

УДК 621.318

*Д. О. ВОЛОНЦЕВИЧ*, д.т.н., профессор, НТУ «ХПИ»;

*Щ. В. АРГУН*, канд. техн. наук, ст. преподаватель, ХНАДУ, Харьков

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

Работа посвящена численным оценкам влияния ширины распределения токов в электродинамических инструментах, которые предназначены для 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 с кузовной панели автомобиля.

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

**Введение.** Как показывает практика, более 50% повреждений – это вмятины в зонах с затрудненным или полностью закрытым обратным доступом. Это различные корпусные элементы, фюзеляжи самолётов, двери, капоты, крыши, пороги, бамперы 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 [2–4].

**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 времен появления магнитно-импульсной обработки металлов [5]. 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 [6]. В дальнейшем данная идея получила своё развитие в работе [7], 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 [7, 8] поступает в специальный, так называемый «основной токопровод», выполненный 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 токопровода». Т.о., имеем

© Д. О. Волонцевич, Щ. В. Аргун, 2015

два проводника («основной токопровод» и металл с вмятиной) с однонаправленными токами. В соответствии с законом Ампера они будут притягиваться друг к другу [9,10]. 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 [6, 10]. Реально, в предложенной электродинамической системе «с прямым пропуском тока» взаимодействуют плоские проводники, имеющие в поперечном направлении конечную протяжённость.

Цель настоящей работы – численные оценки влияния поперечных размеров распределений 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.

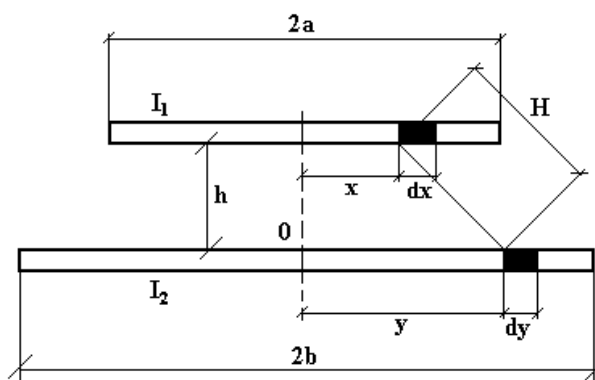


Рисунок 1 – Расчётная модель силового взаимодействия токов в плоских проводниках конечной ширины

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 [10]:

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

где  $l$  – длина проводников (в направлении, перпендикулярном плоскости чертежа);  
 $b$  – ширина проводников;  
 $h$  – 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,

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

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  $(a/h)$  согласно рис.1).

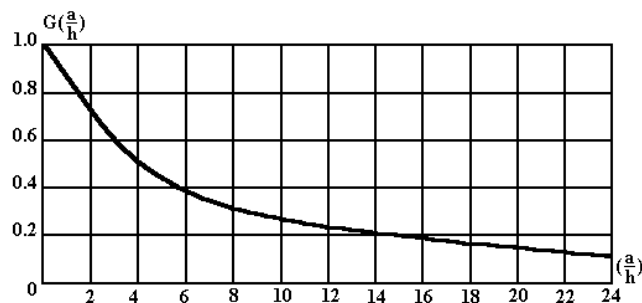


Рисунок 2 – Зависимость величины сил притяжения в относительных единицах (нормировка на максимум) от поперечного размера области взаимодействующих токов

Комментируя результаты вычислений, следует конкретизировать параметры  $a/h$  и  $G(a/h)$  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. Т. о., отношение  $a/h$  определяет соотношение ширины распределения протекающих токов и глубины вмятины.

Параметр  $G(a/h)$  определяет относительное изменение величины силового притяжения в функциональной зависимости от параметра  $a/h$ .

Как показали вычисления (графическая зависимость на рис. 2), геометрия системы, определяемая параметром  $a/h$ , оказывает существенное влияние на силовые показатели инструмента магнитно-импульсной рихтовки.

Наибольшая величина развиваемого усилия имеет место при  $a/h \rightarrow 0$ ,  $G(a/h) \rightarrow 1$ . То есть, при достаточно малых поперечных размерах распределения протекающих токов, что соответствует идеализации взаимодействующих проводников «тонкими линейными проводами», при любой глубине рихтуемых вмятин сила притяжения – максимальна. Но уже при  $a/h \approx 4$  имеем, что  $G(a/h) \approx 0,5$ . То есть, в инструменте рихтовки с фиксированной геометрией (фактически, это ширина «основного токопровода») при глубине вмятины, составляющей  $\sim 25\%$  условной шириной токораспределения, амплитуда сил притяжения падает почти в 2 раза. Если же вмятина достаточно мелкая и  $a/h \rightarrow 24$ , развиваемое усилие падает почти на порядок относительно своего возможного максимума.

#### **Выводы:**

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

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

3. 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 літератури:** 1. Синельников А. Ф. Кузова легковых автомобилей: обслуживание и ремонт / А. Ф. Синельников, Ю. Л. Штоль, С. А. Скрипников – М.: Транспорт, 1995. – 256 с. 2. Белый И. В. Справочник по магнитно-импульсной обработке металлов / Белый И. В., Фертик С. М., Хищенко Л. Т. – Харьков : Вища школа, 1977. - 189 с. 3. Туренко А. Н. Импульсные магнитные поля для прогрессивных технологий. Том 3. Теория и эксперимент притяжения тонкостенных металлов импульсными магнитными полями / Туренко А. Н., Батыгин Ю. В., Гнатов А. В.; монография. – Харьков : ХНАДУ, 2009. – 240 с. 4. Фізичні основи прогресивних магнітно-імпульсних технологій в виробництві та ремонті АТЗ: навч. посіб /

[Ю. В. Батыгин, А. В. Гнатов, Є. А. Чаплигин, Щ. В. Аргун та ін.]. – Х.: ХНАДУ, 2013 – 336 с. **5.** Батыгин Ю. В. Импульсные магнитные поля для прогрессивных технологий / Ю. В. Батыгин, В. И. Лавинский, Л. Т. Хименко – Т. 1.; под ред. проф. Ю.В. Батыгина. – [2-е изд.] – Харьков: МОСТ-Торнадо, 2003. – 288 с. **6.** Батыгин Ю. В. Физические основы возможных направлений развития магнитно-импульсной обработки тонкостенных металлов / Ю. В. Батыгин, В. И. Лавинский, Л. Т. Хименко // Электротехника і електромеханіка. – 2004. – № 2. – С. 80–84. **7.** Бондаренко А. Ю. Внешняя рихтовка кузовов автотранспорта с помощью электродинамических систем при прямом пропускании импульсного тока / А. Ю. Бондаренко, В. Б. Финкельштейн, Т. В. Гаврилова // Вісник НТУ «ХПІ». – Х. : НТУ «ХПІ». – 2014. – № 9 (1052). – С. 66 – 72. **8.** Аргун Щ. В. Особенности в работе источника мощности – генератора многократных токовых импульсов / Щ. В. Аргун // Электротехника і електромеханіка. – Х. : НТУ «ХПІ». – 2013. – № 2.– С. 48–51. **9.** Ландау Л. Д. Электродинамика сплошных сред / Л. Д. Ландау, Е. М. Лифшиц. – М. : Наука, 1982. – 620 с. **10.** Яворский Б. М. Справочник по физике / Б. М. Яворский, А. А. Детлаф – М: Наука. – 1968. – 939 с.

**Bibliography (transliterated):** **1.** Sinelnikov A. F., Shtol Yu. L., Skripnikov S. A., Kuzova legkovyih avtomobiley: obsluzhivanie i remont [Car bodies: service and repair] Moskva, Transport, 1995, 256 p. **2.** Belyj I. V., Fertik S. M., Himenko L. T. Spravochnik po magnitno-impul'snoy obrabotke metallov [Directory of magnetic-pulse treatment of metals]. Kharkiv, Vishcha shkola, 1977, 189 p. **3.** Turenko A.N., Batygin Yu.V., Hnatov A.V. Impulsnyie magnitnyie polya dlya progressivnyih tehnologiy. Vol 3. Teoriia i eksperiment pritiazheniia tonkostennykh metallov impul'snymi magnitnymi poliami [The pulse magnetic fields for advanced technologies. Volume 3. Theory and experiment of thin-walled metals attraction by the pulse magnetic fields]. Kharkov, KhNAHU, 2009. 240 p. **4.** Batygin Yu. V., Gnatov A. V., Chapligin E. A., Argun Sch. V. Fizichni osnovi progresivnih magnitno-impul'snih tehnologiy v virobnitstvi ta remonti ATZ [The physical basis of advanced magnetic pulse technology in the manufacture and repair of motor vehicle]. Kharkov, KhNAHU, 2013 – 336 p. **5.** Batygin Yu. V., Lavinskiy V. I., Himenko L. T. Impulsnyie magnitnyie polya dlya progressivnyih tehnologiy Vol 1 [The pulse magnetic fields for advanced technologies. Volume 1]. Kharkov, MOST-Tornado, 2003, 288 p. **6.** Batygin Yu. V., Lavinskiy V. I., Himenko L. T., Fizicheskie osnovy vozmozhnyih napravleniy razvitiya magnitno-impul'snoy obrabotki tonkostennyih metallov [Physical basis of the possible directions of magnetic-pulse processing of thin-walled metal]. Elektrotekhnika i elektromekhanika – Electrical engineering & electromechanics, 2004, no.2, pp. 80-84. **7.** Bondarenko A. Yu., Finkelshteyn V. B., Gavrilova T. V. Vneshnyaya rihtovka kuzovov avtotransporta s pomoschyu elektrodinamicheskikh sistem pri pryamom propuskaniy impul'snogo toka [External straightening bodies of vehicles using electrodynamic systems for direct transmission of the pulse current]. Visnik NTU «HPI», Kharkiv, 2014, no.9, Tem. vip. „Tehnika i elektrofizika visokih naprug, pp. 66–72. **8.** Argun Sch. V., Osobennosti v rabote istochnika moschnosti – generatora mnogokratnyih tokovyih impul'sov [Especially in the power source – the generator of multiple current pulses]. Elektrotekhnika i elektromekhanika – Electrical engineering & electromechanics, 2013, no.2, pp. 48-51. **9.** Landau L. D., E. M. Lifshic Elektrodinamika sploshnyh sred [Electrodynamics of the continuous medium]. Moscow, Nauka, 1982, 620 p. **10.** Yavorskij B. M., Detlaf A. A. Spravochnik po fizike [Directory of a physics]. Moscow, Nauka, 1968, 939 p.

Надійшла (received) 13.01.2015