УДК 621.318

Ю.В. Батыгин, С.Ф. Головащенко, А.В. Гнатов, Д.О. Смирнов

ИНДУКТОРНЫЕ СИСТЕМЫ ДЛЯ МАГНИТНО-ИМПУЛЬСНОЙ РАЗДАЧИ ТРУБ ПРЯМОУГОЛЬНОЙ ФОРМОЙ ПОПЕРЕЧНОГО СЕЧЕНИЯ

Стаття присвячена розрахунку просторового розподілу електромагнітних полів, які створюються різними індукторними системами, призначеними для роздачі порожнистих металевих труб з прямокутною формою поперечного перетину. Визначені збуджувані електродинамічні зусилля в даних індукторних системах. Показано, що дані системи забезпечують не лише силову дію на стінки внутрішньої порожнини, але і цілеспрямований тиск на кути прямокутного профілю.

Статья посвящена расчёту пространственного распределения электромагнитных полей, которые создаются различными индукторными системами, предназначенными для "раздачи" полых металлических труб с прямоугольной формой поперечного сечения. Определены возбуждаемые электродинамические усилия в рассматриваемых индукторных системах. Показано, что данные системы обеспечивают не только силовое воздействие на стенки внутренней полости, но и целенаправленное давление на углы прямоугольного профиля.

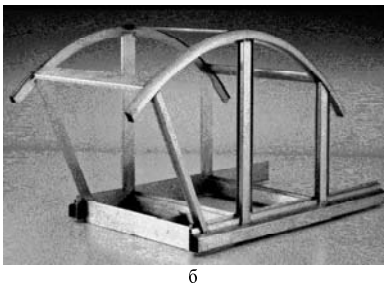
ВВЕДЕНИЕ

Постановка проблемы. Для сборки элементов механических рамных конструкций из лёгких прочных металлических сплавов на основе алюминия и магния, получивших широкое распространение в современном промышленном производстве (рис. 1), необходимы новые способы их относительной фиксации.

Анализ основных достижений и публикаций Известные методы традиционной сварки оказываются не эффективными или вообще не работоспособными [1]. Но, как показали проведенные исследования, магнитно-импульсные технологии позволяют реализовать на практике, так называемую, холодную сварку, в основе которой положена взаимная диффузия соединяемых металлов при достаточно высоких скоростях соударения [2, 3].

Цель настоящей работы – расчёт пространственного распределения полей с последующими выводами о возбуждаемых электродинамических усилиях в различных индукторных системах, предназначенных для "раздачи" полых металлических труб с прямоугольной формой поперечного сечения. Причём данные системы должны обеспечивать не только силовое воздействие на стенки внутренней полости, но и обязательное целенаправленное давление на углы.

а



б

Рис. 1. Кузовная рама автомобиля фирмы "Volkswagen" (б) и экспериментальные образцы тавровых соединений в её узлах (а)

РАСЧЁТНЫЕ СООТНОШЕНИЯ

Схематически, предлагаемая индукторная система в поперечном сечении и, соответственно, принимаемая расчётная модель показаны на рис. 2. Проводники, помеченные цифрами 1, 2, 3 и 4, – это протяжённые токопроводы витков. Их поперечное сечение – квадрат со стороной d .

В дальнейшем, указание направления токов в витках позволит исследовать электродинамические процессы в различных вариантах соединения витков между собой и подключения их к источнику мощности прямоугольного профиля.

Принимаемые допущения:

- углы поперечного профиля в изгибах полой металлической трубы приближаются к $\approx\pi/2$;
- приемлема декартова прямоугольная система координат;
- одновитковые соленоиды прямоугольной формы выполнены из проводников квадратного сечения $d\times d$ и обладают достаточно большой протяжённостью в измерении, соответствующем оси OX, так что $\partial/\partial x = 0$;
- электропроводность обрабатываемого металла и действующие рабочие частоты настолько высоки, так что допустимо приближение резкого поверхностного эффекта;
- по токопроводам витков, параллельных оси OX, протекает один и тот же по величине ток $I_x(t) = I(t)$ (где t – время в секундах).

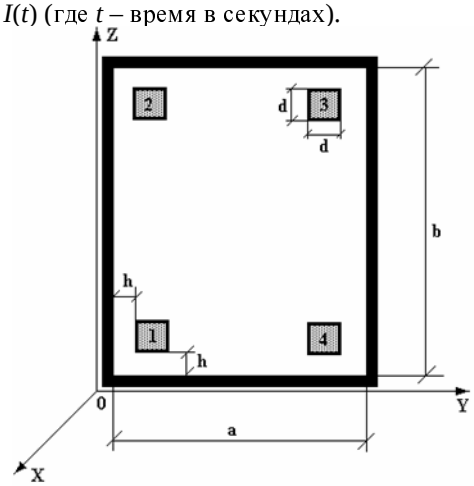


Рис. 2. Расчётная модель

Принятые допущения позволяют считать, что в рассматриваемой системе возбуждаются нетривиальные компоненты вектора напряжённости электромагнитного поля:

$$E_x(t,y,z) \neq 0; H_y(t,y,z) \neq 0; H_z(t,y,z) \neq 0 .$$

Из допущения о резком поверхностном эффекте следует, что на поверхностях стенок металлической трубы касательная составляющая вектора напряжённости электрического поля обращается в нуль, то есть:

$$E_x(t,y,\{z=0,b\}) = E_x(t,\{y=0,a\},z) = 0 .$$

Уравнения Максвелла для компонентов вектора поля, преобразованных по Лапласу с учётом нулевых начальных условий, во внутренней полости между взаимно ортогональными стенками металлической трубы ($y \in [0, a]$, $z \in [0, b]$) [3, 4]:

$$\begin{cases} \dfrac{\partial H_z(p,y,z)}{\partial y} - \dfrac{\partial H_y(p,y,z)}{\partial z} = j_x(p,y,z); & (1) \\ \dfrac{\partial E_x(p,y,z)}{\partial z} = -\, p \cdot \mu_0 \cdot H_y(p,y,z); & (2) \\ \dfrac{\partial E_x(p,y,z)}{\partial y} = p \cdot \mu_0 \cdot H_z(p,y,z), & (3) \end{cases}$$

где p – параметр интегрального преобразования Лапласа, $j_x(p, y, z)$ – плотность стороннего тока – тока в токопроводах:

$$j_x(p,y,z) = \left(\frac{I(p)}{d^2}\right) \cdot \sum_{i=1}^{4} \delta_i \cdot f_i(y,z), \quad I(p) = L\{I(t)\};$$

$f_i(y, z)$ – функции пространственного распределения ($i = 1, 2, 3, 4$):

$$f_1(y,z) = [\eta(z-h) - \eta(z-(h+d))] \times$$
$$\times [\eta(y-h) - \eta(y-(h+d))];$$
$$f_2(y,z) = [\eta(z-(b-(h+d)) - \eta(z-(b-h))] \times$$
$$\times [\eta(y-h) - \eta(y-(h+d))];$$
$$f_3(y,z) = [\eta(z-(b-(h+d))) - \eta(z-(b-h))] \times$$
$$\times [\eta(y-(a-(h+d))) - \eta(y-(a-h))];$$
$$f_4(y,z) = [\eta(z-h) - \eta(z-(h+d))] \times$$
$$\times [\eta(y-(a-(h+d))) - \eta(y-(a-h))];$$

$\eta(z)$, $\eta(y)$ – ступенчатые функции Хевисайда;
$E_x(p, y, z) = L\{E_x(t, y, z)\}$; $H_{y,z}(p, y, z) = L\{H_{y,z}(t, y, z)\}$.

Из дифференциальной системы (1) – (3) можно получить уравнение для $E_x(p, y, z)$:

$$\frac{\partial^2 E_x(p,y,z)}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 E_x(p,y,z)}{\partial z^2} = p \cdot \mu_0 \cdot j_x(p,y,z). \quad (4)$$

Правая часть (4) есть линейная комбинация из четырёх слагаемых. Для его интегрирования целесообразно воспользоваться принципом суперпозиции, в соответствии с которым следует найти решения для каждого из слагаемых в правой части линейного неоднородного дифференциального уравнения, после чего полученные результаты просуммировать [7].

Чтобы удовлетворить граничным условиям поставленной задачи решение уравнения (5) следует искать в виде двойного разложения Фурье по синусам кратных дуг [7]:

$$E_x(p,y,z) = \sum_{m,n=1}^{\infty} E_x(p,m,n) \cdot \sin\left(\frac{\pi \cdot m}{b} \cdot z\right) \times \times \sin\left(\frac{\pi \cdot n}{a} \cdot y\right), \quad (5)$$

где $E_x(p, m, n)$ – неизвестные коэффициенты разложения.

Для определения неизвестных коэффициентов двойного ряда Фурье в выражении (5) его необходимо подставить в левую часть уравнения (4), а правую часть (4) в соответствии с известными алгоритмами разложить по синусам.

После выполнения требуемых математических операций находим выражение для напряжённости возбуждаемого электрического поля. Полученный результат следует подставить в уравнения (2) и (3).

В конечном итоге, после выполнения необходимых тождественных преобразований определяем компоненты вектора магнитного поля, возбуждаемого:

а) на горизонтальных стенках трубы (соответственно рис. 2), $z = 0$:

$$H_y(p,y,z=0) = \left(\frac{I(p) \cdot 16}{\pi \cdot b \cdot d^2}\right) \times \sum_{m,n=1}^{\infty} \frac{f_1(m,n)}{\left[\left(\frac{\pi \cdot m}{b}\right)^2 + \left(\frac{\pi \cdot n}{a}\right)^2\right] \cdot n} \times \times \left[\delta_1 + (-1)^{m+1} \cdot \delta_2 + (-1)^{m+n} \cdot \delta_3 + (-1)^{n+1} \cdot \delta_4\right] \times \times \sin\left(\frac{\pi \cdot n}{a} \cdot y\right); \quad (6)$$

б) на вертикальных стенках трубы (соответственно рис. 2), $y = 0$:

$$H_z(p,y=0,z) = -\left(\frac{I(p) \cdot 16}{\pi \cdot a \cdot d^2}\right) \times \sum_{m,n=1}^{\infty} \frac{f_1(m,n)}{\left[\left(\frac{\pi \cdot m}{b}\right)^2 + \left(\frac{\pi \cdot n}{a}\right)^2\right] \cdot m} \times \times \left[\delta_1 + (-1)^{m+1}\delta_2 + (-1)^{m+n}\delta_3 + (-1)^{n+1}\delta_4\right] \times \times \sin\left(\frac{\pi \cdot m}{b} \cdot z\right). \quad (7)$$

Плотности токов, индуцированных в металле обрабатываемой трубчатой заготовки, также будут определяться формулами (6) и (7). Их квадрат с точностью до магнитной проницаемости вакуума равен магнитному давлению, развиваемому в исследуемой индукторной системе.

Численные оценки распределения напряжённости возбуждаемого магнитного поля и электродинамических усилий. Полученные решения проиллюстрируем численными расчётами для экспериментальных индукторных систем, моделировавших реальные процессы в производственных условиях.

В режиме резкого поверхностного эффекта обработке подлежит полая протяжённая алюминиевая трубчатая заготовка толщиной 0,001 м с квадратной формой поперечного сечения: 0,02×0,02 м, $a = b = 0{,}02$ м.

Индукторы – одновитковые соленоиды прямоугольной формы выполнены из проводников с квадратным поперечным сечением: 0,002×0,002 м, $d = 0{,}02$ м. Изоляционные промежутки между витками и стенками заготовки $h = 0{,}001$ м.

Геометрически расположение индукторов соответствует рис. 2. Их токопроводы помещаются вдоль внутренних угловых изгибов профиля поперечного сечения трубчатой заготовки: виток I – токопроводы № 1 и № 4, виток II – токопроводы № 2 и № 3.

Электрически, витки соединены последовательно. Протекающий ток одинаков. В токопроводах №1 и №2 его направление совпадает с положительным направлением оси *OX*, в №3 и №4 он направлен в противоположную сторону.

Необходимо вычислить распределения касательных компонент напряжённости магнитного поля, а следовательно и распределения плотности вихревых токов, индуцированных в металле полой трубы.

Как было указано выше, требуемые характеристики электромагнитных процессов в исследуемой индукторной системе вычисляются по формулам (6) и (7).

В соответствии с заданной конфигурацией индуктора, способа его включения и направлением тока в токопроводах для проведения расчётов следует положить, что $\delta_1 = 1$, $\delta_2 = 1$, $\delta_3 = -1$, $\delta_4 = -1$. Результаты вычислений представлены графическими зависимостями на рис. 3. Проведенные вычисления показали, что:

- в индукторной системе с двумя одновитковыми соленоидами, предназначенной для раздачи полых трубчатых заготовок с прямоугольной формой поперечного сечения из металлов с достаточно высокой электропроводностью, возбуждаются интенсивные магнитные поля и, соответственно, мощные электродинамические усилия, величины которых вполне достаточны для практического осуществления заданной технологической операции;
- пространственные распределения полей и давлений таково, что их максимумы сосредоточены вблизи внутренних углов обрабатываемой заготовки;
- концентрация возбуждаемых усилий в угловых зонах на двух взаимно ортогональных плоскостях означает появление равнодействующей силы давления с амплитудой $\sqrt{2}\cdot P_m$, направленной к центру угла;
- развитие процессов деформирования обрабатываемой заготовки должно происходить за счёт её растяжения по углам профиля поперечного сечения.

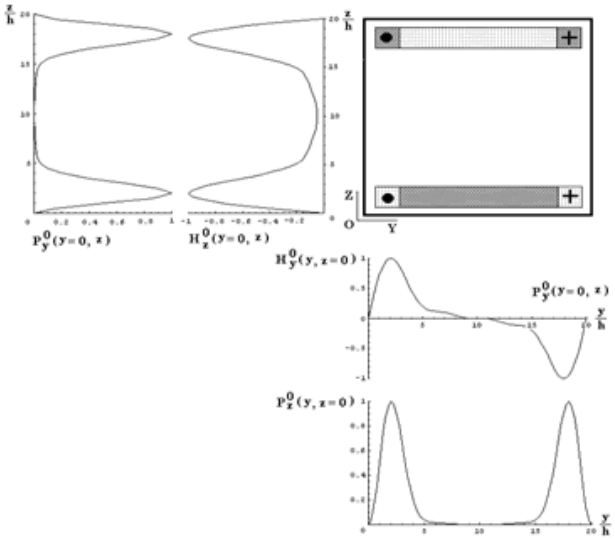


Рис. 3. Пространственные распределения касательных компонент напряжённости магнитного поля ($H^0_{y,z}$) и возбуждаемых сил давления ($P^0_{z,y}$) в относительных единицах (нормировка производилась на максимум расчётной величины)

Для более полной иллюстрации процессов в системе расчёты в относительных единицах следует дополнить абсолютными значениями характеристик. Так, при амплитуде тока в индукторе $I_m \approx 100$ кА максимум напряжённости будет составлять $H_m \approx 1{,}6\cdot10^7$ А/м, соответственно, максимум развиваемого давления будет равен $P_m \approx 1{,}5\cdot10^8$ Н/м^2.

ВЫВОДЫ

1. Предложена конструкция индукторной системы для "раздачи" полых труб прямоугольного сечения.
2. Проведенные расчёты показали:

- максимумы давлений сосредоточены вблизи внутренних углов обрабатываемой заготовки;
- развитие процессов деформирования обрабатываемой заготовки должно происходить за счёт её растяжения по углам профиля поперечного сечения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Proceedings of the 1-st International Conference on High Speed Metal Forming. March 31/April 1. 2004. Dortmund, Germany.
2. Белый И.В., Фертик С.М., Хименко Л.Т., Справочник по магнитно-импульсной обработке металлов. Харьков: Вища школа. 1977. – 189 с.
3. Шнеерсон Г.А., Поля и переходные процессы в аппаратуре сверхсильных токов. Л: "Энергия". 1982. – 188 с.
4. Батыгин Ю.В., Лавинский В.И., Хименко Л.Т., Импульсные магнитные поля для Прогрессивных технологий. Том 1. Издание второе, переработанное и дополненное. Под общей редакцией д.т.н., проф. Батыгина Ю.В. Харьков: Изд. МОСТ. - .2003.– 285 с.
5. Батыгин Ю.В., Сериков Г.С, Головащенко С.Ф., Магнитное поле и давления, возбуждаемые одновитковым индуктором в угловом изгибе листовой заготовки. // Електротехніка і електромеханіка. Харків. 2006.– №6. – с.66-71.
6. Батыгин Ю.В., Чаплыгин Е.А., Сериков Г.С., патент Украины на полезную модель № 31309. Індуктор для магнітно-імпульсного формування кутів у вигнутих листових металевих заготівках.
7. Т. Корн, Г.Корн, Справочник по математике для научных работников и инженеров. – М: Наука. 1973. – 831с.

Поступила 05.12.2009

Батыгин Юрий Викторович, д.т.н., проф.
Гнатов Андрей Викторович, к.т.н., с.н.с.
Смирнов Дмитрий Олегович
Харьковский национальный
автомобильно-дорожный университет
61002, Харьков, ул. Петровского, 25
ХНАДУ, кафедра "Автомобильная электроника"
тел. (057) 700-38-52, e-mail: batygin48@mail.ru,
kalifus@yandex.ru, as.pirant@mail.ru

Головащенко Сергей Фёдорович,
Technical Leader
Manufacturing Research Department,
Ford Research & Advanced Engineering
Research and Innovation Center
MD 3135, 2101 Village Road, Dearborn, MI 48121 USA
phone: (313) 337-37-38, fax: (313) 390-05-14
e-mail: sgolovas@ford.com

Yu.V. Batygin, A.V. Gnatov, D.O. Smirnov

Induction systems for magnetic-impulse expansion of rectangular pipes

The article is devoted to calculation of spatial distribution of electromagnetic fields generated by different inductor systems intended for expansion of hollow rectangular metallic pipes. Excited electrical dynamic forces in the examined inductor systems are found. It is shown that these systems provide not only force action on the pipe internal walls but also purposeful pressure on corners of the rectangular pipe profile.

Key words – **induction system, hollow rectangular metallic pipes expansion, spatial electromagnetic field distribution calculation**