

## НОВОЕ НАПРАВЛЕНИЕ В МИОМ, СВЯЗАННОЕ С ПРИТЯЖЕНИЕМ ТОНКОСТЕННЫХ ЛИСТОВЫХ МЕТАЛЛОВ. ИСТОРИЯ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ

*У рамках статті проведено короткий огляд основних світових досягнень нового напрямку магнітно-імпульсної обробки металів, пов'язаного з притяганням заданих ділянок листових металів при виробництві та ремонті транспортних засобів. Дано обґрунтування актуальності розвитку даного нового напрямку і розкриті його основні періоджерела. Висвітлено альтернативні методи рихтування пошкоджених листових металів.*

*В рамках статті проведено короткий огляд основних світових досягнень нового напрямку магнітно-імпульсної обробки металів, пов'язаного з притяганням заданих ділянок листових металів при виробництві та ремонті транспортних засобів. Дано обґрунтування актуальності розвитку даного нового напрямку і розкриті його основні періоджерела. Висвітлено альтернативні методи рихтування пошкоджених листових металів.*

### ВВЕДЕНИЕ

К настоящему времени разработки разного рода технических систем для выравнивания заданных участков на поверхности тонкостенных листовых металлов инициированы, в основном, спросом на производственные операции по реставрации корпусов самолётов и кузовных покрытий наземных транспортных средств, в частности автомобилей [1-3].

В первом случае необходимость такой операции обусловлена нарушением аэродинамических характеристик летательного аппарата, вплоть до потери устойчивости в полёте, во втором, не только эстетическими соображениями, и невозможностью дальнейшей эксплуатации транспортного средства с повреждённым кузовом.

Как показывает практика, более 50% повреждённых представляют собой вмятины в зонах с затрудненным или полностью закрытым обратным доступом. Это различные корпусные элементы, крылья, фюзеляжи самолётов. Это двери, капоты, крыши, пороги, бампера автомобилей т.д.

В этой связи особый интерес представляют устройства, позволяющие производить реставрацию повреждений (вмятин) на поверхности с внешней стороны без разборки корпуса или кузова и, по возможности, без нарушения существующего защитного покрытия [3, 4].

Достоверность вышесказанного не требует подтверждения специальными ссылками на первоисточники. Доказательством тому являются хорошо известные не только специалистам разработки концерна "Boeing Company", внедряемые в авиапромышленность США в течение уже последних 40 лет, а также европейских фирм (с многочисленными филиалами по всему миру), специализирующихся на эффективном оборудовании для ремонта современных автомобилей.

**Цель настоящей работы** – обоснование актуальности развития магнитно-импульсной обработки металлов (МИОМ) в направлении, связанном с притяжением заданных участков листовых металлов при производстве и ремонте транспортных средств, краткий обзор основных мировых достижений в этой области.

### ПЕРВОИСТОЧНИКИ НОВОГО НАПРАВЛЕНИЯ МИОМ

Исторически и хронологически, "пионером" в области создания технических систем для внешнего устранения вмятин в листовых проводниках можно считать Соединённые Штаты Америки [5-13]. Но идея использования энергии импульсных магнитных полей

для производственных целей, первым 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 [14-16].

Одно из первых, и без преувеличения можно сказать основополагающих, предложений по созданию устройств магнитно-импульсного притяжения металлов было сформулировано в патенте Н. Furth [5].

Рассматривалось два варианта решения проблемы (рис. 1).

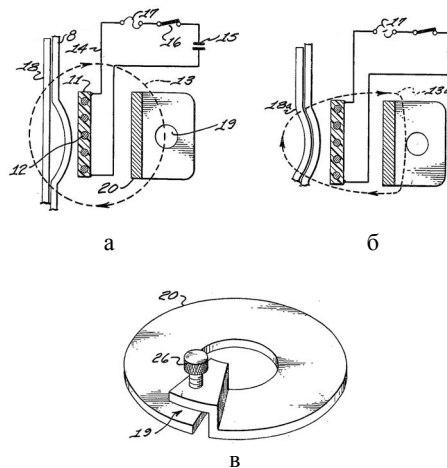


Рис. 1. Общий вид схемы изобретения Н. Furth: а – до перегорания плавкой вставки; б – после перегорания плавкой вставки; в – общий вид вторичной катушки

Первый, помимо основного многовиткового соленоида, предполагал введение дополнительного разомкнутого витка (рис. 1,в), размещённого над вмятиной в тонком металлическом листе. По замыслу автора, основным соленоидом возбуждается медленно нарастающее магнитное поле и при определённой разности потенциалов на границах разреза в разомкнутом витке, должен произойти электрический пробой промежутка, после чего виток становится короткозамкнутым. Протекающий в нём ток возбуждает быстро нарастающее магнитное поле, направление которого противоположно полю основного соленоида. Поле витка и поле соленоида взаимно уничтожа-

ются. Поверх металла с вмятиной результирующая напряжённость обращается в нуль. Поле основного соленоида, проникшее и оставшееся под обрабатываемым металлом, создаёт давление, направленное к индуктору. Под его действием происходит выравнивание деформированного металла.

Физическая сущность данного предложения сводится к возбуждению магнитных полей с разными временными характеристиками. "Медленное" проникает сквозь обрабатываемый объект – тонкий листовый проводник. "Быстрое" не может проникнуть, его назначение состоит в том, чтобы уничтожить поле над листом с вмятиной. В результате "медленное" магнитное поле реализует магнитно-импульсное притяжение обрабатываемого металла к индуктору.

Второй вариант по физической сущности не отличается от первого предложения. Различие состоит в способе получения "медленного" и "быстрого" полей. Здесь автор предлагает использовать два отдельных источника мощности (батареи импульсных конденсаторов) с разными временными характеристиками генерируемых токов. Взаимодействие возбуждаемых полей в зоне обработки приводит к превалированию сил магнитного давления на металл снизу над давлением сверху. Объект обработки притягивается к индуктору.

Работоспособность возможных технических реализаций по предложениям Н. Furth весьма сомнительна. Как следствие, его патент не нашёл своего практического воплощения, хотя авторы следующих более поздних и более удачных проектов ссылаются на него, как на первоисточник в направлении развития систем для магнитно-импульсного притяжения.

К таковым относятся, например, изобретения инженеров "Boeing Company" К. Hansen, I. Hendrickson, Р. Zieve и др. [6-9]. Следует подчеркнуть, что физическая сущность цитируемых разработок принципиально не отличается от физической сущности заявки Н. Furth. Здесь также речь идёт о суперпозиции "медленного" и "быстрого" полей. Но теперь уже авторы говорят о наложении низкочастотного и высокочастотного сигналов в обмотке инструментального индуктора.

Двухчастотные системы для магнитно-импульсного притяжения нашли реальное практическое применение в работах по реставрации корпусов самолётов, рис. 2. В последующем на базе этих разработок из корпорации "Boeing Company" выделились фирмы "Electroimpact" и "Fluxtronic" (США), специализирующиеся именно на магнитно-импульсных технологиях по притяжению металлов [10, 11].



а

б

Рис. 2 Системы магнитно-импульсного устранения вмятин в элементах летательных аппаратов: а – разработка фирмы "Electroimpact"; б – оборудование, предлагаемое компанией "Fluxtronic"

Общими недостатками систем магнитно-импульсного притяжения, основанных на суперпозиции низкой и высокой частот (как токов, так и полей), являются:

- наличие двух источников энергии (магнитно-импульсных установок);
- сложность необходимой высокоточной электроники;
- большие затраты на требуемые комплектующие (как минимум в 2 раза больше в сравнении с традиционными магнитно-импульсными системами);
- низкая надёжность в эксплуатации плюс достаточно высокая себестоимость конечного продукта.

#### АЛЬТЕРНАТИВНЫЕ МЕТОДЫ РИХТОВКИ

В заключение обзора работ американских учёных по реставрации повреждённых металлов для полноты картины следует упомянуть разработки, не связанные с использованием магнитно-импульсных технологий и по разным, но по вполне объективным причинам, не нашедшие своего практического применения.

Так, в [17, 18] описан способ удаления вмятин с помощью магнита (электромагнита). Суть данного способа заключается в том, что к месту с вмятиной на металле подносят магнит (электромагнит), а с противоположной стороны (с обратной стороны поврежденного участка листового металла) подносят металлический объект (шарик, ролик, массивную металлическую подложку) который обладает хорошими магнитными свойствами. Магнит, притягивая металлический объект, удаляет вмятину. В патенте [19] предложен комплекс по удалению вмятин с кузовов автомобилей, в основу которого положено совмещение гидравлики с электромагнитом. В патентах [20] описан пневматический способ и оборудование для удаления вмятин с кузовов авто. Вакуумный способ удаления вмятин описан в патенте [13], (рис. 3), а в монографии [4] авторы описывают способ удаления вмятин с помощью интенсивного нагрева и последующим резким охлаждением участка, где находится вмятина (рис. 4). Авторы патента [21] описывают способ с "прямого пропускания" тока через обрабатываемый металл, принцип действия которого основан на взаимодействии параллельных проводников с токами (закон Ампера), в результате, проводники с одинаково направленными токами притягиваются друг к другу, что и лежит в основе устранения деформаций, и др.

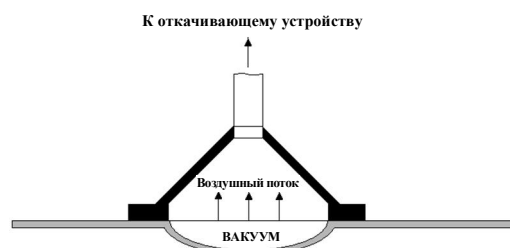


Рис. 3. Схема производственной операции по вакуумному устранению вмятин с поверхности листовых металлов



Рис. 4. Схема производственной операции по устранению вмятин с помощью её интенсивного нагрева и последующего резкого охлаждения

На европейском рынке оборудования для рихтовки и восстановления автомобильных кузовов лидирующее положение занимает концерн "Beulentechnik AG" (главный офис в Швейцарии, филиалы в Германии, Чехии, Австралии) [22-28].

В перечне предлагаемых разработок содержится довольно обширный ряд механических устройств для внешней рихтовки вмятин [22-25]. Среди них выделяются вытяжные приспособления, общими конструктивными элементами которых являются собственно вытягивающий элемент – стержень, одним концом приваренный или приклеенный к металлу по центру удаляемой вмятины, и рычажный механизм, позволяющий постепенное вытягивание свободного конца стержня до уровня реставрируемой поверхности, рис. 5.

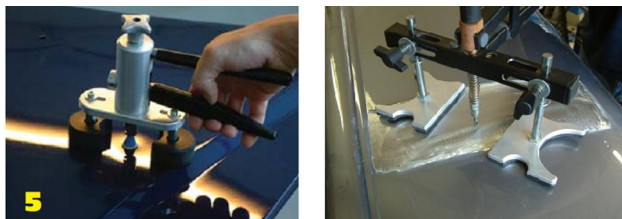


Рис. 5. Механические вытяжные устройства для внешнего устранения вмятин концерна "Beulentechnik AG"

После устранения вмятины сварное или клеевое присоединение убирается. Отреставрированная поверхность подвергается обработке в соответствии с традиционной технологией. Последняя операция – это нанесение защитного лакокрасочного покрытия.

Следует подчеркнуть, что работа с механическими вытяжными устройствами требует высокой квалификации и мастерства исполнителя. Но даже в этом случае практически невозможно обеспечить достаточную надёжность выполняемой операции в смысле сохранности ремонтируемого элемента. Последнее замечание означает, что в процессе реставрации возможно и его разрушение.

#### СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ТЕХНИКИ МИОМ ДЛЯ РЕМОНТА ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ

Значительно более интересными для практики внешнего устранения вмятин в автомобильных кузовах из ферромагнитных сплавов представляются предложения концерна "Beulentechnik AG", названные как "Магнитное приспособление для удаления вмятин", рис. 6 (в оригинале на сайте концерна – "Magnetic Dent Remover") [26-28].

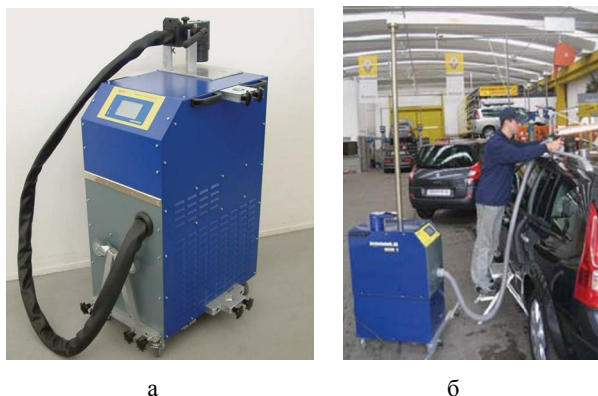


Рис. 6. Магнитное приспособление для удаления вмятин концерна "Beulentechnik AG": а – источник мощности с инструментом; б – приспособление в действии

В патентах [26, 27], полученных в разное время (2006 г., автор – R. Meichtry, 2008 г., авторы – R. Meichtry и I. Kouba), практически, заявлены одни и те же позиции.

В целом, это устройство для удаления вмятин в листовых ферромагнетиках, содержащее ёмкостные накопители энергии, рабочий инструмент и, так называемые, адаптерные приспособления, предназначенные для фиксации рабочего инструмента над удаляемой вмятиной.

Существенной практической новизной здесь обладают лишь способ изготовления многовитковой рабочей катушки инструмента-индуктора и адаптерные приспособления.

Выносной индуктор – это мобильный инструмент, подсоединённый к источнику мощности гибким кабелем, описан в патенте [27].

Принцип магнитно-импульсного притяжения тонкостенных листовых металлов в патентах [26, 27] заимствован из работ, часть из которых была выполнена по заказу концерна "Beulentechnik AG" в Национальном техническом университете "Харьковский политехнический институт" (НТУ "ХПИ") в 2002-2003г.г. [29-31].

Главным фактором, обеспечивающим трансформацию известного отталкивания обрабатываемого объекта в притяжение, то есть, обеспечивающим работоспособность систем, названных в цитируемых патентах как "Магнитное приспособление для удаления вмятин", является выбор рабочих частот действующего поля. Эффект возможен только в низкочастотном режиме, когда:

$$\omega \ll \frac{1}{\mu_0 \cdot \gamma \cdot d^2},$$

где  $\omega = 2\pi f$ ,  $f$  – рабочая частота,  $\mu_0$  – магнитная проницаемость вакуума,  $\gamma$  – удельная электропроводность металла,  $d$  – толщина металла.

Условие низкочастотного режима в виде процитированного неравенства выписано из работы [31], опубликованной в 2004 г. Оно же зафиксировано в патенте [32] с приоритетом от 2004 г. Эта же формула, регламентирующая выбор частотного диапазона действующих полей и обозначенная как (уравнение 2), фигурирует в патентах R. Meichtry и I. Kouba [26, 27].

В настоящее время "Магнитное приспособление для удаления вмятин" так же, как и широкий перечень механических приспособлений, предлагаются авторемонтным компаниям концерном "Beulentechnik AG" на страницах их фирменного сайта [28].

К преимуществам магнитно-импульсных разработок концерна "Beulentechnik AG" в сравнении с реальными аналогами, предлагаемыми американскими производителями "Boeing Company", "Electroimpact" и "Fluxtronic" (США), следует отнести:

- наличие одного источника мощности вместо двух;
- отсутствие сложной высокоточной электроники, необходимой для синхронизации в случае двух источников;
- существенно меньший перечень комплектующих и, наконец, вероятно значительно меньшая себестоимость готового изделия.

К основным недостаткам оборудования "Магнитное приспособление для удаления вмятин" кон-

церна "Beulentechnik AG" следует отнести:

- применение в качестве инструмента многовитковой катушки, которая, судя по описанию в цитируемых патентах, достаточно сложна в изготовлении и, как показал весь практический опыт МИОМ, весьма недолговечна в эксплуатации;

- возможность работы только с ферромагнетиками (отдельные стальные композиции), и невозможность устранения вмятин в немагнитных металлах (алюминиевые сплавы и др.);

- принцип действия основан на устаревших к настоящему времени выводах первых научно-исследовательских поисковых работ 2003-2004 гг., которые не позволяют в достаточной мере реализовать все позитивные возможности магнитно-импульсного притяжения (в дальнейшем будут освещены более эффективные предложения – следствия авторских исследований электрофизической природы протекающих электромагнитных процессов).

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.

Познавательный интерес представляют различные вариации способа, описанного в монографии Г.А. Шнерсона [33], и заключающегося в создании медленно нарастающего магнитного поля, резко прерываемого при достижении заданного уровня напряженности. В результате над обрабатываемым объектом поля нет, а под ним есть (проникшее). 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.

Следует отметить, что физическая сущность медленного нарастания с последующим прерыванием действующего магнитного поля сводится к принципу действия двухчастотных магнитно-импульсных систем, предложенных и создаваемых до настоящего времени американскими производителями соответствующей аппаратуры.

Работы по созданию оборудования и инструментов для магнитно-импульсного притяжения, основанных на иных физических концепциях, были начаты в Национальном техническом университете НТУ "ХПИ". В настоящее время эти работы продолжены и ведутся также в Харьковском национальном автомобильно-дорожном университете (ХНАДУ), где при кафедре физики создана специализированная научно-исследовательская лаборатория электромагнитных технологий [34-38].

Первые разработки устройств магнитно-импульсного притяжения были основаны на создании пространственно-временного распределения действующих полей в индукторной системе, обеспечивающего нуль магнитного потока в пространстве между тонкостенными листовыми металлами. Инструменты такого принципа действия были названы авторами предложения "сложными индукторными системами". Сущность предложения состоит в следующем. Между двумя источниками магнитного поля (например, плоскими соленооидами) помещаются два листовых металла. Варьирование амплитуд внешних полей в соответствии с

электрофизическими характеристиками металлов позволяет получить нуль магнитного потока в пространстве между ними. За счёт сил давления, действующих со стороны соленоидов, листовые металлы испытывают взаимное притяжение [29].

Для расширения круга производственных задач, требующих выноса инструмента к обрабатываемым объектам, была создана магнитно-импульсная установка с выносным индуктором. Данная разработка была защищена патентом 1996 года [30].

Результаты теоретических и экспериментальных исследований электромагнитных процессов в "сложных индукторных системах" описаны в публикациях [29, 30].

Резюмируя первые попытки трансформировать естественное магнитно-импульсное отталкивание в "искусственное" притяжение с помощью "сложных индукторных систем", следует отметить, что, как инструменты для притяжения, они не нашли практического применения. Их использование оказалось целесообразным для штамповки рисунка печатных плат в электротехнических устройствах и для холодной сварки металлических элементов сборных конструкций (при встречном движении скорость соударения возрастает почти в 2 раза) [30].

Более перспективными для магнитно-импульсного притяжения тонкостенных листовых металлов следует считать разработки, начатые в 2002г. в ХПИ и проводимые по настоящее время в ХНАДУ [34-38].

## ВЫВОДЫ

1. Проведен краткий обзор основных мировых достижений нового направления магнитно-импульсной обработки металлов связанного с притяжением заданных участков листовых металлов при производстве и ремонте транспортных средств.

2. Дано обоснование актуальности развития магнитно-импульсной обработки металлов в новом направлении.

3. Раскрыты основные первоисточники нового направления МИОМ.

4. Приведены альтернативные методы рихтовки и реставрации повреждённых листовых металлов.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Батыгин Ю.В. Притяжение тонкостенных металлических листов магнитным полем одновиткового индуктора / Ю.В. Батыгин, А.В. Гнатов, С.А. Циголева // Электричество. – М., 2011. – № 4. – С. 55-62.
2. Батыгин Ю. В. Цилиндрический виток индуктора с разрезом как инструмент для магнитно-импульсной обработки металлов / Ю.В. Батыгин, А.В. Гнатов // Электричество. – М., 2011. – № 12. – С. 53-59.
3. Туренко А.Н. Импульсные магнитные поля для прогрессивных технологий. Теория и эксперимент притяжения тонкостенных металлов импульсными магнитными полями / А.Н. Туренко, Ю.В. Батыгин, А.В. Гнатов. – Т.3, – Харьков: ХНАДУ, 2009. – 240 с.
4. Батыгин Ю. В. Импульсные магнитные поля для прогрессивных технологий. Магнитно-импульсные технологии бесконтактной рихтовки кузовных элементов автомобиля: монография / Ю.В. Батыгин, А.В. Гнатов, Е.А. Чаплыгин. – LAP LAMBERT Academic Publishing, 2012 – 242 с.
5. Пат. 3,196,649 USA (США). Devices for metal-forming by magnetic tension / Harold P. Furth; заявитель и патентообладатель Advanced Kinetiks, Inc., Costa Mesa, California. – № 173,680; заявл. 16.02.1962; опубл. 27.07.1965.
6. Пат. 3,998,081 USA (США), B21D 26/14. Electromagnetic

- dent puller / Hansen Karl A., Hendrickson Glen I.; заявитель и патентообладатель The Boeing Company, Seattle, Wash. – № 489,290; заявл. 17.07.1974; опубл. 21.12.1976.
7. Пат. 4,148,091 USA (США), H02M 5/40. Electromagnetic force machine with universal portable power supply / Hansen Karl A., Hendrickson Glen I.; заявитель и патентообладатель The Boeing Company, Seattle, Wash. – № 864,735; заявл. 27.12.1977; опубл. 03.04.1979.
8. Пат. 4,986,102 USA (США), B21D 26/14. Electromagnetic dent remover with tapped work coil / Hendrickson Glen I., Hansen Karl A.; заявитель и патентообладатель The Boeing Company, Seattle, Wash. – № 355,563; заявл. 23.05.1989; опубл. 22.01.1991.
9. Пат. 5,046,345 USA (США), B21D 1/06. Power supply for electromagnetic proof load tester and dent remover / Zieve Peter B.; заявитель и патентообладатель Peter B. Zieve. – № 451,106; заявл. 15.12.1989; опубл. 10.09.1991.
10. Electromagnetic Dent Removal // Матеріали сайту – 2009. – Режим доступу: <http://www.electroimpact.com/EMAGDR/overview.asp>.
11. Need an electromagnetic dent remover on hand. Fluxtronic offers the best: the Portable Flux 3 dent remover // Матеріали сайту – 2009. – Режим доступу: <http://www.fluxtronic.com/product.php>.
12. Пат. 4,754,637 USA (США), B21D 1/12. Electromagnetic dent removing tool / Danny W. O'Dell; заявитель и патентообладатель Danny W. O'Dell, Calument City. – № 38/622; заявл. 14.04.1987; опубл. 05.07.1988.
13. Пат. 6,538,250 B1 USA (США), B21D 1/12. Apparatus and method for vacuum dent repair / Borchert Donald Paul; заявитель и патентообладатель Dent Defyer Inc. – № 09/707,562; заявл. 06.11.2000; опубл. 25.03.2003.
14. Kapitza P. L. A method of Producing Strong Magnetic Fields / P. L. Kapitza // II Proc. of Royal Soc. Ser. A – 1924. – vol.105 – P.691.
15. Kapitza P. L. Further Developments of the Method of Obtaining Strong Magnetic Fields / P. L. Kapitza // II Proc. of Royal Soc. Ser. A. – 1927. – vol.115. – N.A.777 – P.658.
16. Баранов М.И. Петр Леонидович Капица – основоположник техники сильных импульсных магнитных полей / М. И. Баранов // Электротехника і електромеханіка. – 2005. – № 3. – С. 5-8.
17. Пат. 7,124,617 B2 USA (США), B21J 15/24 B21D 5/00. Magnetic dent removal device, method and kit / Eric Richard Satterlee, Wayne Tanabe; заявитель и патентообладатель Eric Richard Satterlee, Wayne Tanabe, Hickory, Arlington Heights. – № 10/341,611; заявл. 14.01.2003; опубл. 24.10.2006.
18. Пат. 7,143,627 B2 USA (США), B21J 15/24. Apparatus and method for removing dents from metal / James M. Akins; заявитель и патентообладатель James M. Akins, Dublin. – № 11/138,057; заявл. 26.05.2005; опубл. 05.12.2006.
19. Пат. 4,252,008 USA (США), B21D 26/14. Apparatus for removing dents from automobile bodies and the like / William L. Dibbens; заявитель и патентообладатель William L. Dibbens. – № 12/648; заявл. 16.02.1979; опубл. 24.02.1981.
20. Пат. 6,014,885 USA (США), B21D 1/06. Dent removal apparatus and method of operation / Gerald J. Griffaton; заявитель и патентообладатель Gerald J. Griffaton, Berwyn. – № 08/958,424; заявл. 27.10.1997; опубл. 18.01.2000.
21. Пат. 74909 Україна, МПК В 21 D 26/14. Спосіб магнітно-імпульсної обробки тонкостінних металевих заготовок / Батигін Ю.В., Лавінський В.І., Хавін В.Л.; заявитель и патентообладатель ХПІ. – № 2004010542; заявл. 26.01.04; опубл. 15.02.06, Бюл. № 2.
22. Пат. EP 1341621 B1, Germany B21D 1/06. Planishing device and method / Meichtry Ralph; заявитель и патентообладатель Rentsch & Partner. – № 00977335.9; заявл. 05.12.2000; опубл. 13.06.2002.
23. Пат. 6,874,347 B2, USA (США) B21D 1/06. Planishing device and method / Meichtry Ralph; заявитель и патентообладатель Meichtry Ralph. – № 10/258,397; заявл. 13.01.2002; опубл. 05.04.2005.
24. Пат. WQ 03/008125 A1, B21D 1/06. Device and method for removing the dents in sheet steel parts / Meichtry Ralph; заявитель и патентообладатель IP & T Rentsch & Partner. – № 1354/01; заявл. 19.07.2002; опубл. 30.01.2003.
25. Пат. EP 1459814 B1, Germany B21D 1/06. Device for removing dents from sheet metal parts / Meichtry Ralph; заявитель и патентообладатель Rentsch Rudolf A., Rentsch & Partner. – № 04006194.7; заявл. 17.03.2003; опубл. 16.03.2004.
26. Пат US WO/2006/119661. Dent removing method and device / Meichtry Ralph, Kouba Ivan; заявитель и патентообладатель Rentsch & Partner. – № 60/680,303; заявл. 11.05.2006; опубл. 16.11.2006.
27. Пат. US 2008/0163661 A1 USA (США). Dent removing method and device / Meichtry Ralph, Kouba Ivan; заявитель и патентообладатель Ostrolenk faber gerb & soffon, New York. – № 11/910,788; заявл. 11.05.2006; опубл. 10.07.2008.
28. Welcome to BETAG Innovation // Матеріали сайту – 2012. – Режим доступу: [www.beulentechnik.com](http://www.beulentechnik.com).
29. Батыгин Ю.В. Магнитное поле в системе из двух соленоидов, разделенных тонкостенными проводниками. / Батыгин Ю. В., Л.Т. Хищенко, И.И. Щетинская // Техническая электродинамика. К.:1990. – № 4. – С. 3-8.
30. Батыгин Ю. В. Импульсные магнитные поля для прогрессивных технологий / Ю.В. Батыгин, В.И. Лавинский, Л.Т. Хищенко. – Т.1; под ред. Ю.В. Батыгина. – [2-е изд.]. – Харьков: МОСТ-Торнадо, 2003. – 284 с.
31. Batygin Yu. V. Direction Change of the Force Action upon Conductor under Frequency Variation of the Acting magnetic Field / Yu.V. Batygin, V.I. Lavinsky, L.T. Khimenko // Proceedings of the 1 – st International Conference on High Speed Metal Forming. March 31/April 1, 2004. Dortmund, Germany. P. 157-160.
32. Пат. 75676 Україна, МПК В 21 D 26/14. Спосіб магнітно-імпульсної обробки тонкостінних металевих заготовок / Батигін Ю.В., Лавінський В.І., Хищенко Л.Т.; заявитель и патентообладатель ХПІ. – № 2004010512; заявл. 23.01.04; опубл. 15.05.06, Бюл. № 5.
33. Шнеерсон Г.А. Поля и переходные процессы в аппаратуре сверх сильных токов / Г.А. Шнеерсон. – [2-е изд.] – М.: Энергоатомиздат, 1992. – 200с.
34. Лаборатория электромагнитных технологий // Матеріали сайту – 2012. <http://electromagnetic.comoj.com>.
35. Батыгин Ю.В. Физические основы создания систем для магнитно-импульсного притяжения тонкостенных листовых металлов / Ю.В. Батыгин, А.В. Гнатов, Г.С. Сериков, Е.А. Чаплигин // Автомобильный транспорт. – Харків: ХНАДУ, 2009. – Вып. 25. – С. 181-185.
36. Батыгин Ю.В. Эксперименты по притяжению заданных участков тонкостенных стальных пластин / Ю.В. Батыгин, А.В. Гнатов, Д.О. Смирнов // Вестник ХНАДУ. – Харьков: ХНАДУ, 2010. – Вып. 49. – С. 112-115.
37. Гнатов А.В. Магнитно-импульсная установка – источник мощности, обеспечивающий серийный режим генерации разрядных импульсов / А.В. Гнатов, А.М. Дробинин // Вестник ХНАДУ.– Харьков: ХНАДУ, 2011. – Вып. 55. – С. 130-134.
38. Батыгин Ю.В. Расчет электродинамических процессов в согласующем устройстве цилиндрического типа с двумя разомкнутыми вторичными витками / Ю.В. Батыгин, А.В. Гнатов, И.С. Трунова // Вестник ХНАДУ. – Харьков: ХНАДУ, 2012. – В. 56. – С. 30-36.
39. Батыгин Ю.В. Теория и эксперимент магнитно-импульсного притяжения/ отгалкивания тонкостенных листовых ферромагнетиков / Ю.В. Батыгин, А.В. Гнатов // Электричество. – М., 2012. – № 8. – С. 58-65.
40. Прогресивні технології в автотранспортних засобах. – Ч.2: Фізичні основи магнітно-імпульсних технологій безконтактного рихтування кузовних елементів автомобіля.: навч. посіб / [А.В. Гнатов, Ю.В. Батигін, С.А. Чаплигин, І.С. Трунова] – Харків: ХНАДУ, 2011. – Ч. 2. – 176 с.

**Bibliography (transliterated):** 1. Batygin Yu.V. Prityazhenie tonkostennykh metallicheskih listov magnitnym polem odnovitkovogo induktora / Yu.V. Batygin, A.V. Gnatov, S.A. Schigoleva // `Elektrichestvo. - M., 2011. - № 4. - S. 55-62. 2. Batygin Yu. V. Cilindricheskij vitok induktora s razrezom kak instrument dlya magnitno-impul'snoj obrabotki metallov / Yu.V. Batygin, A.V. Gnatov // `Elektrichestvo. - M., 2011. - № 12. - S. 53-59. 3. Turenko A.N. Impul'snye magnitnye polya dlya progressivnykh tehnologij. Teoriya i `eksperiment prityazheniya tonkostennykh metallov impul'snymi magnitnymi polyami / A.N. Turenko, Yu.V. Batygin, A.V. Gnatov. - T.3, - Har'kov: HNADU, 2009. - 240 s. 4. Batygin Yu. V. Impul'snye magnitnye polya dlya progressivnykh tehnologij. Magnitno-impul'snye tehnologii beskontaktnoj rihtovki kuzovnykh `elementov avtomobilya: monografiya / Yu.V. Batygin, A.V. Gnatov, E.A. Chaplygin. - LAP LAMBERT Academic Publishing, 2012 - 242 s. 5. Pat. 3,196,649 USA (SShA). Devices for metal-forming by magnetic tension / Harold P. Furth; zayavitel' i patentoobladatel' Advanced Kinetiks, Inc., Costa Mesa, California. - № 173,680; zayavl. 16.02.1962; opubl. 27.07.1965. 6. Pat. 3,998,081 USA (SShA), B21D 26/14. Electromagnetic dent puller / Hansen Karl A., Hendrickson Glen I.; zayavitel' i patentoobladatel' The Boeing Company, Seattle, Wash. - № 489,290; zayavl. 17.07.1974; opubl. 21.12.1976. 7. Pat. 4,148,091 USA (SShA), H02M 5/40. Electromagnetic force machine with universal portable power supply / Hansen Karl A., Hendrickson Glen I.; zayavitel' i patentoobladatel' The Boeing Company, Seattle, Wash. - № 864,735; zayavl. 27.12.1977; opubl. 03.04.1979. 8. Pat. 4,986,102 USA (SShA), B21D 26/14. Electromagnetic dent remover with tapped work coil / Hendrickson Glen I., Hansen Karl A.; zayavitel' i patentoobladatel' The Boeing Company, Seattle, Wash. - № 355,563; zayavl. 23.05.1989; opubl. 22.01.1991. 9. Pat. 5,046,345 USA (SShA), B21D 1/06. Power supply for electromagnetic proof load tester and dent remover / Zieve Peter B.; zayavitel' i patentoobladatel' Peter B. Zieve. - № 451,106; zayavl. 15.12.1989; opubl. 10.09.1991. 10. Electromagnetic Dent Removal // Materiali sajtu - 2009. - Rezhim dostupu: <http://www.electroimpact.com/EMAGDR/overview.asp>. 11. Need an electromagnetic dent remover on hand. Fluxtronic offers the best: the Portable Flux 3 dent remover // Materiali sajtu - 2009. - Rezhim dostupu: <http://www.fluxtronic.com/product.php>. 12. Pat. 4,754,637 USA (SShA), B21D 1/12. Electromagnetic dent removing tool / Danny W. O'Dell; zayavitel' i patentoobladatel' Danny W. O'Dell, Calumet City. - № 38/622; zayavl. 14.04.1987; opubl. 05.07.1988. 13. Pat. 6,538,250 V1 USA (SShA), B21D 1/12. Apparatus and method for vacuum dent repair / Borchert Donald Paul; zayavitel' i patentoobladatel' Dent Defyer Inc. - № 09/707,562; zayavl. 06.11.2000; opubl. 25.03.2003. 14. Kapitza P. L. A method of Producing Strong Magnetic Fields / P. L. Kapitza // II Proc. of Royal Soc. Ser. A - 1924. - vol.105 - P.691. 15. Kapitza P. L. Further Developments of the Method of Obtaining Strong Magnetic Fields / P. L. Kapitza // II Proc. of Royal Soc. Ser. A - 1927. - vol.115. - P.658. 16. Baranov M.I. Petr Leonidovich Kapica - osnovopolozhnik tehniki sil'nykh impul'snykh magnitnykh polej / M. I. Baranov // Elektrotehnika i elektromehaniika. - 2005. - № 3. - S. 5-8. 17. Pat. 7,124,617 B2 USA (SShA), B21J 15/24 B21D 5/00. Magnetic dent removal device, method and kit / Eric Richard Satterlee, Wayne Tanabe; zayavitel' i patentoobladatel' Eric Richard Satterlee, Wayne Tanabe, Hickory, Arlington Heights. - № 10/341,611; zayavl. 14.01.2003; opubl. 24.10.2006. 18. Pat. 7,143,627 B2 USA (SShA), B21J 15/24. Apparatus and method for removing dents from metal / James M. Akins; zayavitel' i patentoobladatel' James M. Akins, Dublin. - № 11/138,057; zayavl. 26.05.2005; opubl. 05.12.2006. 19. Pat. 4,252,008 USA (SShA), B21D 26/14. Apparatus for removing dents from automobile bodies and the like / William L. Dibbens; zayavitel' i patentoobladatel' William L. Dibbens. - № 12/648; zayavl. 16.02.1979; opubl. 24.02.1981. 20. Pat. 6,014,885 USA (SShA), B21D 1/06. Dent removal apparatus and method of operation / Gerald J. Griffaton; zayavitel' i patentoobladatel' Gerald J. Griffaton, Berwyn. - № 08/958,424; zayavl. 27.10.1997; opubl. 18.01.2000. 21. Pat. 74909 Ukraina, MPK B 21 D 26/14. Sposib magnitno-impul'snoj obrabotki tonkostennykh metallevih zagotovok / Batigin Yu.V., Lavinskij V.I., Havin V.L.; zayavitel' i patentoobladatel' HPI. - № 2004010542; zayavl. 26.01.04; opubl. 15.02.06, Byul. № 2. 22. Pat. EP 1341621 B1, Germany B21D 1/06. Planishing device and method / Meichtry Ralph; zayavitel' i patentoobladatel' Rentsch & Partner. - № 00977335.9; zayavl. 05.12.2000; opubl. 13.06.2002. 23. Pat. 6,874,347 V2, USA (SShA) B21D 1/06. Planishing device and method / Meichtry Ralph; zayavitel' i patentoobladatel' Meichtry Ralph. - № 10/258,397; zayavl. 13.01.2002; opubl. 05.04.2005. 24. Pat. WQ 03/008125 A1, B21D 1/06. Device and method for removing the dents in sheet steel parts / Meichtry Ralph; zayavitel' i patentoobladatel' IP & T Rentsch & Partner. - № 1354/01; zayavl. 19.07.2002; opubl. 30.01.2003. 25. Pat.EP 1459814 B1, Germa-

ny B21D 1/06. Device for removing dents from sheet metal parts / Meichtry Ralph; zayavitel' i patentoobladatel' Rentsch Rudolf A., Rentsch & Partner. - № 04006194.7; zayavl. 17.03.2003; opubl. 16.03.2004. 26. Pat US WO/2006/119661. Dent removing method and device / Meichtry Ralph, Kouba Ivan; zayavitel' i patentoobladatel' Rentsch & Partner. - № 60/680,303; zayavl. 11.05.2006; opubl. 16.11.2006. 27. Pat. US 2008/0163661 A1 USA (SShA). Dent removing method and device / Meichtry Ralph, Kouba Ivan; zayavitel' i patentoobladatel' Ostrolenk faber gerb & soffon, New York. - № 11/910,788; zayavl. 11.05.2006; opubl. 10.07.2008. 28. Welcome to BETAG Innovation // Materiali sajtu - 2012. - Rezhim dostupu: [www.beulentechnik.com](http://www.beulentechnik.com) <<http://www.beulentechnik.com>>. 29. Batygin Yu.V. Magnitnoe pole v sisteme iz dvuh solenoidov, razdelennykh tonkostennymi provodnikami. / Batygin Yu. V., L.T. Himenko, I.I. Schetinskaya // Tehnicheskaya `elektrodinamika. K.:1990. - № 4. - S. 3-8. 30. Batygin Yu. V. Impul'snye magnitnye polya dlya progressivnykh tehnologij / Yu.V. Batygin, V.I. Lavinskij, L.T. Himenko. - T.1; pod red. Yu.V. Batygina. - [2-e izd.]. - Har'kov: MOST-Tornado, 2003. - 284 s. 31. Batygin Yu. V. Direction Change of the Force Action upon Conductor under Frequency Variation of the Acting magnetic Field / Yu.V. Batygin, V.I. Lavinsky, L.T. Khimenko // Proceedings of the 1 - st International Conference on High Speed Metal Forming. March 31/April 1, 2004. Dortmund, Germany. P. 157-160. 32. Pat. 75676 Ukraina, MPK B 21 D 26/14. Sposib magnitno-impul'snoj obrabotki tonkostennykh metallevih zagotovok / Batigin Yu.V., Lavinskij V.I., Himenko L.T.; zayavitel' i patentoobladatel' HPI. - № 2004010512; zayavl. 23.01.04; opubl. 15.05.06, Byul. № 5. 33. Shneerson G.A. Polya i perehodnye processy v apparature sverh sil'nykh tokov / G.A. Shneerson. - [2-e izd.] - M.: `Energoatomizdat, 1992. - 200s. 34. Laboratoriya `elektromagnitnykh tehnologij // Materiali sajtu - 2012. <<http://electromagnetic.comoj.com>>. 35. Batygin Yu.V. Fizicheskie osnovy sozdaniya sistem dlya magnitno-impul'snogo prityazheniya tonkostennykh listovykh metallov / Yu.V. Batygin, A.V. Gnatov, G.S. Serikov, E.A. Chaplygin // Avtomobil'nyj transport. - Har'kov: HNADU, 2009. - Vyp. 25. - S. 181-185. 36. Batygin Yu.V. `Eksperimenty po prityazheniyu zadannykh uchastkov tonkostennykh stal'nykh plastin / Yu.V. Batygin, A.V. Gnatov, D.O. Smirnov // Vestnik HNADU. - Har'kov: HNADU, 2010. - Vip. 49. - S. 112-115. 37. Gnatov A.V. Magnitno-impul'snaya ustanovka - istochnik moschnosti, obespechivayuschij serijnyj rezhim generacii razryadnykh impul'sov / A.V. Gnatov, A.M. Drobinin // Vestnik HNADU.- Har'kov: HNADU, 2011. - Vyp. 55. - S. 130-134. 38. Batygin Yu.V. Raschet `elektrodinamicheskikh processov v soglasuyuschem ustrojstve cilindricheskogo tipa s dvumya razomknutyimi vtornichnymi vitkami / Yu.V. Batygin, A.V. Gnatov, I.S. Trunova // Vestnik HNADU. - Har'kov: HNADU, 2012. - V. 56. - S. 30-36. 39. Batygin Yu.V. Teoriya i `eksperiment magnitno-impul'snogo prityazheniya/ ottalkivaniya tonkostennykh listovykh ferromagnetikov / Yu.V. Batygin, A.V. Gnatov // `Elektrichestvo. - M., 2012. - № 8. - S. 58-65. 40. Progressivni tehnologii v avtotransportnih zasobah. - Ch.2: Fizichni osnovi magnitno-impul'snykh tehnologij bezkontaktnogo rihtuvannya kuzovnykh elementiv avtomobilya.: navch. posib / [A.V. Gnatov, Yu.V. Batygin, E.A. Chaplygin, I.S. Trunova] - Har'kov: HNADU, 2011. - Ch. 2. - 176 s.

Поступила 24.12.2012

Гнатов Андрей Викторович, к.т.н., доц.

Харьковский национальный автомобильно-дорожный университет, кафедра физики  
61002, Харьков, ул. Петровского, 25, ХНАДУ,  
тел. (057) 707-37-27, e-mail: kalifus@yandex.ru

Gnatov A.V.

### **A new trend in magnetic-pulse metal working associated with thin-walled sheet metal attraction.**

#### **History and development prospects.**

Within the scope of this article, a summary is presented on the main world achievements of the new trend in magnetic-pulse metal working associated with attraction of specified sheet metal sections in vehicle production and repair. The importance of the new trend has been justified, its basic sources disclosed. Alternative straightening methods for damaged sheet metals are given.

**Key words – magnetic-pulse metal working, magnetic pulse installation, straightening, dents removal, repair of vehicles, inductor.**