

**ПРОГРЕССИВНЫЕ МАГНИТНО-ИМПУЛЬСНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ НА ТРАНСПОРТЕ**

*Гнатюк А.В.,*

*Харьковский национальный автомобильно-дорожный университет*

*В рамках статьи проведено обоснование актуальности применения магнитно-импульсных технологий на транспорте. Представлены новые разработки лаборатории электромагнитных технологий ХНАДУ по магнитно-импульсной рихтовке поврежденных элементов кузовных конструкций, и проведена их экспериментальная апробация.*

*Ключевые слова: магнитно-импульсная обработка металлов, индукционная индукторная система, массивный экран, магнитное поле.*

**Постановка проблемы.** Применение прогрессивных магнитно-импульсных технологий на транспорте 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, 2].



Рисунок 1 – Инструменты для рихтовки вмятин в автомобильных кузовах фирмы Veulentechnik AG

**Анализ основных достижений и публикаций.** Концерном «Veulentechnik 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 (рис. 1).

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 [3].

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». Эти фирмы производят магнитно-импульсные комплексы для внешней рихтовки корпусов самолётов (рис. 2).



а

б

в

Рисунок 2 – Магнитно-импульсные комплексы для внешней рихтовки корпусов самолётов: а – фирмы «Electroimpact»; б, в – фирмы «Fluxtronic»

Принцип действия этих комплексов основан на суперпозиции магнитных полей с разными рабочими частотами. В технической реализации это исполняется, как двухчастотная магнитно-импульсная система.

Недостатками таких систем является:

- два источника мощности;
- сложная высокоточная электроника;
- высокая цена.

В европейских странах в последнее время также интенсивно начали применять прогрессивные магнитно-импульсные технологии. Первые образцы комплексов для бесконтактной магнитно-импульсной рихтовки были созданы совместно фирмами «Beulentechnik AG» (штаб-квартира в Швейцарии, Цюрих) и «Tesla» (Чехия, Прага)), рис. 3, но в основу их действенности были положены результаты разработок 2002 ÷ 2004 гг., выполненных в НТУ «ХПИ». [4-6].

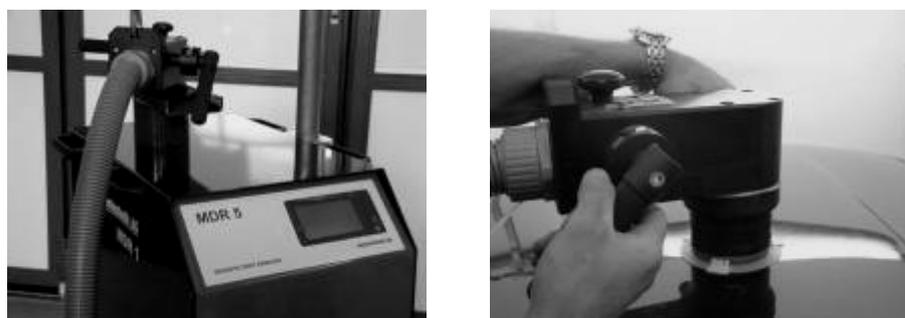
Принцип действия этих комплексов основан на природном притяжении ферромагнитных металлов при понижении рабочей частоты действующего поля. Техническая реализация – магнитно-импульсная система фирмы «Tesla» (Чехия).

Недостатки:

- заложены устаревшие результаты работ 2002 ÷ 2004 гг.;

– низкая эффективность и ограниченная область применения (в частности, только сталь!).

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. Шнеерсона [7] 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.



а

б

Рисунок 3 – Магнитно-импульсная установка фирмы «Tesla»:

а – общий вид; б – установка в работе

Общим недостатком всех вышеперечисленных магнитно-импульсных систем 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.

**Цель настоящей работы** – обоснование актуальности применения магнитно-импульсных технологий на транспорте, на основании обзора публикаций в научной периодике и Интернет-ресурсов. Освещение новых авторских предложений по магнитно-импульсной рихтовке поврежденных элементов кузовных конструкций.

*Лаборатория электромагнитных технологий. Источники мощности*

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 работы

связанные с применением прогрессивных магнитно-импульсных технологий на транспорте ведутся в Харьковском национальном автомобильно-дорожном университете (ХНАДУ), где создана специализированная научно-исследовательская лаборатория электромагнитных технологий [8].

*Задачи, лаборатории электромагнитных технологий:*

1) Создание малогабаритных источников мощности, работающих от сети  $\sim 220\text{В}$  в режиме многократного повторения импульсов силового воздействия.

2) Создание инструментов, трансформирующих естественное магнитно-импульсное отталкивание в притяжение листовых металлов.

3) Практическая направленность работ – создание магнитно-импульсных систем для внешней рихтовки корпусных элементов автомобилей и самолётов без нарушения их защитного покрытия.

*Пути решения, физические обоснования. Авторские предложения.*

1) Создание источников мощности.

Применение схем электронного управления зарядно-разрядными процессами, позволяющими осуществлять непрерывное запасание энергии емкостными накопителями и их разряд в цепи индуктора-инструмента. Как показывают оценки и эксперимент, реальная мощность сети (до  $5 \div 7 \text{ кВт}$ ) позволяет получить частоту повторения импульсов силового воздействия  $\sim$  до 5 Гц.

2) Создание инструментов.

– ИНДУКЦИОННЫЕ ИНДУКТОРНЫЕ СИСТЕМЫ. Основаны на применении закона Ампера о притяжении проводников с одинаково направленными токами. Работа с алюминием и его сплавами.

– ОДНОВИТКОВЫЕ ИНДУКТОРНЫЕ СИСТЕМЫ. Основаны на применении эффекта притяжения ферромагнетика при понижении рабочей частоты действующего поля. Работа с различными сталями. (Обнаружен проф. Батыгиным Ю. В., Лавинским В. И., Хименко Л. Т. в 2004г.)

– 3) КОМБИНИРОВАННЫЕ СИСТЕМЫ. Комбинация закона Ампера и эффекта притяжения ферромагнетика (фактически, это индукционные индукторные системы). Работа с любыми металлами.

*Многократное силовое воздействие* серией импульсов достигается за счёт специальных решений в конструкции магнитно-импульсной установки – источника мощности (рис. 4). Данные решения защищены патентом Украины [9].

Система синхронизации контроля и управления (рис. 4) даёт команду на открытие ключа  $K_1$  в зарядном контуре. При достижении напряжения на конденсаторах заданного уровня, система управления даёт команду на закрытие ключа  $K_1$  и отключение ключа  $K_2$ . После полного разряда конденсаторных батарей на индукторную систему ключ  $K_2$  закрывается и система управления даёт команду на открытие ключа  $K_1$ , и цикл работы повторяется.

Как показали эксперименты, при уровне зарядных напряжений  $\sim 1,5$  кВ работа с сетью позволяет на выходе установки получить частоту повторения генерируемых токовых импульсов порядка  $\sim 3 \div 5$  Гц.

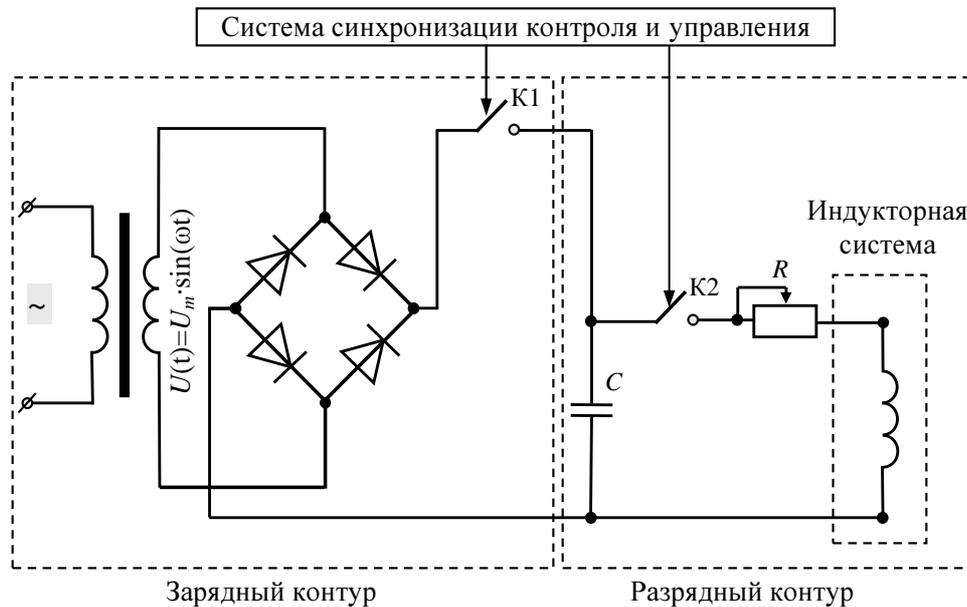


Рисунок 4 – Схема магнитно-импульсной установки для многократного генерирования разрядных импульсов

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.

В лаборатории магнитно-импульсных технологий ХНАДУ создана магнитно-импульсная установка МИУС-2 (рис. 5), которая обладает следующими характеристиками [1, 8, 9]:

- работа от сети  $\sim 220$  В,
- зарядное напряжение до 2 кВ, запасаемая энергия до 2 кДж,
- собственная частота в импульсе  $\sim 7,5$  кГц, в комплекте с согласующими устройствами – импульсными трансформаторами  $\sim 1 \div 2$  кГц,
- частота повторения разрядных импульсов до  $\sim 10$  Гц.
- емкость запасаемой энергии  $C = 1200$  мкФ

МИУС-2 используется как источник мощности для многократного генерирования разрядных импульсов в системах для магнитно-импульсной рихтовки автомобильных кузовов.

#### ИНДУКТОРНЫЕ СИСТЕМЫ

В качестве инструмента в рассматриваемых комплексах для магнитно-импульсной рихтовки используются плоские одновитковые индукторные системы. Одной из разновидностей индукторных систем выступают, так называемые, индукционные индукторные системы, рис. 6, рис. 7. Данные

конструкции индукторных систем являются авторскими разработками специалистов научно-исследовательской лаборатории электромагнитных технологий ХНАДУ и защищены патентами Украины [10, 11]



а



б

Рисунок 5 – МИУС-2: а – общий вид; б – блок управления



а



б



в

Рисунок 6 – Индукторные системы: а – цилиндрическая индукционная индукторная система; б – одновитковый цилиндрический индуктор; в – прямоугольная индукторная система

Принцип действия этих инструментов для магнитно-импульсного притяжения заданных участков поверхности тонкостенных листовых заготовок можно раскрыть с помощью схемы на рис. 7.

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).

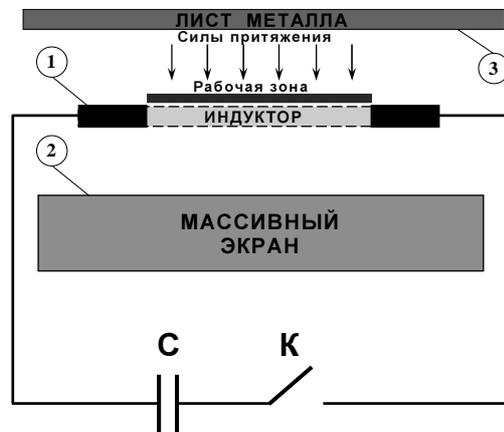


Рисунок 7 – Индукционная индукторная система

Индукционная индукторная система работает следующим образом. Заряженный емкостной накопитель энергии – С, после срабатывания коммутатора – К, разряжается в цепи с подключённым 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 в 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.

**Экспериментальные исследования.** Разработанные в лаборатории магнитно-импульсных технологий ХНАДУ индукторные системы были экспериментально апробированы на МИУС-2.

Для проведения эксперимента были взяты образцы обшивки кузова автомобиля фирмы «Субару» толщиной ~ 1 мм. В ходе эксперимента, сначала, с помощью созданной магнитно-импульсной установки были получены деформации (вмятины) на взятых образцах обшивки кузова автомобиля (рис. 8, позиция № 1). Потом эти образцы перевернули так, чтобы центр образовавшейся лунки совпал с центром отверстия конического индуктора, и произвели втягивание уже существующей лунки в поверхность (рис. 8, позиция № 2). На представленных рисунках видно, что форма образованной и удаленной вмятины (лунки) соответствует форме и размеру конуса индуктора, рис. 6, б.

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

Отличительная особенность экспериментального оборудования и проведенных экспериментов от ранее полученных результатов состоит в следующем.

– Силовое воздействие на заготовку со стороны индукторной системы носило кумулятивный характер в результате многократного повторения (ранее описанный в научной периодике результат был получен при однократном силовом воздействии [2, 8, 12]).

– Получен результат с помощью цилиндрического согласующего устройства – индукторной системы (ранее подобный результат был получен на дисковом согласующем устройстве).

– Операция осуществлена при гораздо меньших энергетических затратах (в 6 ÷ 7 раз) и меньшем напряжении (в 2,5 раза), чем в аналогичных экспериментах НТУ «ХПИ» 2004г. [8, 12]. Данный результат обусловлен многократным силовым воздействием и оптимальным выбором конструкции согласующего устройства.

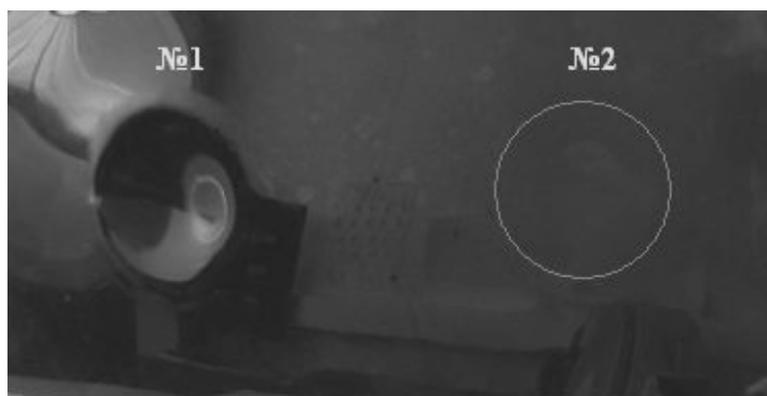


Рисунок 8 – Фрагмент обшивки кузова автомобиля «Субару»: № 1 – деформация образца по форме индуктора; № 2 – контур удаленной вмятины.

Толщина кузовных элементов современных автомобилей, выполненных из различных сталей и алюминиевых сплавов, как правило, не превышает ~ 1 мм. Механическая прочность автомобильных кузовов обеспечивается рёбрами жёсткости с внутренней стороны, где также

располагаются компоненты электрических и электронных сервисных систем, что затрудняет или вообще исключает доступ к поврежденной поверхности изнутри. Поэтому применение магнитно-импульсных технологий для внешнего восстановления поврежденных элементов кузовных конструкций автомобилей является наиболее эффективным.

#### **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. Проиллюстрирована экспериментальная апробация разработанной магнитно-импульсной установки совместно с индуктором с рабочей областью в форме усеченного конуса.

#### **СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Гнатов А. В. Безконтактне магнітно-імпульсне рихтування автомобільних кузовів : Матеріали міжнародної науково-технічної конференції [«Фундаментальні та прикладні проблеми сучасних технологій»], (Тернопіль, 19-21 травня 2010 р.) / А. В. Гнатов. – Тернопіль : Вісник ТДТУ, 2010. – Т.15. – №2. – С. 164-171.

2. Туренко А. Н. Импульсные магнитные поля для прогрессивных технологий. Том 3. Теория и эксперимент притяжения тонкостенных металлов импульсными магнитными полями: монографія / А. Н. Туренко, Ю. В. Батыгин, А. В. Гнатов. – Харків : ХНАДУ, 2009 – 240 с.

3. [www.beulentechnik.com](http://www.beulentechnik.com).

4. Пат. 3998081 США, МКИ В21Д26/14. Electromagnetic dent puller / Karl A. Hansen, Iver Glen Hendricson; Заявл. 17.07.74; Опубл. 21.12.76.

5. [www.electroimpact.com](http://www.electroimpact.com).

6. [www.fluxtronic.com](http://www.fluxtronic.com).

7. Шнеерсон Г. А. Поля и переходные процессы в аппаратуре сверхсильных токов. – Л : Энергоиздат, 1981. – 199 с.

8. Батыгин Ю. В. Экспериментальные исследования магнитно-импульсного притяжения тонкостенных листовых металлов / Ю. В. Батыгин, С. Ф. Головащенко, А. В. Гнатов, Д. О. Смирнов // Електротехніка і електромеханіка. – Харків, 2010. – № 3. – С. 39-41.

9. Пат. № 44933 України. Генератор багаторазових імпульсів струму для магнітно-імпульсної обробки металів / Ю. В. Батигін, О. Ю. Бондаренко, А. В. Гнатов, Г. С. Сериков, Є. А. Чаплигін; заявник та патентовласник Харківський автомобільно-дорожній унів. – Зареєстровано в державному реєстрі патентів України на корисні моделі 26.10.2009 р.

10. Пат. 31751 України, В 21 Д 26/14. Спосіб магнітно-імпульсної обробки металевих заготовок методом притягання до індуктора / Ю. В. Батигін, О. Ю. Бондаренко, Є.О. Чаплигін; заявник та патентовласник Харківський нац. автом.-дорожн. ун-т. – № u200712252; заявл. 05.11.2007; опубл. 25.04.08, Бюл. № 8.

11. Пат. 31752 України, В 21 Д 26/14. Спосіб магнітно-імпульсної обробки металевих заготовок / Батыгин Ю. В., Бондаренко А. Ю., Сериков Г. С.; заявник та патентовласник Харківський нац. автом.-дорожн. ун-т. – № u200712252; заявл. 05.11.2007; опубл. 25.04.08, Бюл. № 8.

12. 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.

**Гнатів А.В.** ПРОГРЕСИВНІ МАГНІТНО-ІМПУЛЬСНІ ТЕХНОЛОГІЇ НА ТРАНСПОРТІ

*В рамках статті проведено обґрунтування актуальності застосування магнітно-імпульсних технологій на транспорті. Представлені нові розробки лабораторії електромагнітних технологій ХНАДУ по магнітно-імпульсному рихтуванню пошкоджених елементів кузовних конструкцій, та проведена їх експериментальна апробація.*

*Ключові слова: магнітно-імпульсна обробка металів, індукційна індукторна система, масивний екран, магнітне поле*

**Gnatov A.V.** PROGRESSIVE MAGNETIC PULSE TECHNOLOGIES FOR TRANSPORT

*The magnetic pulse technologies urgency for transport is proved. Some new elaborations for magnetic pulse straightening of damaged parts of body constructions are presented and their experimental testing was done.*

*Key words: magnetic pulse metal working, induction inductor system, massive screen, magnetic field.*