

УДК 621.318.4

А.В. Гнатов, доцент, канд. техн. наук,**С.А. Шиндерук, аспирант***Харьковский национальный автомобильно-дорожный университет**ул. Петровского 25, г. Харьков, Украина, 61002**svetlana11177@rambler.ru***СИЛЫ ЛОРЕНЦА В УНИВЕРСАЛЬНОМ ИНСТРУМЕНТЕ МАГНИТНО-ИМПУЛЬСНОЙ РИХТОВКИ**

Проведен расчет электромагнитных процессов в универсальном инструменте магнитно-импульсной рихтовки. Определено радиальное распределение компонент сил Лоренца для металлов с разными значениями магнитной проницаемости. Получены аналитические выражения для нормальной и тангенциальной компонент возбуждаемых сил Лоренца. Определено, что амплитуды нормальной составляющей возбуждаемых сил Лоренца в ферромагнетиках по сравнению с неферромагнетиками возрастают. Полученные результаты проиллюстрированы численными оценками для реальных ситуаций в практике МИОМ.

Ключевые слова: магнитно-импульсная рихтовка, индукторная система, силы Лоренца, электромагнитные процессы, кузовная панель.

Постановка проблемы. В настоящее время все большим спросом пользуются операции по рихтовке кузовных панелей автотранспортных средств. Особенно это становится актуально, если такие операции проходят без повреждения защитного лакокрасочного покрытия кузовной панели [1, 2]. В этой связи возникает потребность в разработке различных технических систем и инструментов, способных провести внешнюю бесконтактную рихтовку, не повреждая защитное покрытие. Особенный интерес представляют инструменты, позволяющие производить обработку, как ферромагнитных так и неферромагнитных листовых металлов кузовной панели авто. К таким инструментам относятся индукционные индукторные системы (ИИС) [3, 4].

Анализ основных достижений и публикаций. Принцип действия ИИС основан на использовании закона Ампера, по которому проводники с коллинеарными одинаково направленными токами притягиваются друг к другу. Собственно название «индукционная индукторная система» было предложено авторами этого изобретения [2, 5–7]. Название, по их мнению, отражает принцип действия, в основе которого лежат индукционные эффекты (закон электромагнитной индукции) и явление силового взаимодействия индуцированных токов (закон Ампера). Индуцированный ток от индуктора (рисунок 1) наводится в листовой заготовке. Если экран и заготовка идентичны, то в них возбуждаются одинаковые токи. Их взаимодействие приводит к взаимному притяжению, но так как экран жестко фиксируется, деформируется лишь листовая заготовка в рабочей зоне ИИС.

Цель работы – расчет электромагнитных процессов в универсальном инструменте магнитно-импульсной рихтовки. Определение радиального распределения сил Лоренца.

Анализ электромагнитных процессов. Для анализа электромагнитных процессов примем расчётную модель в цилиндрической системе координат (рисунок 1) [4].

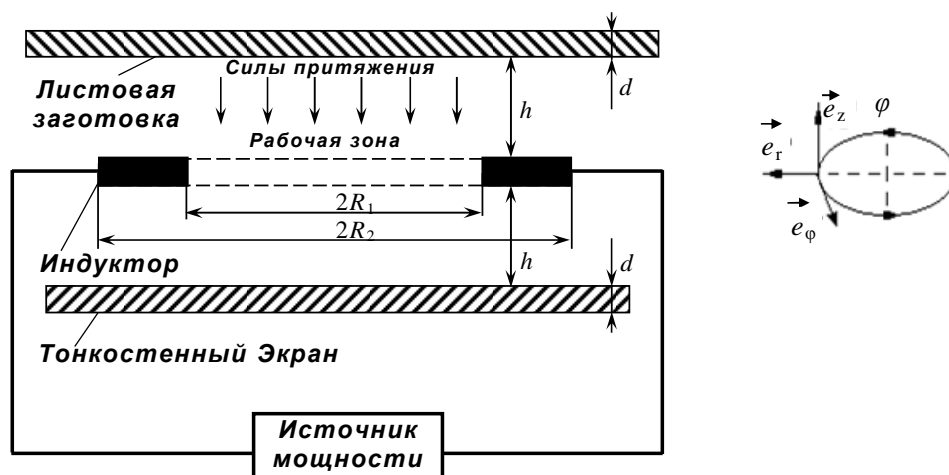


Рисунок 1 – Расчётная модель индукционной индукторной системы

В соответствии с расчетной моделью составляются уравнения Максвелла для возбуждаемых составляющих вектора электромагнитного поля ($E_\varphi \neq 0$, $H_{r,z} \neq 0$), решая которые (опуская промежуточные математические выкладки) запишем в окончательном виде расчетные соотношения для компонент сил Лоренца [4, 7, 8].

Нормальная компонента силы (отталкивание),

$$F_{L\perp}(\phi, r) = F_{Lm}(\phi) \cdot \int_0^d I_1(r, \zeta) \cdot I_2(r, \zeta) d\zeta, \quad (1)$$

где $F_{Lm}(\phi) = \left(\frac{\omega\tau}{2d}\right) \cdot \frac{\mu_0}{2} \cdot j_m^2 \cdot \left(j(\phi) \cdot \frac{dj(\phi)}{d\phi}\right)$,

$$I_1(r, \zeta) = \int_0^\infty \Phi_1(x) \cdot \left(sh\left(x \frac{\zeta-d}{d}\right) - \frac{1}{\mu_r} ch\left(x \frac{\zeta-d}{d}\right) \right) \cdot J_1\left(x \cdot \frac{r}{d}\right) dx,$$

$$\Phi_1(x) = \frac{F(x)}{x^2 \cdot \left(sh(x) \left[sh\left(x \frac{h}{d}\right) + \frac{1}{\mu_r^2} ch\left(x \frac{h}{d}\right) \right] + \frac{1}{\mu_r} e^{x \frac{h}{d}} ch(x) \right)},$$

$$I_2(r, \zeta) = \int_0^\infty \Phi_2(x) \cdot \left(ch\left(x \frac{\zeta-d}{d}\right) - \frac{1}{\mu_r} sh\left(x \frac{\zeta-d}{d}\right) \right) \cdot J_1\left(x \cdot \frac{r}{d}\right) dx,$$

$$\Phi_2(x) = \frac{F(x)}{x \cdot \left(sh(x) \left[sh\left(x \frac{h}{d}\right) + \frac{1}{\mu_r^2} ch\left(x \frac{h}{d}\right) \right] + \frac{1}{\mu_r} e^{x \frac{h}{d}} ch(x) \right)}.$$

Функции $\Phi_{1,2}(x)$ устанавливают сходимость соответствующих несобственных интегралов в практических вычислениях.

Тангенциальная компонента силы,

$$F_{L\parallel}(\phi, r) = F_{Lm}(\phi) \cdot \int_0^d I_1(r, \zeta) \cdot I_3(r, \zeta) d\zeta, \quad (2)$$

где $I_3(r, \zeta) = \int_0^\infty \Phi_2(x) \cdot \left(sh\left(x \frac{\zeta-d}{d}\right) - \frac{1}{\mu_r} ch\left(x \frac{\zeta-d}{d}\right) \right) \cdot J_0\left(x \cdot \frac{r}{d}\right) dx$.

Численные оценки. Проведем оценку возбуждаемых компонент сил Лоренца с помощью выражений (1) и (2) для реальных параметров ИИС: $R_1 = 0.025$ м, $R_2 = 0.035$ м, $h = 0.001$ м, $d = 0.001$ м, $\gamma = 0.4 \cdot 10^7$ 1/(Ом·м) (сталь), тока в индукторе – где I_m – амплитуда, относительный декремент затухания $\delta_0 = 0.2$ (рисунок 2).

Проведенные вычисления сил Лоренца позволяют сделать следующие выводы:

– амплитуды возбуждаемых сил в магнитных металлах по сравнению с немагнитными несколько возрастают;

- нормальные силы сосредоточены под витком индуктора;
- тангенциальные силы также сосредоточены под витком;
- под центром витка направление тангенциальных сил изменяется на противоположное;
- интегральное действие сил во времени стремится к нулю, так как

$$\int_0^\infty F(\phi) d\phi \Rightarrow \int_0^\infty j(\phi) \cdot \frac{dj(\phi)}{d\phi} d\phi = \left. \frac{j^2(\phi)}{2} \right|_0^\infty = 0.$$

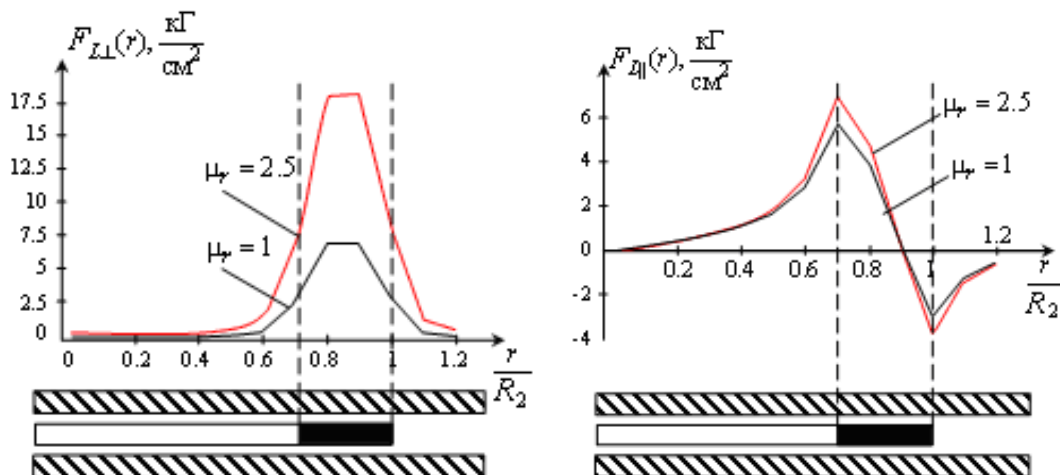


Рисунок 2 – Радиальные распределения компонент сил Лоренца для металлов с разными значениями μ_r

Выводы:

1. Проведен расчет электромагнитных процессов в универсальном инструменте магнитно-импульсной рихтовки. Определено радиальное распределение компонент сил Лоренца для металлов с разными значениями магнитной проницаемости.
2. Получены аналитические выражения для нормальной и тангенциальной компонент возбуждаемых сил Лоренца. Определено, что амплитуды нормальной составляющей возбуждаемых сил Лоренца в ферромагнетиках по сравнению с неферромагнетиками возрастают, причем больше, чем в два раза.
3. По полученным расчетным выражениям построены графические зависимости радиального распределения компонент сил Лоренца.

Библиографический список использованной литературы

1. Гнатов А. В. Импульсные магнитные поля для прогрессивных технологий. Магнитно-импульсные технологии для формовки кузовных элементов автомобиля: монография / А. В. Гнатов, Ю. В. Батыгин, Е. А. Чаплыгин. – Saarbrücken: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2012. – 208 с.
2. Туренко А. Н. Импульсные магнитные поля для прогрессивных технологий. Том 3. Теория и эксперимент притяжения тонкостенных металлов импульсными магнитными полями: монография / А. Н. Туренко, Ю. В. Батыгин, А. В. Гнатов. – Х. : ХНАДУ, 2009. – 240 с.
3. Батыгин Ю. В. Притяжение тонкостенных металлических листов магнитным полем одновиткового индуктора / Ю. В. Батыгин, А. В. Гнатов, С. А. Щиголева // Электричество. – М., 2011. – № 4. – С. 55–62.
4. Электромагнитные процессы в симметричных индукционных системах с идентичными ферромагнитными тонкостенными экраном и листовой заготовкой / Ю. В. Батыгин, А. В. Гнатов, Щ.В. Аргун [и др.] // Електротехніка і електромеханіка. – Х.: НТУ "ХПІ". – № 4. – С. 50–53.
5. Чаплыгин Е. А. Разработка цилиндрических индукционных индукторных систем для магнитно-импульсного притяжения тонких металлических листов: дис. ... кандидата техн. наук: 05.09.13 / Чаплыгин Евгений Александрович. – Харьков, 2009. – 169 с.
6. Батыгин Ю. В. Эксперименты с индукционными индукторными системами для магнитно-импульсного притяжения листовых металлов / Ю. В. Батыгин, Е. А. Чаплыгин, Т. Т. Черногор // Електротехніка і електромеханіка. – Харків, 2008. – № 6. – С. 64–67.
7. Гнатов А.В. Анализ электродинамических процессов в цилиндрических индукторных системах – инструментах магнитно-импульсной рихтовки: монография / А. В. Гнатов. – Х. : ХНАДУ, 2013. – 292 с.
8. Мэтьюз Дж. Математические методы физики / Дж. Мэтьюз, Р. Уокер. Пер. с англ. канд. физ.-мат наук В.П. Крайнова. – М: Атомиздат, 1972. – 399 с.

Поступила в редакцию 15.06.2013 г.

Гнатів А.В., Шиндерук С.О. Сили Лоренца в універсальному інструменті магнітно-імпульсного рихтування

Проведено розрахунок електромагнітних процесів в універсальному інструменті магнітно-імпульсного рихтування. Визначено радіальний розподіл компонент сил Лоренца для металів з різними значеннями магнітної проникності. Отримано аналітичні вирази для нормальної та тангенціальної компонент збуджуваних сил Лоренца. Визначено, що амплітуди нормальної складової збуджуваних сил Лоренца в феромагнетиках в порівнянні з неферомагнетиками зростають. Отримані результати проілюстровані чисельними оцінками для реальних ситуацій в практиці МІОМ.

Ключові слова: магнітно-імпульсне рихтування, індукторна система, сили Лоренца, електромагнітні процеси, кузовна панель.

Hnatov A.V., Shinderuk S.A. The Lorentz force in the universal tool of magnetic pulse straightening

The calculation of the electromagnetic processes in a universal instrument of the magnetic pulse straightening was carrying out. The radial distribution of the components of the Lorentz forces for metals with different permeability was determined. The analytical expressions for the normal and tangential component of the excited Lorentz force were obtained. The amplitude of the normal component excited the Lorentz forces in ferromagnets compared with nonferromagnets increases. The obtained results are illustrated by numerical estimates for the real situations in the practice of EMPF.

Keywords: a magnetic pulse straightening, an induction system, the Lorentz force, the electromagnetic processes, a body panel.