

# Притяжение тонкостенных металлических листов магнитным полем одновиткового индуктора

БАТЫГИН Ю.В., ГНАТОВ А.В., ЩИГОЛЕВА С.А.

*Проведен анализ известных решений по реставрации деформированных металлических листов. Приведены данные исследования магнитно-импульсного притяжения тонкостенных листов ферромагнетиков полем массивного одновиткового индуктора с внутренним отверстием конической формы. Рассмотрены результаты экспериментальных исследований полученных результатов.*

**Ключевые слова:** магнитно-импульсная установка, индукторная система, тонкостенная листовая заготовка, запасаемая энергия

Современное состояние технического развития общества предполагает переход к более совершенным технологиям промышленного производства. Это находит своё отражение в тех отраслях промышленности, например автомобильной и авиационной, где необходим нетрадиционный подход к деформированию металлических изделий для придания им соответствующей формы или реставрации повреждённых металлических элементов до первоначального состояния. В связи с этим растёт интерес к магнитно-импульсным технологиям [1–4].

Анализ современных научных публикаций показывает, что ведущее место в разработках новых технологических процессов с использованием энергии импульсных полей занимают автомобилестроение и самолётостроение. Этот факт обусловлен появлением новых сплавов, обладающих высокой прочностью и малым удельным весом и применяющихся для изготовления кузовных и корпусных деталей [2, 3]. Обработка этих сплавов, как было показано проф. Г. Дэйном из университета штата Огайо, США, возможна исключительно при мощном импульсном воздействии. Именно тогда проявляется так называемая гиперпластичность материала, в соответствии с которой относительные деформации обрабатываемых металлических заготовок могут достигать примерно 200% [3].

В автомобилестроении магнитно-импульсные методы, обеспечивающие холодную сварку как однородных, так и разнородных металлов, приходят на смену известным традиционным технологиям.

Интересная операция, которая может эффективно осуществляться с помощью энергии импульсных магнитных полей, связана с реставрацией кузовных покрытий легковых автомобилей и

*The available technical solutions for restoring deformed metal sheets are analyzed. Data from a study of magnetic-impulse attraction of thin-walled ferromagnetic sheets by the field created by a bulky single-turn inductor having a conically shaped internal hole are presented. Results obtained from the performed experimental investigations are considered.*

**Key words:** inductor system, magnetic-impulse installation, thin-walled billet, stored energy

корпусов самолётов. Причём, как показывает опыт, наибольший интерес вызывает возможность внешней рихтовки вмятин без разборки всей конструкции и нарушения целостности лакокрасочного покрытия. Для современных автомобилей этот интерес обусловлен, в первую очередь, тем, что их кузова изготовлены из достаточно тонких металлических листов. Их прочность обеспечивается большим количеством внутренних рёбер жёсткости, затрудняющих доступ к повреждённым участкам изнутри машины.

Отметим предложенные фирмой Beulentechnik AG (Швейцария) [4] механические способы внешней рихтовки вмятин в автомобильных кузовах. Однако для их практической реализации требуется очень высокая квалификация исполнителя, причем в недостаточной мере обеспечивается сохранность ремонтируемой детали в процессе ее реставрации.

Устранение вмятин, нарушающих аэродинамические характеристики летательных аппаратов, также представляет собой актуальную задачу. Наиболее реальными для практики являются разработки магнитно-импульсных комплексов для внешней рихтовки корпусов самолётов, проводимые на протяжении последних 35–40 лет фирмами Boeing и Electroimpact (США) [4].

Физическую основу предложений составляет использование «медленного» и «быстрого» магнитных полей. Первое поле свободно проникает сквозь обрабатываемый металл. Второе вследствие достаточно высокой частоты концентрируется в рабочей зоне индуктора – инструмента. Суперпозиция этих противоположно направленных полей позволяет реализовать притяжение реставрируемого участка с вмятиной, но только в течение определённого временного интервала. Для практиче-

ской реализации этого предложения необходимы два источника электромагнитной энергии, достаточно сложные высоковольтные системы управления и синхронизация генерируемых токовых импульсов. А это, в свою очередь, приводит к снижению надёжности оборудования и значительно увеличивает его стоимость.

Исключительно новые возможности для создания устройств по внешнему устранению вмятин в кузовах легковых автомобилей открывает явление, экспериментально обнаруженное в 2004 г. проф. Ю.В. Батыгиным, В.И. Лавинским и Л.Т. Хименко [3, 5] из Национального технического университета «Харьковский политехнический институт». Как показали эксперименты, направление электродинамических усилий при воздействии импульсным магнитным полем на достаточно тонкие металлические листы зависит от рабочей частоты токового импульса в обмотке инструмента — индуктора.

Экспериментальные образцы представляли собой стальные пластины толщиной 0,5–1,0 мм. Как генераторы магнитного поля использовались одновитковые индукторы, подключенные к источнику МИУ-10 с запасаемой энергией около 10 кДж. При частоте порядка 2,2 кГц силовое воздействие магнитного поля приводило к притяжению участка ровного стального образца и образованию вмятины, соответствующей поперечным размерам рабочей зоны индуктора (рис. 1, позиция № 1). При повышении рабочей частоты примерно до 7,5 кГц этот же участок стальной пластины испытывал отталкивание и на нем образовывалась выпуклость, т.е. проявлялось магнитное давление на проводник (рис. 1, позиция № 2).

Таким образом, анализ показал, что проблема магнитно-импульсной рихтовки является актуальной, но пути её решения только начинают определяться. А это открывает широкие возможности для разработки модернизации и усовершенствования таких технологий. Последнее особенно касается индукторных систем — инструментов магнитно-импульсного воздействия. Некоторые конструкции индукторных систем на базе одновиткового соле-

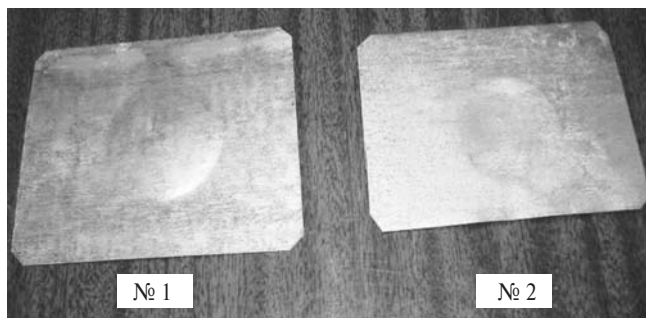


Рис. 1. Экспериментальные образцы, иллюстрирующие результат магнитно-импульсного воздействия при различных частотах действующего поля

ноида уже были рассмотрены в [2, 4], но еще остался целый спектр проблем, которые необходимо исследовать. Это относится как к анализу электродинамических процессов в индукторной системе, так и к вопросам, связанным с их усовершенствованием.

В настоящей статье приведены результаты теоретических и экспериментальных исследований магнитно-импульсного притяжения тонкостенных листов из ферромагнетиков полем массивного одновиткового индуктора, внутреннее отверстие которого выполнено в виде усечённого конуса. Обрабатываемый объект располагается на плоскости большего основания конуса.

Как известно, индуктор с конструктивным исполнением в виде плоского цилиндрического витка создает концентрацию возбуждаемых усилий в зоне под витком [1, 6, 7, 8]. Причиной этого является рост модуля вектора напряжённости магнитного поля в радиальном направлении от центра системы к периферии (максимум отмечается в области под витком).

Из априорных феноменологических соображений следует, что изменить характер распределения поля в индукторной системе и, соответственно, характер распределения действующих сил можно, если профилю окна придать форму усечённого конуса. Большее основание конуса должно выходить на рабочую поверхность индуктора, где располагается листовая заготовка. В этом случае максимум действующих сил притяжения должен сместиться к геометрическому центру витка.

**Расчетные соотношения.** Полагая виток достаточно массивным, рассмотрим электромагнитные процессы в его внутренней полости. Расчётная модель системы с индуктором, внутреннее отверстие которого имеет профиль усечённого конуса, представлена на рис. 2.

В цилиндрической системе координат, связанной с исследуемой индукторной системой, примем следующие допущения.

1. Металл витка индуктора обладает идеальной проводимостью.

2. Феноменологически положим, что в магнитном поле внутренней полости витка можно выделить поверхности равной напряжённости, форма которых близка к сферической (рис. 2). В каждой точке этой поверхности вектор её внешней нормали совпадает с вектором поля. Отметим, что аналогичное допущение и соответствующий приём применялся разными авторами для исследования электромагнитных процессов в одновитковых индукторных системах с различной формой поперечного сечения [4, 6].

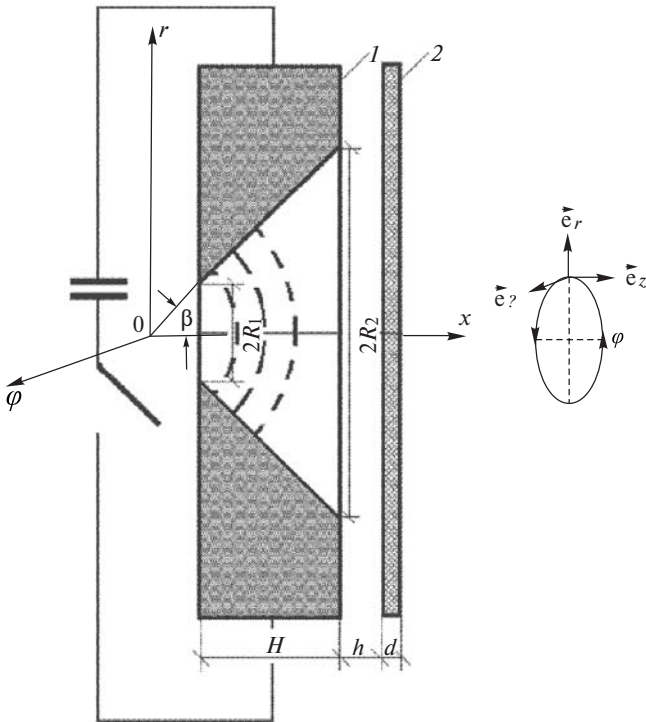


Рис. 2. Схема индукторной системы с одновитковым соленоидом 1 с внутренним отверстием конической формы и плоской листовой заготовкой 2 ( $\vec{e}_r, \vec{e}_\phi, \vec{e}_z$  - направляющие орты цилиндрической системы координат)

3. Система обладает аксиальной симметрией, так что  $\partial/\partial j = 0$  ( $j$  - полярный угол).

4. Внешние поперечные размеры индукторной системы настолько велики, что в рамках поставленной задачи их можно считать бесконечными.

5. В индукторе течёт ток  $I(t)$ , временные параметры которого таковы, что в расчётах вполне приемлемо известное условие квазистационарности происходящих электромагнитных процессов, поэтому  $\frac{\omega}{c}l \ll 1$  (здесь  $\omega$  - радиальная частота процесса,  $c$  - скорость света в вакууме;  $l$  - наибольший характерный геометрический размер системы, в данном случае - это поперечный размер,  $l > > 2R_2$ ).

6. Система работает в низкочастотном режиме, т.е.  $(\omega \eta \mathbf{g}) \ll 0$ , здесь  $\eta, \mathbf{g}$  - абсолютная магнитная проницаемость и удельная электропроводность металла листовой заготовки.

Второе допущение в постановке решаемой задачи позволяет определить модуль вектора напряжённости как отношение магнитного потока к площади соответствующей поверхности и получить в конечном итоге выражение в функциональной зависимости от пространственных координат и времени:

$$H(r, z, t) = \frac{\Phi(t)}{2\pi\eta_0(1 - \cos(b))} \frac{1}{(r^2 + (z + R_1 \operatorname{ctg}(b))^2)^{3/2}}, \quad (1)$$

где  $\Phi(t)$  - магнитный поток; радиальная координата  $r \in [R, R_2]$ ; пространственная переменная по высоте витка  $z \in [0, H]$  соответствует координате системы на рис. 1, смещённой на постоянную величину  $R_1 \operatorname{ctg}(b)$ , вследствие чего начало отсчёта по высоте витка совпадает с меньшим основанием усечённого конуса.

Компоненты вектора напряжённости магнитного поля находятся из формулы (1):

$$H_r(r, z, t) = \frac{\Phi(t)}{2\pi\eta_0(1 - \cos(b))} \frac{r}{(r^2 + (z + R_1 \operatorname{ctg}(b))^2)^{3/2}}. \quad (2)$$

$$H_z(r, z, t) = \frac{\Phi(t)}{2\pi\eta_0(1 - \cos(b))} \frac{(z + R_1 \operatorname{ctg}(b))}{(r^2 + (z + R_1 \operatorname{ctg}(b))^2)^{3/2}}. \quad (3)$$

Легко проверить, что принятое феноменологическое допущение о картине магнитного поля во внутренней полости конической формы является физической реальностью. Выражения (2) и (3) удовлетворяют уравнениям Максвелла [1]:

$$\operatorname{rot} \vec{H}(r, z, t) = \frac{\partial H_z}{\partial r} - \frac{\partial H_r}{\partial z} = 0; \quad (4)$$

$$\operatorname{div} \vec{H}(r, z, t) = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(rH_r) + \frac{\partial H_z}{\partial z} = 0.$$

Допущение об идеальной проводимости витка индуктора означает равенство нулю составляющей напряжённости магнитного поля, нормальной к его поверхности:

$$H_n(r = (z + R_1 \operatorname{ctg}(b)) \operatorname{tg}(b), z, t) = 0. \quad (5)$$

Граничное условие (5) автоматически удовлетворяется допущением, по которому вектор напряжённости поля совпадает с вектором внешней нормали к сферическим поверхностям равной напряжённости. Действительно, поскольку образующая конуса также совпадает с вектором нормали, то на боковой поверхности конуса вектор поля имеет только тангенциальную и не может иметь нормальную компоненту напряжённости.

Таким образом, феноменологически принятое распределение поля во внутренней полости витка индуктора вполне адекватно реальности.

Проведём численные оценки сил притяжения, обусловленных магнитными свойствами металла листовой заготовки в рассматриваемой индукторной системе.

Допущение о достаточно низких рабочих частотах  $(\omega \eta \mathbf{g}) \ll 0$  означает стремление к абсолютной «прозрачности» металла для действующих полей и позволяет считать, что функционально по толщине заготовки компоненты вектора напряжённости из-

меняются согласно формулам (2), (3). Поскольку обрабатываемый объект ферромагнетик, то учесть этот факт можно введением в эти формулы абсолютной магнитной проницаемости металла заготовки  $\mu = \mu_0 \mu_r$  ( $\mu_r$  - относительная магнитная проницаемость) вместо магнитной проницаемости вакуума  $\mu_0$ . Подставляя в (2) и (3) значения  $z = (H + h)$  и  $z = (H + h + d)$ , после тождественных преобразований получаем выражения для тангенциальной и нормальной компонент напряжённости магнитного поля на граничных поверхностях листовой заготовки:

а) со стороны витка индуктора

$$H_{r1}(r, z = (H + h), t) = \frac{\Phi(t)}{2\mu_0 \mu_r (1 - \cos(b))} \cdot \frac{r}{(r^2 + (R_2 \operatorname{ctg}(b) + h)^2)^{3/2}};$$

$$H_{z1}(r, z = (H + h), t) = \frac{\Phi(t)}{2\mu_0 \mu_r (1 - \cos(b))} \cdot \frac{(R_2 \operatorname{ctg}(b) + h)}{(r^2 + (R_2 \operatorname{ctg}(b) + h)^2)^{3/2}};$$

б) на внешней поверхности

$$H_{r2}(r, z = (H + h + d), t) = \frac{\Phi(t)}{2\mu_0 \mu_r (1 - \cos(b))} \cdot \frac{r}{(r^2 + (R_2 \operatorname{ctg}(b) + (h + d))^2)^{3/2}};$$

$$H_{z2}(r, z = (H + h + d), t) = \frac{\Phi(t)}{2\mu_0 \mu_r (1 - \cos(b))} \cdot \frac{(R_2 \operatorname{ctg}(b) - h + d)}{(r^2 + (R_2 \operatorname{ctg}(b) - h + d)^2)^{3/2}};$$

Для удобства дальнейших вычислений преобразуем выражения (6) и (7). Введём относительную радиальную координату  $r$  и условную амплитуду напряжённости магнитного поля  $H_m$  [5]. Представляя магнитный поток как произведение индуктивности на ток, получаем следующие формулы для компонент вектора магнитного поля на поверхностях листовой заготовки:

$$H_{r1}(r, z = (H + h), t) = H_m \frac{j(t)}{2(1 - \cos(b))} \cdot \frac{r}{(r^2 + (\operatorname{ctg}(b) + h/R_2)^2)^{3/2}};$$

$$H_{z1}(r, z = (H + h), t) = H_m \frac{j(t)}{2(1 - \cos(b))} \cdot \frac{\operatorname{ctg}(b) - h/R_2}{(r^2 + (\operatorname{ctg}(b) + h/R_2)^2)^{3/2}};$$

$$H_{r2}(r, z = (H + h + d), t) = H_m \frac{j(t)}{2(1 - \cos(b))} \cdot \frac{r}{(r^2 + (\operatorname{ctg}(b) + (h + d)/R_2)^2)^{3/2}};$$

$$H_{z2}(r, z = (H + h + d), t) = H_m \frac{j(t)}{2(1 - \cos(b))} \cdot \frac{\operatorname{ctg}(b) - h/R_2}{(r^2 + (\operatorname{ctg}(b) + (h + d)/R_2)^2)^{3/2}};$$

где  $H_m = \frac{I_m \mu_0 \cos(b)}{R_2 \cos^2 \frac{\alpha}{2} - 1 + \frac{\alpha R_2}{R_1} - \frac{\alpha}{\delta} \cos(b)}$  - условная

амплитуда напряжённости магнитного поля;  $L_i$  - индуктивность системы;  $I_m$  - амплитуда тока;  $j(t)$  - временная зависимость токового импульса;  $r = r/R_2$  - относительная радиальная координата.

В рассматриваемой индукторной системе возбуждаются силы Лоренца (известны в магнитно-импульсной обработке металлов как силы магнитного давления [1, 4]), направленные от индуктора (отталкивание), и силы, обусловленные магнитными свойствами металла заготовки, направленные к индуктору (притяжение). В [4, 7, 8] было показано, что при достаточно низких рабочих частотах интегральное во времени действие сил отталкивания стремится к нулю. В [4] также было получено выражение для силы притяжения ферромагнетика импульсным полем индуктора. С помощью формул (6), (7) и соответствующего выражения из [4] (не приводится ввиду громоздкости) находим, что в рассмотренной индукторной системе на лист из ферромагнетика, «прозрачный» для действующих полей, будет действовать сила:

$$P_F(r, t) = -\frac{1}{\mu_r} \frac{\mu_0 H_m^2}{8} \frac{j^2(t)}{(1 - \cos(b))^2} \cdot \left[ \frac{\operatorname{ctg}(b) + \frac{h}{R_2}}{r^2 + (\operatorname{ctg}(b) + \frac{h}{R_2})^2} - \frac{\operatorname{ctg}(b) + \frac{h + d}{R_2}}{r^2 + (\operatorname{ctg}(b) + \frac{h + d}{R_2})^2} + \frac{r}{\mu_r} \frac{1}{r^2 + (\operatorname{ctg}(b) + \frac{h}{R_2})^2} - \frac{1}{r^2 + (\operatorname{ctg}(b) + \frac{h + d}{R_2})^2} \right];$$



Выражение (10) показывает, что:

величина  $P_F(r, t)$  в явном виде не зависит от электропроводности металла пластины и частотных характеристик протекающих процессов;

временная функция возбуждаемых сил представляет собой квадрат временной функции тока индуктора, что означает неизменность их направления в течение всего времени воздействия;

положительность импульса силы  $(S_F = \int_0^t P_F(r, t) dt > 0)$  свидетельствует о кумулятивном характере процесса;

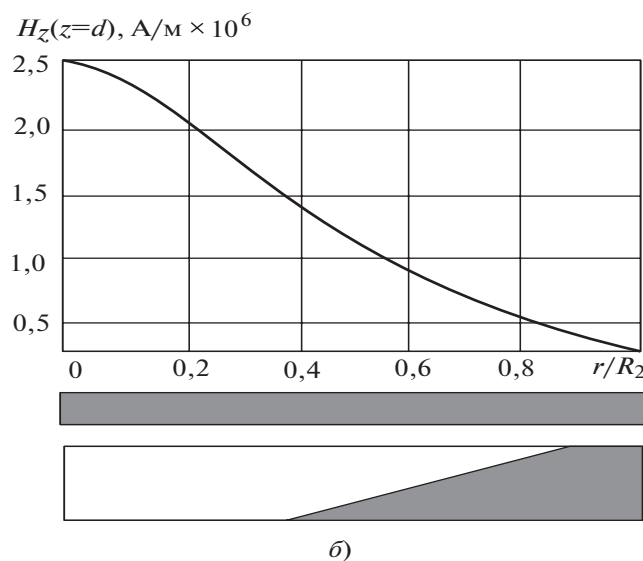
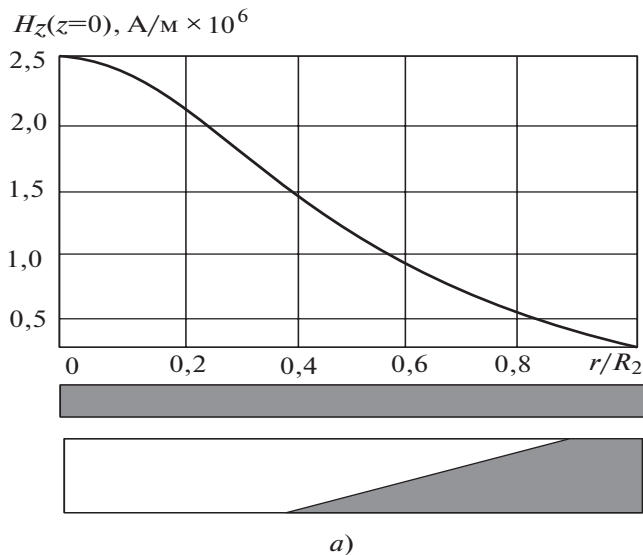
в низкочастотном режиме объект обработки испытывает исключительно притяжение со стороны магнитного поля индуктора. (Напомним, что исходной предпосылкой для выбора предложенной

конструкции индукторной системы являлось стремление изменить характер радиального распределения поля и действующих сил.)

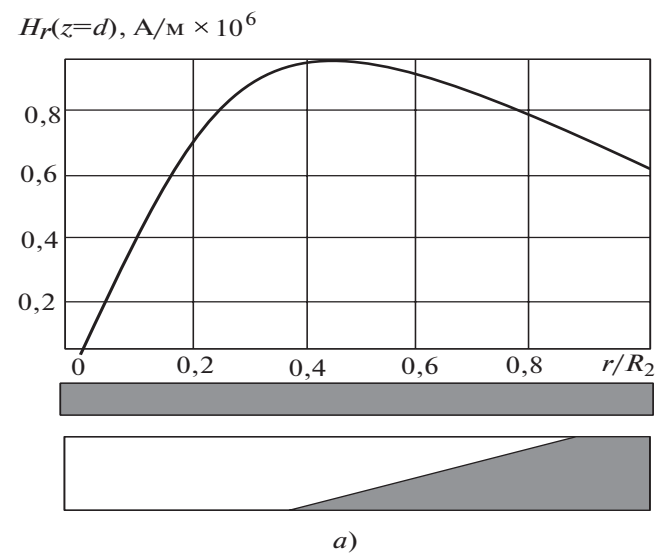
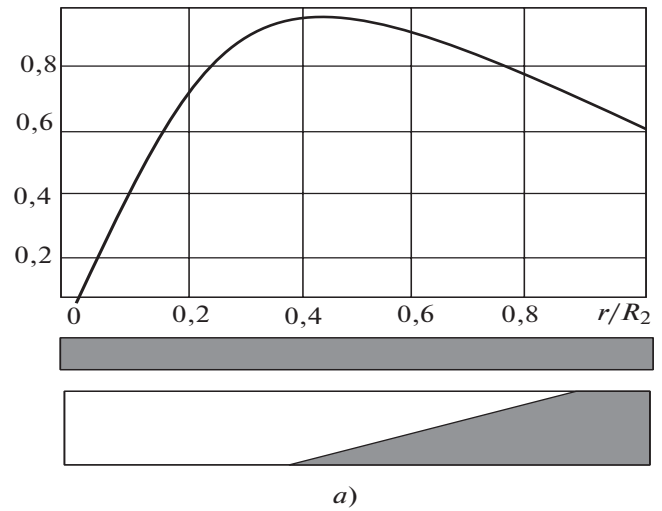
**Численные оценки.** Вычисления проведём для одной из индукторных систем, исследованных в экспериментах:  $R_1 = 0,0075i$ ,  $R_2 = 0,02i$ ,  $h = 0,0005i$ ,  $d = 0,0005i$ , угол наклона образующих внутреннего конуса витка  $b \gg 60^\circ$ , амплитуда тока в индукторе примерно 50 А.

На рис. 3 и 4 приведены результаты расчётов (с точностью до множителя около  $1/m_1$ ) радиального распределения нормальной и тангенциальной составляющих напряжённости поля.

Как следует из результатов вычислений, принятая коническая форма внутреннего окна индуктора позволяет существенно изменить характер радиального распределения нормальной компоненты на-



**Рис. 3.** Радиальные распределения нормальной компоненты напряжённости на поверхностях пластины: а – со стороны индуктора; б – с внешней стороны (ток индуктора около 50 кА, угол наклона образующей конуса около  $60^\circ$ )



**Рис. 4.** Радиальные распределения тангенциальной компоненты напряжённости на поверхностях пластины: а – со стороны индуктора; б – с внешней стороны, ток индуктора около 50 кА, угол наклона образующей конуса около  $60^\circ$

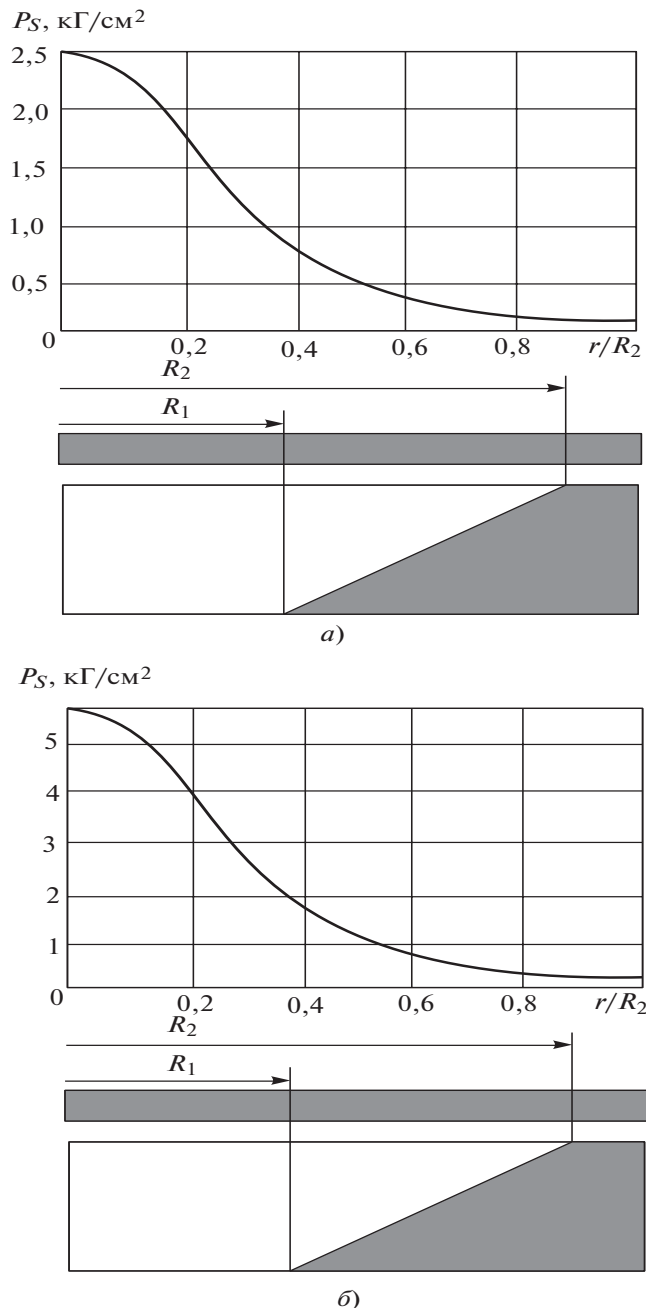


Рис. 5. Радиальное распределение суммарной силы притяжения, обусловленной нормальной и тангенциальной компонентами вектора напряжённости магнитного поля, ток индуктора около 50 кА, угол наклона образующей конуса около  $60^\circ$ ; а –  $m_t = 2$ ; б –  $m_t = 10$

пряжённости магнитного поля и сконцентрировать  $H_z$  в центре системы. Распределение тангенциальной составляющей напряжённости также претерпевает изменение, хотя и не столь значительное.

Заканчивая вычисления компонент напряжённости магнитного поля в конической индукторной системе, следует отметить, что результаты соответствующих экспериментов достаточно хорошо согласуются с настоящими расчётами, что свидетельствует о достоверности принятого теоретического подхода.

Результаты расчётов возбуждаемых сил притяжения для  $m_t \gg 10$  представлены на рис. 5.

Резюмируя результаты проведенных вычислений, сформулируем основные выводы, следующие из сравнения графических зависимостей для полей и возбуждаемых усилий в различных индукторных системах.

1. Индукторная система с массивным витком, внутреннее отверстие которого имеет конический профиль, в низкочастотном режиме позволяет получение достаточно интенсивных нормальных напряжённости магнитного поля (примерно до  $\frac{2,5}{m_t} \times 10^6$  А/м при токе индуктора около 50 кА), хотя их амплитуды примерно на 30% меньше амплитуд напряжённости в системе с плоским цилиндрическим витком.

2. Амплитуды тангенциальных компонент напряжённости в отличие от индукторной системы с плоским витком более чем в 2,5 раза меньше нормальных.

3. Переход к конической форме внутреннего окна индуктора существенно изменяет характер радиального распределения поля и действующих сил: магнитный поток концентрируется в центральной области внутреннего окна в отличие от плоского цилиндрического индуктора, где максимум напряжённости наблюдается на границе внутреннего отверстия витка;

концентрация поля в центре системы приводит к сосредоточению действующих сил в центральной области обрабатываемого листа.

Радиальное распределение с концентрацией поля в центральной части и его убыванием к периферии внутреннего окна индуктора должно привести к росту магнитной проницаемости металла заготовки по радиусу. Отсюда некоторое выравнивание поля и возбуждаемых сил магнитного притяжения, амплитуды которых даже при столь малых значениях относительной магнитной проницаемости ( $m_t \gg 2, 10$ ) могут достигать значений, достаточных для реального деформирования стальных образцов.

Для полноты и ясности рассматриваемого вопроса, а также для подтверждения достоверности полученных аналитических результатов необходимо их подкрепить экспериментальными исследованиями.

**Эксперимент, результаты, обсуждение.** Для проведения практических исследований в соответствии с выполненными расчетами был изготовлен одновитковый соленоид с окном в рабочей зоне в форме конического профиля (рис. 6, поз. 3).

Магнитно-импульсная установка МИУС-2, разработанная и созданная в лаборатории электро-

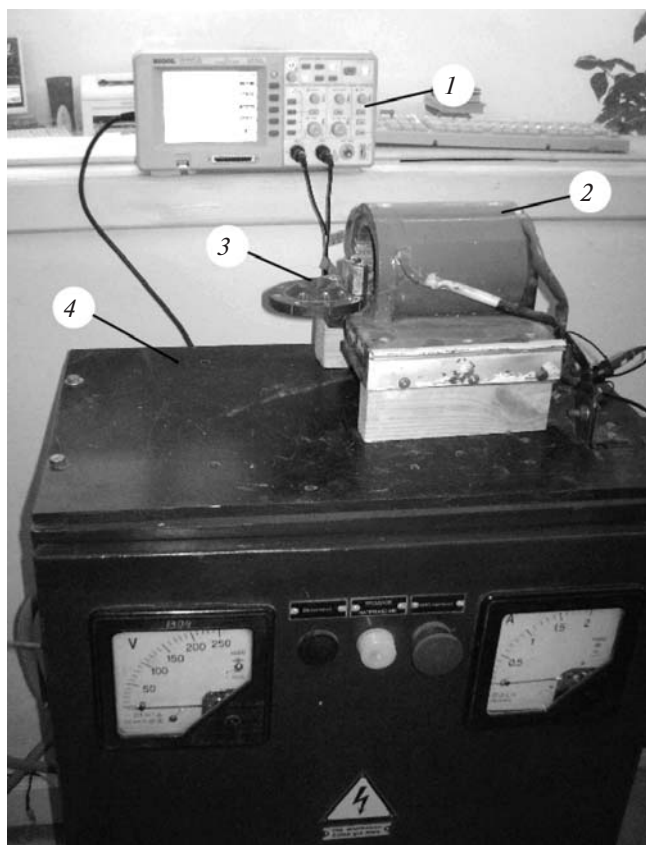


Рис. 6. Установка МИУС-2: 1 – осциллограф; 2 – согласующее устройство – импульсный трансформатор; 3 – цилиндрический индуктор с внутренним отверстием конического профиля; 4 – магнитно-импульсная установка МИУС-2

магнитных технологий на кафедре автомобильной электроники Харьковского национального автомобильно-дорожного университета, использовалась в качестве источника мощности (рис. 6, поз. 4).



а)



б)

Рис. 7. Образец обшивки кузова автомобиля «Субару» с вмятинами (а) и после рихтовки (б)

Магнитно-импульсный комплекс, включающий МИУС-2, согласующее устройство 2 и индуктор 3, обладает следующими техническими характеристиками: питающее напряжение от сети 220 В; зарядное напряжение до 2 кВ, запасаемая энергия до 2 кДж; собственная частота разрядного тока в импульсе около 10 кГц, в комплекте с согласующими устройствами эта частота понижается до 1, 2 кГц; частота повторения разрядных импульсов 3, 4 Гц.

Для проведения эксперимента были взяты образцы обшивки кузова автомобиля фирмы «Субару» (толщиной около 1 мм).

В ходе эксперимента сначала на образцах были сделаны (вмятины) (рис. 7,а).

Потом эти образцы перевернули так, чтобы центр образовавшейся лунки совпал с центром отверстия индуктора, и произвели рихтовку существующей лунки до выравнивания поверхности (рис. 7,б). Видно, что форма образованной и удаленной вмятины (лунки) соответствует форме и размеру конуса внутреннего отверстия индуктора.

При проведении эксперимента установка МИУС-2 работала в режиме зарядного напряжения, равного 1,8 Кв, и запасаемой энергии 1,5 кДж.

Основные результаты проведенных экспериментов ПРИ ИХ сравнении с более ранними выводами работ НТУ «ХПИ» [3, 5] можно представить в виде следующих положений.

Силовое воздействие индукторной системы на заготовку имеет кумулятивный характер при многократном повторении (ранее описанный в научной периодике результат был получен при однократном силовом воздействии).

Конструктивные особенности цилиндрического согласующего устройства позволили существенно повысить эффективность притяжения (ранее подобный результат, но с меньшей эффективностью, был достигнут с помощью дискового согласующего устройства).

Операция рихтовки была реализована при гораздо меньших (в 6, 7 раз) энергетических затратах и меньшем (в 2,5 раза) напряжении, чем в аналогичных экспериментах НТУ «ХПИ» в 2004 г.

**Выводы.** 1. В низкочастотном режиме обрабатываемая деталь испытывает только притяжение со стороны магнитного поля индуктора;

2. Переход к конической форме внутреннего окна индуктора существенно изменяет характер радиального распределения поля и действующих сил. Магнитный поток концентрируется в центральной области внутреннего окна.

3. Концентрация поля в центре системы приводит к сосредоточению действующих сил в центральной области обрабатываемого листа.

4. Вариация рабочей частоты внешнего поля или положения металлического листа относительно рабочей поверхности предложенного варианта индукторной системы может приводить как к образованию выпуклости в листе, так и к устранению ее.

5. Существенным достижением является практическая реализация рихтовки участка листового образца из стали при запасённой энергии в 6–7 раз и напряжении в 2,5 раза меньше, чем в аналогичных экспериментах НТУ «ХПИ» 2004 г.

6. Теоретически обоснованную и экспериментально подтвержденную технологию можно рассматривать как одно из возможных решений для создания магнитно-импульсного комплекса по бесконтактной рихтовке поврежденных кузовных элементов автомобилей.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Батыгин Ю.В., Лавинский В.И., Хименко Л.Т. Импульсные магнитные поля для прогрессивных технологий. Т. 1. Изд. второе, переработ. и доп./Под общ. ред. Ю.В. Батыгина. — Харьков: МОСТ-Торнадо, 2003.

2. Батыгин Ю.В., Лавинский В.И., Бажинов А.В. Магнитно-импульсные методы и системы для притяжения тонкостенных листовых металлов. — Тр. Международ. научно-техн. конф. «Магнитно-импульсная обработка металлов. Пути совершенствования и развития», Самара, 18–19 сентября 2007.

3. *Proceedings of the 1-st International Conference on High Speed Forming, Dortmund (Germany), 31 March /1 April 2004.*

4. Туренко А.Н. Батыгин Ю.В., Гнатов А.В. Импульсные магнитные поля для прогрессивных технологий. Т. 3. Теория и эксперимент притяжения тонкостенных металлов импульсными магнитными полями: Монография. — Харьков: ХНАДУ, 2009.

5. Батыгин Ю.В., Лавинский В.И., Хименко Л.Т. Изменение направления силового воздействия на проводник при вариации частоты действующего магнитного поля. — Вестник науки и техники (Харьков), 2004, № 2–3(17–18).

6. Шнеерсон Г.А. Поля и переходные процессы в аппаратуре сверх сильных токов. — Л.: Энергоиздат, 1981.

7. Батыгин Ю.В., Лавинский В.И., Бондаренко А.Ю. Вихревые токи в тонких металлических листах при магнитно-импульсной обработке металлов. — Электричество, 2009, № 9.

8. Батыгин Ю.В., Бондаренко А.Ю. Силы, действующие на тонкостенный проводник, в проникающем поле плоского одновиткового соленоида. — Техническая электродинамика, 2010, № 1.

[09.10.10]

*Авторы: Батыгин Юрий Викторович в 1972 г. окончил инженерно-физический факультет Харьковского политехнического института (ХПИ). Докторскую диссертацию по специальности «Техника сильных электрических и магнитных полей» защитил в Национальном техническом университете «ХПИ» в 1994 г. Заведующий кафедрой физики Харьковского национального автомобильно-дорожного университета (ХНАДУ).*

*Гнатов Андрей Викторович в 1998 г. окончил факультет энергетического и специального обеспечения Харьковского военного университета (ХВУ). Кандидатскую диссертацию по специальности «Вооружение и военная техника» защитил в ХВУ в 2004 г. Доцент кафедры автомобильной электроники ХНАДУ.*

*Щиголева Светлана Александровна в 2007 г. окончила механический факультет ХНАДУ. Ассистент кафедры физики этого университета.*

\* \* \*

### Вниманию предприятий, организаций, НИИ, вузов России и зарубежных фирм!

Журнал «Электричество» предоставляет свои страницы для

- РЕКЛАМЫ ИЗДЕЛИЙ отечественных предприятий и зарубежных фирм в области энергетики, электротехники, электроники, автоматики
- ПУБЛИКАЦИИ ОБЪЯВЛЕНИЙ о научных симпозиумах, конференциях, совещаниях, семинарах
- ДРУГОЙ ИНФОРМАЦИИ, соответствующей тематике журнала

Сообщаем, что журнал поступает к зарубежным подписчикам во многих странах мира. Напоминаем наш адрес: 101000 Москва, Главпочтамт, а/я 648.

Тел./факс (7-495)362-7485