

Внешняя рихтовка кузовов автотранспорта с помощью электродинамических систем при прямом пропускании импульсного тока.

А.Ю.Бондаренко, В.Б.Финкельштейн, Т.В. Гаврилова

ВВЕДЕНИЕ.

Постановка проблемы. В результате механического воздействия в металлических кузовах автомобилей возможно появление вмятин различного размера сфероидальной или конической формы. Традиционная рихтовка с внутренней стороны кузовной обшивки зачастую невозможна из-за отсутствия доступа, так как здесь могут присутствовать рёбра жёсткости, разного рода электротехническое, электронное и другое оборудование [1].

Анализ публикаций. Описание традиционных подходов к устранению вмятин в металлических обшивках автомобильных кузовов контактными механическими методами дано, например, в [2]. Не останавливаясь на перечислении недостатков, связанных с физическими основами их действенности, следует отметить появление прогрессивных предложений по использованию магнитно-импульсных методов притяжения заданных участков листовых металлов, позволяющих осуществлять операции рихтовки с внешней стороны автомобильного кузова без какого-либо механического контакта с возможным сохранением защитного лакокрасочного покрытия [3,4,5]. Аналогично известным обрабатывающим технологиям в машиностроении магнитно-импульсные методы кузовного ремонта реализуются с помощью оборудования, включающего две основные составляющие: источник мощности и инструмент [6]. Последний, в специальной литературе получил название «индукторной системы», и представляет собой технически довольно сложное устройство, принцип действия которого основан на силовом взаимодействии полей и токов. В ряде случаев, когда требование сохранения защитного покрытия не является определяющим и допускается контакт с объектом обработки, инструмент магнитно-импульсного метода можно упростить, если использовать «прямое пропускание тока» через металл устраняемой вмятины. Впервые принципиальное предложение такого рода было сформулировано авторами работ [7,8]. Помимо технической простоты, его несомненным достоинством является возможность работы как с магнитными (сталь), так и с немагнитными (алюминий) металлами кузовных покрытий автомобилей. Практическая реализация инструментов с «прямым пропусканием тока» требует дальнейших разработок конструктивного исполнения с последующей практической апробацией.

Цель настоящей работы – предложение принципиальных решений, а также теоретическое и экспериментальное обоснование работоспособности

модельных конструкций электродинамических систем, принцип действия которых основан на силовом взаимодействии параллельных проводников с однонаправленными токами, позволяющих устранение (рихтовку) вмятин в кузовах автомобилей.

ОБОРУДОВАНИЕ.

В целом, комплекс для рихтовки вмятин в кузовных элементах автомобилей показан на рис.1а. Как было ранее отмечено, он состоит из двух крупных составляющих: первая – это источник мощности, обеспечивающий питание инструмента, а вторая составляющая – это собственно инструмент метода.

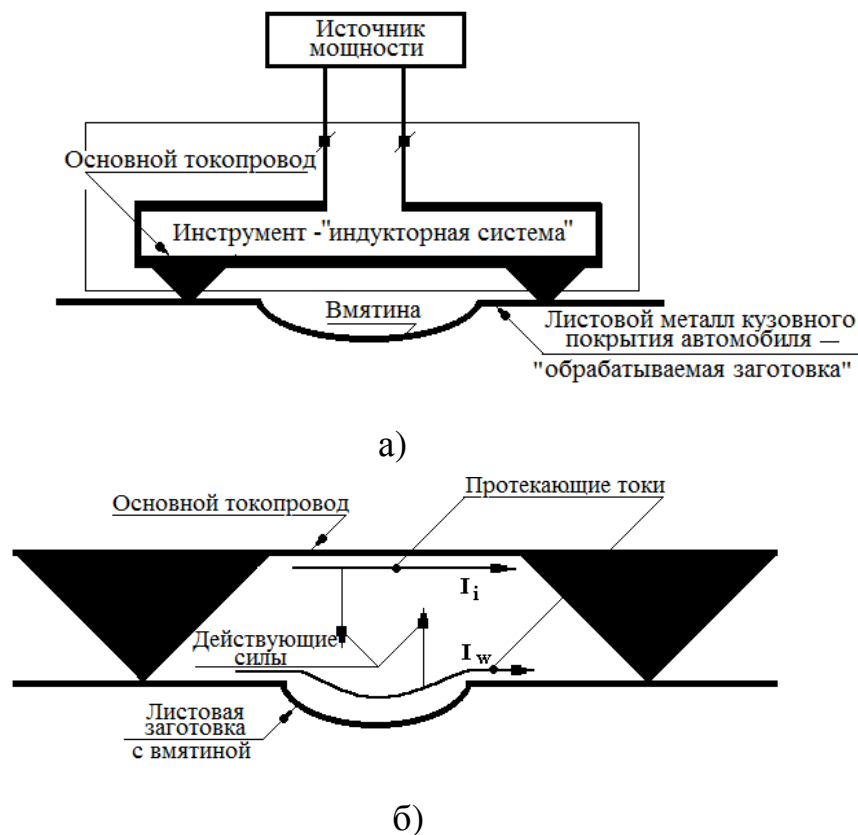


Рис.1

Схематическая иллюстрация комплекса для рихтовки с инструментом, принцип действия которого основан на притяжении проводников с однонаправленными токами (закон Ампера):

- а) принципиальная схема комплекса в целом;
- б) физическая схема возбуждения механических сил притяжения при взаимодействии тока в основном токопроводе – I_i с током в металле листовой заготовки с вмятиной – I_w .

Источник мощности (в общепринятых терминах специальной литературы – это магнитно-импульсная установка [6]) включает зарядное устройство, батарею емкостных накопителей, коммутаторы и др.

Инструмент метода, получивший в специальной литературе название – «индукторная система» [6], включает исполнительный орган – «основной токопровод» или просто «индуктор» и металл участка с вмятиной – «обрабатываемую заготовку».

Один из вариантов конструктивного исполнения предлагаемого инструмента для удаления вмятин с параллельным подсоединением основного токопровода и участка листовой заготовки с вмятиной иллюстрируется схемой на рис.1б.

Через кабель высокого напряжения индукторная система подключается к источнику мощности. Рабочая часть инструмента – индуктор накладывается на поверхность кузова с вмятиной (напомним, что в специальных терминах – эта часть кузова названа «обрабатываемой заготовкой»). Электрические выводы основного токопровода – индуктора должны войти в плотный электрический контакт с металлом обшивки кузова и обеспечить минимальное переходное сопротивление.

В реальных условиях это может обеспечиваться, например, притяжением за счёт применения мощных электромагнитов, которые устанавливаются по краям основного токопровода непосредственно в области контактов. Может оказаться, что таковые не нужны совсем, и для обеспечения требуемого контакта будет вполне достаточно физического усилия со стороны оператора, работающего с инструментом. В конечном итоге, каким образом должен осуществляться требуемый электрический контакт будет зависеть от токового режима работы инструмента. Ответ на данный вопрос могут дать только исследования с конкретной работоспособной электродинамической системой, практически позволяющей выполнение заданной производственной операции.

РАБОТА КОМПЛЕКСА.

После подачи источником мощности импульса напряжения на электрический вход индукторной системы, в её цепи (состоит из токоподводов, основного токопровода и участка металлического кузова с вмятиной) будет протекать ток. В рабочей зоне индукторной системы (область вмятины) этот ток в соответствии электрической схемой параллельного соединения проводников разделяется и будет протекать по контурам: первый – это основной токопровод индуктора (ток – I_1), а второй – это участок кузова с вмятиной (ток – I_w). Токи в элементах указанного контура будут иметь одинаковое направление. По закону Ампера между ними возникают мощные пондеромоторные силы, под действием которых произойдёт притяжение деформированного участка кузова к жёстко зафиксированному основному токопроводу – индуктору.

В результате, реализуется предлагаемая производственная операция по устранению вмятины в обшивке кузова автомобиля.

Следует отметить, что параллельное электрическое соединение основного токопровода индуктора и металла кузова – обрабатываемой заготовки не обязательное условие практической действенности данной электродинамической системы. Соединение может быть и последовательным. Главным требованием работоспособности является требование протекания токов в одном направлении.

ОЦЕНКА ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКИХ И ТЕМПЕРАТУРНЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ.

Поскольку классическая формулировка закона Ампера дана для постоянных токов в вакууме [9], расчёты параметров протекающих электромагнитных процессов, возбуждаемых механическими усилиями и возможных температурных режимов в первом приближении можно провести именно для этой идеализации. Хотя практически, токовые импульсы, у которых время нарастания и спада много меньше длительности собственно сигнала, можно считать «постоянными» при достижении амплитудного значения.

Для проведения расчётов необходимо выбрать конкретную модель инструмента, позволяющую реализацию ранее сформулированного принципа действия. В качестве таковой возьмём конструкцию и соответствующую электрическую схему замещения, представленные на рис.2.

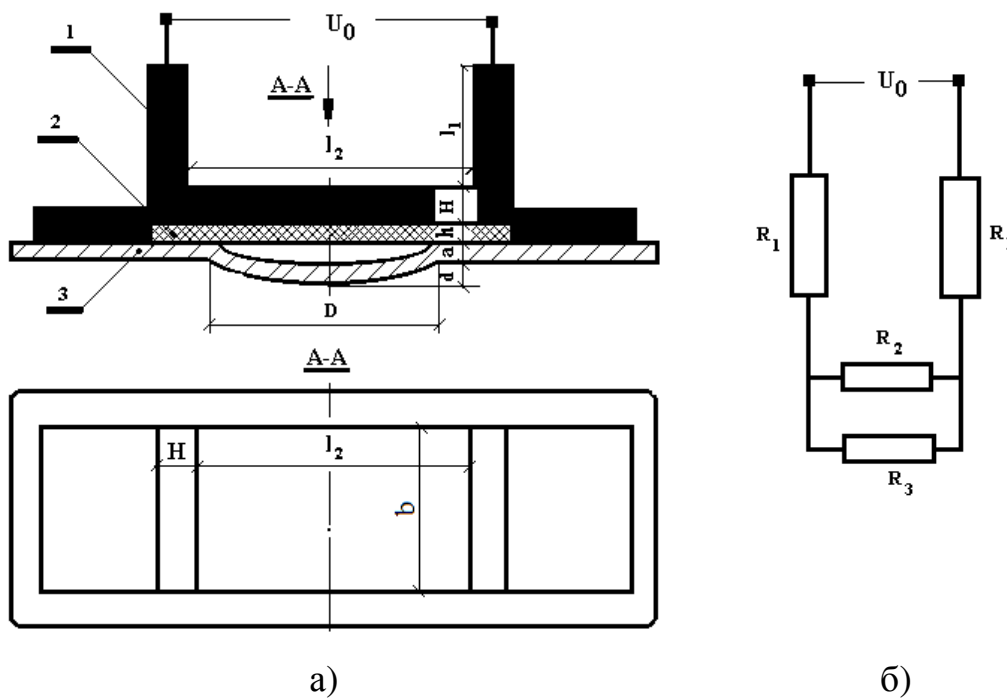


Рис.2

Расчётная модель,
а) конструкция; б) электрическая схема замещения.

Постановка задачи.Дано:

- 1) Соответственно рисунку индуктор представляет собой металлический виток прямоугольной формы со сторонами: l_1 – длина токоподводов; l_2, b, H – длина, ширина, толщина основного токопровода, соответственно, общая длина токоподводов и основного токопровода – $l = 2l_1 + l_2$.
- 2) Основание индуктора (основной токопровод) – рабочая зона отделяется от листовой заготовки изолирующей прокладкой толщиной – h .
- 3) Электрическое соединение прямоугольного витка индуктора с листовой заготовкой осуществляется по основаниям двух уголков, расположенных с внешних сторон токоподводов.
- 4) Листовая заготовка – стальной лист с удельной электропроводностью:

$$\gamma_w = 0.15 \cdot 10^7 \frac{1}{\text{Ом} \cdot \text{м}}$$
 (данное значение электропроводности – минимальная величина для существующих сталей).
- 5) Размеры листовой заготовки в рабочей зоне:
 l_2 – длина, b – ширина, a – толщина.
- 6) В листовой заготовке существует вмятина полусферической формы с диаметром на поверхности листа – D , глубиной – d .

Найти:

- 1) Ток в индукторе – I_i , обеспечивающий развитие силового воздействия с амплитудой – F .
- 2) Температуры нагрева индуктора и заготовки при протекании тока в индукторе – I_i .

Расчётные соотношения.

При подключении напряжения к токоподводам индуктора в системе протекает суммарный ток – I , разветвляющийся по двум параллельным контурам, первый из которых – это основание витка (основной токопровод), второй – часть листовой заготовки, находящейся в рабочей зоне.

Ток в рабочей зоне витка (основание) – I_i , ток в заготовке (область вмятины в металле кузова) – I_w .

Общий ток – $I = I_i + I_w$.

Токи протекают в одном направлении, следовательно, между основанием витка индуктора и листовой заготовкой согласно рис.2а будет иметь место притяжение с силой – F , определяемой законом Ампера [9].

$$F = \frac{\mu_0}{2\pi} \cdot I_i \cdot I_w \cdot \frac{D}{(d+h)}, \quad (1)$$

где

$(d+h)$ – расстояние между проводниками,

μ_0 – магнитная проницаемость вакуума, $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{\text{А}}{\text{м}}$.

При равенстве площадей основного токопровода и деформируемого участка заготовки токи в параллельных контурах, согласно электрической схеме замещения связаны, соотношением [10]:

$$I_w = I_i \cdot \frac{1}{\alpha}, \quad (2)$$

где

$$\alpha = \frac{\gamma_i}{\gamma_w} \cdot \frac{H}{a}.$$

Подставляя (2) в (1), находим, что заданную величину силы воздействия на листовую заготовку можно получить при токе:

$$I_i = \sqrt{2\pi \cdot \alpha \cdot \frac{F}{\mu_0} \cdot \frac{(d+h)}{D}} \quad (3)$$

Суммарное сопротивление индукторной системы (включая виток и заготовку) в соответствии с электрической схемой замещения при постоянном токе будет равно [10]:

$$R = \frac{1}{\gamma_i} \cdot \frac{l_2}{H \cdot b} \cdot \left[2 + \frac{l_1}{l_2} \cdot \frac{\alpha}{1+\alpha} \right]. \quad (4)$$

Температуры нагрева индуктора и заготовки при протекании прямоугольного импульса тока с длительностью – t_i может быть вычислена по формулам:

а) индуктор,

$$\Delta T_i^o = \left(\frac{I_i}{b \cdot H} \right)^2 \cdot \frac{t_i}{\gamma_i \cdot \rho_i \cdot c_i}, \quad (5)$$

где

ρ_i, c_i – плотность и удельная теплоёмкость материала индуктора;

б) заготовка,

$$\Delta T_w^o = \left(\frac{I_w}{b \cdot a} \right)^2 \cdot \frac{t_i}{\gamma_w \cdot \rho_w \cdot c_w}. \quad (6)$$

где

ρ_w, c_w – плотность и удельная теплоёмкость материала заготовки.

Пример расчёта.**Задано:**

1. Геометрия системы:

$$l_1 = l_2 = 5 \cdot 10^{-2} \text{ м}; b = 5 \cdot 10^{-2} \text{ м}; a = 10^{-3} \text{ м}; H = 2 \cdot 10^{-3} \text{ м};$$

$$d = 3 \cdot 10^{-3} \text{ м}, h = 10^{-3} \text{ м}, D = 4 \cdot 10^{-3} \text{ м}.$$

2. Пусть виток индуктора выполнен из меди. Обрабатывается листовая заготовка из стали. Физические параметры металлов:

$$\text{медь} - \gamma_{\text{cu}} = 6 \cdot 10^7 \frac{1}{\text{Ом} \cdot \text{м}}, \rho_{\text{cu}} = 9000 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}, c_{\text{cu}} = 437 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{град}};$$

$$\text{сталь} - \gamma_{\text{steel}} = 0.15 \cdot 10^7 \frac{1}{\text{Ом} \cdot \text{м}}, \rho_{\text{steel}} = 7500 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}, c_{\text{steel}} = 483 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{град}}.$$

2. Необходимые силы притяжения по справочным данным: $F \leq 1000 \text{ Н}$.**Вычисления:**

$$1) \text{ формула (2): } \alpha = \frac{\gamma_i}{\gamma_w} \cdot \frac{H}{a} = \frac{6 \cdot 10^7}{0.15 \cdot 10^7} \cdot \frac{2 \cdot 10^{-3}}{10^{-3}} = 80;$$

2) Ток в индукторе, формула (3):

$$I_i = \sqrt{2\pi \cdot \alpha \cdot \frac{F}{\mu_0} \cdot \frac{(d+h)}{D}} = \sqrt{2\pi \cdot 80 \cdot \frac{1000}{4\pi \cdot 10^{-7}} \cdot \frac{4 \cdot 10^{-3}}{4 \cdot 10^{-2}}} \approx 200 \text{ кА}.$$

3) Ток в заготовке, формула (2):

$$I_w = \frac{I_i}{\alpha} = \frac{200}{80} = 2,5 \text{ кА}.$$

Примечание.

Если токи одинаковы, то их амплитуды для развития заданной величины силы должны составлять $I_i \approx I_w \approx 22 \text{ кА}$.

4) Нагрев индуктора, формула (5):

$$\Delta T_i^o = \left(\frac{I_i}{b \cdot H} \right)^2 \cdot \frac{t_i}{\gamma_i \cdot \rho_i \cdot c_i} \approx 10^4 \cdot t_i.$$

Во временном интервале – $t_i \leq 10^{-3}$ с повышение температуры нагрева должно составить $\sim \Delta T_i^0 \leq 10^0$.

5) Нагрев заготовки, формула (6):

$$\Delta T_w^0 = \left(\frac{I_w}{b \cdot a} \right)^2 \cdot \frac{t_i}{\gamma_w \cdot \rho_w \cdot c_w} \approx 372 \cdot t_i.$$

Во временном интервале – $t_i \leq 10^{-3}$ с повышение температуры нагрева должно составить $\sim \Delta T_i^0 \leq 3.72^0$.

Выводы.

1. Для внешней рихтовки вмятин в металлических покрытиях автомобильных кузовов в качестве инструмента предложена электродинамическая система, принцип действия которой основан на силовом взаимодействии однонаправленных больших токов.
2. Вычисления, выполненные для принятой модели электродинамической системы с прямым пропусканием постоянного тока, продемонстрировали реальную работоспособность предложенного инструмента внешней магнитно-импульсной рихтовки.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бажинов А.В., Батыгин Ю.В., Чаплыгин Е.А., Использование энергии импульсных магнитных полей в автомобильной промышленности. //Сб. научных трудов Харьковского национального автомобильно-дорожного университета. - Харьков. - 2005. - Выпуск 16. - С.349-353.
2. <http://auto-remont.com.ua/rihtovka.html>
3. Meichtry R., Dent Removing Method and Device. International Patent Application WO2006/119661 A1, 2006.
4. Batygin Y.V., Golovashchenko S.F., Gnatov A.V., Pulsed Electromagnetic Attraction of Sheet Metals – Fundamentals and Perspective Applications. //Journal of Materials Processing Technologies. – Elsevier: 2013. 213, PP. 444-452.
5. Batygin Y.V., Golovashchenko S.F., Gnatov A.V., Pulsed Electromagnetic Attraction of non-magnetic Sheet Metals. Applications.// Journal of Materials Processing Technologies. – Elsevier: 2014. 214, PP. 390-401.
6. Батыгин Ю.В., Лавинский В.И., Хименко Л.Т., Импульсные магнитные поля для прогрессивных технологий. Том 1. Импульсные магнитные поля для прогрессивных технологий. Издание второе, переработанное и

- дополненное. Под общей ред. д.т.н., проф. Батыгина Ю.В. – Харьков: изд. МОСТ-Торнадо. 2003. – 284 с.
7. Батыгин Ю.В., Лавинский В.И., Хищенко Л.Т., Физические основы возможных направлений развития магнитно-импульсной обработки тонкостенных металлов.// Электротехніка і електромеханіка. Харків. 2004, №2, С.80-84.
 8. Батыгин Ю.В., Лавинский В.И., Бондаренко А.Ю., Инструмент для магнитно-импульсного притяжения листовых заготовок.//Авиационно-космическая техника и технология.2007.№11(47). – СС.44 – 51.
 9. Яворский Б. М. Справочник по физике / Б. М. Яворский, А. А. Детлаф. – М.: Наука, 1974. – 940 с.
 10. Нейман Л.Р., К. С. Демирчян, Теоретические основы электротехники. Часть 2. Теория линейных электрических цепей – Л.: Энергия, 1967. – 340 с.