

## ВЫБОР МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ИНДУКТОРНЫХ СИСТЕМ

© 2008 В. А. Барвинок<sup>1</sup>, Ю. Е. Паламарчук<sup>2</sup>, А. Н. Кирилин<sup>2</sup>,  
В. П. Самохвалов<sup>1</sup>, В. М. Вершигоров<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Самарский государственный аэрокосмический университет  
<sup>2</sup>ФГУП ГНП РКЦ «ЦСКБ-Прогресс»

Приведены результаты экспериментальных исследований по выбору материалов для изготовления токопроводящих и корпусных элементов индукторов для магнитно-импульсной штамповки. Рассмотрены различные варианты конструкции индукторов, определена их эффективность по величине деформации трубчатой заготовки. Даны рекомендации на проектирование рабочих индукторных систем для производственных условий.

*Индукторы, материалы, магнитные поля, эффективность, экспериментальные исследования, мелкосерийное производство*

Мощные магнитные поля успешно применяются для магнитно-импульсной обработки металлов (МИОМ) давлением. Инструментом являются индукторы - прочные катушки индуктивности, которые служат генераторами магнитного поля при разряде батарей высоковольтных конденсаторов.

Одной из важнейших задач повышения технико-экономических показателей магнитно-импульсной обработки металлов является экономия дефицитных материалов, в первую очередь цветных металлов, применяемых для изготовления токопроводов индукторных систем.

Токопроводы индукторов для обработки деталей диаметром более 50 мм преимущественно изготавливаются методом навивки медной проволоки прямоугольного сечения на оправку. Расход медной проволоки на один индуктор может колебаться от 0,3 кг до 80 кг и более в зависимости от диаметра обрабатываемой заготовки.

В настоящее время как в РФ, так и за рубежом медь - более дефицитный материал, чем алюминий. По прогнозам, в будущем дефицит меди по сравнению с алюминием будет возрастать. Поэтому вопрос применения алюминия для индукторных систем вместо меди является актуальным.

Для индукторов малого диаметра необходимо подобрать материал, мало отличающийся от меди по электрическим свойствам и превышающий его по механическим характеристикам.

Материал токопровода, заменяющий медь или её сплавы в индукторах большого диаметра, должен иметь электрофизические и механические характеристики, близкие к меди.

Были проведены экспериментальные исследования по выявлению эффективности работы индукторов с токопроводами, изготовленными из стали, молибдена, алюминия, провода типа БПВЛ, и индукторов с тоководом из медной проволоки.

В таблице 1 приведены свойства материалов, которые были использованы для изготовления исследуемых индукторов.

Первая серия экспериментов бала направлена на определение эффективности применения различных материалов при изготовлении индукторных систем для деформирования заготовок малого диаметра. Для этого были изготовлены одновитковые цилиндрические индукторы с одинаковыми геометрическими размерами из меди, стали и молибдена. Рабочее отверстие индукторов изготовлено под цилиндрическую деталь диаметром 10 мм, длина рабочей зоны индуктора равнялась 3 мм.

В эксперименте проводились замеры напряжённости импульсного магнитного поля в зазоре индуктор-заготовка и определялась величина разрядного тока для энергии разряда более 4 кДж.

В качестве заготовки использовалась трубка из материала АД0 диаметром 10 мм и толщиной стенки 1,5 мм. Эксперименты про-

Таблица 1. Физико-механические свойства металлов, используемых для изготовления токопроводов индукторов

Параметр	Медь М1, М2	Алюминий А1	Сталь Ст20	Молибден ВМ1
Удельное электрическое сопротивление, мм <sup>2</sup> ·Ом/м при 20°С при 75°С	0,01724 0,02135	0,028 0,0344	0,08 -	0,052 -
Плотность, кг/м <sup>3</sup>	8900	2700	7860	10200
Предел пропорциональности, кг/м <sup>2</sup>	2,5	3÷4	30	-
Предел прочности, кг/м <sup>2</sup>	20÷24	8	48	70
Модуль упругости, н/м <sup>2</sup>	1,15·10 <sup>11</sup>	0,7·10 <sup>11</sup>	2·10 <sup>11</sup>	3,44·10 <sup>11</sup>
Удельная теплоёмкость, $\frac{\text{Вт} \cdot \text{с}}{\text{кг} \cdot \text{град}} = \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{град}}$	390	816	456	146
Температура плавления, °С	1083	658	1535	2625
Цена материала, руб/т	890	780	126	-

водились на установке ИУ-20 с максимальной запасаемой энергией 20 кДж, максимальным рабочим напряжением 20 кВ, ёмкостью конденсаторной батареи 90 мкФ и частотой короткого замыкания 34 кГц.

Эффективность работы индукторов с токопроводами из различных материалов сравнивалась по величине относительной деформации заготовок и величине давления магнитного поля, определяемого в зазоре между индуктором и заготовкой.

Результаты эксперимента приведены в таблице 2. Например, из неё следует, что давление магнитного поля при энергии 3,3 кДж на медном токопроводе выше, чем на молибденовом на 5,6 %, а по сравнению со стальным - на 38 %. Величина относительной деформации заготовки соответственно выше при медном токопроводе на 27 % по сравнению с молибденовым, а со стальным - на 34%. Аналогичная зависимость наблюдается и при других энергиях разряда.

Таким образом, для получения одинаковой величины деформации заготовки необходимо увеличение энергии разряда для индукторов со стальными токопроводами при-

мерно в 1,3-1,5 раза, для индукторов с молибденовым токопроводом в 1,05-1,1 раза по сравнению с индуктором с медным токопроводом.

Основные механические параметры стали и молибдена существенно (в три-шесть раз) выше, чем у меди.

Если сравнивать прямоугольные провода из меди и стали, то для равенства их электрического сопротивления сечение стального провода должно быть в 4,5 раза больше. Если считать, что стороны сечения изменяются в равной степени, то линейные размеры стального провода будут в  $\sqrt{4,5} = 2,12$  раз больше, чем медного. Электрическое сопротивление молибдена в 3,3 раза больше, чем у меди, а линейные размеры соответственно больше в 1,8 раза.

Протекание большого импульсного тока сопровождается наличием скин-эффекта, т.е. ток течёт вблизи поверхности проводника и вызывает её сильный нагрев. В медном проводнике величина скин-слоя мала и наблюдается выгорание рабочей кромки и выплески металла с поверхности. В стальном токоп-

Таблица 2. Результаты экспериментов по определению эффективности индукторов

№ п/п	Материалы токопровода индуктора	Энергия разряда, кДж	Давление магнитного поля, кг/мм <sup>2</sup>	Величина относительной деформации, %	Ток разряда, кА
1	Медь М1, М2	1,5	7,4	-	-
		2,2	9,3	0,16	203
		3,3	13,2	0,29	219
		4,6	16,6	0,37	238,2
		8,6	23,5	-	258,4
		10	29,5	-	278
		11,8	-	-	304
2	Сталь ст20	1,5	5,7	-	-
		2,2	7,4	0,125	-
		3,3	8,3	0,195	220
		4,6	10,05	0,27	235
		8,6	12,1	-	258
		10	14,6	-	268
		11,8	-	-	302
3	Молибден ВМ1	1,5	7,3	-	-
		2,2	7,9	0,15	-
		3,3	12,47	0,212	186
		4,6	16,4	0,3	211
		8,6	21,3	-	238,1
		10	28,1	-	278
		11,8	-	-	304

роводе величина скин-слоя значительно больше. Поэтому нагрев более равномерный, что заметно по цветам побежалости на срезе токопровода в результате протекания большого импульсного тока и возникновения при этом высокой температуры. В токопроводе из

молибдена появляются радиальные трещины, которые приводят к его разрушению (рис. 1, 2). Для индукторов с диаметрами более 100 мм, когда применение его точечной спирали экономически невыгодно, была опробована возможность применения алюминиевых прямо-

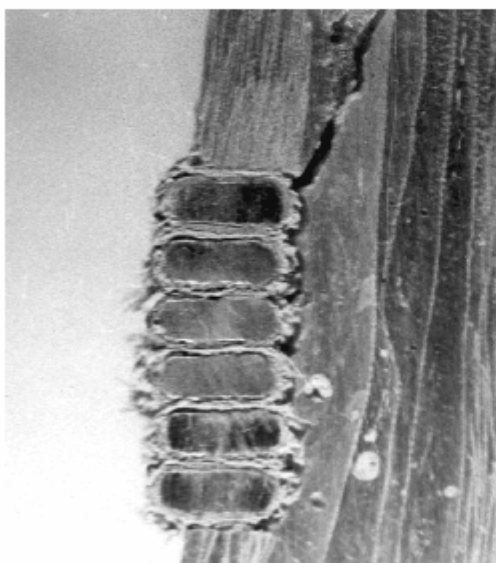


Рис. 1. Характер разрушения вставки токопровода из молибдена

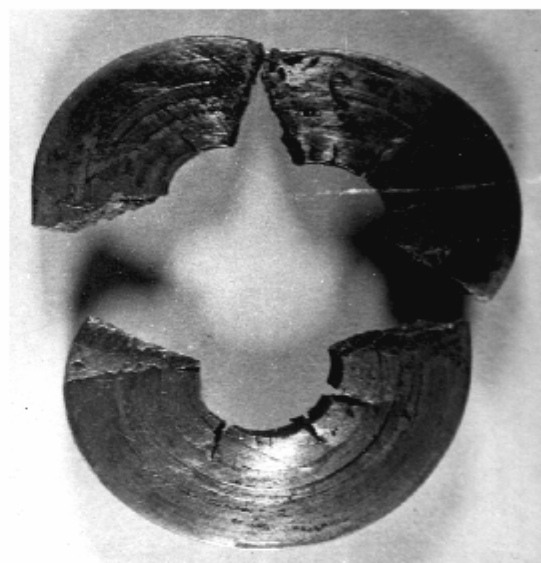


Рис. 2. Характер разрушения корпуса многовиткового индуктора

угольных проводов в качестве токопровода индуктора.

Одной из причин отсутствия внедрения алюминиевых проводов для изготовления индукторов в МИОМ является мнение о недостаточной прочности алюминиевых проводов по сравнению с медными.

Если сравнивать одинаковые по длине прямоугольные провода из меди и алюминия, то для равенства их электрического сопротивления сечение алюминиевого провода должно быть в 1,6 раза больше, а линейные размеры должны быть больше в 1,27 раза. Отношение временных сопротивлений меди и алюминия составляет примерно 0,33 (табл. 1).

При этом прочность алюминиевого провода по сравнению с медным будет составлять лишь  $0,33 \cdot 1,6 \cdot 0,58 \%$  на растяжение и  $0,33 \cdot 1,273 \cdot 0,68 \%$  на изгиб.

Но для индукторов большого диаметра основным требованием является обеспечение устойчивости спирали индуктора при действии радиальных усилий. Поэтому для обеспечения прочности алюминиевого провода необходимо увеличить его сечение по сравнению с медным в 1,7 раза.

Для сравнения технико-экономических характеристик были изготовлены индукторы из медной и алюминиевой прямоугольной шины сечением 10 x 2 мм, диаметром 60 мм и с числом витков, равным 7.

В качестве заготовок использовались трубы из АМгЗ толщиной 1,0 и 1,5 мм и диаметром 60 мм. В процессе экспериментов эффективность работы индукторов оценивалась по величине относительной деформации заготовки. Результаты экспериментов приведены в таблице 3. Из неё следует, что эффективность работы индуктора с алюминиевым токопроводом составляет 0,7-0,75 по сравнению с индуктором с медным токопроводом. Для достижения равной деформации необходимо увеличить энергию разряда установки для индукторов с алюминиевым токопроводом примерно в 1,2...1,3 раза. Установлено, что предельная радиальная деформация витков алюминиевого токопровода, равная  $e = 0,02$  (начало разрушения индуктора), наступает при давлении магнитного поля в 1,4 раза меньшем, чем для медного токопровода. Очевидно, что влияют инерционные силы, зависящие от массы витка токопровода.

Из-за большей теплоемкости алюминия (в 2,25 раза выше меди) одинаковый температурный режим в алюминиевом проводнике наступает при энергии в 1,4-1,5 раза меньшей, чем для медного токопровода, т.е. алюминиевый токопровод должен быть в 1,4 раза в сечении больше.

Так как для алюминия допустимое напряжение в три раза меньше, чем для меди, то запас по прочности алюминиевых спира-

Таблица 3. Результаты сравнения эффективности медного и алюминиевого токопроводов

Марка материала	Индуктивность системы индуктор-заготовка (Гн)	Энергия разряда, кДж	Давление м.п. кг/м <sup>2</sup>	Деформации заготовки, %
Медная проволока прямоугольного сечения	$0,28 \cdot 10^6$	1,6	-	-
		1,8	-	-
		2,2	0,54	-
		2,8	0,68	2,7
		3,3	0,81	4,0
		4,0	0,94	5,0
Алюминиевая проволока прямоугольного сечения	$0,3 \cdot 10^6$	1,6	-	-
		1,8	-	-
		2,2	0,39	-
		2,8	0,51	1,9
		3,3	0,58	2,6
		4,0	0,64	3,4

лей на растяжение под действием радиальных сил будет меньше, чем медных спиралей. Таким образом, обеспечение условия прочности для алюминиевых индукторов несколько хуже, чем для медных. Однако при расчётах индукторов больших диаметров, в которых абсолютные значения среднего напряжения растяжения малы, затруднений с обеспечением условия прочности на растяжение не было.

Одним из эффективных методов снижения затрат на изготовление индукторов в мелкосерийном, штучном производстве может служить применение провода типа БПВЛ.

Провод марки БПВЛ - провод с поливинилхлоридной изоляцией, с жилой из медных проволок, а провод БПВЛА - с алюминиевой жилой. Данный провод применяется для сетей напряжением до 500 В и выпускается сечением до 95 мм<sup>2</sup>.

При изготовлении индукторов для МИОМ 40-45 % времени приходится на изолирование шины перед навивкой спирали. Применение провода БПВЛ позволяет снизить затраты на изготовление индукторов, которые могут использоваться в экспериментальном и мелкосерийном производстве. Эффективность работы индукторов из провода БПВЛ также оценивалась по величине относительной деформации заготовки (табл. 4).

Снижение эффективности работы токопроводов из БПВЛ происходит из-за круг-

лой формы проводника. Ток по сечению токопровода распределяется более равномерно, меньше сказывается "эффект близости", чем у проводников прямоугольной формы, когда ток сосредотачивается в основном в зоне, прилегающей к заготовке.

Кроме того, эксперименты показали, что при одинаковом сечении температура нагрева токопровода из БПВЛ на 10-12 % выше, чем для медного токопровода при одинаковой энергии разряда. Поэтому и характер разрушения индукторов из провода БПВЛ показывает потерю диэлектрических свойств полиэтиленовой изоляции провода.

По результатам проведённых исследований можно сделать следующие выводы.

1. Индукторы диаметром более 50 мм из алюминия могут иметь высокие технико-экономические показатели, по крайней мере, не хуже, чем индукторы из медных проводов, в том числе и по обеспечению электродинамической прочности.

2. Расширение применения алюминия для изготовления индукторов диаметром более 50 мм позволит не использовать дефицитную медь.

3. Применение провода типа БПВЛ для изготовления индукторов для мелкосерийного и штучного производства позволяет значительно снизить расходы и время на изготовление индукторных систем.

Таблица 4. Результаты экспериментов по определению эффективности индукторов с шиной из БПВЛ и меди

Энергия разряд, кДж	Деформация заготовки $\epsilon$ , %		Коэффициент эффективности по отношению к медному индуктору
	Индуктор из БПВЛ	Медный индуктор	
1,8	7,07	9,8	0,72
2,2	9,6	12,8	0,75
2,8	13,25	17,25	0,768
3,3	19,45	22,5	0,86
4,0	25,9	30,6	0,846

### **Информация об авторах**

**Барвинок Виталий Алексеевич**, доктор технических наук, профессор, член-корреспондент РАН, директор НИИ технологий и проблем качества, заведующий кафедрой производства летательных аппаратов и управления качеством в машиностроении. Область научных интересов: физика и математическое моделирование тепловых и деформационных процессов в твёрдых телах, разработка физических и математических моделей процессов взаимодействия ускоренных потоков плазмы с твёрдым телом.

**Паламарчук Юрий Ефимович**, начальник отдела, ФГУП ГНП РКЦ «ЦСКБ-Прогресс».

**Кирилин Александр Николаевич**, генеральный директор, доктор технических наук, профессор, ФГУП ГНП РКЦ «ЦСКБ-Прогресс».

**Самохвалов Владимир Петрович**, доцент, СГАУ, доктор технических наук, профессор.

**Вершигоров Вячеслав Михайлович**, заместитель генерального директора по общим вопросам, ФГУП ГНП РКЦ «ЦСКБ-Прогресс».