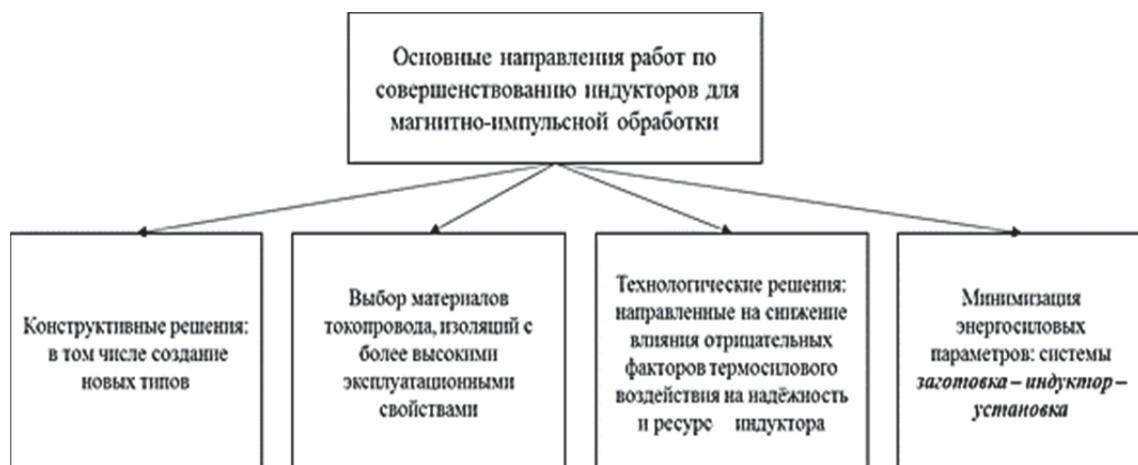


Рис. 2. Направление действия электродинамических сил на элементы токопровода индуктора



**Рис. 3. Характерные разрушения индукторов:**  
 а) деформация токопровода;  
 б) высоковольтный пробой изоляции; в) механическое разрушение выводов индуктора



**Рис. 4. Основные направления работ по усовершенствованию индукторов**

эффективной теплоотдачей. На рисунке 5 приведены некоторые из таких решений:

- многовитковый индуктор с полым токопроводом, через который прокачивается охлаждающая жидкость. Проведенные эксперименты позволили определить оптимальный расход охлаждающей воды, при котором температура токопровода не повышается более чем на 5 °C.

- одновитковый индуктор с отводом тепла от токопровода с его боковой нерабочей поверхности. При этом достигаемая скважность разрядов без изменения температуры токопровода составила 20 сек.

- плоский многовитковой индуктор с отводом тепла, например, конвективным теплоотводом (обдув воздухом) токопровода с нерабочей стороны индуктора.

В рамках второго направления решения разработчиков направлены на поиск новых материалов для токопроводом, изоляции, усилений, в лучшей степени противостоящих действию термосиловых факторов. Найдено интересное решение в замене обычных материалов

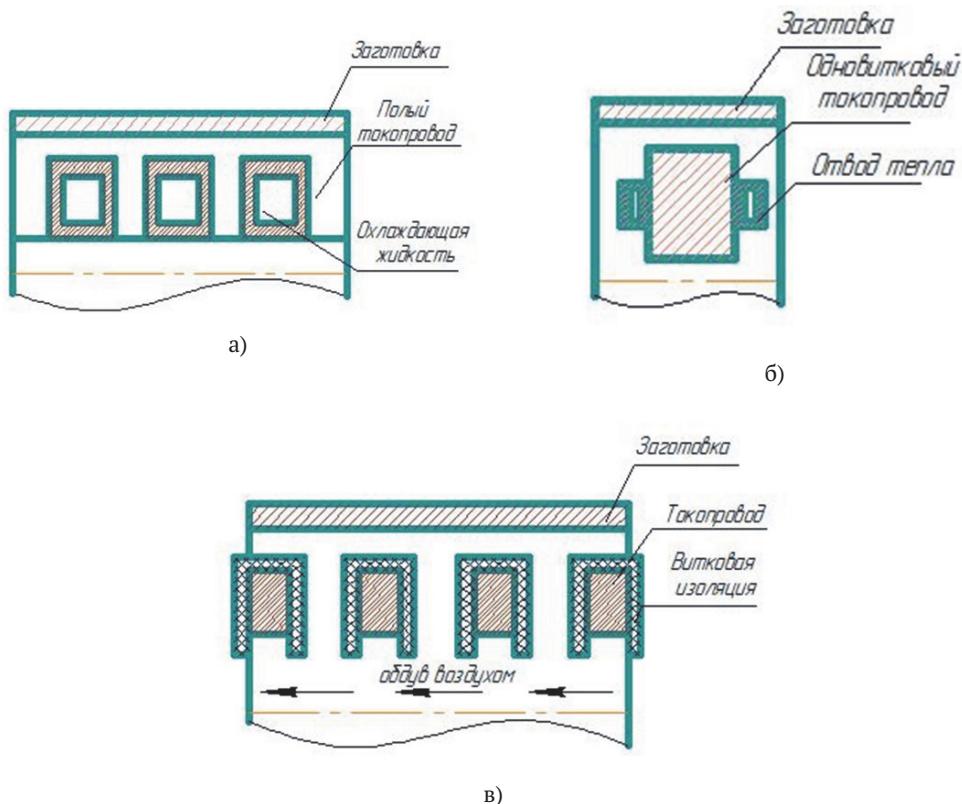
токопровода (меди, стали) на композит «меди-ниобий» или «меди-сталь». Материал Cu-Nb обладает высокими механическими свойствами и хорошей электропроводностью (до 70% от электропроводности меди) [7].

На рисунке 6 приведена структура такого материала, а на рисунке 7 - зависимость деформации витков от величины энергии разряда.

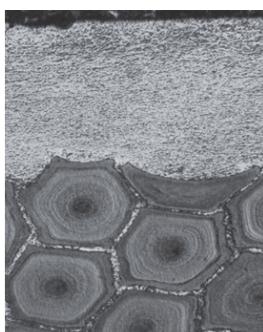
Установлено, что прочность спирали из композита в три раза выше прочности спирали из меди.

Широкий набор технологических приемов, используемых при изготовлении индукторов, таких, например, как предварительная стяжка витков, замена ленточной изоляции на литую, склейка некоторых силовых элементов и многие другие, хоть и незначительно, но каждый способствует повышению прочности и ресурса индукторов [8].

Последнее направление - оптимизация режимов обработки, в результате расчёта разрядной цепи (установка-индуктор-заготовка), позволяет значительно снизить потребную



**Рис. 5.** Конструктивные решения при создании охлаждаемых индукторов:  
а) многовитковый цилиндрический индуктор с полым (трубчатым) токопроводом;  
б) одновитковый индуктор с отводом тепла с боковых поверхностей токопровода;  
в) плоский индуктор с отводом тепла с нерабочей поверхности



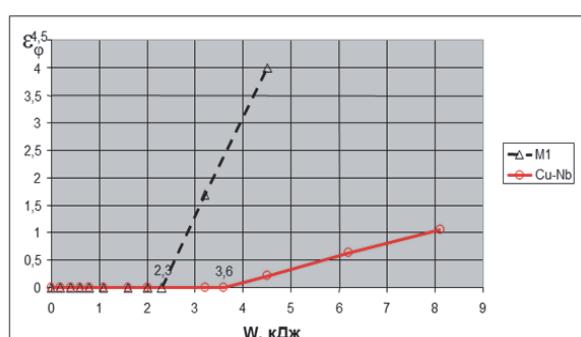
Предел прочности, МПа	Предел текучести, МПа	Относительное удлинение, %	IACS, %
983	724	5,6	73,7

**Рис. 6.** Свойства и структура медно-ниобиевого композита

энергию разряда, рабочее напряжение зарядки батареи конденсаторов и, как следствие, уменьшить электродинамические усилия, действующие на элементы индуктора [9].

## ВЫВОД

Представленные направления работ по совершенствованию индукторов позволили, для



**Рис. 7.** Радиальная деформация витка в зависимости от энергии разряда

некоторых их типов, поднять гарантийный ресурс индукторов с 1000 до 10 - 15 тыс. циклов, а это открывает возможность использования магнитно-импульсных технологий в серийном производстве.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Глушенков, В.А. Индукторы для магнитно-импульсной обработки материалов: учебное пособие [Текст] / В.А. Глушенков - Самара: Учебная литература, 2013. - 148 с.
- Белый, И.В. Справочник по магнитно-импульсной обработке металлов [Текст] / И.В. Белый, С.М. Фертик, Л.Т. Хименко. – Харьков: Вища школа.

1970. – 190 с.
1. Глущенков, В.А. Технология магнитно-импульсной обработки материалов [Текст]: монография [Текст] / В.А. Глущенков, В.Ф. Карпухин – Самара: Издательский дом «Федоров», 2014. – 208 с.
  1. Степанов, В.Г. Высокоэнергетические импульсные методы обработки металлов [Текст] / В.Г. Степанов, И.А. Шавров. Л.: Машиностроение. 1975. 278 с.
  1. Попов, Е.А. Магнитно-импульсная штамповка деталей из плоской заготовки [Текст] / Е.А. Попов, А.И. Легчилин, В.С. Дмитриев // Труды МВТУ им. Баумана. - 1973.- № 163. - Вып. 10. - С.216-231.
  6. Грачев, А.С. Электрические аппараты [Текст]: руководство по решению задач проектирования электрических аппаратов / А.С. Грачев. – Йошкар-Ола: МарГУ, 2009. – 111 с.
  7. Глущенков, В.А. Эффективность использования наноструктурированного материала СU-NB в качестве материала токопровода в конструкциях ин-
  - дукторов для магнитно-импульсной обработки [Текст] / В.А. Глущенков, Ф.В. Гречников // Металлофизика, механика материалов,nanoструктур и процессов деформирования: В 2 т. Труды международной научно-технической конференции «Металлде-форм-2009», 3-5 июня 2009. – СГАУ. – Самара. – Т.1. – С.208-217
  8. Проскуряков, Н.Е. Моделирование процесса обжима корпусных деталей специального назначения [Текст] / Проскуряков Н.Е., Зверев И.В. В сборнике: Инновационные технологии и технические средства специального назначения. Труды тридцатой общероссийской научно-практической конференции. В 2 т. Сер. «Библиотека журнала «Военмех. Вестник БГТУ». № 71. Санкт-Петербург, 2021. С. 150-154.
  9. Глущенков, В.А. Инженерная методика расчета процессов магнитно-импульсной обработки / В.А. Глущенков, В.Ф. Карпухин. Самара: ИД «Федоров», 2018. 45 с.

### MAIN DIRECTIONS OF IMPROVEMENT OF INDUCTORS FOR MAGNETIC-PULSE PROCESSING. INCREASING THEIR STRENGTH AND RESOURCE

© 2021 V.A. Glushchenkov<sup>1,3</sup>, I.V. Zverev<sup>2</sup>, V. I. Pesotsky<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Samara National Research University named after Academician S.P. Korolyov, Samara, Russia

<sup>2</sup> Imperial Tula Arms Factory, Tula, Russia

<sup>3</sup> Samara Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences, Samara, Russia

The article discusses the factors of thermal power effects on the elements of inductors used as a tool in magnetic-pulse processing. The characteristic reasons for their failure are given. The main directions of improving inductors are formulated to ensure their efficiency and resource. All directions are illustrated with specific examples. The creation of highly resistant inductors paves the way for the use of magnetic-pulse processing in mass production.

*Key words:* magnetic-pulse processing, inductors, mechanical engineering, thermal power action.

DOI: 10.37313/1990-5378-2021-23-6-67-71

---

Vladimir Glushchenkov, Candidate of Technical Sciences, Professor of the Department of Metal Forming by Pressure of the Samara University, Head of the Bioengineering Laboratory. E-mail: vgl@ssau.ru

Ivan Zverev, Deputy Head of the Production of Multidisciplinary Processing. E-mail: ouiviz@mail.ru

Vyacheslav Pesotsky, Leading Engineer.  
E-mail: VIP\_vvz@mail.ru