

УДК 621.33

ОЦЕНКА ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПРОЦЕССОВ В КОМБИНИРОВАННОЙ ИНДУКТОРНОЙ СИСТЕМЕ, КАК ИНСТРУМЕНТА МАГНИТНО-ИМПУЛЬСНОЙ РИХТОВКИ

Д.О. Волонцевич, д.т.н., проф., НТУ “ХПИ”, М.В. Барбашова, ассистент, ХНАДУ,
Анналиев Р., студент, ХНАДУ

Аннотация. Работа посвящена оценке электромагнитных процессов в комбинированной индукторной системе, как инструмента магнитно-импульсной рихтовки. Вычисления продемонстрировали действенность предложенного инструмента магнитно-импульсной рихтовки металлических покрытий автомобильных кузовов. Реальные амплитуды распределённых сил притяжения составляют ~ 7,7 МПа.

Ключевые слова: комбинированная индукторная система, магнитно-импульсная рихтовка.

ОЦІНКА ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ПРОЦЕСІВ У КОМБІНОВАНІЙ ІНДУКТОРНІЙ СИСТЕМІ, ЯК ІНСТРУМЕНТУ МАГНІТНО-ІМПУЛЬСНОГО РИХТУВАННЯ

Д.О. Волонцевич, д.т.н., проф., НТУ “ХПІ”, М.В. Барбашова, асистент, ХНАДУ,
Анналиєв Р., студент, ХНАДУ

Анотація. Робота присвячена оцінці електромагнітних процесів у комбінованій індукторній системі, як інструменту магнітно-імпульсного рихтування. Обчислення продемонстрували дієвість запропонованого інструменту магнітно-імпульсної рихтування металевих покриттів автомобільних кузовів. Реальні амплітуди розподілених сил тяжіння складають ~ 7,7 МПа.

Ключові слова: комбінована індукторна система, магнітно-імпульсне рихтування.

EVALUATION THE ELECTROMAGNETIC PROCESS IN A COMBINED INDUCTION SYSTEM AS A TOOL FOR MAGNETIC PULSED STRAIGHTENING

D. Voloncevich, doctor of engineering science, professor, NTU “KhPI”,
M. Barbashova, assistant, KhNADU, Annaliev R., student, KhNADU

Abstract. The evaluation of electromagnetic processes in the combined inductor system as a tool for magnetic-pulse alignment are presented. The calculations demonstrated the effectiveness of the proposed instrument magnetic pulsed straightening metal coatings automotive bodies. Real amplitude distributed forces of attraction are ~ 7,7 MPa.

Keywords: the combined inductor system, magnetic pulsed straightening.

Введение

Появление новых сплавов в современных авиа- и автомобилестроении инициировало развитие новых обрабатывающих технологий, поскольку известные подходы оказались

недееспособными. Рекомендуемые для кузовных покрытий современных автомобилей соединения различных металлов, обладающих малым весом и высокой прочностью, оказались не технологичными с точки зрения традиционной механической штамповки.

Причина – недостаточная пластичность. При обработке имели место разрывы и разрушение формованных изделий. Как показали исследования, направленные на преодоление отмеченных негативов, при магнитно-импульсном силовом воздействии проявляется эффект «гиперпластичности» («hyperplasticity»), вследствие которого относительные деформации металлических образцов могут достигать ~ 200% и более [1].

Обзор литературы. Цель работы

Современные потребности авто- и авиапромышленности поставили задачу внешней рихтовки вмятин на металлических поверхностях кузовных и корпусных покрытий. Как оказалось, практически, наиболее эффективным способом решения данной проблемы является магнитно-импульсное притяжение повреждённых участков силами низкочастотных полей при интенсивном проникновении сквозь обрабатываемый металл [2,3].

В этой связи весьма интересными для практики являются разработки инженеров концерна «Боинг». Физическая сущность их предложений состоит в пространственно-временной суперпозиции низко- (НЧ) и высокочастотных (ВЧ) магнитных полей. Первые проникают сквозь металл с вмятиной. Вторые не проникает и при определённых условиях нивелируют НЧ-поле над обрабатываемым объектом. В результате, над металлом с вмятиной нуль напряжённости, под ним – амплитуда. Возникающая сила магнитного давления осуществляет притяжение металла вмятины к источнику поля – индуктору [4].

Реализация цитируемого предложения является достаточно сложной и дорогостоящей, ввиду обязательного наличия источников мощности разного типа – генераторов НЧ и ВЧ сильноточных токовых импульсов. Упростить схему двухчастотной реализации магнитно-импульсного притяжения можно с помощью систем, генерирующих плоскопараллельные магнитные поля. В этом случае источники мощности могут генерировать идентичные НЧ-сигналы. Данная идея в виде «комбинированных индукторных систем» была представлена в работе [5].

Настоящая работа является логическим продолжением цитируемой публикации. Её це-

лью является анализ электромагнитных процессов в инструментах магнитно-импульсного притяжения данного типа, выполненный на основе численных оценок с помощью ранее полученных аналитических зависимостей для возбуждаемых полей и сил, необходимых для успешного выполнения рихтовки металлических покрытий автомобильных кузовов.

Исходные данные для вычислений взяты из типичных экспериментов, описанных авторами научного издания [6].

Численные оценки

Постановка задач расчёта.

Дано:

- источники поля – плоский катушечный индуктор, индуктор прямоугольной формы, их взаимное расположение представлены на рис.1 и рис.2;

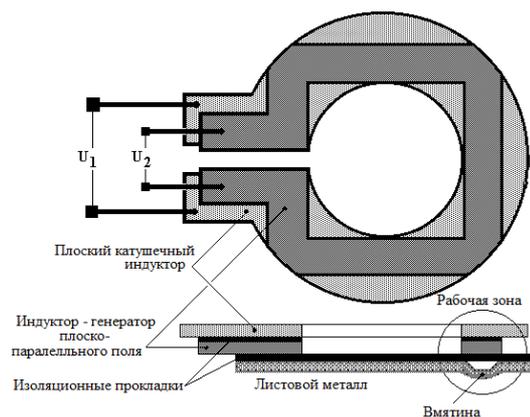


Рис.1. Общий вид расчётной модели комбинированной индукторной системы

- оба индуктора расположены соосно на разных расстояниях от внутренней поверхности обрабатываемого листа ($H = 0.006$ м, $h = 0.003$ м);

- геометрия катушечного индуктора: $R_1 = 0.025$ м, $R_2 = 0.063$ м;

- геометрия прямоугольного индуктора: квадрат с внутренними и внешними сторонами, соответственно, $2b_1 = 2R_1 = 0.05$ м, $2b_2 = \sqrt{2}R_2 \approx 0.09$ м.

- обрабатывается стальной лист толщиной $d = 0.0008$ м (удельная электропроводность

$\gamma = 0.6 \cdot 10^7 \frac{1}{\text{Ом} \cdot \text{м}}$);

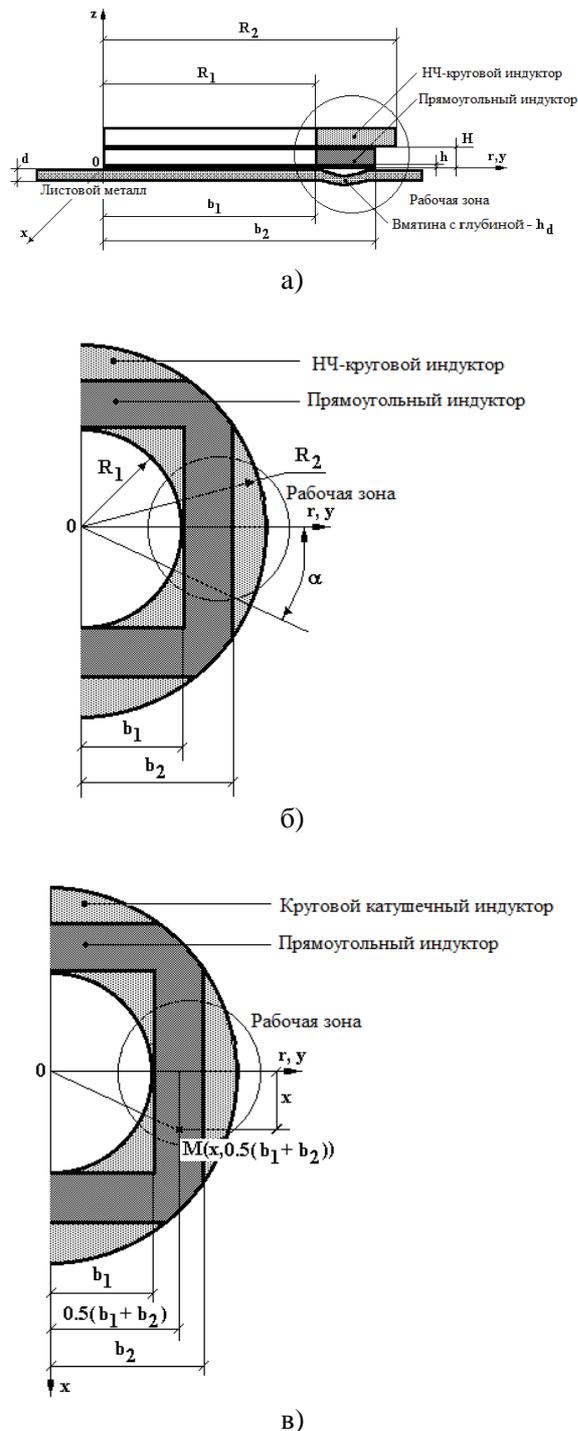


Рис. 2. Модельные представления элементной базы комбинированной индукторной системы для проведения численных оценок

- на вход индукторной системы подаются токовые импульсы, временные зависимости которых функционально одинаковы и представляют собой экспоненциально затухающие синусоиды, то есть

$$j_{1,2}(t) = j_{1,2}^{(\max)} \cdot \varphi_{1,2}(t),$$

$$\varphi_{1,2}(t) = e^{-\delta_{1,2}(\omega_{1,2} \cdot t)} \cdot \sin(\omega_{1,2} \cdot t) \quad (\text{здесь } j_{1,2}^{(\max)} - \text{амплитудные значения плотностей токов, } \varphi_{1,2}(t) - \text{временные функции, } \delta_{1,2} - \text{относительные декременты затухания, } \omega_{1,2} = 2\pi \cdot f_{1,2}, f_{1,2} - \text{рабочие частоты);}$$

- относительные декременты затухания – $\delta_1 \approx 0.2, \delta_2 \approx 0.5$, рабочая частота низкочастотного сигнала – $f_1 = 2.2$ кГц, плоскопараллельного поля – $f_2 = 5 \div 10$ кГц;

начальные моменты токовых импульсов смещены, величина смещения составляет

$$\Delta t \approx \frac{\pi}{2 \cdot \omega_1} \quad (\text{четверть периода низкочастотного сигнала}).$$

Найти:

- пространственно-временные распределения касательной составляющей напряжённости магнитного поля на поверхностях обрабатываемого металлического листа;
- условия, при выполнении которых возможно притяжение листа со стороны его внутренней поверхности (к индукторам);
- временной характер взаимодействия возбуждаемых полей;
- пространственные зоны максимального воздействия на обрабатываемый лист.

Вычисления

Для более ясного понимания происходящих процессов выпишем из работы [5] напряжённости магнитных полей, возбуждаемых каждым из источников в отдельности.

Но вначале некоторые замечания.

Зависимости, полученные в цитируемой публикации, показывают, что пространственные распределения низкочастотного поля над листом и под листом не зависят от его временного характера. Этого нельзя сказать о временной зависимости плоскопараллельного поля (напомним, что это поле существует только над заготовкой, под ней имеет место только круговое низкочастотное магнитное поле).

Кроме того, особенностью рассматриваемой комбинированной индукторной системы является неравномерность распределённых сил притяжения в рабочей зоне.

Эта неравномерность обусловлена следующим фактором.

Касательная компонента напряжённости кругового низкочастотного магнитного поля направлена по радиусу в цилиндрической системе координат, связанной с соответствующим индуктором. А касательная компонента плоскопараллельного поля направлена вдоль поперечной пространственной координаты в прямоугольной системе координат, связанной со своим источником. Их суперпозиция при соответствующем выборе амплитуд может дать нулевое поле над листовой заготовкой только в центре рабочей зоны, то есть там, где радиус – r совпадает с поперечной координатой – y . Отклонение от центра приводит к тому, что суммирование напряжённостей полей разной геометрии следует проводить с учётом некоторой разницы в их направлениях. Это означает появление зависимости от азимута в цилиндрической системе координат, что эквивалентно появлению зависимости от пространственной переменной – x в прямоугольной системе координат.

Введение азимутального угла – α , характеризующего появление таких зависимостей, иллюстрируется рис.2.

Дальнейшие вычисления будут проведены для центральной части рабочей зоны, где $y = r$ ($x = 0$, см. рис.1,2), и для $y = 0.5 \cdot (b_1 + b_2)$, но $x = \text{var}$ (средняя линия прямоугольного витка).

Формула для напряжённости магнитного поля над листовым металлом с вышеозначенными поправками принимает следующий вид.

Для $y \in [b_1, b_2]$ и $x = 0$,

$$H_s^{(over)}(t, y, z = 0) = H_r(t, r = y, z = 0) + H_y(t, y, z = 0) \quad (1)$$

Для расчёта распределения поля вдоль средней линии прямоугольного витка в рабочей зоне возьмём лежащую на ней произвольную точку $M(x, 0.5 \cdot (b_1 + b_2))$. В этой точке радиус для вычисления радиальной компоненты напряжённости будет равен

$r = \sqrt{\left(\frac{b_1 + b_2}{2}\right)^2 + x^2}$. Кроме того, суммировать r - и y -составляющие напряжённостей магнитных полей в данной точке следует с учётом их направлений (фактически – это суммирование проекции H_r на направление H_y , но можно и наоборот!).

Итак, для $y = 0.5 \cdot (b_1 + b_2)$, $x \in [0, (0.5 \cdot b_2)]$ (дальнейшее увеличение координаты x не имеет смысла ввиду искажения поля прямоугольного витка вблизи внутренних углов) записываем, что

$$H_s^{(over)}(t, y = 0.5(b_1 + b_2), z = 0) \Big|_{x=\text{var}} = H_r \left(t, r = \sqrt{\left(\frac{b_1 + b_2}{2}\right)^2 + x^2}, z = 0 \right) \cdot \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{2 \cdot x}{b_1 + b_2}\right)^2}} + H_y(t, y = 0.5(b_1 + b_2), z = 0) \quad (2)$$

Выражения для $H_{r,y}$ в зависимостях (1) и (2) приведены в работе [5]. В настоящем изложении их развёрнутые выражения опущены ввиду громоздкости.

Результаты расчётов, выполненных с помощью (1) и (2), представлены на рис. 3 и рис.4.

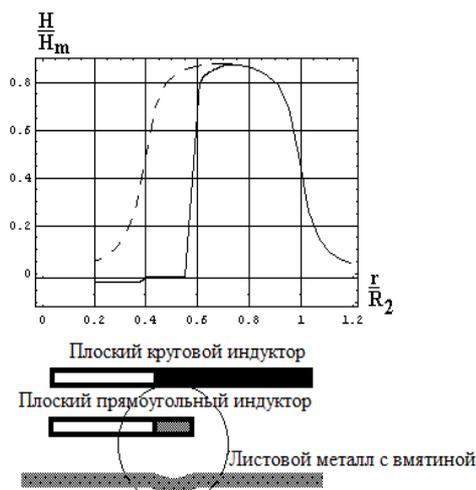


Рис.3. Распределение относительной напряжённости магнитного поля на поверхности листовой заготовки в центре рабочей зоны (нормировка на максимум, $H_m = 0.5 \cdot j_{1m}$, $x = 0$, рис.1,2)

----- касательная составляющая напряжённости кругового низкочастотного поля;

----- касательная составляющая напряжённости результата суперпозиции низкочастотного и плоско параллельного полей;

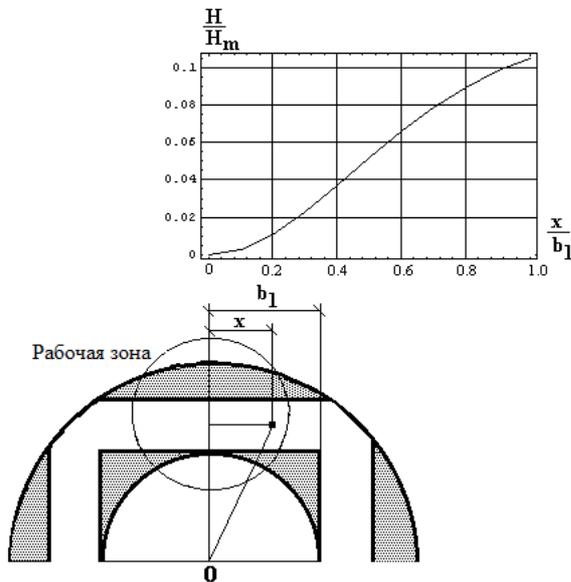


Рис.4. Распределение амплитудных значений касательной компоненты напряжённости результирующего магнитного поля поверхности листовой заготовки вдоль центра прямоугольного витка (нормировка на максимум, $H_m = 0.5 \cdot j_{1m}$).

Как видно из результатов расчёта, возможные размеры рабочей зоны рассчитанной индукторной системы составляют $(b_2 - b_1) \times 2 \cdot (0.5 \cdot b_1) \approx 0.01 \text{ м} \times 0.025 \text{ м}$. В этой области на внешней поверхности листовой заготовки напряжённость магнитного поля будет составлять не более 5% напряжённости кругового поля низкочастотного источника. Учитывая, что сквозь листовую заготовку плоско параллельное поле практически не проникает, на её внешней стороне листовой заготовки, как следует из выполненных оценок, напряжённость действующего поля будет составлять $\sim (0.3 \div 0.4) \cdot j_{1m}$.

Для полноты описания процессов в рассмотренной индукторной системе приведём ранее рассчитанную временную зависимость для силы притяжения, которая будет действовать на листовую заготовку при рабочих частотах $f_1 \approx 2.2 \text{ kHz}$, $f_2 \approx 7.0 \text{ kHz}$,

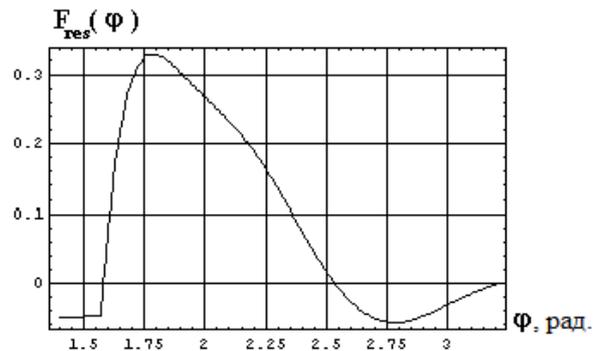


Рис.5. Временная (фазовая) зависимость распределённой силы притяжения-отталкивания (с нормировкой на максимум), действующей на листовую заготовку при $f_1 = 2.2 \text{ kHz}$, $f_2 = 7 \text{ kHz}$, $\delta_1 \approx 0.2$; $\delta_2 \approx 0.5$

При данных временных параметрах амплитуда сил притяжения будет превышать амплитуды сил отталкивания в ~ 6 раз.

При типичной для магнитно-импульсной обработки металлов линейной плотности токов

– $j_m \approx 10^7 \frac{\text{А}}{\text{м}}$ амплитуда напряжённости бу-

дет равна – $H_m \approx 0.35 \cdot 10^7 \frac{\text{А}}{\text{м}}$. Распределён-

ная сила магнитно-импульсного притяжения в комбинированной индукторной системе может достигать величины $\sim 7,7 \text{ МПа}$ ($\sim 77 \text{ Атм}$).

В заключение следует указать, что индукторы – источники поля могут выполняться многовитковыми. Это позволит существенно увеличить напряжённость возбуждаемого магнитного поля и, соответственно, амплитуду сил притяжения.

Выводы

Выполнены численные оценки напряжённостей возбуждаемых полей в комбинированной индукторной системе, основанной на суперпозиции кругового низкочастотного и плоско параллельного магнитного полей.

Проведенные вычисления продемонстрировали дееспособность предлагаемого инструмента рихтовки вмятин в автомобильных кузовках, возможные значения сил притяжения составляют $\sim 7,7 \text{ МПа}$.

Литература

1. Proceedings of the 1-st International Conference on High Speed Metal Forming. (ICHSF 2004) March 31/April 1, 2004. Dortmund, Germany.
2. Батыгин Ю.В., Лавинский В.И., Бажинов А.В., Магнитно-импульсные методы и системы для притяжения тонкостенных листовых металлов. // Труды международной научно-технической конференции «Магнитно-импульсная обработка металлов. Пути совершенствования и развития». Самара, 18-19 сентября 2007.с.3 – 13.
3. Yuriy V. Batygin, Sergey F. Golovashchenko, Andrey V. Gnatov, Pulsed electromagnetic attraction of sheet metals – Fundamentals and perspective applications. //Journal of Materials Processing Technology. – Elsevier. – 2013. – № 213 (3). – pp. 444–452.
4. US.Pat.No.4,986,102, Hendrickson et al. (the Boeing Company, 1991).
5. Расчёт полей в комбинированных индукторных системах – инструментах рихтовки металлических покрытий автомобильных кузовов.//
6. Батыгин Ю.В., Лавинский В.И., Хищенко 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.