

## ИСТОРИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ВОЗНИКНОВЕНИЯ МАГНИТНО-ИМПУЛЬСНОГО ПРИТЯЖЕНИЯ ТОНКОСТЕННЫХ ЛИСТОВЫХ МЕТАЛЛОВ

*В статті розкриті джерела виникнення нового напрямку в МІОМ, як магнітно-імпульсне притягання тонкостінних листових металів. Проведений аналіз патенту № 3,196,649 Г.Фюрта 1965г. і обґрунтовано його неможливість практичної реалізації. Розкрита ідея використання двох джерел (високочастотного і низькочастотного) електромагнітного поля в практиці магнітно-імпульсного притягання листових металів.*

*В статье раскрыты истоки возникновения нового направления в МИОМ, как магнитно-импульсное притяжение тонкостенных листовых металлов. В частности, проведен анализ предложений в патенте № 3,196,649 Г.Фюрта 1965г. и показана невозможность их практической реализации. Раскрыта идея использования двух источников (высокочастотного и низкочастотного) электромагнитного поля в практике магнитно-импульсного притяжения листовых металлов.*

### ВВЕДЕНИЕ

**Постановка проблемы.** Проблематика магнитно-импульсной обработки металлов (МИОМ) в современной обрабатывающей промышленности становится всё более актуальной. Доказательством этого утверждения является I Международная конференция по высокоскоростной формовке, проведенная впервые после 10-12-летнего затишья в этой области науки в марте-апреле 2004 г. Дортмундским университетом при поддержке German Research Foundation ("Collaborative Research Center") в соответствии с широкой программой международного сотрудничества "Integration of Forming, Cutting and Joining for the Flexible Manufacture of Lightweight Frame Structures" [1, 2].

Ещё большим доказательством актуальности в области МИОМ являются разработки магнитно-импульсных комплексов для внешней рихтовки корпусов самолётов, проводимые на протяжении последних 35-40 лет фирмами Boeing и Electroimpact (США) [3-5]. Работа этих комплексов основана на притяжении заданных участков листового металла посредством импульсных магнитных полей строго определенной конфигурации.

В связи с этим немалую важность представляют вопросы, связанные с таким аспектом МИОМ, как магнитно-импульсное притяжение металлов и истоки его возникновения. Это связано с тем, что сами источники, и причины их побудившие, зачастую, играют определяющую роль в развитии конкретного направления в науке и техники. Последнее в полной мере касается такого направления, как магнитно-импульсное притяжение тонкостенных листовых металлов.

Данный аспект вызывает ещё больший интерес тем, что он относится к так называемым "нетрадиционным" методам МИОМ. Традиционные же методы основаны на действии высокочастотных импульсных полей, которые способствуют появлению сил давления (нетрадиционные – сил притяжения) на обрабатываемый объект. То есть, импульсное магнитное давление на проводник эффективно только при условии резкого поверхностного эффекта, когда поле индуктора не успевает проникнуть сквозь металл заготовки за время действия импульса [3].

### Анализ основных достижений и публикаций.

Идея использования энергии импульсных магнитных полей для производственных целей была высказана советским академиком Капицей П.Л. в 1920 г. Он впервые обратил внимание научной общественности на появление мощных электродинамических сил в

электротехнических установках, которые в то время использовались для исследований физических свойств материалов при воздействии сильных электромагнитных полей [1, 3].

Первооткрывателем "нетрадиционных" методов МИОМ можно считать Г. Фюрта, который в своём патенте [6] изложил идеи магнитно-импульсного притяжения листовых металлов. Представленная им техническая реализация притяжения металла к индуктору практически неосуществима и в научно-технической периодике отсутствуют сведения о её внедрении (использовании). Но сами идеи, заложенные автором патента, нашли своё дальнейшее развитие и стали основополагающими в "нетрадиционных" методах МИОМ.

Это доказывает тот факт, что инженеры "Boeing Company" Хансен и Хендриксон ссылаясь на патент Г. Фюрта предложили свои технические реализации по притяжению листовых металлом магнитно-импульсным способом и оформили их соответствующими патентами [8, 9].

**Цель настоящей работы** – анализ истоков возникновения такого направления в МИОМ, как магнитно-импульсное притяжение листовых металлов к источнику поля – индуктору, с критикой первых, но основополагающих предложений.

### МАГНИТНО-ИМПУЛЬСНОЕ ПРИТЯЖЕНИЕ

Одно из первых предложений по созданию инструмента для магнитно-импульсного притяжения металлов сформулировано в патенте Г. Фюрта [6]. Автором предлагается конструкция индукторной системы, состоящей из параллельно (для цилиндрической системы – коаксиально) расположенных проводящей заготовки, первичной и вторичной катушек. Первичная, или основная, катушка представляет собой многовитковый соленоид. Вторичная, или дополнительная, катушка есть одновитковый соленоид. Ниже приведены иллюстрации, представленные в патенте Г. Фюрта, где на рис. 1 представлен общий вид схемы изобретения, а на рис. 2 – вид вторичной катушки.

Первичная катушка замкнута на источник энергии. В ней протекает медленно нарастающий во времени ток, возбуждающий в системе соответствующее основное, медленно нарастающее во времени магнитное поле, проникающее сквозь металл заготовки в свободное полупространство. По достижению током своего пикового значения первичная катушка отключается.

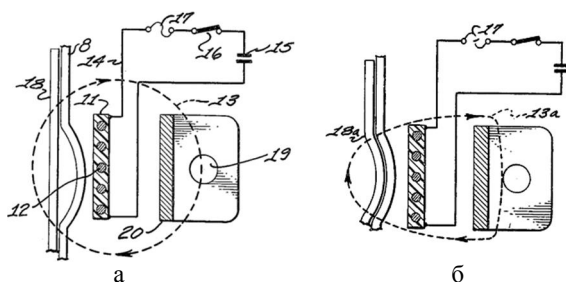


Рис. 1. Общий вид схемы изобретения Г. Фюрта:

а – до перегорания плавкой вставки;

б – после перегорания плавкой вставки

(8 – диэлектрическая матрица; 11 – первичная катушка с произвольным числом витков; 12; 13 – магнитный поток возбужденный первичной катушкой; 14 – первичная цепь; 15 – конденсатор; 16 – выключатель; 17 – плавкая вставка; 18 – заготовка; 19 – воздушный промежуток; 20 – вторичная катушка)

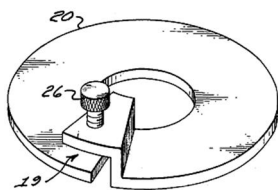


Рис. 2. Общий вид вторичной катушки: 19 – воздушный промежуток; 20 – вторичная катушка; 26 – регулировочный винт

Вторичная катушка разомкнута. Её цепь замыкается в результате электрического пробоя промежутка 19 (рис. 1) после отключения первичной катушки.

По мнению автора, в пространстве между заготовкой и вторичной катушкой произойдёт коллапс магнитного поля, в то время как поле с индукцией  $B$ , проникшее сквозь заготовку за время нарастания сигнала в цепи первичной катушки, окажет силовое давление на металл этой заготовки с амплитудой

$$P = \frac{B^2}{8\pi}, \text{ [Гаусс]}. \quad (1)$$

Для большей ясности, формулу (1) запишем в виде пондеромоторных сил – результата взаимодействия магнитного поля индуктора с проводящей средой (в системе единиц СИ). В классическом приближении суммарное давление не зависит от нюансов распределения магнитного поля в заготовке, и будет определяться лишь разностью квадратов значений касательной составляющей вектора напряжённости магнитного поля на граничных поверхностях проводящей заготовки [3],

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

где  $H_{1,2}$  – значения напряжённости на граничных поверхностях обрабатываемого объекта.

Работоспособность индукторной системы Г. Фюрта вызывает сомнения.

**Во-первых**, требуемое быстрое отключение тока первичной катушки с помощью схем в патенте (например, плавкая вставка!) практически нереализуемо для токов, реальных в магнитно-импульсной обработке металлов.

**Во-вторых**, процесс коммутации цепи вторичной катушки за счёт электрического пробоя весьма нестабилен во времени.

**В-третьих**, синхронизация отключения первичной и включения вторичной катушек в предлагаемой системе практически невозможна.

**В-четвертых**, при требуемом достаточно малом времени отключения первичного тока протекающие электромагнитные процессы должны быть довольно высокочастотными, что соответствует резкому скин-эффекту. Последнее же означает, что индуцированные токи должны будут протекать строго под витками первичной катушки, а её металл будет надёжно экранировать и разделять электромагнитные процессы в полостях заготовка-первичная катушка и первичная-вторичная катушки. Коллапс магнитного поля в указанных полостях будет происходить по разному. Здесь также влияет асимметрия системы относительно плоскости первичной катушки.

**В-пятых**, в результате электрического пробоя промежутка, во вторичной одновитковой катушке образуется замкнутый контур, который способствует протеканию индуцированного электрического тока **высокой частоты** (эл. пробой означает появление высокочастотного электромагнитного поля) [7]. Как было указано выше, высокочастотное поле соответствует резкому скин-эффекту, и индуцированные этим полем токи протекают **строго** под витком. Это значит, что основная составляющая такого поля также сосредоточена под витком. Автор патента вторичную катушку разместил за первичной по отношению к заготовке (см. рис. 1), т.е. её витки будут выступать в качестве экрана для поля, созданного вторичной катушкой и полностью его экранируют (индуцированные поля, и первой, и второй катушки будут зеркальными друг, относительно друга).

Приемлемость данного предложения для реальных технологических процессов в режиме непрерывного производства также весьма сомнительна. Эти сомнения вызывают, например, использование плавких вставок и коммутаций за счёт электрического пробоя и др.

Пробой промежутка 19 (рис. 2) происходит естественным путём, вследствие появления напряжения между его контактами при воздействии индуцированного первичной катушкой электромагнитного поля. Характеристики электрического пробоя нестабильны во времени и в процессе повторения показывают очень большой (по отношению к технике МИОМ) разброс по времени [1]. Это крайне усложняет (делает невозможным) синхронизацию процесса отключения первичной катушки при пробое вторичной.

Очевидно, в силу вышеперечисленных причин индукторная система Г. Фюрта не нашла своего практического воплощения, хотя авторы следующих более поздних и более удачных проектов ссылаются на неё, как на первоисточник в направлении развития инструментов магнитно-импульсного притяжения.

К таковым относятся изобретения инженеров "Boeing Company" Хансена, Хендриксона, Зива и др.

Так в основополагающем предложении описывается аппаратура и метод устранения вмятин с поверхности неферромагнитного проводника. Основной элемент – катушка служит для того, чтобы направить поток электромагнитной энергии в ограниченную область между катушкой и листом с вмятиной. Первоначально катушка запитывается медленно изменяющимся током, а затем быстроизменяющимся противо-

положительным током, чтобы создать силу тяги [8]. Фактически, речь идёт о суперпозиции низкочастотного и высокочастотного сигналов в обмотке инструмента.

Более поздний патент заявляет авторские права на электромагнитный рихтовщик [9]. Заявленный магнитно-импульсный инструмент содержит рабочую катушку из двух частей (внешнюю и внутреннюю). Первый токовый импульс поступает в обе части, чтобы создать электромагнитное поле, которое возбуждает отталкивающую силу, действующую на проводящий объект. Второй токовый импульс, имеющий противоположную полярность по отношению к первому и меньшее время нарастания, поступает во внутреннюю катушку, где уничтожает её электромагнитное поле, и создаёт силу тяги на обрабатываемом объекте. Вся рабочая катушка размещена поверх вмятины в проводящем объекте так, что сила тяги, создаваемая внутренней катушкой, сконцентрирована на вмятине и вытягивает вмятину из листа. Одновременно, сила тяги нейтрализуется отталкивающей силой со стороны внешней катушки. Сила отталкивания стабилизирует объект для облегчения устранения вмятины. Кроме того, для стабилизации объекта обработки отталкивающая сила, создаваемая внешней катушкой, может использоваться для устранения выпуклых деформаций собственно вмятины. В отличие от предыдущего предложения здесь речь идёт о суперпозиции действующих магнитных полей в рабочей зоне инструмента, а не токов в его обмотке.

Приведенные инструменты магнитно-импульсного притяжения нашли реальное практическое применение в работах по реставрации корпусов самолётов. В последующем на базе этих разработок из корпорации Бойнга выделились фирмы "Электроимпакт" и "Флакстроник" (США), специализирующиеся именно на магнитно-импульсных технологиях по притяжению металлов [4, 5]. Общий вид магнитно-импульсных комплексов этих фирм представлен на рис. 3.

Общими недостатками систем магнитно-импульсного притяжения, основанных на суперпозиции низкой и высокой частоты (как токов, так и полей!), являются наличие двух источников энергии, сложность требуемой силовой электроники, большие затраты на требуемые комплектующие и, как следствие, низкая надёжность в эксплуатации и достаточно высокая себестоимость конечного продукта.



Рис. 3. Комплекс магнитно-импульсной рихтовки:  
а – фирмы "Electroimpakt"; б – фирмы "Fluxtronic"

### ВЫВОДЫ

1. Проанализированы истоки возникновения нового направления в МИОМ, как магнитно-импульсное притяжение тонкостенных листовых металлов.
2. Подробно рассмотрен патент Г. Фюрта [6] и обоснована его неработоспособность.
3. Раскрыты источники возникновения американско-

го направления МИОМ в области притяжения металлов. Комплексы магнитно-импульсного притяжения фирм США основаны на суперпозиции низких и высоких частот (как токов, так и полей!).

*Авторы выражают глубокую признательность профессору В.М. Михайлову за инициацию настоящей работы.*

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Батыгин Ю.В., Лавинский В.И., Хименко Л.Т., Импульсные магнитные поля для прогрессивных технологий. – Т. 1. 2-е изд., перераб. и дополн. / Под ред. проф. Ю.В. Батыгина. – Харьков: МОСТ-Торнадо, 2003. – 284 с.
2. Proceedings of the 1-st International Conference on High Speed Forming. March 31/April 1, 2004. Dortmund, Germany. 300 p.
3. Туренко А.Н., Батыгин Ю.В., Гнатов А.В. Импульсные магнитные поля для прогрессивных технологий. Том 3. Теория и эксперимент притяжения тонкостенных металлов импульсными магнитными полями: Монография – Харьков: ХНАДУ, 2009. – 240 с.
4. www.beulentechnik.com.
5. www.electroimpact.com.
6. U.S. Pat. No. 3,196,649, Furth H. Devices for metal-forming by magnetic tension. Patented July 27, 1965.
7. Уайт Д. Электромагнитная совместимость радиоэлектронных средств и непреднамеренные помехи: – М.: Советское радио, 1978. В.2. – 270 с.
8. US.Pat.No.3,998,081, Hansen et al. (the Boeing Company, 1976).
9. US.Pat.No.4,986,102, Hendrickson et al. (the Boeing Company, 1991).

**Bibliography (transliterated):** 1. Batygin Yu.V., Lavinskij V.I., Himenko L.T., Impul'snye magnitnye polya dlya progressivnyh tehnologij. - T. 1. 2-e izd., pererab. i dopoln. / Pod red. prof. Yu.V. Batygina. - Har'kov: MOST-Tornado, 2003. - 284 s. 2. roceedings of the 1-st International Conference on High Speed Forming. March 31/April 1, 2004. Dortmund, Germany. 300 p. 3. urenko A.N., Batygin Yu.V., Gnatov A.V. Impul'snye magnitnye polya dlya progressivnyh tehnologij. Tom 3. Teoriya i eksperiment prityazheniya tonkostennyh metallov impul'snymi magnitnymi polyami: Monografiya - Har'kov: HNADU, 2009. - 240 s. 4. ww.beulentechnik.com. 5. ww.electroimpact.com. 6. .S. Pat. No. 3,196,649, Furth H. Devices for metal-forming by magnetic tension. Patented July 27, 1965. 7. ajt D. 'Elektromagnitnaya sovместimost' radio`elektronnyh sredstv i neprednamerennye pomehi: - M.: Sovetskoe radio, 1978. V.2. - 270 s. 8. S.Pat.No.3,998,081, Hansen et al. (the Boeing Company, 1976). 9. S.Pat.No.4,986,102, Hendrickson et al. (the Boeing Company, 1991).

Поступила 10.01.2010

*Батыгин Юрий Викторович, д.т.н., проф.,  
Харьковский национальный автомобильно-дорожный университет  
61002, Харьков, ул. Петровского, 25, кафедра физики  
тел. (057) 700-368-53, e-mail: batygin48@mail.ru*  
*Гнатов Андрей Викторович, к.т.н., доц.,  
Харьковский национальный автомобильно-дорожный университет  
61002, Харьков, ул. Петровского, 25,  
кафедра "Автомобильная электроника"  
тел. (057) 700-38-52, e-mail: kalifus@yandex.ru*

*Batygin Yu. V., Gnatov A. V.*

### **Historical aspects of thin-wall sheet metals magnetic-pulse attraction technology origination.**

In the article, origination of a new direction in Electrical Magnetic Metal Forming such as magnetic pulse attraction of thin-wall sheet metals is analyzed. Patent No. 3,196,649 (H.Furth, 1965) claim is commented. Practical realization of the suggestion is shown impossible. The idea of utilization of two sources of (high-frequency and low-frequency) electromagnetic field for sheet metals magnetic pulse attraction is analyzed.

**Key words – electrical magnetic metal forming, patent, coil, intensity of a magnetic field, current.**