

# ПЕРСПЕКТИВНЫЕ КОНСТРУКЦИИ ИНДУКТОРОВ ДЛЯ МАГНИТНО-ИМПУЛЬСНОЙ ОБРАБОТКИ МЕТАЛЛОВ

*Н.В. КУРЛАЕВ, доктор техн. наук, профессор,  
Н.А. РЫНГАЧ, канд. техн. наук, доцент,  
К.Н. БОБИН, канд. техн. наук  
(НГТУ, г. Новосибирск)*

Статья поступила 30 января 2012 года

**Н.В. Курлаев** – 630092, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20,  
Новосибирский государственный технический университет,  
e-mail: kurlayev@craft.nstu.ru

Рассматривается проектирование и применение новых конструкций индукторов для магнитно-импульсной обработки металлов давлением.

**Ключевые слова:** магнитно-импульсная обработка металлов давлением, индуктор.

В настоящее время растет интерес к высокоскоростным методам штамповки, которые позволяют получать детали заданной формы за меньшее количество технологических переходов, либо получать детали такой формы, которая недостижима любыми другими методами штамповки [1]. Кроме того, магнитно-импульсная обработка металлов (МИОМ) положительно сказывается на долговечности металлических изделий [2]. При этом существуют ограничения для материалов заготовок и индуктора – они должны иметь малое электрическое сопротивление. Как правило, это медные и алюминиевые сплавы. Индукторы для МИОМ чаще всего изготавливаются из бериллиевой бронзы, имеющей хорошую электропроводность и удовлетворительные механические характеристики; реже – из меди, так как медь обладает низкими механическими характеристиками. Попытки использовать высокопрочные алюминиевые сплавы не дали ожидаемого результата из-за их низкой долговечности в условиях импульсного нагружения. Возможно изготовление токоведущих элементов из углеродистых и легированных сталей, однако такие индукторы имеют низкий КПД передачи энергии в заготовку, преобразуя электрическую энергию в тепло. В данной статье рассматриваются конструкции индуктора, которые позволяют повысить рабочее давление на обрабатываемую поверхность и долговечность самого индуктора.

Прочность индукторов обусловлена выбором материала токоведущей спирали. Например, наи-

более подходящим материалом индукторов для МИОМ сплава типа Д16АМ с динамическим пределом текучести  $Y_0 \approx 200$  МПа, учитывая, что при МИОМ давление импульсного магнитного поля может численно превзойти в 1,5...2,0 раза значение  $Y_0$ , будет бериллиевая бронза БрБ2 с пределом текучести  $\sigma_T = 500$  МПа. Однако высокочастотный ток по сечению индуктора при МИОМ распределяется неравномерно – падающая волна с индукцией  $B(0, t)$  проникает в металл заготовки и наводит в нем индукционный ток, плотность которого  $i$  и результирующее магнитное поле зависят от глубины  $x$  и времени  $t$ :

$$B(x, t) = B_m \exp\left(-\frac{x}{\Delta}\right) \sin\left(\omega t - \frac{x}{\Delta}\right),$$

где  $\Delta$  – это глубина проникновения электромагнитного поля в материал, равная такому расстоянию  $x$ , на котором амплитуда магнитной индукции и плотности тока уменьшаются в  $e$  раз;  $\omega$  – круговая частота электромагнитного поля. Величина  $\Delta$  получила название «скин-слой» и приближенно можно считать, что все токи, проходящие через спираль индуктора и материал заготовки, концентрируются в нем. Величина  $\Delta$  равна

$$\Delta_{\text{инд}} = \sqrt{\frac{2}{\mu_0 \gamma \omega}},$$

где  $\mu_0$  – это магнитная постоянная, равная  $1,26 \cdot 10^{-6}$  Гн/м;  $\gamma$  – проводимость, величина, обратная удельному сопротивлению См/м.

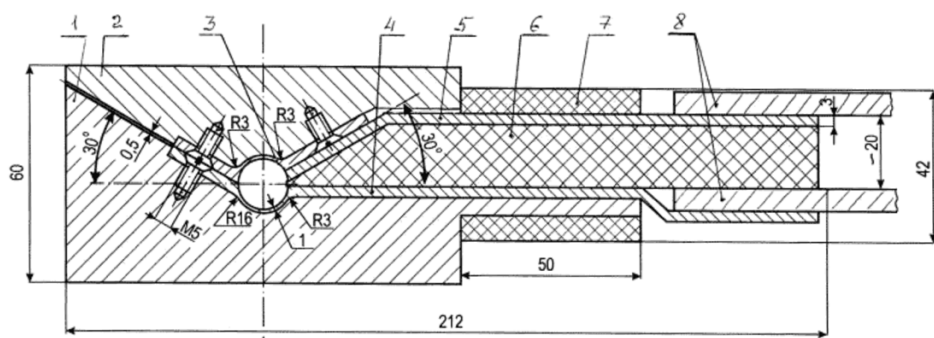


Схема разъемного одновиткового индуктора:

1 – полукорпус (сталь 30ХГСА); 2 – полукорпус (сталь 30ХГСА); 3 – токовод рабочей зоны (бронза БрБ2); 4 – токовод рабочей зоны и МИУ (бронза БрБ2); 5 – токовывод к МИУ; 6 – изолирующая проставка (текстолит); 7 – бандаж (стеклоткань, пропитанная эпоксидным компаундом); 8 – токовыводы установки МИУ 20/5

Частота тока при МИОМ находится в пределах 10...20 кГц, при этом толщина скин-слоя для медных сплавов не превышает 1 мм. Исходя из сказанного выше можно сделать вывод, что основная масса спирали индуктора предназначена для обеспечения жесткости индуктора и существенно не влияет на его электрические характеристики. Учитывая низкие механические характеристики медных сплавов, индуктор приходится изготавливать достаточно массивным и ограничивать максимальное давление на заготовку, что, в свою очередь, снижает технологические возможности индуктора. Кроме того, для повышения безопасности индуктора в случае его разрушения применяются специальные бандажи. Однако если разделить спираль индуктора на электрическую и силовую составляющие, то можно существенно повысить прочность и долговечность индуктора. В этом случае по проводящему контуру будет идти электрический ток, а силовое воздействие будет восприниматься прочным основанием.

Первой реализацией этой концепции [4] был одновитковый разъемный индуктор для обжима трубчатых заготовок (наконечников электро-

жгутов), см. рисунок, схема которого была выбрана из-за простоты ее реализации. Токоведущая часть 3 и 4 представляет собой сменные медные полосы, всю силовую и тепловую нагрузку воспринимает массивный стальной корпус 1 и 2. Испытания такого индуктора не показали существенных различий по сравнению с режимами, полученными для индуктора, изготовленного полностью из бронзы [3].

Данный индуктор показал свою работоспособность и высокую ремонтпригодность, при этом он не требует дополнительного изменения технологических параметров процесса обжатия трубчатых наконечников.

#### Список литературы

1. Белый И.В., Фертник С.М., Хищенко Л.Т. Справочник по магнитно-импульсной обработке металлов. – Харьков, 1977. – 168 с.
2. Гулидов А.И., Курлаев Н.В., Мерзиевский Л.А., Рынгач Н.А. Влияние импульсной обработки на дефекты сплошности и долговечность материалов // Научный вестник НГТУ. – 2005. – № 1(18) – С. 97–110.
3. Гулидов А.И. Численное моделирование процесса сборки наконечников с электрожгутами давлением импульсного магнитного поля / А.И. Гулидов, Н.В. Курлаев, Ю.С. Покалюхин, Н.А. Рынгач, В.Б. Юдаев // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка металлов давлением. – № 8. – С. 38–42.
4. Рынгач Н.А. Определение эффективных режимов магнитно-импульсной обработки для уменьшения объема пор в металлах и сплавах // Материалы Российской научн.-техн. конф. «Наука. Промышленность. Оборона». 21–23 апреля 2004 г. – Новосибирск: НГТУ, 2004. – С. 67–68.

#### Advanced inductors construction for magnetic pulse forming

N.V. Kurlaev, N.A. Ryngatch, K.N. Bobin

Development and implementation of new designs for inductors for magnetic pulse magnetic forming is discussed.

**Key words:** pulse magnetic forming treatment, inductor.