



МАГНИТНО-ИМПУЛЬСНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ДЛЯ ВОССТАНОВЛЕНИЯ КОРПУСНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ. Часть 1. АКТУАЛЬНОСТЬ И ПЕРСПЕКТИВНОСТЬ НАПРАВЛЕНИЯ МИОМ. ПУТИ РЕШЕНИЯ

Батыгин Ю.В., Гнатов А.В., Трунова И.С.

Харьковский национальный автомобильно-дорожный университет

В статье проведено обоснование актуальности развития магнитно-импульсной обработки металлов в новом направлении – притяжение заданных участков листовых металлов. Дан краткий обзор основных мировых достижений. Проведен анализ электродинамических процессов при притяжении ферромагнетиков, представлено оборудование, экспериментальные исследования и практическая апробация новых авторских предложений по внешней бесконтактной магнитно-импульсной рихтовке корпусных элементов транспортных средств.

Ключевые слова: магнитно-импульсная обработка металлов, магнитно-импульсная установка, бесконтактная рихтовка, удаление вмятин, индуктор.

Цель изложения – обоснование актуальности развития магнитно-импульсной обработки металлов (аббревиатура – МИОМ) в направлении, связанном с притяжением заданных участков листовых металлов, краткий обзор основных мировых достижений и освещение новых авторских предложений в этой области.

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.

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

Как показывает практика, более 50 % повреждений 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.

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 более 40-ка лет, а также европейских фирм (с многочисленными филиалами по всему миру), специализирующихся на эффективном оборудовании для ремонта современных автомобилей.

Исторические аспекты развития магнитно-импульсных технологий. Исторически и хронологически, «пионером» в области создания технических систем для внешнего устранения вмятин в листовых проводниках можно считать Соединённые Штаты Америки [1-9].

Одно из первых, и без преувеличения можно сказать основополагающих, предложений по созданию устройств магнитно-импульсного притяжения металлов было сформулировано в патенте Н.Furth [1].

Рассматривалось два варианта решения проблемы (рис. 1).

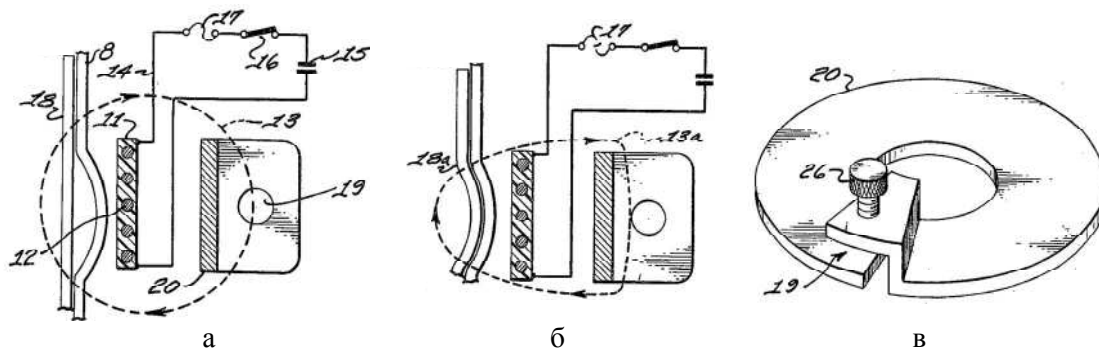


Рисунок 1 – Общий вид схемы изобретения Н. Furth: а – до перегорания плавкой вставки; б – после перегорания плавкой вставки; в – общий вид вторичной катушки

Первый, помимо основного многовиткового соленоида, предполагал введение дополнительного разомкнутого витка (рис. 1в), 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 уничтожаются. Поверх металла с вмятиной результирующая напряжённая 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 листовой 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, P. Zieve и др. [2-5]. 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 инструмента-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 [6, 7].



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 сильноточной 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.

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.



а



б

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

К таковому относится предложение применять электромагниты в сочетании с ферромагнитной подложкой [8]. По замыслу автора электромагнит помещается над вмятиной, а с противоположной стороны реставрируемого металлического листа (со стороны выпуклости) подводится ферромагнетик. Последний притягивается полем электромагнита и давлением собственной массы выравнивает поверхность листа. Автором патента [9] предложено использовать вакуумную технику. В области вмятины создаётся атмосферное разрежение. Его втягивающее силовое действие приводит к устранению повреждения.

В научной периодике обсуждалось также предложение использовать нагрев металла в области вмятины с последующим быстрым локальным охлаждением. Резкий переход из одного теплового состояния в противоположное, по мнению участников дискуссии, должен привести к появлению внутренних механических напряжений, под действием которых должно произойти выравнивание деформированного листа. Дальше обсуждений дело не пошло, проект оказался практически не реализуемым.

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) [10-17].

В перечне предлагаемых разработок содержится довольно обширный ряд механических устройств для внешней рихтовки вмятин [10-13]. Среди них выделяются вытяжные приспособления, общими конструктивными элементами которых являются собственно вытягивающий элемент – стержень, одним концом приваренный или приклеенный к металлу по центру устраняемой вмятины, и рычажный механизм, позволяющий постепенное вытягивание свободного конца стержня до уровня реставрируемой поверхности, рис. 3. После устранения вмятины сварное или клеевое присоединение убирается. Отреставрированная поверхность подвергается обработке в



соответствии с традиционной технологией. Последняя операция – это нанесение защитного лакокрасочного покрытия.

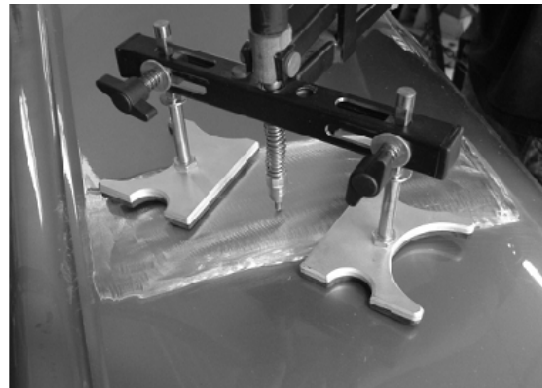


Рисунок 3 – Механические вытяжные устройства для внешнего устранения вмятин концерна «Beulentechnik AG»

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.

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. 4 (в оригинале на сайте концерна – «Magnetic Dent Remover») [14-16].

В патентах [14, 15], полученных в разное время (2006 г., автор – R. Meichtry, 2008 г., авторы – R. Meichtry и I. Kouba), практически, заявлены одни и те же позиции.



а



б

Рисунок 4 – Магнитное приспособление для удаления вмятин концерна «Beulentechnik AG»: а – источник мощности с инструментом; б – приспособление в действии

В целом, это устройство для удаления вмятин в листовых ферромагнетиках, содержащее емкостные 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 [19].

Принцип магнитно-импульсного притяжения тонкостенных листовых металлов в патентах [14, 15] заимствован из работ, часть из которых была выполнена по заказу концерна «Beulentechnik AG» в Национальном техническом университете «Харьковский политехнический институт» в 2002-2003 г. г. [20-22].

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

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

где $\omega = 2\pi \cdot f$; f – рабочая частота; μ_0 – магнитная проницаемость вакуума; γ – удельная электропроводность металла; d – толщина металла.

Условие низкочастотного режима в виде процитированного неравенства выписано из работы [19], опубликованной в 2004 г. Оно же зафиксировано в патенте [21] 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 [13, 14].

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 [16].

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» концерна «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.



Так, например, в работе [19] предложена схема раздачи полых труб внешним магнитным полем, временная конфигурация которого предполагает переменное действие сжимающих и расширяющих электродинамических усилий. Внутри трубы размещается жёсткая оправка, механически препятствующая её сжатию. Степени свободы в расширении приводят, в конечном итоге, к раздаче полой трубы в соответствии с производственным заданием.

По меньшей мере, познавательный интерес представляют различные вариации способа, описанного в монографии Г.А. Шнеерсона [17], и заключающегося в создании медленно нарастающего магнитного поля, резко прерываемого при достижении заданного уровня напряжённости. 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 «Харьковский политехнический институт». В настоящее время эти работы продолжены и ведутся также в Харьковском национальном автомобильно-дорожном университете, где при кафедре физики создана специализированная научно-исследовательская лаборатория электромагнитных технологий.

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 соленоидами) 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 [18].

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 [19].

Результаты теоретических и экспериментальных исследований электромагнитных процессов в «сложных индукторных системах» описаны в публикациях [18, 19].

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) [19].

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



Выводы:

1. Проведен анализ мировых тенденций развития современных магнитно-импульсных технологий, который показывает всё возрастающую актуальность направления магнитно-импульсной обработки металлов, связанного с притяжением заданных участков проводящих объектов.
2. Обоснована актуальность развития магнитно-импульсной обработки металлов в направлении, связанном с притяжением заданных участков.
3. Описаны существующие системы магнитно-импульсного устранения вмятин и присущие им недостатки.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. 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.
2. 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.
3. 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.
4. 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.
5. 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.
6. Electromagnetic Dent Removal // Матеріали сайту – 2009. – Режим доступу : <http://www.electroimpact.com/EMAGDR/overview.asp>.
7. 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>
8. 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.
9. 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.
10. 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.
11. 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.
12. 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.
13. 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.



14. 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.
15. Пат. US 2008/0163661 A1 USA (США). Dent removing method and device / Meichtry Ralph, Kouba Ivan ; заявитель и патентообладатель Ostrolenk faber gerb & soffen, New York. – № 11/910,788 ; заявл. 11.05.2006; опубл. 10.07.2008.
16. Welcome to BETAG Innovation // Матеріали сайту – 2012. – Режим доступу : www.beulentechnik.com.
17. Шнеерсон Г. А. Поля и переходные процессы в аппаратуре сверх сильных токов / Г. А. Шнеерсон. – М. : Энергоатомиздат, 1992. –200 с.
18. Батыгин Ю. В. Магнитное поле в системе из двух соленоидов, разделенных тонкостенными проводниками / Ю. В. Батыгин, Л. Т. Хищенко, И. И. Щетинская // Техническая электродинамика. – К., 1990.– № 4.– С. 3-8.
19. 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. – Харьков : МОСТ–Торнадо, 2003. – 284 с.
20. 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.
21. Пат. 75676 Україна, МПК В 21 D 26/14. Спосіб магнітно – імпульсної обробки тонкостінних металевих заготовок / Батыгин Ю. В., Лавинський В. І., Хищенко Л. Т.; заявитель и патентообладатель ХПИ. – № 2004010512 ; заявл. 23.01.04; опубл. 15.05.06, Бюл. № 5.
22. Батыгин Ю. В. Физические основы возможных направлений развития магнитно-импульсной обработки тонкостенных металлов / Ю. В. Батыгин, В. И. Лавинский, Л. Т. Хищенко // Електротехніка і електромеханіка. – Харків, 2004. – № 2. – С. 80-84.

Батыгин Ю.В., Гнатов А.В., Трунова І.С. МАГНІТНО-ІМПУЛЬСНІ ТЕХНОЛОГІЇ ДЛЯ ВІДНОВЛЕННЯ КОРПУСНИХ ЕЛЕМЕНТІВ ТРАНСПОРТНИХ ЗАСОБІВ. Частина 1. АКТУАЛЬНІСТЬ ТА ПЕРСПЕКТИВНІСТЬ НАПРЯМКУ МІОМ. ШЛЯХИ РІШЕННЯ

У статті проведено обґрунтування актуальності розвитку магнітно-імпульсної обробки металів у новому напрямку – притягання заданих ділянок листових металів. Надано короткий огляд основних світових досягнень. Проведено аналіз електродинамічних процесів при притяганні ферромагнетиків, представлено обладнання, експериментальні дослідження та практична апробація нових авторських пропозицій по зовнішньому безконтактному магнітно-імпульсному рихтуванню корпусних елементів транспортних засобів.

Ключові слова: магнітно-імпульсна обробка металів, магнітно-імпульсна установка, безконтактне рихтування, видалення вм'ятин, індуктор.

Batygin Yu.V., Hnatov A.V., Trunova I.S. PULSE-MAGNETIC PROCESSING OF METALS RELEVANCE AND PERSPECTIVENESS. WAYS TO SOLVE

The foundation for relevance of pulse-magnetic processing of metals in a new direction – attraction of the given sections of sheet metals has been carried out in this article. The brief review of main world achievements has been done. The analysis of electro-dynamical processes in ferromagnetic substances attraction has been carried out as well as the demonstration of equipment. The experimental researches and practical approbation of new authors proposals for external noncontact magnetic-pulse straightening of the transport body elements have been presented.

Keywords: pulse-magnetic processing of metals, magnetic-pulse installation, noncontact straightening, dents removal, inductor.