

УДК 621.318.4

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ИНДУКТОРНЫХ СИСТЕМ ДЛЯ ФОРМОВКИ УГЛОВ В ИЗОГНУТЫХ ЛИСТОВЫХ ЗАГОТОВКАХ

Ю.В. Батыгин, профессор, д.т.н., А.В. Гнатов, профессор, д.т.н.,
Р.О. Гринишин, студент, ХНАДУ

Аннотация. В статье представлены результаты экспериментальных исследований электромагнитных процессов в индукторных системах с протяжённым одновитковым соленоидом прямоугольной формы для формовки углов в предварительно изогнутых листовых заготовках. Получены графические зависимости пространственного распределения модуля относительной величины касательной компоненты напряжённости магнитного поля, позволяющие оценивать силовые показатели исследованных индукторных систем.

Ключевые слова: магнитно-импульсная обработка металлов, индукторная система, электромагнитные процессы, формовка.

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ІНДУКТОРНИХ СИСТЕМ ДЛЯ ФОРМУВАННЯ КУТІВ У ЗІГНУТИЙ ЛИСТОВІЙ ЗАГОТІВЦІ

Ю.В. Батигін, професор, д.т.н., А.В. Гнатов, професор, д.т.н.,
Р.О. Гринишин, студент, ХНАДУ

Анотація. У статті представлені результати експериментальних досліджень електромагнітних процесів в індукторних системах з протяжним одновитковим соленоїдом прямокутної форми для формування кутів у попередньо зігнутих листових заготовках. Отримані графічні залежності просторового розподілу модуля відносної величини дотичної компоненти напруженості магнітного поля, що дозволяють оцінити силові показники досліджуваних індукторних систем.

Ключові слова: магнітно-імпульсна обробка металів, індукторної система, електромагнітні процеси, формування.

EXPERIMENTAL RESEARCHES OF INDUCTOR SYSTEM FOR FORMING OF ANGLES IN CURVED SHEET WORKPIECES

Yu. Batygin, Professor, Doctor of Technical Sciences, A. Hnatov, Professor, Doctor of Technical Sciences, R. Grinishin, student, KhNAHU

Abstract. The results of experimental researches of electromagnetic processes in the inductor system with extended single-turn solenoid of rectangular shape for angles forming in previously curved sheet metal workpieces are presented in the article. The graphical dependences of relative value space distribution of magnetic field intensity tangential component module, which allow estimation of researched inductor systems power index, have been received.

Keywords: magnetic-pulse metal working, inductor system, electromagnetic processes, forming.

Введение

Современное состояние технического развития общества предполагает переход к новым

технологическим операциям. Выполнение данных операций устоявшимися и известными производственными методами уже не представляется возможным. Это находит

своё отражение в тех отраслях промышленности, например, автомобильной и авиационной, где необходима деформация металлических изделий для придания им соответствующей формы, а также реставрация деформированных элементов корпусов до первоначального состояния. В связи с этим в последнее время все больше внимания уделяется технологиям с использованием энергии электромагнитных полей [1–4]. К ним относятся разработки инструментов для магнитно-импульсной формовки углов заданного уровня чёткости в предварительно изогнутых листовых заготовках. Эти разработки инициированы производственными операциями по «заполнению углов» (технологический термин) и приданию им соответствующей формы в панелях современных легковых автомобилей [2].

Анализ публикаций

Известно много работ, связанных с магнитно-импульсной штамповкой, подробный анализ которых приведен в обобщающих трудах [2,4,5]. Как показали исследования, магнитно-импульсные технологии позволяют реализовать на практике, не только штамповку, но и формовку изогнутых углов, а также доведение штампуемого рисунка до заданного уровня чёткости [2]. Этому аспекту применения магнитно-импульсных технологий и посвящена данная работа.

Цель и постановка задачи

Экспериментальное определение характеристик электромагнитного поля в индукторных системах (ИС) с протяжённым одновитковым соленоидом прямоугольной формы для штамповки углов с заданным уровнем чёткости в предварительно изогнутых проводящих листовых заготовках. По данным этих измерений можно судить о пространственном распределении сил магнитного давления в угловой зоне изогнутого металла.

Напряжённость магнитного поля и токи в листовой заготовке с одним изгибом

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 одинако-

вы и равны, соответственно 0,2x0,06 м².

Для однозначности выводов в измерениях первоначальный угол был выбран 90°. Последующие эксперименты проводились с листовым металлом, перпендикулярные плоскости которого в области изгиба сочленялись с закруглением по радиусу $\approx 0,01$ м. Экспериментальная модель индуктора была выполнена из медного проводника диаметром 1,5 мм. Размеры витка выбирались так, чтобы исключить влияние клемм подключения его токопровода к источнику питания и краёв листового металла на результаты исследований. Размеры соленоида 0,15x0,02 м². Измерения проводились в области, соответствующей средней части алюминиевого листа и витка. На вход индуктора подавался синусоидальный ток с частотой $f \approx 20,6$ кГц. Измерительные зонды представляли собой катушки из достаточно тонкого провода, намотанные на диэлектрические полосы с шириной до $\approx 0,01$ м и толщиной до $\approx 0,00025$ м (датчики индукционного типа). Соответствующие расчёты и конструктивные особенности измерительных зондов описаны в [4].

Катушки располагались перпендикулярно касательной компоненте вектора напряжённости магнитного поля, вдоль осей OY и OZ , соответственно, между токопроводами витка и плоскостями листового металла. Сигнал с обмотки измерительных зондов подавался на вход осциллографа.

Первая группа экспериментов была посвящена измерениям в случае, когда плоскость витка индуктора строго компланарна плоскости горизонтальной плоскости угла. Результаты измерений представлены на рис. 2.

Из результатов измерений следует:

- в данном варианте ИС на горизонтальной плоскости изгиба плотность возбуждаемого 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 верти-

кальной плоскости (позиция №2 рис.2б) составляет 70% от аналогичного параметра для поля "ближнего" угла.

Поскольку условия проводимого эксперимента практически соответствуют режиму резкого поверхностного эффекта, в оценках электродинамических усилий можно считать, что амплитуды возбуждаемых сил давления

будут пропорциональны квадратам амплитуд соответствующих компонент напряжённости магнитного поля на поверхностях обрабатываемого объекта.

Таким образом, в угловой зоне на горизонтальную и вертикальную плоскости будут действовать силы, отличающиеся по амплитуде почти в 2 раза.

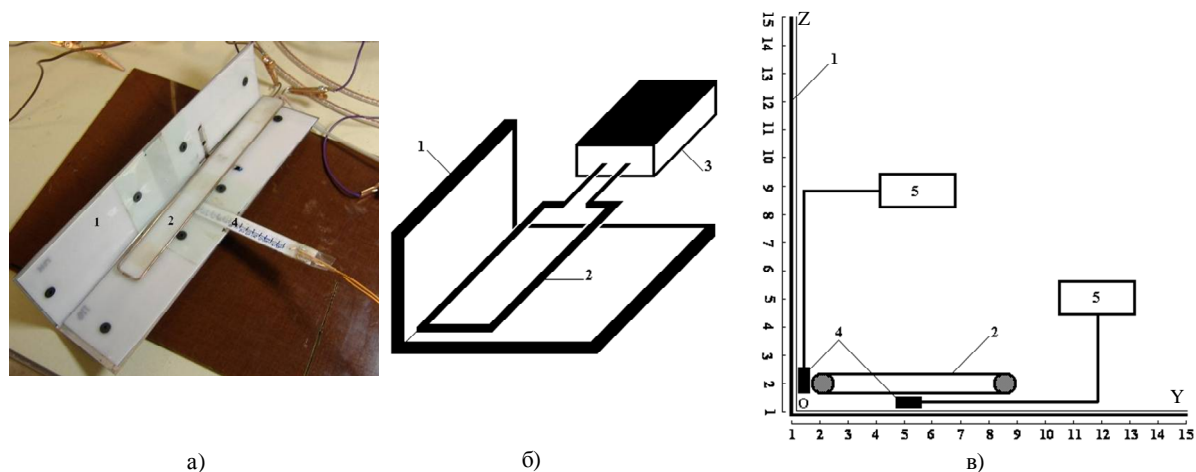


Рис.1. Экспериментальная система: а) модель ИС; б) изображение исследуемой ИС в аксонометрии; в) изображение поперечного сечения ИС в зоне измерений: 1 – изогнутая листовая заготовка, 2 – индуктор, 3 – генератор синусоидального тока, 4 – измерительные катушечные зонды, 5 – осциллограф (точки измерений по осям OY и OZ расположены на расстоянии $\sim 0,003$ м друг от друга)

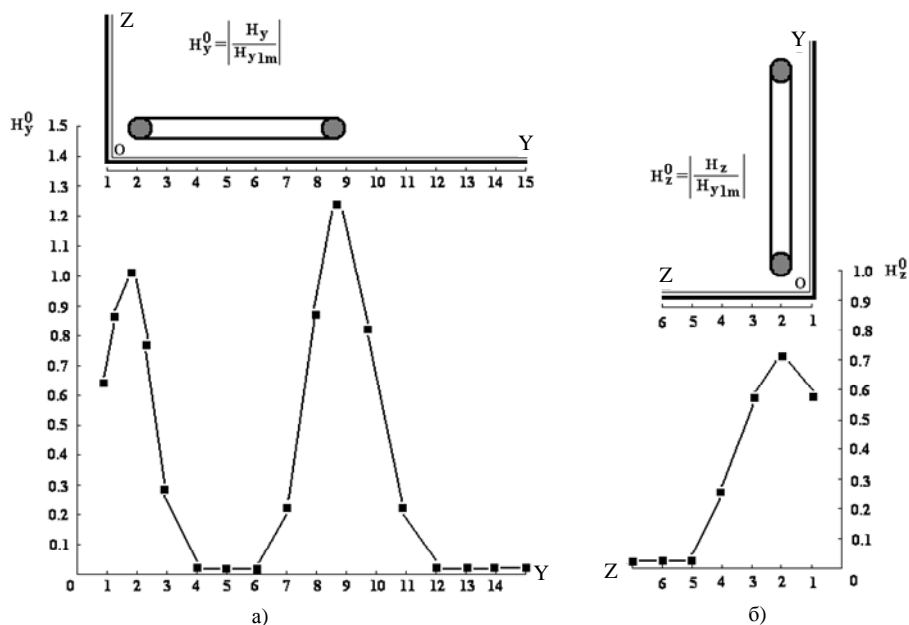


Рис. 2. Пространственное распределения модуля относительной величины касательной компоненты напряжённости магнитного поля на угловых поверхностях изогнутого листа, (нормировка производилась на максимальное значение напряжённости вблизи угла): а) горизонтальная поверхность; б) вертикальная поверхность (точки измерений по осям OY и OZ расположены на расстоянии $\sim 0,003$ м друг от друга)

Их равнодействующая с точкой приложения, соответствующей максимумам напряжённости (пересечение прямых по позициям №2 на рис.2а,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 ИС является возбуждение сил давления на листовую заготовку вне зоны, где требуется формовка чёткого угла. Устранить данный недостаток при сохранении одного соленоида, то есть, снизить амплитуды сил давления вне заданной

области, можно, если плоскость витка индуктора расположить под некоторым углом к горизонтальной поверхности изгиба, рис.3.

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 1,5 раз (рис. 3б).

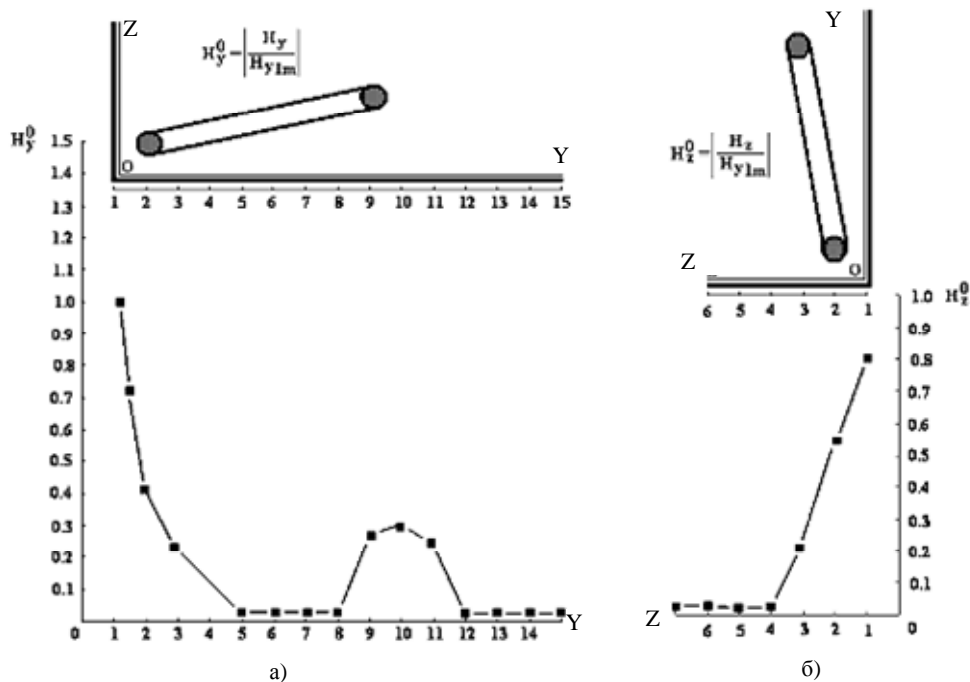


Рис. 3. Модуль относительной величины касательной компоненты напряжённости магнитного поля при угле наклона плоскости витка к горизонтальной поверхности $\approx 15^\circ$, (нормировка производилась на максимальное значение напряжённости вблизи угла): а) горизонтальная поверхность; б) вертикальная поверхность (точки измерений по осям OY и OZ расположены на расстоянии $\sim 0,003$ м друг от друга)

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

токов в металле листа.

Картины пространственного распределения касательных составляющих напряжённости магнитного поля на поверхностях углового изгиба, а следовательно, и распределения плотности индуцированного тока, при увеличении угла наклона плоскости витка индуктора до $\approx 45^\circ$ представлены на рис. 4.

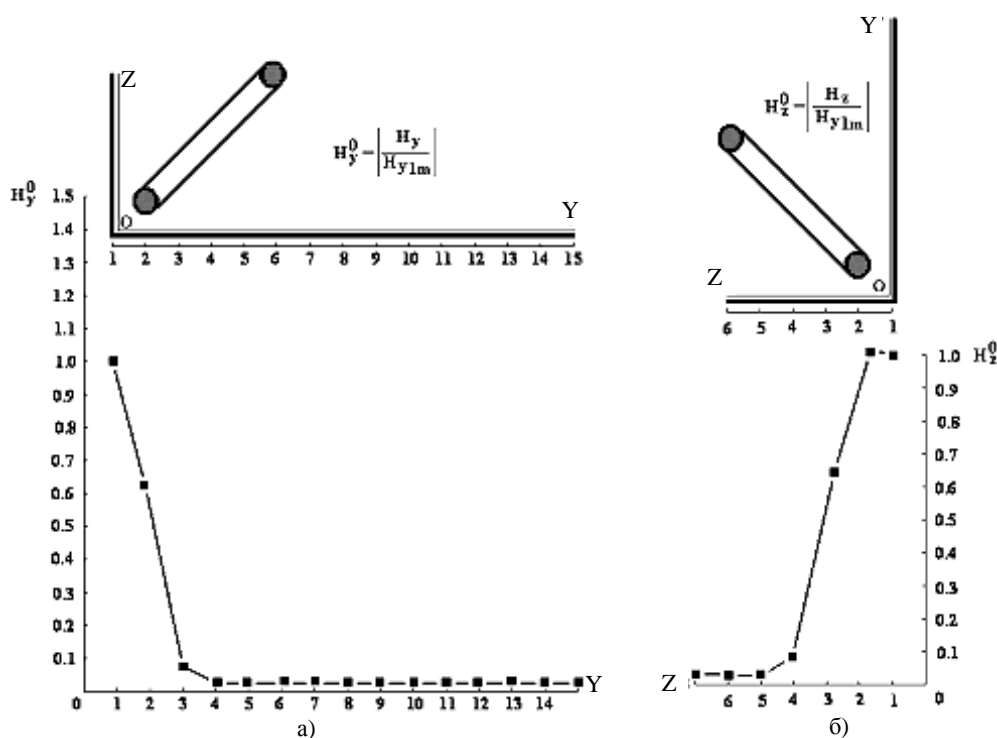


Рис. 4. Модуль относительной величины касательной компоненты напряжённости магнитного поля при угле наклона плоскости витка к горизонтальной поверхности $\approx 45^\circ$, (нормировка производилась на максимальное значение напряжённости вблизи угла): а) горизонтальная поверхность; б) вертикальная поверхность (точки измерений по осям OY и OZ расположены на расстоянии $\sim 0,003$ м друг от друга)

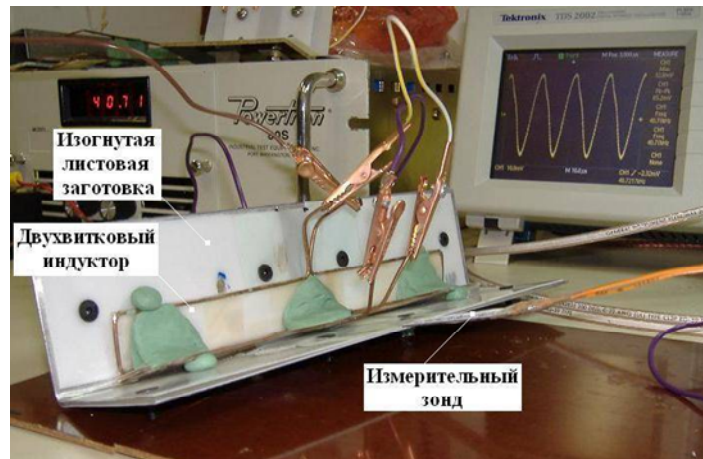
Как следует из измерений, практически действенными остаются лишь силы магнитного давления только в области собственно угла, хотя их абсолютные величины по сравнению с горизонтальным расположением витка снижаются более чем в 2 раза. Но положения максимумов поля и сил сдвигаются к центру угла, а их величины выравниваются. В данном конструктивном исполнении ИС можно ожидать, что равнодействующая пондеромоторных 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 ИС с наклонным соленоидом является достаточно слабая электродинамическая связь тока витка и тока, индуцированного в металле листа. Как следствие, ощутимое снижение амплитуд вихревых токов и возбуждаемых пондеромоторных сил. Кроме того, юстировка соленоида, обеспечивающего магнитное давление строго по центру угла изгиба, сложная практическая задача.

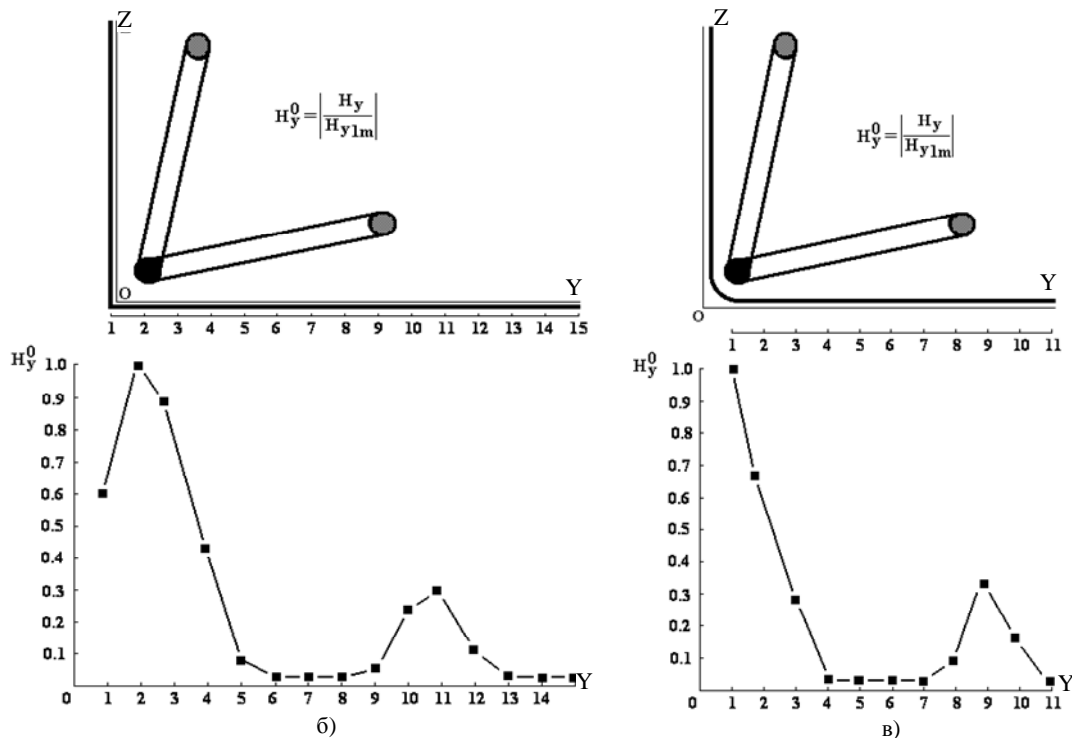
Необходимость юстировки обусловлена необходимостью симметрии как геометрической, так и электродинамической, относительно биссектрисы формируемого угла изгиба. Нарушение этой симметрии приведёт к перекосу амплитуд вихревых токов, возбуждаемых в металле угловых плоскостей, как следствие, к изменению направления 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 ИС со спаренными наклонными соленоидами (рис.5а).

Конструктивно, такая система выполняется в виде двух протяжённых прямоугольных витков, расположенных 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.



а)



б)

в)

Рис. 5. Индукторная система: а) внешний вид; б) модуль относительной величины касательной компоненты напряжённости магнитного поля на угловых поверхностях изгиба металлического листа; в) на угловых поверхностях изгиба, выполненного с закруглением по радиусу $\approx 0,01$ м (точки измерений по осям OY и OZ расположены на расстоянии $\sim 0,003$ м друг от друга)

В зависимости от способа их включения между собой и подключения к источнику мощности, витки могут образовывать параллельные или последовательные контура.

В первом случае по центральному токопроводу, объединяющему две длинные ветви каждого из них, будет протекать ток источника, но по параллельным протяжённым ветвям только его половина. Соответственно, силы магнитного давления вне формуемой угловой зоны снижаются почти в 4 раза.

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 ИС 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 ав-

торами научных изданий [2, 3] для штамповки изделий из тонкостенной медной фольги. Инструменты такого рода были ими названы как "индукторные системы с спаренными токопроводами".

Результаты измерений напряжённости магнитного поля в пространстве между токопроводами индуктора и поверхностями листовой заготовки приведены на рис. 5б. Витки включались последовательно. Угол их наклона к соответствующим плоскостям составлял $\approx 15^\circ$. Кроме того, ориентируясь на данные измерений, расположение индукторов относительно заготовки корректировалось до получения одинаковых значений напряжённости как на горизонтальной, так и вертикальной плоскостях (речь идёт об электромагнитной симметрии).

Преыдушие эксперименты проводились для листовых заготовок с плоскими прямыми углами. Реально же, этот прямой угол следует ещё отформовать из изгибов, полученных с каким-то закруглением иными производственными методами. То есть, реальная заготовка для последующей магнитно-импульсной обработки представляет собой лист металла, в изгибе которого (центральная угловая зона) имеет место какая-то часть цилиндрической поверхности.

В этой связи представляет практический интерес вопрос о влиянии закруглений на распределения характеристик протекающих электромагнитных процессов. Последующие эксперименты проводились с заготовкой, перпендикулярные плоскости которой в области изгиба сочленялись с закруглением по радиусу $\approx 0,01$ м.

Из измерений следует, что в исследованной ИС, как в случае довольно малых (рис.5,б), так и в случае достаточно больших радиусов закруглений (рис.5,в):

- 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 воз-

действия вне рабочей зоны;

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

Выводы

1. Предложены конструкции ИС для формовки углов заданного уровня чёткости в предварительно изогнутых листовых заготовках.
2. Получены графические зависимости пространственного распределения модуля относительной величины касательной компоненты напряжённости магнитного поля на угловых поверхностях изгиба металлического листа, позволяющих оценивать силовые показатели исследованных ИС.
3. Проведенные измерения показали, что более эффективной с точки зрения возможных амплитуд силового воздействия является ИС со спаренными наклонными соленоидами.

Литература

1. Direction Change of the Force Action upon Conductor under Frequency Variation of the Acting magnetic Field : proceedings of the 1–st International Conference [«High Speed Metal Forming»], (Dortmund, March 31/April 1, 2004) / Yu. V. Batygin, V. I. Lavinsky, L. T. Khimenko. – Dortmund, Germany. 2004. – P. 157–160.
2. Батыгин Ю. В. Магнитно-импульсная обработка тонкостенных металлов, Т.2. / Ю. В. Батыгин, В. И. Лавинский. – Харьков: МОСТ-Торнадо, 2002. – 288 с.
3. Батыгин Ю. В. Импульсные магнитные поля для прогрессивных технологий / Батыгин Ю. В., Лавинский В. И., Хименко Л. Т. – Т. 1.; под ред. проф. Ю.В. Батыгина. – [2–е изд.] – Х.: МОСТ-Торнадо, 2003. – 288 с.
4. Белый И. В. Справочник по магнитно-импульсной обработке металлов / И. В. Белый, С. М. Фертик, Л. Т. Хименко. – Х.: Вища школа, 1977. – 189 с.
5. Туренко А. Н. Импульсные магнитные поля для прогрессивных технологий. Том 3. Теория и эксперимент притяжения тонкостенных металлов импульсными магнитными полями: монография / А. Н. Туренко, Ю. В. Батыгин, А. В. Гнатов. – Х.: ХНАДУ, 2009. – 240 с.