

УДК 621.318

## ВОЗБУЖДАЕМЫЕ УСИЛИЯ В ИНСТРУМЕНТЕ С ПРЯМЫМ ПРОПУСКАНИЕМ ТОКА ДЛЯ РИХТОВКИ КУЗОВНЫХ ПАНЕЛЕЙ

Д.О. Волонцевич, профессор, д.т.н., Ш.В. Аргун, ст. преподаватель, к.т.н.,  
С.В. Кисловский, студент, ХНАДУ

*Аннотация.* Работа посвящена численным оценкам влияния ширины распределения токов в электродинамических инструментах рихтовки металлических обшивок автомобильных кузовов. Полученные оценки позволяют связать геометрию конструктивных составляющих инструмента с глубиной устраняемой вмятины в смысле эффективности силового воздействия. Данные оценки определяют рекомендации по выбору основных параметров электродинамического инструмента рихтовки для устранения вмятин соответствующего размера.

*Ключевые слова:* магнитно-импульсная рихтовка, электромагнитная сила притяжения, ремонтные технологии, удаление вмятин.

## ЗУСИЛЛЯ ЩО ЗБУДЖУЮТЬСЯ В ІНСТРУМЕНТІ З ПРЯМИМ ПРОПУСКАННЯМ СТРУМУ ДЛЯ РИХТУВАННЯ КУЗОВНИХ ПАНЕЛЕЙ

Д.О. Волонцевич, професор, д.т.н., Ш.В. Аргун, ст. викладач, к.т.н.,  
С.В. Кисловський, студент, ХНАДУ

*Анотація.* Робота присвячена чисельним оцінкам впливу ширини розподілу струмів в електродинамічних інструментах рихтування металевих обшивок автомобільних кузовів. Отримані оцінки дозволяють зв'язати геометрію конструктивних складових інструменту з глибиною вмятини що усувається в сенсі ефективності силового впливу. Дані оцінки визначають рекомендації щодо вибору основних параметрів електродинамічного інструменту рихтування для усунення вмятин відповідного розміру.

*Ключові слова:* магнітно-імпульсне рихтування, електромагнітна сила притягання, ремонтні технології, видалення вмятин.

## EXCITED BY THE EFFORTS OF THE TOOL WITH DIRECT TRANSMISSION OF POWER TO THE STRAIGHTENING OF BODY PANELS

D. Volontsevich, Professor, Doctor of Technical Science,  
Sh. Argun, senior lecturer, Candidate of Technical Sciences,  
S. Kislovsky, student, KhNAHU

*Abstract.* The work is devoted to numerical assessments of the impact of the width of the distribution of currents in the electrodynamic instruments straightening metal plating of automobile bodies. The estimates obtained allow us to link the geometry of the structural make up of existing tool with depth fixed dents in the sense of the effectiveness of force. These assessments determine recommendations on the choice of the main parameters of electrodynamic straightening tool for removing dents suitable size.

*Key words:* electromagnetic-pulse forming, electromagnetic attractive force, repair technologies, dent removing.

### Введение

Более 50% повреждений в автомобилях— это

вмятины в зонах с затрудненным или полностью закрытым обратным доступом. Это различные корпусные элементы, крылья, фюзеле-

ляжи самолётов, двери, капоты, крыши, пороги, бампера автомобилей и т.д. [1].

В этой связи особый интерес представляют устройства, позволяющие производить реставрацию повреждений (вмятин) на поверхности с внешней стороны без разборки корпуса или кузова. Данным требованиям отвечают магнитно-импульсные технологии притяжения тонкостенных металлов, разрабатываемые американскими и европейскими лидерами в области кузовного ремонта современных автомобилей [2].

### Обзор литературы. Постановка задачи

Одним из способов магнитно-импульсного притяжения тонкостенных листовых металлов, который может быть положен основу создания эффективного электродинамического инструмента внешней рихтовки автомобильных кузовов, является способ «прямого пропускания тока» через обрабатываемый металл. Его привлекательность обусловлена простотой технической реализации и довольно высокими энергетическими показателями.

Следует отметить, что идея «прямого пропускания тока» для создания инструментов известна и эксплуатировалась практически со времени появления магнитно-импульсной обработки металлов [3]. Но для притяжения заданных участков тонкостенных металлов, конкретно для рихтовки вмятин в элементах автомобильных кузовов, использовать «прямое пропускание тока» через обрабатываемый объект впервые было предложено авторами публикации [4]. В дальнейшем данная идея получила своё развитие в работе [5], где в идеализации тонких линейных проводников выполнена оценка возможных сил притяжения.

Физическая сущность «прямого пропускания тока», трансформированная в конструкцию инструмента для рихтовки вмятин, состоит в следующем. Ток источника мощности поступает в специальный, так называемый «основной токопровод». Последний выполнен в виде проводящей полосы, расположенной над вмятиной в обшивке автомобильного кузова. В простейшем случае источник мощности подключается к участку металла с вмятиной параллельно полосе «основного токопрово-

да». Таким образом, имеем два проводника («основной токопровод» и металл с вмятиной) с однонаправленными токами. В соответствии с законом Ампера они будут притягиваться друг к другу [6]. Если «основной токопровод» жёстко зафиксирован, металл вмятины будет притягиваться к его плоскости.

Силы взаимодействия между проводниками с токами в известных формулах для закона Ампера записаны для идеализации, когда эти проводники не имеют никаких поперечных размеров [5, 6]. Реально, в предложенной электродинамической системе «с прямым пропусканием тока» взаимодействуют плоские проводники, имеющие в поперечном направлении конечную протяжённость.

Цель настоящей работы – численные оценки влияния поперечных размеров распределённых токов на амплитуды возбуждаемых сил магнитно-импульсного притяжения в электродинамических инструментах рихтовки автомобилей.

### Вычисления и результаты

Для получения расчётных соотношений воспользуемся моделью электродинамического инструмента рихтовки на рис. 1, где в поперечном сечении показаны два параллельных ленточных проводника с токами  $I_1$  и  $I_2$ . Направления токов не оговаривается. Они могут быть направлены одинаково или противоположно. В расчётных соотношениях этот факт приведёт лишь к изменению знака действующей силы. Напомним, что практически это означает либо притяжение, либо отталкивание.

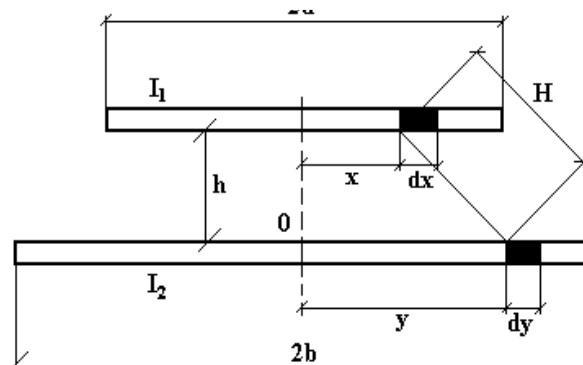


Рис.1. Расчётная модель силового взаимодействия токов в плоских проводниках конечной ширины

В соответствии с чертежом, в каждом из ленточных проводников выделены элементы  $dx$  и  $dy$ . Расстояние между ними

$$H = \sqrt{(y-x)^2 + h^2}.$$

Дифференциал силы взаимодействия по закону Ампера можно записать в виде [6]:

$$dF = \frac{\mu_0}{2\pi} \cdot \frac{I_1 \cdot I_2}{(a \cdot b)} \cdot l \cdot \frac{dx \cdot dy}{\sqrt{(y-x)^2 + h^2}}, \quad (1)$$

где  $l$  – длина проводников (в направлении, перпендикулярном плоскости чертежа),  $a$ ,  $b$  – их ширина,  $h$  – расстояние между ленточными проводниками.

Интегрируя выражение (1) по переменным  $y \in [-b, b]$ ,  $x \in [-a, a]$ , находим, что

$$F = \frac{\mu_0}{2\pi} \cdot I_1 \cdot I_2 \cdot \frac{l}{h} \cdot G(a, b), \quad (2)$$

где

$$G(a, b) = \left( \frac{h}{4a \cdot b} \right) \int_{-a}^a \ln \left[ \frac{\sqrt{(b-x)^2 + h^2} + (b-x)}{\sqrt{(b+x)^2 + h^2} - (b+x)} \right] dx$$

Достоверность полученной формулы легко проверить предельным переходом к идеализации, когда проводники не имеют поперечных размеров (закон Ампера для линейных токов, соответственно  $a, b \rightarrow 0$ ).

Итак,

$$\begin{aligned} \lim_{a, b \rightarrow 0} G(a, b) &= \lim_{a, b \rightarrow 0} \left( \frac{h}{4a \cdot b} \right) \cdot \times \\ &\times \int_{-a}^a \ln \left[ \frac{\sqrt{(b-x)^2 + h^2} + (b-x)}{\sqrt{(b+x)^2 + h^2} - (b+x)} \right] \cdot dx = \\ &= \lim_{a \rightarrow 0} \left( \frac{h}{4a \cdot b} \right) \cdot \ln \left[ \frac{h+b}{h-b} \right] \cdot 2a = \\ &= \lim_{a \rightarrow 0} \left( \frac{h}{4a \cdot b} \right) \cdot 2a \cdot \ln \left[ 1 + 2 \cdot \frac{b}{h} \right] = 1 \end{aligned}$$

С учётом данного результата формула (2) будет полностью совпадать с законом Ампера для идеализированных линейных проводников.

Прокомментируем выражение (2).

Полученный результат говорит о том, что силовое взаимодействие проводников будет снижаться с увеличением их ширины при постоянном расстоянии между ними или, что одно и то же, с увеличением расстояния между ними при постоянной ширине. Физически, это понятно. Силовое взаимодействие определяется напряжённостями действующих полей. Напряжённости – это плотности токов. С увеличением ширины проводников при одном и том же токе плотность его распределения падает, снижается и напряжённость, уменьшаются силы взаимодействия.

Количественно, это снижение определяется величиной функции  $G(a, b)$ . Для наглядности этого вывода на рис.2 приведена графическая зависимость, иллюстрирующая падение амплитуд силового взаимодействия ленточных проводников одинаковой ширины ( $a = b$ ), расположенных на различных расстояниях друг от друга (варьируется параметр  $\left(\frac{a}{h}\right)$  согласно рис.1).

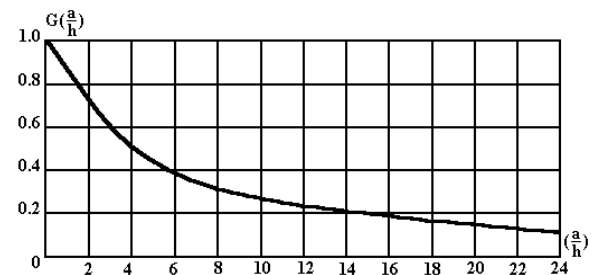


Рис.2. Зависимость величины сил притяжения в относительных единицах (нормировка на максимум) от поперечного размера области взаимодействующих токов

Комментируя результаты вычислений, следует конкретизировать параметры « $\frac{a}{h}$ » и

$G\left(\frac{a}{h}\right)$  в смысле их связи с реальными условиями рихтовки вмятин в проводящих покрытиях автомобильных кузовов магнитно-импульсными инструментами «с прямым протеканием тока» через металл обрабатываемого объекта.

Первое. Реально, величина ширины проводящей ленты – « $a$ » соответствует условной ширине распределения протекающих токов.

Один из них – это ток в «основном токопроводе», другой – в листовом металле с вмятиной. Реально, расстояние между проводниками с токами – « $h$ » соответствует глубине устраняемой вмятины. Таким образом, отношение « $\frac{a}{h}$ » определяет соотношение ширины распределения протекающих токов и глубины вмятины.

Параметр  $G\left(\frac{a}{h}\right)$  определяет относительное изменение величины силового притяжения в функциональной зависимости от параметра « $\frac{a}{h}$ ».

Как показали вычисления (графическая зависимость на рис. 2), геометрия системы, определяемая параметром – « $\frac{a}{h}$ », оказывает существенное влияние на силовые показатели инструмента рихтовки.

Наибольшая величина развиваемого усилия имеет место при  $\frac{a}{h} \rightarrow 0$ ,  $G\left(\frac{a}{h}\right) \rightarrow 1$ . То есть, при достаточно малых поперечных размерах распределения протекающих токов, что соответствует идеализации взаимодействующих проводников «тонкими линейными проводниками», при любой глубине рихтуемых вмятин сила притяжения – максимальна. Но уже при  $\frac{a}{h} = 4$  имеем, что  $G\left(\frac{a}{h}\right) \approx 0.5$ . То есть, в инструменте рихтовки с фиксированной геометрией (фактически, это ширина «основного токопровода») при глубине вмятины, составляющей ~ 25% условной ширины токораспределения, амплитуда сил притяжения падает почти в 2 раза. Если же вмятина достаточно мелкая и  $\frac{a}{h} \rightarrow 24$ , развиваемое усилие падает почти на порядок относительно своего возможного максимума.

### Выводы

Выполнены численные оценки влияния ширины поперечных размерораспределений взаимодействующих токов на амплитуды возбуждаемых сил притяжения в электродинамических инструментах рихтовки автомобилей.

Показано, что силы притяжения падают с ростом условной ширины токораспределения. Их амплитуда снижается более, чем в два раза уже для соотношения  $\frac{a}{h} \approx 4$ , где  $a$  – условная ширина токораспределения,  $h$  – глубина вмятины в реставрируемом тонкостенном металле.

Полученные оценки позволяют связать геометрию инструмента рихтовки с глубиной устраняемой вмятины в смысле эффективности силового воздействия, что определяет рекомендации по выбору основных параметров магнитно-импульсной системы «с прямым пропусканием тока» для устранения вмятин соответствующего размера.

### Список литературы

1. Синельников А.Ф., Штоль Ю. Л., Скрипников С. А., Кузова легковых автомобилей: обслуживание и ремонт. М.: Транспорт, 1995. – 256 с.
2. Батыгин Ю.В., Лавинский В.И., Сериков Г.С., Чаплыгин Е.А., Возможности магнитно-импульсной технологии для рихтовки кузовных элементов автомобилей. //Труды 13-ой международной научно-технической конференции «Физические и компьютерные технологии», Харьков, 19-20 апреля 2007г, с.352-355.
3. Батыгин Ю.В., Лавинский В.И., Хименко Л.Т., Импульсные магнитные поля для прогрессивных технологий. Том 1. Издание второе, переработанное и дополненное. Под общей ред. д.т.н., проф. Батыгина Ю.В. – Харьков: изд. МОСТ-Торнадо. 2003. – 284 с.
4. Батыгин Ю.В., Лавинский В.И., Хименко Л.Т., Физические основы возможных направлений развития магнитно-импульсной обработки тонкостенных металлов.// Електротехніка і електромеханіка. Харків. 2004, №2, с.80-84.
5. А.Ю.Бондаренко, В.Б.,Финкельштейн, Т.В.Гаврилова, Внешняя рихтовка кузовов автотранспорта с помощью электродинамических систем при прямом пропускании импульсного тока.//Харків: Вісник НТУ «ХП». 2014.№9(1052). С.66 – 72.
6. Яворский Б.М. Детлаф А.А., Справочник по физике. – М: Наука. – 939с.