

МАГНИТНО-ИМПУЛЬСНОЕ ПРИТЯЖЕНИЕ ЛИСТОВЫХ МЕТАЛЛОВ – ПЕРСПЕКТИВНОЕ НАПРАВЛЕНИЕ В РАЗВИТИИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ШТАМПОВКИ

Ю.В. Батыгин, докт.техн.наук, А.В. Гнатов, канд.техн.наук
Харьковский национальный автомобильно-дорожный университет
Украина, ул. Петровского, 25, г. Харьков, 61002, Украина
Тел. +38 (057) 700-38-52, E-mail: batygin48@mail.ru, kalifus@yandex.ru

Annotation - The main methods review of the sheet metals magnetic-pulse attracting is conducted. The author's suggestions are outlined on development and creation of the both instruments of the magnetic-pulse attracting and generators of electromagnetic power for their feed. Simplified theoretical explanation of the magnetic-pulse attracting physical essence for the thin-walled steel plates in operating field working frequency lowering is offered. The idea of the electromagnetic punching without die is formulated.

Key words - inductor system, magnetic-impulsive setting, induced currents, sheet thin-walled purveyance.

ВВЕДЕНИЕ

Цель настоящей работы – обоснование актуальности развития магнитно-импульсной обработки металлов в направлении, связанном с притяжением заданных участков листовых металлов, освещение новых авторских предложений, теоретическое осмысление экспериментально обнаруженного эффекта изменения направленности силового воздействия при вариации частот действующих полей и иллюстрация идеи безматричной электромагнитной обработки металлов при одновременном магнитно-импульсном отталкивании и притяжении на примере плоской штамповки круговых гофров в тонкостенной металлической пластине.

Постановка проблемы. Разработки разного рода технических систем для выравнивания заданных участков на поверхности тонкостенных листовых металлов инициированы, в первую очередь, спросом на выполнение операций по реставрации кузовных покрытий автомобилей и корпусов самолётов. Причём, как показывает практика, до 80% повреждений приходится на небольшие и средние повреждения. Половина из них – это вмятины, не требующие замены всего элемента и устраняемые рихтовкой. Более 50% таких повреждений составляют зоны с затрудненным или полностью закрытым обратным доступом – двери, капоты, крыши, пороги, арки, задние части хэчбэков, купе, боковины микроавтобусов, корпусные элементы самолетов. В этой связи особый интерес представляют устройства, позволяющие произвести, так называемую, внешнюю рихтовку без разборки кузова и нарушения существующего защитного (возможно лакокрасочного) покрытия [1].

Анализ основных достижений и публикаций. Концерном «Beulentechnik AG» (Швейцария, Германия, Австралия), объединяющим несколько авторемонтных компаний в разных странах мира, предложен довольно обширный ряд механических устройств для внешней рихтовки вмятин в автомобильных кузовах. Среди них выделяются вытяжные приспособления, в которых собственно вытягивающий элемент – стержень с одной стороны крепится по центру устраняемой вмятины (клеевое соединение), а с другой фиксируется рычажным

механизмом, позволяющим постепенное вытягивание вмятины до уровня реставрируемой поверхности (рис.1).



Рис. 1. Механическое вытяжное устройство

После устранения вмятины клеевое присоединение убирается с помощью растворителя. Однако, практическое применение этих устройств не обеспечивает достаточную надёжность с точки зрения сохранности ремонтируемого элемента. Последнее замечание означает, что в процессе реставрации возможно и его разрушение [2].

Более перспективными и реальными для практики реставрации повреждений в элементах кузовов автомобилей и корпусов самолётов представляются разработки с использованием энергии электромагнитных полей. В этой области на протяжении последних 35-40 лет передовые позиции занимают фирмы США «Boeing», «Electroimpact», «Fluxtronic». Специалистами фирм освоен выпуск, так называемых, магнитно-импульсных комплексов для внешней рихтовки корпусов самолётов (рис.2). Физическая сущность их предложений сводится к использованию «медленного» и «быстрого» магнитных полей. Первое свободно проникает сквозь обрабатываемый металл. Второе, вследствие достаточно высокой частоты, концентрируется в рабочей зоне индуктора-инструмента с внешней стороны над поверхностью листа. Суперпозиция этих полей позволяет достичь притяжения заданного участка с вмятиной в течение определённого временного интервала. Последней модификацией данной идеи является суперпозиция уже не полей, а отдельных токов в цепи индуктора-инструмента.

Результирующий сигнал соответствующей временной формы обеспечивает тот же эффект притяжения заданной области обрабатываемого объекта [3-5].



Рис.2. Магнитно-импульсное устройство для внешней рихтовки корпусов самолётов

Проблема притяжения заданных участков листовых металлов с помощью силового воздействия со стороны электромагнитных полей может быть решена и с использованием других технических предложений, выдвинутых в разное время разными авторами. К таковым, например, можно отнести различные вариации способа, описанного в монографии Г.А. Шнейерсона [6] и заключающегося в создании медленно нарастающего магнитного поля, резко прерываемого при достижении заданного уровня напряжённости. В обрабатываемом участке металла наводятся вихревые токи, экранирующие внутреннее поле и препятствующее его уменьшению. Направление индуцированных токов таково, что возникающие электродинамические усилия притягивают к индуктору заданный участок металла, вызывая его деформирование. Несмотря на кажущуюся «прозрачность» данного предложения, информация о каких-либо его практических реализациях в научной периодике отсутствует.

Общим недостатком всех вышеперечисленных магнитно-импульсных устройств для внешней реставрации повреждённых листовых металлов является сложность технической реализации, которая обусловлена наличием двух источников электромагнитной мощности (низкочастотного и высокочастотного), сложных систем высоковольтной электроники и устройств синхронизации всего комплекса в целом. Как следствие, имеет место достаточно высокая себестоимость оборудования и низкая надёжность.

ЛАБОРАТОРИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

Работы по созданию оборудования и инструментов для магнитно-импульсного притяжения, основанных на иных физических концепциях, были начаты в НТУ «ХПИ» в 2002 году. В настоящее время эти работы продолжены и ведутся также в Харьковском национальном автомобильно-дорожном университете, где создана специализированная научно-исследовательская лаборатория электромагнитных технологий [7].

Проводимые работы ведутся в следующих направлениях.

1. Многократное силовое воздействие серией силовых импульсов на заданный участок обрабатываемого объекта, позволяющее существенно понизить уровень энергии, необходимый для реализации разрабатываемой производственной операции (следует отметить, что принцип серийного силового воздействия применяется также в системах, предлагаемых фирмами «Electroimpact» и «Fluxtronic» [4, 5]).

2. Притяжение листовых немагнитных металлов (алюминиевые сплавы) осуществляется в, так называемых, индукционных индукторных системах, где с помощью дополнительного вспомогательного экрана создаётся усилие, притягивающее заданный участок обрабатываемого объекта к индуктору-источнику поля.

3. Притяжение ферромагнетиков (различные автомобильные стали) осуществляется инструментами, принцип действия которых основан на экспериментально обнаруженном эффекте изменения направленности силового воздействия при вариации частот действующих полей.

4. Создание инструментов – индукторных систем с комбинированным принципом действия, позволяющих эффективное притяжение как немагнитных, так и магнитных металлов.

Многократное силовое воздействие серией импульсов достигается за счёт специальных решений в конструкции магнитно-импульсной установки – источника мощности.

Батарея конденсаторов заряжается до заданного уровня напряжения от сети ~ 220В. После чего происходит разряд на нагрузку – индукторную систему. Затем процесс заряд-разряд повторяется. Контроль и управление работой установки осуществляется с помощью специально разработанной тиристорной схемы. Как показали эксперименты, при уровне зарядных напряжений ~ 1.5 кВ работа с сетью позволяет на выходе установки получить частоту повторения генерируемых токовых импульсов порядка ~ 3÷5 Гц.

Естественно, что необходимый уровень зарядных напряжений конденсаторной батареи определяется прочностными характеристиками объекта обработки. При каждом силовом воздействии из серии импульсов создаваемые в нём внутренние механические напряжения должны хоть немного, но превышать пределы текучести обрабатываемых металлов. В этом случае каждый последующий удар из серии будет только увеличивать относительные деформации.

ИНДУКЦИОННЫЕ ИНДУКТОРНЫЕ СИСТЕМЫ

Принцип действия этих инструментов для магнитно-импульсного притяжения заданных участков поверхности тонкостенных листовых заготовок можно раскрыть с помощью схемы на рис. 3.

Конструктивно, такая система включает плоский одновитковый соленоид-индуктор – 1, дополнительный элемент, обеспечивающий возникновение сил притяжения, это вспомогательный экран – 2 и листовую заготовку – 3, определённый

участок которой следует деформировать в направлении к поверхности индуктора. Все три составляющие укладываются параллельными слоями, изолированно друг от друга: «экран – индуктор – листовая заготовка».

Листовая заготовка размещается так, чтобы участок, подлежащий деформированию, находился в рабочей зоне системы (в области внутреннего отверстия витка).

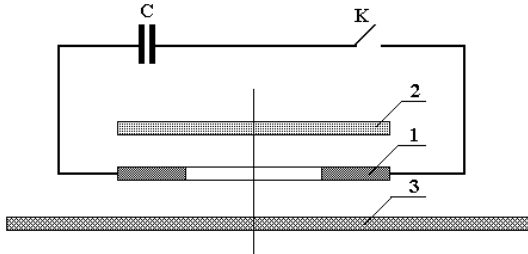


Рис. 3. Индукционная индукторная система

Индукционная индукторная система работает следующим образом.

Заряженный емкостной накопитель энергии – С, после срабатывания коммутатора – К, разряжается в цепи с подключенным индуктором – 1. При протекании разрядного тока по плоскому индуктору в экране и заготовке наводятся вихревые токи, имеющие одинаковое направление. В соответствии с законом Ампера, непосредственно под витком индуктора заготовка – 3 будет воспринимать отталкивающие усилия, так как токи, протекающие в индукторе и заготовке, имеют противоположные направления. В рабочей же зоне индуктора, т.е. в «окне», образованном витком индуктора, заготовка – 3 будет притягиваться к экрану – 2, так как индуцированные в ней и экране токи имеют одинаковое направление.

Необходимо подчеркнуть обязательное условие практической работоспособности индукционных индукторных систем. Как следует из физического осмысления закона Ампера, силовое взаимодействие между плоскими проводящими листами, в металле которых возбуждаются одинаково направленные индуцированные токи, возможно лишь в режиме интенсивного проникновения электромагнитного поля индуктора сквозь эти листы. Только в этом случае при нулевом поле между ними возникают силы магнитного давления извне, обуславливающие их взаимное притяжение. Кроме того, при достаточно низких рабочих частотах действующих полей интегральное во времени силовое действие сил отталкивания будет стремиться к нулю.

ПРИТЯЖЕНИЕ ФЕРРОМАГНЕТИКОВ

Исключительно новые возможности для создания устройств по внешнему устранению вмятин в кузовах легковых автомобилей открывает явление, экспериментально обнаруженное профессорами Батыгиным Ю.В., Лавинским В.И., Хименко Л.Т. [8] и зафиксированное в Национальном Техническом Университете "Харьковский политехнический институт". Его суть состоит в том, что при частотах

действующих полей ниже ~ 2 кГц имело место притяжение металла образца к поверхности индуктора-инструмента. При увеличении частоты до ~ 7 кГц и выше образец отталкивался согласно традиционным представлениям о процессах при магнитно-импульсной обработке металлов.

В основу гипотезы, объясняющей обнаруженный эффект, предлагается учесть проявление магнитных свойств обрабатываемого металла. Достаточно слабых при реальных амплитудах полей ($>10^5 \div 10^6$ А/м), но действенных при низких частотах, когда импульс сил магнитного давления стремится к нулю.

Итак, индуктор в экспериментах – это одновитковый круговой соленоид (R_1, R_2 – внутренний и внешний радиусы витка). Вспомогательный экран и листовая заготовка – идентичные металлические листы толщиной – d . Их удельная электропроводность – γ . Индуктор расположен между экраном и листом на одинаковом расстоянии – h от них. Относительная магнитная проницаемость принимается постоянной, её значение варьируется в пределах $\mu_r \approx 1.5 \div 10$.

Выпишем из монографии [7] все необходимые выражения.

Тангенциальная компонента напряжённости магнитного поля при достаточно низких рабочих частотах – ω действующих полей (условие низкочастотного режима: $\omega \cdot (\mu_0 \cdot \mu_r) \cdot \gamma \cdot d^2 \ll 1$ μ_0 – магнитная проницаемость вакуума) описывается зависимостью:

$$H_r(r, \zeta, t) \approx \frac{0,5j(t)}{\mu_r} \int_0^{\infty} f(\lambda) e^{-\lambda(h+\zeta)} \lambda \cdot J_1(\lambda r) d\lambda, \quad (1)$$

где $j(t)$ – плотность тока в индукторе,

μ_r – относительная магнитная проницаемость обрабатываемого металла,

$$f(\lambda) = \int_{R_1}^{R_2} r \cdot J_1(\lambda \cdot r) dr, \quad J_1(\lambda \cdot r) – \text{функция Бесселя}$$

первого порядка.

Нормальная составляющая напряжённости магнитного поля в низкочастотном режиме запишется в виде:

$$H_z(r, \zeta, t) \approx -j(t) \times \int_0^{\infty} \frac{f(x) x e^{-x \frac{h}{d}} [\mu_r \operatorname{sh}(x(\zeta-1)) - ch(x(\zeta-1))]}{\left[(1 + \mu_r^2) \operatorname{sh}(x) + 2\mu_r \cdot ch(x) \right]} \times J_0\left(x \frac{r}{d}\right) dx, \quad (2)$$

где $x = \lambda \cdot d$, λ – параметр интегрального преобразования Фурье-Бесселя.

При $d \rightarrow 0$ и $\mu_r > 1$ выражение (2) переходит в зависимость:

$$H_z(r, \zeta, t) \approx -\frac{0,5j(t)}{\mu_r} \int_0^{\infty} f(\lambda) e^{-\lambda \cdot (h+\zeta)} \lambda \cdot J_0(\lambda r) d\lambda. \quad (3)$$

С помощью выражений (1) и (3) вычислим силу притяжения металлической пластины, обусловленную её магнитными свойствами [7].

$$P_F = -\frac{\mu_0 j_m^2 j^2(t)}{8} \cdot \left(1 - \frac{1}{\mu_r}\right) \times \left[\left[\left(\int_0^\infty f(\lambda) e^{-\lambda \cdot h} \lambda J_0(\lambda r) d\lambda \right)^2 - \left(\int_0^\infty f(\lambda) e^{-\lambda \cdot (h+d)} \lambda J_0(\lambda r) d\lambda \right)^2 \right] + \frac{1}{\mu_r} \cdot \left[\left(\int_0^\infty f(\lambda) e^{-\lambda \cdot (h+d)} \lambda J_1(\lambda r) d\lambda \right)^2 - \left(\int_0^\infty f(\lambda) e^{-\lambda \cdot (h+d)} \lambda J_1(\lambda r) d\lambda \right)^2 \right] \right]. \quad (4)$$

Интересный вывод следует из выражения (4) для $\mu_r \gg 1$.

$$P_F \approx -\frac{\mu_0 j_m^2 j^2(t)}{8} \cdot \left[\left(\int_0^\infty f(\lambda) e^{-\lambda \cdot h} \lambda J_0(\lambda r) d\lambda \right)^2 - \left(\int_0^\infty f(\lambda) e^{-\lambda \cdot (h+d)} \lambda J_0(\lambda r) d\lambda \right)^2 \right] = \frac{\mu_0 \mu_r^2}{2} \cdot \left(H_z^2(z=0) \Big|_{\mu_r=1} - H_z^2(z=d) \Big|_{\mu_r=1} \right). \quad (5)$$

То есть, сила притяжения, обусловленная магнитными свойствами листового металла, не зависит от значения его магнитной проницаемости (учитывая, что $H_z^2(z=0, d)$ содержит множитель $\sim \frac{1}{\mu_r^2}$) и определяется разностью квадратов только нормальной составляющей возбуждаемого магнитного поля.

В целом же, анализ выражения общего вида – (4) показывает, что, в отличие от отталкивающих сил магнитного давления (в конечном итоге, это силы Лоренца!),

- величина сил притяжения в рассматриваемом временном диапазоне действующих полей не зависит от электропроводности металла пластины и частотных характеристик протекающих процессов;

- временная функция сил притяжения есть квадрат временной функции тока индуктора (постоянство знака!), то есть силы притяжения, обусловленные магнитными свойствами обрабатываемого объекта, сохраняют своё направление в течение всего времени действия;

- конечный результат силового воздействия, обусловленного магнитными свойствами металла пластины, определяется положительным импульсом

силы ($S_F = \int_0^\infty P_F(t, r) dt > 0$), что свидетельствует о

кумулятивном характере процесса;

- в рассматриваемом низкочастотном режиме объект обработки испытывает исключительно притяжение со стороны поля индуктора, поскольку временной интеграл для сил отталкивания (магнитного давления) стремится к нулю.

Конкретные расчёты проводились для экспериментальной индукторной системы:

$$R_1 = 0,02 \text{ м}, R_2 = \frac{1}{0,8} \cdot R_1 = 0,025 \text{ м}, h = d = 0,0005 \text{ м},$$

амплитуда тока в индукторе ~ 50 кА. Конкретное значение относительной магнитной проницаемости пока не закладываем. Таким образом, вычисляется величина компонент вектора напряжённости магнитного поля, возбуждаемого в металле листовой заготовки, с точностью до множителя $\sim \frac{1}{\mu_r}$.

Как показывают численные оценки, в низкочастотном режиме возбуждаются весьма интенсивные магнитные поля. При токе индуктора ~ 50 кА напряжённость в окне витка составляет $\sim \frac{(1 \div 3,5)}{\mu_r} \cdot 10^6$ А/м.

Величину магнитной проницаемости металла пластины для данных значений напряжённости, можно оценить с помощью функциональных зависимостей, приведенных в монографии Туровского Я. [9]. Аппроксимация этих функций для значений напряжённости, близких к $\sim 10^6$ А/м, приводит к величинам $\mu_r \approx 2,5 \div 10$.

На рис.4 дана сила магнитного притяжения (формула (4)), учитывающая действие вектора напряжённости магнитного поля, представленного двумя компонентами: нормальной и тангенциальной.

На рис. 5 приведены силы, обусловленные действием каждой из указанных составляющих в отдельности.

Из графиков следует, что в системе возбуждаются довольно мощные силы магнитного притяжения (~ 28 Атм.), сосредоточенные, в основном, в области витка индуктора и вблизи него. Действие сил, обусловленных тангенциальной составляющей напряжённости (рис.5 б, г) «сглаживает провал» в радиальном распределении силы притяжения (рис.5 а, в), обусловленной действием нормальной компоненты поля.

И последнее замечание.

Фактором, способствующим росту возбуждаемых усилий, является существенная неоднородность радиального распределения вектора напряжённости. Как показывают расчёты, в области вне витка индуктора данные характеристики приближаются к нулю. В этой зоне обрабатываемого

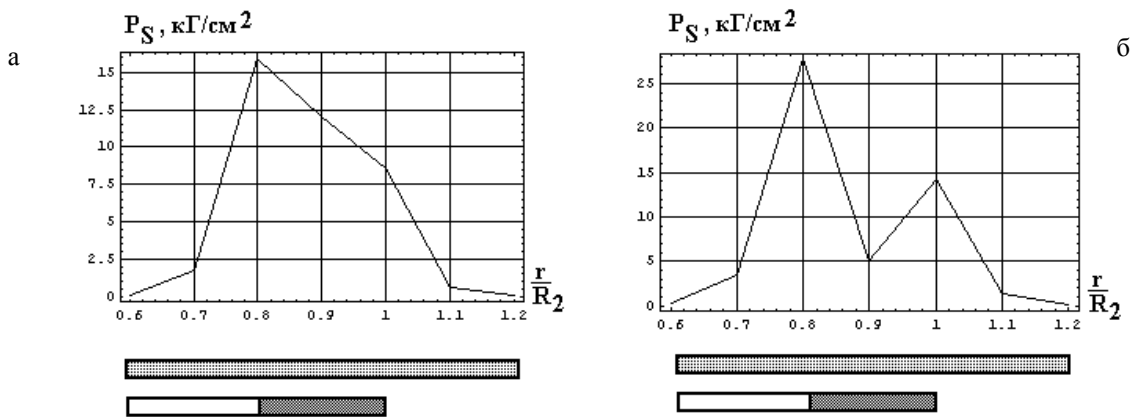


Рис. 4. Радиальное распределение суммарной силы притяжения, обусловленной нормальной и тангенциальной компонентами вектора напряжённости магнитного поля, при токе индуктора ~ 50 кА: (а) – $\mu_r = 2$; (б) – $\mu_r = 10$

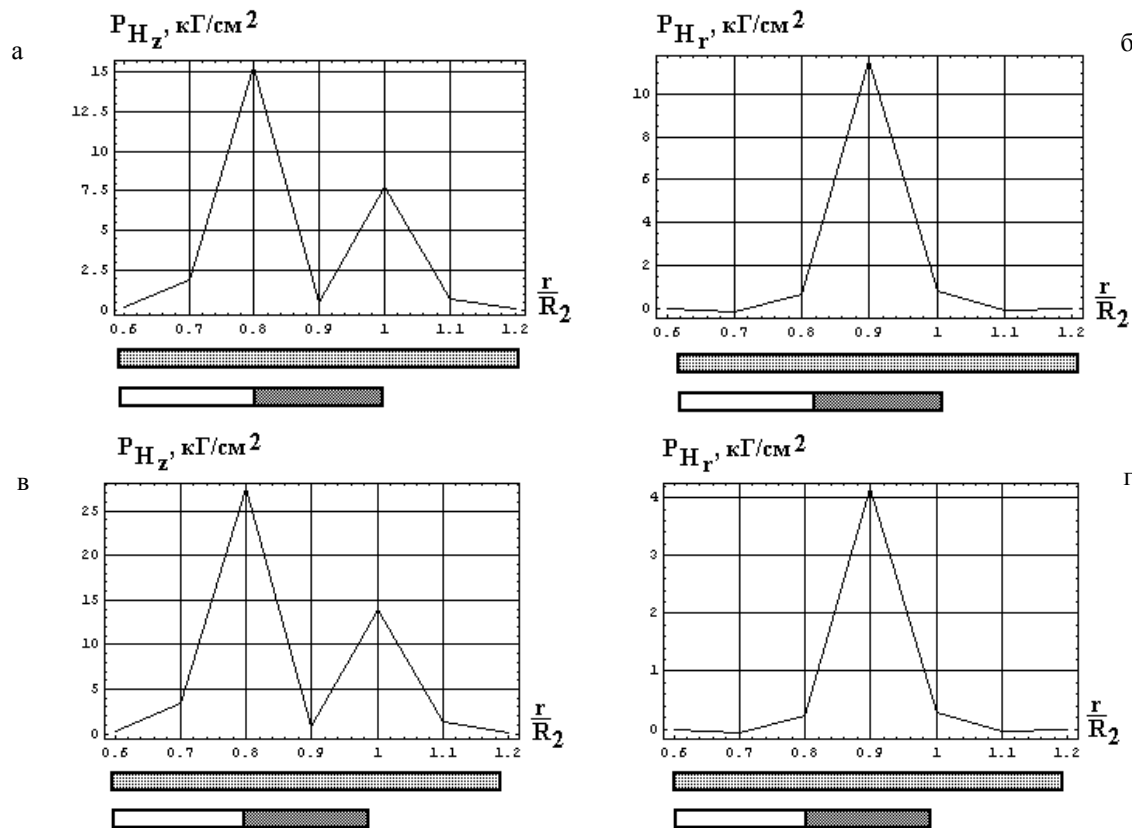


Рис. 5. Радиальное распределение сил притяжения, обусловленных нормальной (а – $\mu_r = 2$; в – $\mu_r = 10$) и тангенциальной (б – $\mu_r = 2$; г – $\mu_r = 10$) компонентами вектора напряжённости магнитного поля, при токе индуктора ~ 50 кА

объекта напряжённость имеет значение, при котором магнитная проницаемость металла пластины может достигнуть своего максимума. Это означает, что в распределении по радиусу относительная магнитная проницаемость может принимать значения из интервала [1, 3100] (см. [9]). Её усреднённая величина может быть весьма далека от принятых в расчёте – $\mu_r \in [2 \div 10]$.

В заключение обязательно следует подчеркнуть, что магнитно-импульсное притяжение приемлемо не только как отдельная, относительно простая, производственная операция, но и как составляющая в

более сложных комбинациях. Речь идёт о безматричной электромагнитной штамповке изделий из тонкостенных листовых металлов под действием одновременного магнитно-импульсного отталкивания и притяжения с заданием пространственного распределения сил, обеспечивающим получение требуемой формы готовой продукции (круговые гофры).

В соответствии с блок схемой на рис. 6, в инструмент-индуктор подаётся высокочастотный и низкочастотный токовые импульсы.

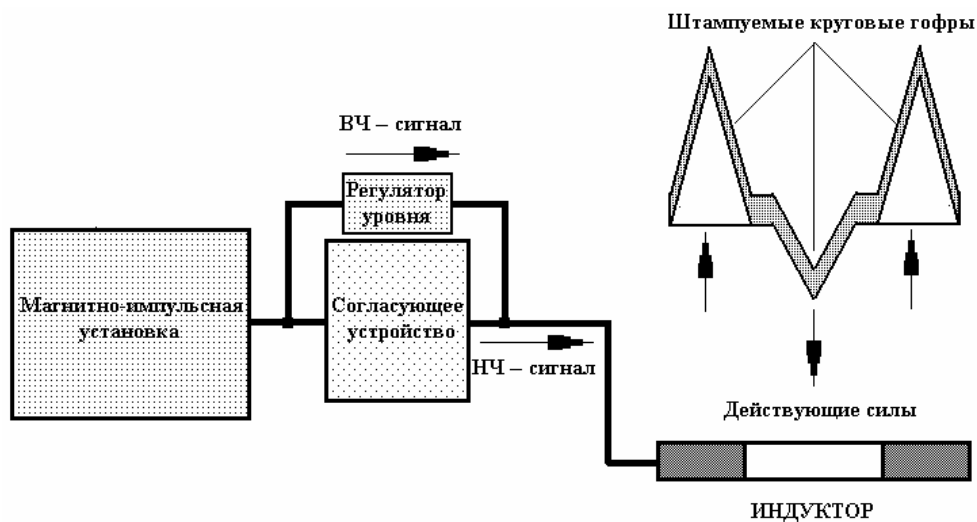


Рис. 6. Принципиальная блок-схема безматричной электромагнитной штамповки круговых гофров в тонкостенной металлической пластине при одновременном магнитно-импульсном отталкивании и притяжении.

Первый из них формируется непосредственно на выходе магнитно-импульсной установки, второй – на выходе согласующего устройства (импульсного трансформатора). Последнее не только понижает частоту, но и регулирует амплитуду тока, подаваемого в индуктор. Для регулировки высокочастотного сигнала служит отдельный регулятор уровня.

Высокочастотный токовый импульс возбуждает силы отталкивания по периметру витка, низкочастотный – силы притяжения в области внутреннего окна индуктора. Их одновременное действие при адекватном выборе амплитуд токовых импульсов приведёт к выполнению заданной производственной операции, а именно, к безматричной электромагнитной штамповке круговых гофров в тонкостенной металлической пластине.

ВЫВОДЫ

1. Анализ мировых тенденций развития современных промышленных технологий показывает всё возрастающую актуальность направления магнитно-импульсной обработки металлов, связанного с притяжением заданных участков проводящих объектов.

2. Предложена схема, так называемой, индукционной индукторной системы, позволяющей трансформацию отталкивания, хорошо известного в классической магнитно-импульсной обработке металлов, в притяжение заданных участков обрабатываемого объекта. Принцип действия основан на притяжении одинаково направленных токов.

3. Расчётами показано, что физической причиной обнаруженного изменения направленности силового воздействия при вариации рабочих частот действующих полей является проявление магнитных свойств обрабатываемого объекта.

4. Конкретной схемой реализации проиллюстрирована идея безматричной электромагнитной штамповки круговых гофров в тонкостенной металлической пластине при одновременном магнитно-импульсном отталкивании и притяжении.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Бажинов А.В., Батыгин Ю.В., Чаплыгин Е.А., Использование энергии импульсных магнитных полей в автомобильной промышленности. //Сб. научных трудов Харьковского национального автомобильно-дорожного университета. Харьков. 2005. Выпуск 16.с.349-353.
- [2] www.beulentechnik.com
- [3] Пат. 3998081 США, МКИ В21Д26/14. Electromagnetic dent puller / Karl A. Hansen, Iver Glen Hendricson; Заявл. 17.07.74; Оpubл. 21.12.76.
- [4] www.electroimpact.com
- [5] www.fluxtronic.com
- [6] Шнерсон Г.А., Поля и переходные процессы в аппаратуре сверхсильных токов. – Л: Энергоиздат. 1981.- 199с.
- [7] Туренко А.Н., Батыгин Ю.В., Гнатов А.В., Теория и эксперимент притяжения тонкостенных металлов импульсными магнитными полями. Том 3. Импульсные магнитные поля для прогрессивных технологий. Под общей ред. проф., д.т.н. Батыгина Ю.В. Харьков: Изд.ХНАДУ. 2009г. – 240с.
- [8] Yu.V.Batygin, V.I.Lavinsky, L.T.Khimenko, Direction Change of the Force Action upon Conductor under Frequency Variation of the Acting magnetic Field. Proceedings of the 1-st International Conference on High Speed Metal Forming. March 31/April 1, 2004. Dortmund, Germany. P.157-160.
- [9] Туровский Я., Техническая электродинамика. М: "Энергия". 1974. - 488с.