

ИНДУКТОРНАЯ СИСТЕМА С ЧЕТЫРЬМЯ ПРЯМОУГОЛЬНЫМИ ВИТКАМИ ДЛЯ МАГНИТНО-ИМПУЛЬСНОЙ РАЗДАЧИ ТРУБ ПРЯМОУГОЛЬНОГО ПРОФИЛЯ

Ю.В. Батыгин, профессор, д.т.н., ХНАДУ, А.Ю. Бондаренко, к.т.н., ст. научн. сотр., НТУ "ХПИ", А.В. Гнатов, доцент, к.т.н., Д.О. Смирнов, аспирант, ХНАДУ

Аннотация. Экспериментально исследовано операцию раздачи прямоугольных труб индукторной системой с четырьмя прямоугольными витками.

Ключевые слова: индукторная система, источник энергии, ферромагнитный металл.

ИНДУКТОРНА СИСТЕМА З ЧОТИРМА ПРЯМОКУТНИМИ ВИТКАМИ ДЛЯ МАГНІТНО-ІМПУЛЬСНОЇ РОЗДАЧІ ТРУБ ПРЯМОКУТНОГО ПРОФІЛЮ

Ю.В. Батигін, професор, д.т.н., ХНАДУ, О.Ю. Бондаренко, к.т.н., ст. наук. співр., НТУ "ХПІ", А.В. Гнатов, доцент, к.т.н., Д.О. Смирнов, аспірант, ХНАДУ

Анотація. Експериментально досліджено операцію роздачі прямокутних труб індукторної системи з чотирма прямокутними витками.

Ключеві слова: індукторна система, джерело енергії, ферромагнітний метал.

INDUCTIVE SYSTEM WITH FOUR RECTANGULAR COILS FOR MAGNETIC- PULSE DISTRIBUTION PIPE RECTANGULAR PROFILE

Yu. Batygin, professor, dr. eng. sc., KhNAHU, A. Bondarenko, cand. eng. sc., senior research worker, NTU "KhPI", A. Gnatov, assistant professor, cand. eng. sc., D. Smirnov, post graduate student, KhNAHU

Abstract. Experimentally investigated distributing operation rectangular tubes induction reflex the system with four rectangular turns.

Key words: inductor system, the energy source, nonferromagnetic metal.

Введение

Для сборки элементов механических рамных конструкций из лёгких прочных металлических сплавов на основе алюминия и магния, получивших широкое распространение в современном промышленном производстве, необходимы новые способы их относительной фиксации. Известные методы традиционной сварки оказываются не эффективными или вообще не работоспособными [1].

Магнитно-импульсные технологии позволят реализовать на практике, так называемую, холодную сварку, в основе которой положена взаимная диффузия соединяемых металлов при достаточно высоких скоростях соударения. В отличие от механических способов, где силовое воздействие определяется только инструментом и никак не связано с внутренними процессами внутри обрабатываемой заготовки, в магнитно-импульсных технологиях давление на металл возникает при только взаимодействии собственно магнитного поля с индуцированными токами, и

рассматривать в отдельности, а затем проектировать источник магнитного поля как независимый инструмент силового воздействия нельзя.

Для магнитно-импульсной сборки достаточно жёстких рамных конструкций из металлов с высоким уровнем предела текучести необходимы индукторные системы, развивающие мощные и строго направленные силы давления [2,3]. Опять же, очевидно, что для успешного выполнения данной производственной операции по "раздаче" полых трубчатых заготовок с прямоугольной формой поперечного сечения, в первую очередь, необходима концентрация усилий во внутренних углах деформируемого профиля, поскольку именно здесь его жёсткость достигает максимума.

Повышение эффективности целенаправленного силового воздействия во внутренней полости деформируемой прямоугольной трубы возможно за счёт применения четырёх одновитковых соленоидов, последовательно соединённых между собой и расположенных так, чтобы линейная суперпозиция полей, возбуждаемых каждым из них, обеспечивала квадратичный рост амплитуды магнитного давления в угловых зонах деформируемого профиля.

Цель исследования

Целью работы явилось исследование индукторных систем – инструментов для магнитно-импульсного сочленения элементов сборных металлических конструкций на основании анализа электродинамических усилий, действующих на объект обработки, и позволяющих реализацию производственной операции «раздача».

Постановка задачи исследования

Простейшим вариантом конструкции индукторной системы для раздачи труб прямоугольного сечения является конструкция из протяжённых одновитковых соленоидов, размещённых внутри трубы компланарно плоскостям противоположных стенок так, что их длинные токопроводы параллельны и проходят вдоль угловых изгибов прямоугольного профиля.

Схематически, предлагаемая индукторная система и, соответственно, принимаемая

расчётная модель иллюстрируются на рис. 1. Проводники, помеченные цифрами 1, 2, 3 и 4, – это протяжённые токопроводы витков. Их поперечное сечение – квадрат со стороной d .

Итак, уточним постановку задачи:

- углы поперечного профиля в изгибах полых трубы приближаются к $\approx \frac{\pi}{2}$;
- одновитковые соленоиды прямоугольной формы выполнены из проводников квадратного сечения $d \times d$ и обладают достаточно большой протяжённостью в измерении, соответствующем оси Ox , так что $\frac{\partial}{\partial x} = 0$;
- электропроводность обрабатываемого металла и действующие рабочие частоты настолько высоки, что допустимо приближение резкого поверхностного эффекта;
- по токопроводам витков, параллельных оси Ox , протекает один и тот же по величине ток $I_x(t) = I(t)$ (t - время в сек.).

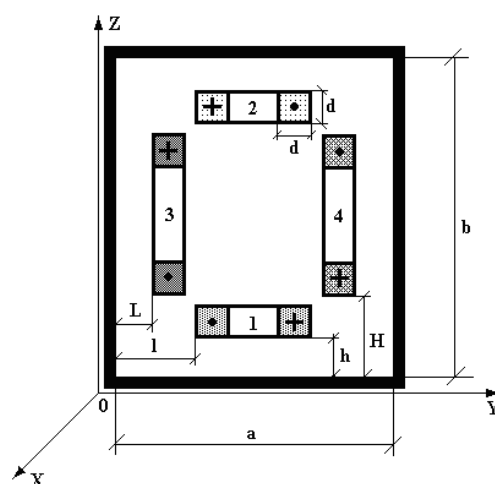


Рис. 1. Схема индукторной системы

При решении задач раздачи необходимо решить уравнения Максвелла для нетривиальных компонент вектора поля, преобразованных по Лапласу с учётом нулевых начальных условий, возбуждаемых во внутренней полости.

$$\begin{cases} \frac{\partial H_z(p, y, z)}{\partial y} - \frac{\partial H_y(p, y, z)}{\partial z} = j_x(p, y, z); \\ \frac{\partial E_x(p, y, z)}{\partial z} = -p\mu_0 H_y(p, y, z); \\ \frac{\partial E_x(p, y, z)}{\partial y} = p\mu_0 H_z(p, y, z), \end{cases}$$

p – параметр интегрального преобразования Лапласа.

Для интегрирования уравнений воспользовались двойным разложением Фурье по взаимно ортогональным пространственным переменным в выбранной системе координат.

Численные расчёты распределения напряжённости и электродинамических усилий

Для иллюстрации численных расчётов, с помощью индукторной системы, было проведено экспериментальное моделирование

процессов возбуждения электромагнитных полей токами 4-х одновитковых соленоидов в полости прямоугольной трубчатой заготовки (рис.2).

В режиме резкого поверхностного эффекта обработке подлежит полая протяжённая алюминиевая трубчатая заготовка толщиной 0,001m с квадратной формой поперечного сечения: 0,02x0,02m, $a = b = 0,02m$ [3,4]. Индукторы – одновитковые соленоиды прямоугольной формы выполнены из проводников с квадратным поперечным сечением: 0,002x0,002m, $d = 0,002m$.

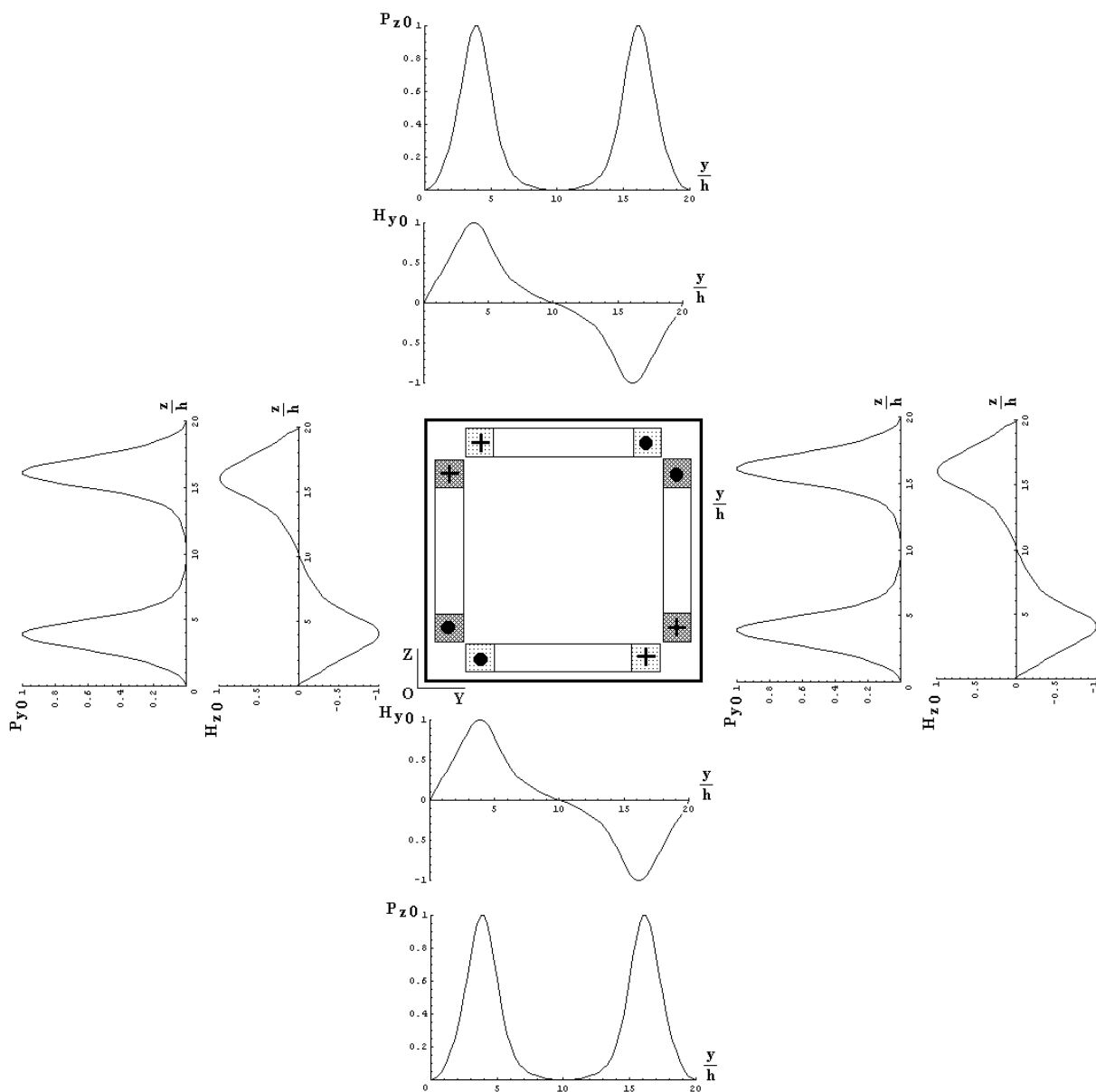


Рис. 2. Пространственные распределения касательных компонент напряжённости магнитного поля ($H_{y,z}^0$) и возбуждаемых сил давления ($P_{z,y}^0$) в относительных единицах

Для более полной иллюстрации процессов в системе расчёты в относительных единицах следует дополнить абсолютными значениями характеристик [4].

При амплитуде тока в индукторе $I_m = 100\text{кА}$ максимум напряжённости будет составлять

$H_m \approx 1.96 \cdot 10^7 \frac{A}{m}$, соответственно, максимум развиваемого давления будет равен $P_m \approx 2.42 \cdot 10^8 \frac{H}{m^2}$.

Выводы

Проведенные экспериментальные исследования и вычисления приводят к следующим выводам.

В индукторной системе с 4-мя взаимно ортогональными одновитковыми соленоидами, расположенными на внутренних поверхностях профиля полой трубчатой заготовки прямоугольной формы, в режиме резкого поверхностного эффекта возбуждаются интенсивные магнитные поля и мощные электродинамические усилия, величины которых вполне достаточны для практического деформирования обрабатываемой заготовки по углам профиля поперечного сечения [3,5].

Максимум напряжённости составляет

$$H_m \approx 1.96 \cdot 10^7 \frac{A}{m},$$

максимум давления

$$P_m \approx 2.42 \cdot 10^8 \frac{N}{m^2}.$$

Максимумы пространственного распределения полей и давлений сосредоточены вблизи внутренних углов обрабатываемой заготовки, а концентрация возбуждаемых усилий на двух взаимно ортогональных плоскостях означает появление равнодействующей силы давления с амплитудой $\sqrt{2} \cdot P_m$, направленной к центру угла.

Повышение эффективности многовитковых индукторных систем возможно за счёт выбо-

ра формы поперечного сечения витков их в областях сочленения смежных токопроводов при наименьших диэлектрических зазорах между ними.

Литература

1. Туренко А.Н., Батыгин Ю.В., Гнатов А.В., Теория и эксперимент магнитно-импульсного притяжения тонкостенных металлов. Том 3. Импульсные магнитные поля для прогрессивных технологий. – Харьков: Изд. Харьковского национального автомобильно-дорожного университета. 2008. – 245.
2. Дашук П. Н. Техника больших импульсных токов и магнитных полей / П. Н. Дашук, С. Л. Зайенц, В. С. Комельков, Г. С. Кучинский, Н. Н. Николаевская, П. И. Шкуропат, Г. А. Шнеерсон. – под ред. В. С. Комелькова. – Москва: Атомиздат, 1970. – 472 с.
3. Батыгин Ю. В. Возможности магнитно-импульсной технологии для рихтовки кузовных элементов автомобилей / Ю. В. Батыгин, В. И. Лавинский, Г. С. Сериков, Е. А. Чаплыгин // Труды 13-й международной научно-технической конференции «Физические и компьютерные технологии», 19–20 апреля 2007 г. – Харьков: ХНПК «ФЭД», 2007. – С.352–355.
4. Батыгин Ю.В. Диффузионные процессы при "раздаче" трубчатых заготовок в магнитно-импульсной обработке металлов / Батыгин Ю.В., Лавинский В.И., Черногор Т.Т. – Харьков: Електротехніка і електромеханіка. – 2005, №2. – с.72–78.
5. Бажинов А. В. Использование энергии импульсных магнитных полей в автомобильной промышленности / А. В. Бажинов, Ю. В. Батыгин, Е. А. Чаплыгин // Сб. научных трудов Харьковского национального автомобильно-дорожного университета. – Харьков: ХНАДУ, – 2005. – Выпуск 16. – С.349–353.

Рецензент: О.П. Алексеев, профессор, д.т.н., ХНАДУ.

Статья поступила в редакцию 5 октября 2011 г.