

УДК 621.318.4

Чаплыгин Е.А., к.т.н., Шиндерук С.А, к.т.н., Еремина Е.Ф, к.т.н., Коряк А.А., к.т.н.  
Харьковский национальный автомобильно-дорожный университет

## ПРИТЯЖЕНИЕ НЕМАГНИТНЫХ МЕТАЛЛОВ В ТЕХНОЛОГИЯХ МАГНИТНО-ИМПУЛЬСНОЙ ОБРАБОТКИ МЕТАЛЛОВ

*Практический интерес к магнитно-импульсной обработке металлов обусловлен потребностью в создании устройств, позволяющих восстанавливать детали из листового металла, устранять вмятины на поверхности с внешней стороны, без разборки конструкции. Проведенный анализ описанных ранее приспособлений показал, что все они имеют определенные недостатки и ограничения. В предлагаемой работе обоснована возможность создания электротехнических систем для притяжения металлов немагнитной природы с помощью низкочастотного электромагнитного поля и однонаправленных токов, индуцированных в заготовке и притягивающем экране. Рассмотрена зависимость разности фаз в индукторе и заготовке от частоты сигнала. Обосновано введение в классическую схему инструмента магнитно-импульсной обработки металлов дополнительного притягивающего экрана. Это дает возможность создать в обрабатываемом объекте и дополнительном экране токи, совпадающие по фазе, что позволяет притягивать как ферромагнитные, так и не магнитные металлы. Показано, что с целью более эффективного притяжения экран и заготовка должны быть изготовлены из одинаковых металлов для индуцирования в них максимально близких как по фазе, так и по амплитуде токов.*

**Ключевые слова:** магнитно-импульсная обработка, индуктор, притягивающий экран, индуцированный ток.

Физический принцип магнитно-импульсного притяжения широко известен в научной литературе. Исследование магнитно-импульсного притяжения заготовок из листового металла первоначально было обусловлено реставрационными потребностями внешних панелей самолетов и наземных средств транспорта. Анализ примеров реальной жизни показывает, что большое количество повреждений – это вмятины в областях, где доступ изнутри панели очень проблематичен, если вообще невозможен. К этим случаям относятся крылья самолетов и части фюзеляжа, а также двери, капоты, крыши, крылья легковых автомобилей и грузовиков. Кроме того, существует потребность в обработке не только ферромагнитных металлов, но и металлов немагнитной природы, таких как алюминий, медь, нержавеющая сталь.

Практическое применение устройств, позволяющих восстанавливать детали из листового металла, устраняя вмятины на поверхности, с внешней стороны, без разборки компонентов и избегая повреждения существующего лакокрасочного и защитного покрытия, описано в работе [1]. Системы включают в себя прерывание медленно растущих полей и возбуждающих токов, а также эффекты изменения направления усилия, применяемого к тонкому ферромагнитному листу. В патенте, полученном Фюртом, предложено производить магнитно-импульсную обработку многовитковой катушкой с разомкнутым дополнительным витком [2]. Физическая основа предложенного им процесса состоит в генерации двухчастотного разряда: медленного и быстрого. Быстрый разряд устраняет медленное поле со стороны заготовки, обращенной к катушке, в то время как медленное поле, рассеянное по толщине листового металла, деформирует заготовку. Практической реализации данный патент не получил. Физический принцип, описанный ранее, был включен в ряд конструкций соленоидов разной конфигурации Хансена и Хендриксона [3-5]. Они предложили метод и устройство для магнитно-импульсного удаления вмятин из магнитных металлов путем введения медленного разряда через многовитковую катушку и быстрого импульса противотока. Также ими была разработана система катушек с введением концентратора потока, который также известен в литературе как полевой индуктор. Кроме того, была представлена система из двух катушек и переносного генератора импульсов, генерирующих как отталкивающие, так и силы притяжения для деформации как вогнутых, так и выпуклых областей. Шнеерсоном было предложено получать притяжение листового металла катушкой на основе резкого прерывания одночастотного разряда [6]. В этом случае электромагнитное поле создает силы притяжения. В

общем, этот подход подобен двухчастотному методу Фюрта, развитого Хансеном и Хендриксоном, Предложенный метод выглядит проще, однако его эффективность зависит от того, насколько быстро разряд может быть прерван. Прерывание разряда аналогично введению вторичного высокочастотного разряда, что устраняет магнитно-импульсное поле со стороны заготовки, обращенной к катушке. О'Делл [7] предложил использовать магнитно-импульсное устройство, включающее электромагнит, расположенный с внешней стороны панели и инструмент, расположенный с внутренней стороны панели. Магнит притягивает инструмент, который выравнивает внутреннюю поверхность вмятины. Этот метод аналогичен процедурам механического выравнивания вмятин. Одночастотное притяжение листового металла было разработано Батыгиным и др. [8, 9] для ферромагнитных металлов. Эффект был обнаружен во время экспериментов по магнитно-импульсному притяжению листовых металлов электрическими разрядами разной частоты. Данная концепция быстро нашла свое практическое применение в устройствах для удаления вмятин при ремонте автомобилей, где большинство наружных панелей изготовлено из низкоуглеродистой стали. Специфические конструкции катушек, а также практические аспекты удаления вмятин в автомобильных панелях описаны в патенте [10]. Эксперименты показали, что направление магнитно-импульсного давления для заготовок из листового металла из ферромагнитной стали зависит от частоты разряда. При некотором пределе силы меняют направление: при высоких частотах имеет место отталкивание, а при низких частотах наблюдается притяжение. Все упомянутые концепции [2-11] имеют определенные недостатки и ограничения, которые усложняют их практическое использование, например, использование дорогостоящих коммутационных компонентов, позволяющих прерывать высокоинтенсивные токи или требования, по материалу обработки он обязательно должен быть ферромагнитным.

Целью настоящей работы было обоснование возможности создания электротехнических систем для притяжения металлов немагнитной природы с помощью низкочастотного электромагнитного поля и однонаправленных токов, индуцированных в заготовке и притягивающем экране.

Рассмотрим новую концепцию в сравнении с концепцией традиционных процессов магнитно-импульсного притяжения (МИОМ). Традиционная схема магнитно-импульсной обработки металлов (МИОМ), схематически показанная на рис.1. Такая реализация требует довольно высокой частоты разряда конденсаторов через катушку-инструмент, чтобы вызвать электрический ток в поверхностном слое заготовки [12].

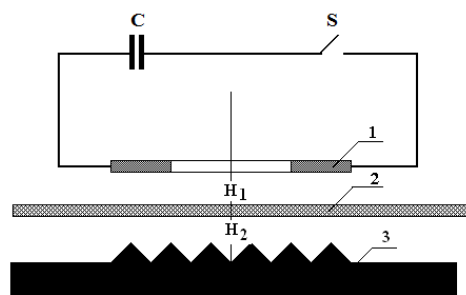


Рис.1. Схема традиционной магнитно-импульсной обработки

1 – одновитковый индуктор, 2 – заготовка листового металла, 3 – односторонняя матрица  
С – блок конденсаторов для накопления электрической энергии, S – переключатель разрядной цепи

Известные методики проектирования оборудования МИОМ обычно направлены на то, чтобы избежать проникновения магнитно-импульсного поля через толщину заготовки, как это было рекомендовано, например, [13]. При этом давление, прикладываемое к заготовке, может быть рассчитано как:

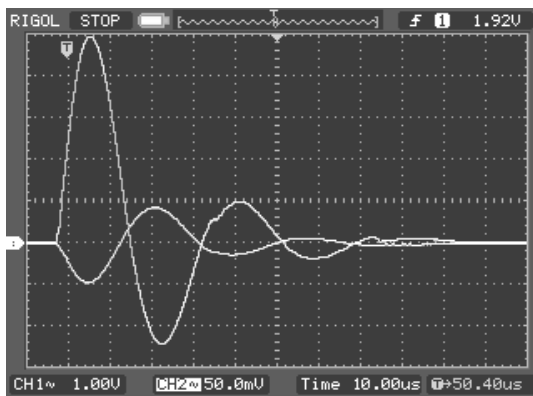
$$P = \frac{\mu_0}{2} (H_1^2 - H_2^2), \quad (1)$$

где  $H_1$  – напряженность магнитного поля в зазоре между катушкой и заготовкой,

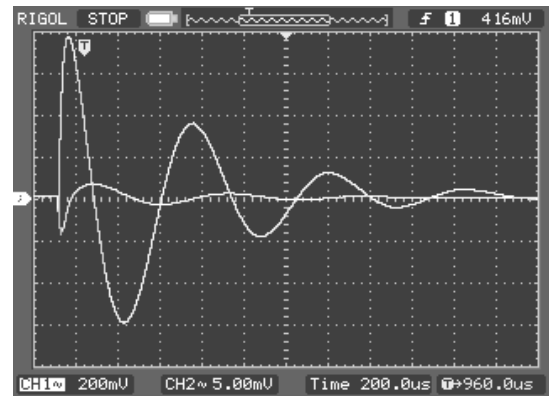
$H_2$  – напряженність магнітного поля, проникаючого через заготовку.

Кількість витків котушки і ємкість накопичувача енергії обладнання звичайно вибирається з урахуванням остаточного мінімального рівня індуктивності. В такій конфігурації ток, індукований в заготовці, має майже таку ж часову форму, як і ток розряду в котушці (але з різницею фаз  $\sim \pi$ ). Незначительний зсув у часових фазах токів в котушці і в заготовці, викликаний процесами проникнення, можна спостерігати і в інших експериментах, але даний ефект, як правило, не враховується при практичних розрахунках процесів МІОМ. В традиційній МІОМ спостерігається сильне відштовхувальне діяння між котушкою і заготовкою з гарною електропровідністю при досить високій частоті розряду.

Приклади експериментальних кривих збуджуючого току, протікаючого в котушці, синхронізованого з наведеним током в заготовці для частот розряду 33 кГц і 1,33 кГц, показані на рис. 2, а і б відповідно.



а)



б)

Рис. 2. Тока в котушці (крива з більш високою амплітудою) синхронізований з індукованим в заготовці (крива з низькою амплітудою)  
а – 33 кГц; б – 1,33 кГц

Сравнение этих двух случаев показывает, что для 33 кГц токи в котушке и в заготовке имеют сдвиг фазы  $\sim \pi$ , что означает, что токи работают в противоположных направлениях, что приводит к устойчивой силе отталкивания. Для 1,33 кГц токи в котушке и в заготовке имеют сдвиг фаз  $\sim \pi/2$ , что приводит к очень слабому взаимодействию между токами, которые периодически меняют направления. Этот эффект обсуждался в аналитической модели для двух предельных случаев, когда электропроводность  $\gamma \rightarrow 0$  и  $\gamma \rightarrow \infty$  [1].

Процесс магнитно-импульсного притяжения – это процесс, при котором создаются силы, направленные от заготовки к инструменту. Согласно наблюдаемому результату, процесс имеет некоторое отдаленное сходство с притяжением вакуумом. Также его можно сравнить с динамическим процессом, описанным только для магнитных материалов [1]. Идея состоит в том, чтобы создать электромагнитное поле с обеих сторон заготовки, а затем устранить его с одной стороны противоположным электромагнитным полем, генерируемым экраном. Этот процесс включает в себя и дополнительную часть инструмента – экран, который играет определяющую роль в создании поля противоположного знака и силового взаимодействия проводников с однонаправленными токами для притяжения немагнитных листовых металлов.

Чтобы устранить силу отталкивания между котушкой и заготовкой, частота разряда должна быть довольно низкой для достижения значительного проникновения магнитно-импульсного поля через заготовку, а также для увеличения временного сдвига фаз тока в котушке и в заготовке. Индукированный ток в заготовке будет пропорционален производной по времени индуцирующего тока. Для гармонических процессов этот сдвиг между фазами равен  $\sim \pi/2$ . Это важное обстоятельство, потому что оно делает динамическое взаимодействие между котушкой и заготовкой почти несущественным, в то время как экран начинает играть главную роль, поскольку фазы тока, индуцированные в заготовке и в экране, идентичны. В этом случае котушка не подвергается каким-либо значительным электродинамическим силам.

На рисунке 3 показана схема предлагаемого процесса притяжения листового металла, которая получила название «Индукторная система с притягивающим экраном» (ИСПЭ).

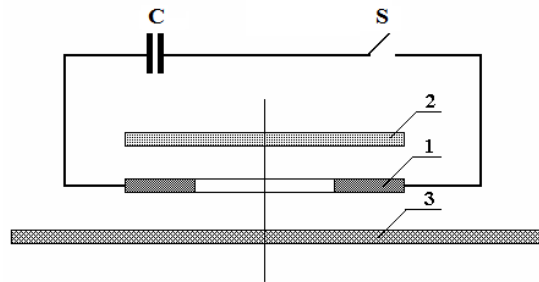


Рис. 3. Схема индукторной системы с притягивающим экраном  
1 – одновитковый индуктор, 2 – вспомогательный притягивающий экран, 3 – заготовка листового металла  
С – блок конденсаторов для накопления электрической энергии, S – и является переключателем разрядной цепи

ИСПЭ работает следующим образом: предварительно заряженный емкостной накопитель С разряжается через цепь с одновитковой катушкой индуктивности  $L$ , когда переключатель  $S$  находится в закрытом состоянии. Ток разряда индуцирует однонаправленные вихревые токи в притягивающем экране 2 и заготовке из листового металла 3. Экран 2 жестко установлен на изолированной пластине инструмента. В соответствии с законом Ампера ток, индуцированный в заготовке 3 из листового металла, будет притягиваться к току, индуцированному на рабочей поверхности экрана 2. Необходимо подчеркнуть обязательное условие для работы индукторных систем с притягивающим экраном. Согласно закону Ампера, сила притяжения между металлической листовой заготовкой и экраном с однонаправленными токами возможна только в режиме интенсивного проникновения полей через заготовку и экран. Эффективность процесса притяжения определяется интенсивностью поля, проникающего через листовую заготовку. Схема сил показана на рис.4.

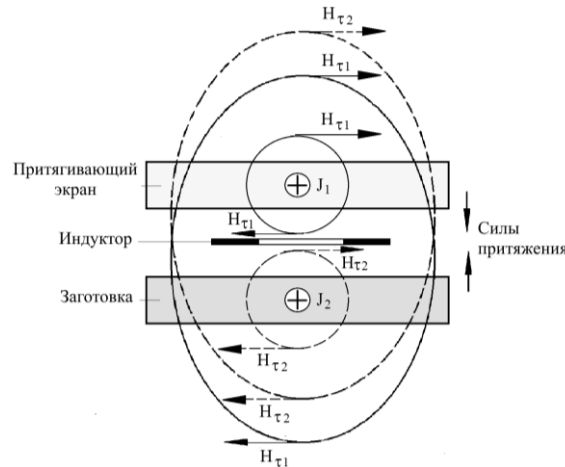


Рис.4. Схема физических процессов в индукторной системе с притягивающим экраном  
 $J_{1,2}$  – однонаправленные токи, индуцированные в экране и заготовке,  $H_{\tau 1,2}$  – касательные компоненты напряженности магнитного поля, возбуждаемые токами  $J_{1,2}$ .

Чтобы добиться эффективной работы индукторной системы с притягивающим экраном, токи, индуцированные в заготовке листового металла и в притягивающем экране, должны быть идентичны по частоте и амплитуде. Это может быть достигнуто путем изготовления экрана примерно из того же материала и такой же толщины, что и листовая заготовка. Подробное математическое описание обсуждаемого процесса магнитно-импульсного притяжения можно найти в работах авторов статьи.

**Выводы.** Раскрыты особенности традиционных методов магнитно-импульсной обработки металлов, классическая схема которых заключается в создании электродинамических усилий с целью давления обрабатываемого металлического объекта на формовочную матрицу. Рассмотрен принцип действия основного оборудования и обозначена

область его применения. При достаточно высокой частоте сигнала, позволяющей индуцировать ток на поверхности заготовки (глубина проникновения поля не превышает поверхностного слоя), ток в индукторе отличается от тока в заготовке на  $\sim \pi$ , что обуславливает эффект отталкивания. В случае относительно низкой частоты (глубина проникновения поля превышает толщину заготовки), ток в индукторе отличается от тока в заготовке на  $\sim \pi/2$ , что позволяет перейти от отталкивания к притяжению. Введение дополнительного притягивающего экрана в классическую схему инструмента магнитно-импульсной обработки металлов позволяет создать в обрабатываемом объекте и дополнительном экране токи, совпадающие по фазе, что позволяет притягивать как ферромагнитные, так и не магнитные металлы (закон Ампера). Для более эффективного притяжения, как ферромагнитных, так и не магнитных металлов, экран и заготовка должны быть изготовлены из одинаковых металлов для индуцирования в них максимально близких как по фазе, так и по амплитуде токов.

### Информационные источники

1. Batygin Y.V., Golovashchenko S.F., Gnatov A.V., Pulsed electromagnetic attraction of sheet metals – Fundamentals and perspective applications. //Journal of Materials Processing Technology. – Elsevier. – 2013. # 213 (3), pp. 444–452.
2. Furth, H.P. 1965. Devices for Metal Forming by Magnetic Tension. US Patent 3,196,649.
3. Hansen, K.A., Hendrickson, I.G., 1976. Electromagnetic Dent Pooler. US Patent 3,998,081.
4. Hansen, K.A., Hendrickson, I.G., 1979. Electromagnetic Force Machine with Universal Portable Power Supply. US Patent 4,148,091.
5. Hansen, K.A., Hendrickson, I.G., 1991. Electromagnetic Dent Remover with Tapped Work Coil. US Patent 4,986,102.
6. Шнеерсон Г.А. Поля и переходные процессы в аппаратуре сверхвысокого импульсного тока. – Л.: Энергоиздат, 1997, 199 с.
7. O'Dell, D.W., 1988. Electromagnetic Dent Removing Tool. US Patent 4,754,637.
8. Batygin, Y. V., Lavinskiy, V.I., Khimenko, L.T., 2004. Direction Change of the Force Action upon Conductor under Frequency Variation of the Acting Magnetic Field. In: Proceedings of the 1st International Conference on High Speed Forming, Dortmund, pp. 157-160.
9. Батигін Ю. В., Лавінський В.І., Хавін В.Л., 2006. Спосіб магнітно-імпульсної обробки тонкостінних металевих заготовок. Патент України 74909.
10. Meichtry, R., 2006. Dent Removing Method and Device. International Patent Application WO2006/119661 A1.
11. Batygin Y.V., Golovashchenko S.F., Gnatov A.V., Pulsed electromagnetic attraction of nonmagnetic sheet metals. – Fundamentals and perspective applications // Journal of Materials Processing Technology. – Elsevier. – 2014. #214 (2), pp. 390–401.
12. Psyk V. Electromagnetic Forming / V. Psyk, D. Rich, B. I. Kinsley, A. E. Tekkaya, M. Kleiner // Journal of Material Processing Technology. 211(2011), pp. 787-829.
13. Белый И.В., Фертик С.М., Хименко Л.Т. Справочник магнитно-импульсной обработки металлов. – Харьков: Высш. шк. 1977. - 189 с.

**Чаплигін Є.О., к.т.н., Шиндерук С.І., к.т.н., Єрьоміна О.Ф., к.т.н., Коряк О. О., к.т.н.**  
Харківський національний автомобільно-дорожній університет

### ПРИТЯГАННЯ НЕМАГНІТНИХ МЕТАЛІВ В ТЕХНОЛОГІЯХ МАГНІТНО-ІМПУЛЬСНОЇ ОБРОБКИ МЕТАЛІВ

*Практичний інтерес до магнітно-імпульсної обробки металів обумовлений потребою в створенні обладнань, що дозволяють відновлювати деталі з листового металу, усувати вм'ятини на поверхні з зовнішнього боку, без розбирання конструкції. Проведений аналіз описаних раніше пристосувань показав, що всі вони мають певні недоліки і обмеження. У пропонованій роботі обґрунтована можливість створення електротехнічних систем для притягання металів немагнітної природи за допомогою низькочастотного електромагнітного поля і односпрямованих струмів, індукованих у заготовці та екрані, що притягує. Розглянуто залежність різниці фаз в індукторі і заготовці від частоти сигналу. Обґрунтовано введення в класичну схему інструменту магнітно-імпульсної обробки металів додаткового екрану, що притягує. Це дає можливість створити в оброблюваному об'єкті і додатковому екрані струми, які збігаються за фазою, що дозволяє притягувати як ферромагнітні, так і немагнітні*

метали. Показано, що з метою більш ефективного притягання екран і заготовка повинні бути виготовлені з однакових металів для індуктування в них максимально близьких як за фазою, так і за амплітудою струмів.

**Ключові слова:** магнітно-імпульсна обробка, індуктор, екран, що притягує, індукований струм.

**E. Chaplygin, Ph.D., S. Shynderuk, Ph.D., E. Yeryomina, Ph.D., A. Koryak, Ph.D.**  
Kharkov national automobile-highway university

#### **ATTRACTION OF NONMAGNETIC METALS IN TECHNOLOGIES OF MAGNETIC-PULSE PROCESSING OF METAL**

*Practical interest in magnetic-pulse processing of metals is caused by the need to create devices that allow the restoration of sheet metal parts, to remove dents on the surface from the outside, without disassembling the structure. An analysis of the previously described devices showed that they all have certain drawbacks and limitations. In the proposed work, the possibility of creating electrotechnical systems for the attraction of metals of a nonmagnetic nature with the help of a low-frequency electromagnetic field and unidirectional currents induced in a blank and an attracting screen is substantiated. The dependence of the phase difference in the inductor and the workpiece on the frequency of the signal is considered. The introduction of an additional attractive screen into the classical scheme of the tool for magnetic-pulse processing of metals is substantiated. This makes it possible to create in the object being processed and in the additional screen the currents that coincide in phase, which makes it possible to attract both ferromagnetic and non-magnetic metals. It is shown that for the purpose of more effective attraction, the screen and the blank have to be manufactured of identical metals to induce in them as the closest as it possible both in phase and in amplitude currents.*

**Key words:** magnetic-pulse processing, inductor, attracting screen, induced current.

Стаття надійшла до редакції 12.05.2018.