

## ИССЛЕДОВАНИЯ ИНДУКТОРНОЙ СИСТЕМЫ ДЛЯ ФОРМИРОВАНИЯ УГЛОВЫХ ИЗГИБОВ В ЛИСТОВЫХ ЗАГОТОВКАХ

Батыгин Ю.В., д.т.н., проф., Маджид Бижар  
 Национальный технический университет "Харьковский политехнический университет"  
 Украина, 61002, Харьков, ул. Фрунзе, 21, НТУ "ХПИ", кафедра "Высшей математики"  
 тел. 057) 707-60-87, E-mail: batygin@kpi.kharkov.ua

Сериков Г.С.  
 Харьковский национальный автомобильно-дорожный университет  
 Украина, 61002, Харьков, ул. Петровского, 25, кафедра "Автомобильной электроники",  
 тел. 700-38-52

*Експериментальні дослідження індукторних систем для формування кутів в ізгибах листових металевих заготовок, які були проведені, підтвердили достовірність результатів теоретичних досліджень і, відповідно, практичну роботоздатність запропонованих конструкцій інструментів для виконання заданої технологічної операції. Урахування кінцевої поперечної протяжності показало, що реальна ширина токопроводів значительно зніжує амплитуди збуджених полів та тисків.*

*Проведенные экспериментальные исследования индукторных систем для формирования углов в изгибах листовых металлических заготовок подтвердили достоверность результатов теоретических исследований и, соответственно, практическую действенность предложенных конструкций инструментов для выполнения заданной технологической операции. Учёт конечной поперечной протяжённости показал, что реальная ширина токопроводов значительно снижает амплитуды возбуждаемых полей и давлений.*

Простые и эффективные конструкции инструментов для магнитно-импульсной формовки чётких углов в изгибах металлических листов предложены авторами работы [1]. Проведенные вычисления позволили теоретически обосновать действенность одновитковых соленоидов прямоугольной формы и их различных модификаций.

Теоретические исследования требуют экспериментального подтверждения.

Кроме того, в цитируемой работе токопроводы индукторной системы полагались достаточно тонкими, хотя из феноменологических соображений очевидно, что поперечные размеры источников поля должны влиять на процессы возбуждения электромагнитных полей. Очевидно, что должны измениться амплитуды напряжённости и давлений, должны измениться формы распределений и т.д. Всё это требует дополнительных оценок.

Целью настоящей работы является экспериментальное исследование одновитковых индукторных систем прямоугольной геометрии для формовки углов в листовых заготовках и обобщение ранее полученных решений для тонких токопроводов на случай, когда последние обладают конечной протяжённостью.

Источник мощности – экспериментальный стенд, специально созданный для адекватного моделирования реальных электромагнитных процессов. Фактически, стенд представляет собой модельную магнитно-импульсную систему, работающую в слаботочном режиме многократного повторения разрядных импульсов, следующих с частотой, кратной рабочей частоте напряжения питающей промышленной сети (50 Гц, 25 Гц и т.д.). Периодически повторяющаяся картинка разряда формируется в устойчивое стационарное изображение на экране осциллографа (аналогия со стробоскопическим эффектом!). Стенд позво-

ляет проводить необходимые измерения при низких напряжениях и относительно малых токах в объектах исследования [2].

Источник импульсного магнитного поля – протяжённый одновитковый соленоид прямоугольной формы. Одной из своих сторон он обращён к углу в листовой алюминиевой заготовке с одним изгибом (рис. 1). Её толщина – 0.001 м. Размеры плоскостей одинаковы и равны, соответственно  $0.2 \times 0.06 \text{ м}^2$ .

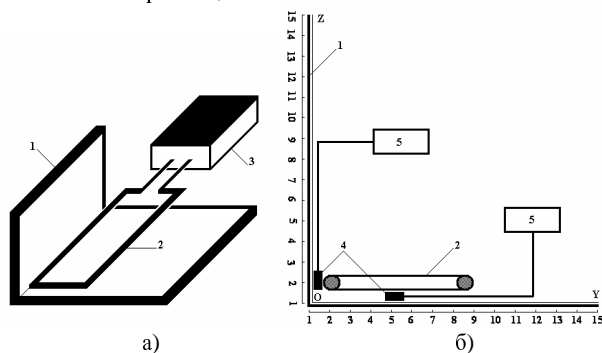


Рис. 1. Экспериментальная система:

- а) схематическое изображение исследуемой индукторной системы в аксонометрии; б) поперечное сечение индукторной системы в зоне измерений;  
 1 – изогнутая листовая заготовка, 2 – собственно индуктор, 3 – генератор синусоидального тока, 4 – измерительные катушечные зонды, 5 – осциллограф

Для однозначности выводов в измерениях первоначальный угол был выбран строго прямым. Последующие эксперименты проводились с листовым металлом, перпендикулярные плоскости которого в области изгиба сочленились с закруглением по радиусу  $\approx 0.01 \text{ м}$ .

Экспериментальная модель индуктора была выполнена из медного проводника диаметром 0.0015 м.

Размеры витка выбирались так, чтобы исключить влияние краёв листового металла и клемм подключения токопровода к источнику питания на результаты исследований. Размеры соленоида:  $0.15 \times 0.02 \text{ м}^2$ . Измерения проводились в области, соответствующей средней части алюминиевого листа (и, соответственно, витка).

На вход индуктора подавался ток с временной зависимостью в виде экспоненциально затухающей синусоиды с частотой  $f \approx 33 \text{ кГц}$  и относительным декрементом затухания  $\delta \approx 0.15$ .

Измерительные зонды представляли собой катушки из достаточно тонкого провода, намотанные на диэлектрические полосы с шириной до  $\approx 0.01 \text{ м}$  и толщиной до  $\approx 0.00025 \text{ м}$ . Соответствующие расчёты и конструктивные особенности измерительных зондов описаны в [2].

Катушки располагались перпендикулярно касательной компоненте вектора напряжённости магнитного поля, вдоль осей  $OY$  и  $OZ$ , соответственно, между токопроводами витка и плоскостями листового металла. В зоне измерения поперечный размер намотки не превышал  $\approx 0.001 \text{ м}$ .

Сигнал с обмотки измерительных зондов подавался на вход осциллографа.

Конкретной целью проводимых экспериментов являлось определение характеристик поля и, соответственно, плотности тока на поверхностях листовой заготовки. По данным этих измерений можно судить о пространственном распределении сил магнитного давления в угловой зоне изогнутого металла.

Первая группа экспериментов была посвящена измерениям в случае, когда плоскость витка индуктора строго компланарна плоскости горизонтальной плоскости угла.

Результаты измерений представлены на рис. 2.

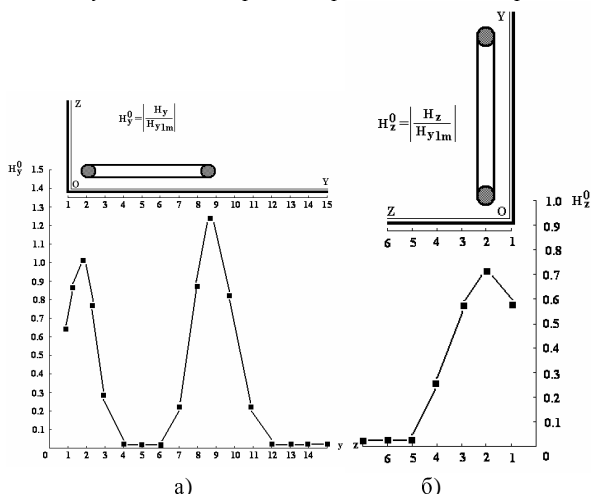


Рис. 2. Пространственное распределения модуля относительной величины касательной компоненты напряжённости магнитного поля на угловых поверхностях изогнутого листа, (нормировка производилась на максимальное значение напряжённости вблизи угла): а) горизонтальная поверхность; б) вертикальная поверхность.

Из результатов измерений следует.

- В данном варианте индукторной системы на горизонтальной плоскости изгиба плотность возбуж-

даемого тока имеет два локальных максимума: первый из них расположен вблизи угла под соответствующим "ближним" токопроводом (позиция №2 на рис. 2а), второй – под "дальним" токопроводом прямоугольного витка (позиция №9 рис. 2а).

- Величина второго максимума превышает первый в 1.25 раза, что можно объяснить рассеянием электромагнитной энергии первого витка на возбуждение поля в металле ортогональной поверхности изгиба.

- Максимум возбуждаемого поля на вертикальной плоскости (позиция №2 рис. 2б) составляет 70% от аналогичного параметра для поля "ближнего" угла.

Условия проводимого эксперимента практически соответствуют режиму резкого поверхностного эффекта. И в оценках электродинамических усилий можно считать, что амплитуды возбуждаемых сил давления будут пропорциональны квадратам амплитуд соответствующих компонент напряжённости магнитного поля.

**Примечание.** Отношение максимумов напряжённости поля при угле наклона  $\approx 15^\circ$  и  $\approx 0^\circ$  составляет  $\approx 0.84$ .

Таким образом, в угловой зоне на горизонтальную и вертикальную плоскости будут действовать силы, отличающиеся по амплитуде почти в 2 раза. Их равнодействующая с точкой приложения, соответствующей максимумам напряжённости (пересечение прямых по позициям №2 на рис. 2 а,б), будет направлена не в сторону собственно угла, а со значительным смещением вдоль горизонтальной плоскости.

На металл горизонтальной поверхности в области "дальнего" токопровода (позиция №9 рис. 2а) будет действовать давление с амплитудой, превышающий максимум в угловой зоне (позиция №2 рис. 2а) в 1.56 раз.

В целом, наиболее существенным недостатком исследованной конструкции индукторной системы является возбуждение сил давления на листовую заготовку вне заданной области, где требуется формовка чёткого угла.

Устранить данный недостаток при сохранении именно одного соленоида, то есть, снизить амплитуды сил давления вне заданной области, можно, если плоскость витка индуктора расположить под некоторым углом к горизонтальной поверхности изгиба.

Как следует из физических соображений, при увеличении расстояния от токопровода до металла должна падать амплитуда магнитного поля на его поверхности. Действительно, этот факт подтверждается на практике. В зоне под "дальним" токопроводом (позиция №9 рис. 3а) величина напряжённости снижается более чем в 4 раза. А сила давления уменьшается, соответственно, в 16 раз. Отмечается также сдвиг положений максимумов вблизи угла к его центру.

Амплитуда касательной компоненты вектора магнитного поля на вертикальной плоскости изгиба возрастает почти в 1.15 раз (рис. 3б).

Результаты проведенных измерений индуктора инициировали эксперименты с дальнейшим увеличением угла наклона плоскости витка. Естественно, что его увеличение ограничено значением  $\approx 45^\circ$ . Дальнейший рост приводит просто к перемене местами ролей горизонтальной и вертикальной плоскостей изгиба в процессе возбуждения вихревых токов в металле листа.

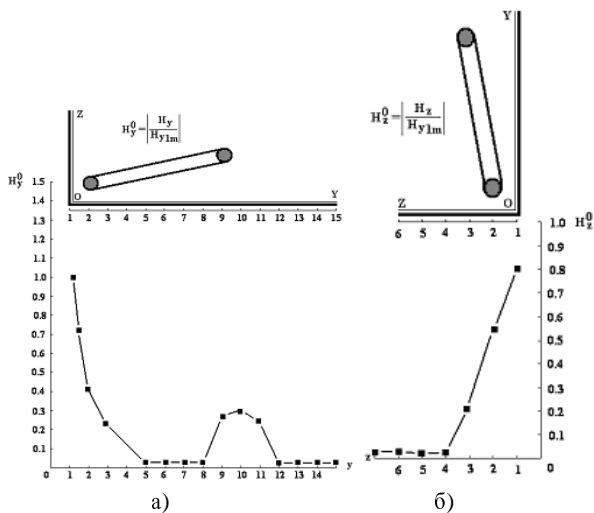


Рис. 3. Модуль относительной величины касательной компоненты напряжённости магнитного поля при угле наклона плоскости витка к горизонтальной поверхности  $\approx 15^\circ$ , (нормировка производилась на максимальное значение напряжённости вблизи угла): а) горизонтальная поверхность; б) вертикальная поверхность

Не приводя графических иллюстраций, прокомментируем полученные результаты.

Как следует из измерений, практически действенными остаются лишь силы магнитного давления только в области собственно угла, хотя их абсолютные величины по сравнению с горизонтальным расположением витка снижаются более чем в 2 раза. Но положения максимумов поля и сил сдвигаются к центру угла, а их величины выравниваются. В данном конструктивном исполнении индукторной системы можно ожидать, что равнодействующая ponderomotive сил, действующих на ортогональные поверхности изгиба, будет направлена строго в его центр. В конечном итоге, возможно практическое целенаправленное магнитное давление именно в угол и, как результат, его чёткая формовка.

Недостатком одновитковой индукторной системы с наклонным соленоидом является достаточно слабая электродинамическая связь тока витка и тока, индуцированного в металле листа. Кроме того, юстировка соленоида, обеспечивающего магнитное давление строго по центру угла изгиба, достаточно сложная практическая задача.

Необходимость юстировки обусловлена необходимостью симметрии как геометрической, так и электродинамической, относительно биссектрисы формируемого угла изгиба. Нарушение этой симметрии приведёт к перекосу амплитуд вихревых токов, возбуждаемых в металле угловых плоскостей, как следствие, к изменению направления равнодействующей электродинамического давления и к искажению результата магнитно-импульсного воздействия.

Более устойчивой по отношению к положению источника поля и более эффективной с точки зрения возможных амплитуд силового воздействия является индукторная система со спаренными наклонными соленоидами (рис. 4, поперечное сечение вверху).

Конструктивно, такая система выполняется в виде двух протяжённых прямоугольных витков, распо-

ложенных под заданным углом друг к другу (соответственно, каждый виток будет иметь определённый наклон к своей поверхности изгиба). Вдоль одной из длинных сторон витки соединяются механически. Электрический контакт может быть, а может и не быть. В зависимости от способа их включения (между собой!) и подключения к источнику мощности, витки могут образовывать параллельные или последовательные контура.

При последовательном подсоединении витков величина тока в центральном токопроводе удваивается. По протяжённым параллельным ветвям будет протекать токовый импульс с амплитудой, равной амплитуде тока источника. В целом, эффективность индукторной системы при таком соединении витков существенно возрастает (почти в 4 раза по сравнению с предыдущим вариантом их включения).

Следует отметить, что нечто подобное в виде отдельных прямоугольных контуров, имеющих одну общую сторону, предлагалось авторами [2] для штамповки изделий из тонкостенной медной фольги. Инструменты такого рода были ими названы как "индукторные системы со спаренными токопроводами".

Результаты измерений напряжённости магнитного поля в пространстве между токопроводами индуктора и поверхностями листовой заготовки приведены на рис. 4. Витки включались последовательно и параллельно. Угол их наклона к соответствующим плоскостям составлял  $\approx 15^\circ$ .

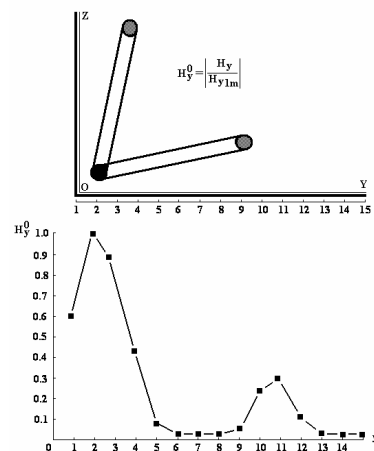


Рис. 4. Индукторная система и модуль относительной величины касательной компоненты напряжённости магнитного поля на угловых поверхностях изгиба металлического листа (нормировка производилась на максимум напряжённости вблизи угла, позиция №2)

Из измерений следует, что в исследованной индукторной системе

- пространственное распределение касательной составляющей напряжённости магнитного поля обеспечивает распределение сил давления, необходимое для формовки достаточно чётких углов в зоне изгиба листовой металлической заготовки;
- равнодействующая сил магнитного давления, возбуждаемых в рабочей зоне, будет направлена строго в центр формируемого угла, а её амплитуда превышает более чем на порядок аналогичный показатель силового воздействия вне рабочей зоны;

• при последовательном соединении витков индукторной системы существенно возрастает эффективность силового воздействия за счёт удвоения тока в центральном токопроводе, расположенном вдоль линии изгиба.

Как было ранее указано, в теоретическом рассмотрении, выполненном авторами работы [1], токопроводы индукторной системы полагались достаточно тонкими.

Для большей иллюстративности в описании следующих экспериментов приведём результаты расчётов электромагнитных характеристик, учитывающие их возможную конечную протяжённость [3].

Не останавливаясь на повторении тривиальных процедур вычисления Фурье-образов возбуждающих токов выпишем из работы [3] аналитическое выражение для касательной компоненты напряжённости магнитного поля на горизонтальной поверхности изгиба листовой заготовки при  $l = h$ .

$$H_y^0(y, z=0) = \int_0^{\infty} \frac{e^{-x}}{x} \cdot \left[ \sin\left(y\left(1 + \frac{a}{2h}\right)\right) \cdot \sin\left(y \cdot \frac{a}{2h}\right) - \left(\frac{a}{b}\right) e^{-y\left(\frac{D}{h}\right)\sin\alpha} \sin\left(y\left(1 + \frac{a+b}{2h} + \frac{D}{h}\cos\alpha\right)\right) \cdot \sin\left(y \cdot \frac{b}{2h}\right) \right] dx, (1)$$

где 
$$H_y^0(y, z=0) = \frac{H_y(t, y, z=0)}{\left(\frac{I(t)}{\pi \cdot a}\right)}$$

Магнитное давление на горизонтальную поверхность плоского угла также может быть рассчитано с помощью выражения (1).

На рис. 5 приведены графические иллюстрации экспериментальных и расчётных результатов пространственного распределения напряжённости для индукторной системы с  $a = 0.005$ ,  $D = 0.02$ ,  $b = \text{var}$ ,  $\alpha = \text{var}$ . Значения напряжённости нормировались на величину её расчётного максимума для тангенциальной компоненты поля "ближнего" токопровода. То есть, на графиках приведены зависимости для

$$H_{y,z}^0 = \frac{H_{y,z}}{H_{m1}}$$

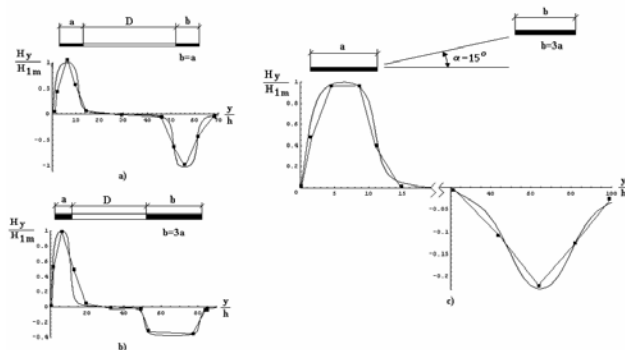


Рис. 5. Распределение тангенциальной компоненты напряжённости магнитного поля вдоль горизонтальной поверхности углового изгиба листовой заготовки, — рассчитанное по формуле (1), — результаты измерений.

а)  $\alpha = 0^\circ$ ,  $b = a$ ; б)  $\alpha = 0^\circ$ ,  $b = 3 \cdot a$ ; в)  $\alpha = 15^\circ$ ,  $b = 3 \cdot a$ .

На основании результатов расчета и эксперимен-

та можно скорректировать выводы предыдущей идеализации, сделанных без учёта конечной поперечной протяжённости токопроводов индуктора.

• Амплитуды возбуждаемых полей и давлений, действительно, снижаются с ростом протяжённости токопровода. Очевидно, что поля с более высокими напряжённостями возбуждаются при стремлении к нулю отношения ширины и расстояния до проводящей плоскости.

• Экспериментально подтверждено, что в случае конечной ширины токопроводов превышение второго максимума над первым как для напряжённости, так и давления существенно ниже, чем в случае тонких проводников (рис. 5а).

• Результаты измерений показывают, что при неизменной ширине "ближнего" токопровода увеличение ширины "дальнего" приводит к весьма ощутимому снижению напряжённости и сил давления с его стороны (рис. 5б).

• Действительно, комбинирование угла наклона плоскости, в которой расположены токопроводы, и ширины "дальнего" токопровода позволяет реализовать довольно высокий уровень концентрации поля и сил магнитного давления в угловой зоне изогнутого металлического листа (рис. 5в).

## ВЫВОДЫ

1. Проведенные экспериментальные исследования индукторных систем для формирования углов в изгибах листовых металлических заготовок подтвердили достоверность результатов теоретических исследований и, соответственно, практическую действенность предложенных конструкций инструментов для выполнения заданной технологической операции.

2. Как показали измерения, при последовательном соединении витков индукторной системы со спаренными наклонными соленоидами существенно возрастает эффективность силового воздействия за счёт удвоения тока в центральном токопроводе, расположенном вдоль линии изгиба.

3. Учёт конечной поперечной протяжённости позволяет скорректировать выводы для идеализации достаточно тонких токопроводов индуктора. Их реальная ширина значительно снижает амплитуды возбуждаемых полей и давлений.

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] Батыгин Ю.В., Сериков Г.С., Головащенко С.Ф., Магнитное поле и давления, возбуждаемые одновитковым индуктором в угловом изгибе листовой заготовки. // *Электротехника і електроніка*. Харьков. 2006. №6, с.66-71.
- [2] Батыгин Ю.В., Лавинский В.И., Хименко Л.Т., Импульсные магнитные поля для прогрессивных технологий. Том 1. Издание второе, переработанное и дополненное. Под общей ред. д.т.н., проф. Батыгина Ю.В. Харьков: изд. МОСТ-Торнадо. 2003. 284 с.
- [3] Сериков Г.С., Магнитное поле и давления, возбуждаемые индуктором с токопроводами конечной ширины, в угловых изгибах заготовки. // *Электротехніка і електроніка*. Харьков. 2008. №5, С. 70-71.

Поступила 26.02.2008