

УДК 624.318

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ И ТЕОРЕТИЧЕСКИХ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЙ ДЛЯ ВОЗБУЖДАЕМЫХ ПОЛЕЙ И ТОКОВ В ИНДУКТОРНОЙ СИСТЕМЕ С КОНИЧЕСКИМ ОТВЕРСТИЕМ

С.А. Щиголева, аспирант, ХНАДУ

Аннотация. Экспериментально подтверждена достоверность расчётов электродинамических характеристик при магнитно-импульсной обработке металлов в одновитковой индукторной системе с коническим отверстием индуктора и тонкостенным листовым металлом в низкочастотном режиме действующих полей. Показано, что вариация угла наклона образующих внутреннего конуса в исследованных пределах несколько изменяет характер распределения возбуждаемых полей и токов.

Ключевые слова: магнитно-импульсная обработка, обрабатываемый металл, компоненты напряжённости магнитного поля, плотность индуцированного тока, индукторная система.

ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ТА ТЕОРЕТИЧНИХ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕННЯ ДЛЯ ЗБУДЖУВАНИХ ПОЛІВ ТА СТРУМІВ У ІНДУКТОРНІЙ СИСТЕМІ З КОНІЧНИМ ОТВОРОМ

С.О. Щиголева, аспірант, ХНАДУ

Анотація. Експериментально підтверджено достовірність розрахунків електродинамічних характеристик при магнітно-імпульсній обробці металів в одновитковій індукторній системі з конічним отвором індуктора і тонкостінним листовим металом у низькочастотному режимі діючих полів. Показано, що варіація кута нахилу твірних внутрішнього конуса в досліджених межах децю змінює характер розподілу збуджуваних полів і струмів.

Ключові слова: магнітно-імпульсна обробка, оброблюваний метал, компоненти напруженості магнітного поля, щільність індукованого струму, індукторна система.

COMPARATIVE ANALYSIS OF EXPERIMENTAL AND THEORETICAL RESULTS FOR EXCITED FIELDS AND CURRENTS RESEARCH IN THE INDUCTIVE SYSTEM WITH A CONICAL BORE

S. Schigoleva, postgraduate, KhNAHU

Abstract. The electrodynamic characteristics calculations reliability of magnetic-pulse metal treatment in a single-turn inductor system with a conical bore in inductor and a thin-walled sheet metal at low current mode fields are experimentally confirmed. It is shown that the variation of the angle forming the inner cone in the test within a few changes the nature of the distribution of the excited fields and currents.

Key words: magnetic pulse treatment, processed metal, the components of the magnetic field, induced current density, inductor system.

Введение

Одновитковые цилиндрические индукторные системы как инструменты для магнитно-импульсной обработки металлов оказались наиболее эффективными в экспериментах по

магнитно-импульсному притяжению заданных участков тонкостенных листовых металлов. Такие инструменты имеют практическое значение для бесконтактной рихтовки (устранение вмятин) в металлических обшивках автомобильных кузовов.

Создание действенных инструментов требует адекватных представлений о характере происходящих электродинамических процессов. В первую очередь речь идёт о возбуждении вихревых токов в заготовках, их взаимодействии с током индуктора, возбуждении сил магнитного притяжения и соответствующих расчётных соотношениях. Индукторные системы с коническим отверстием представляют интерес, так как конусообразная форма внутреннего отверстия индуктора позволяет сдвинуть максимум вертикальных составляющих сил магнитного воздействия к центру системы и, таким образом, обеспечивает более эффективную обработку заготовки [1].

Анализ публикаций

Впервые идея магнитно-импульсного притяжения ферромагнитного металла к индуктору была экспериментально доказана учёными НТУ ХПИ в 2004 году [2]. Как показали расчеты индукторной системы с отверстием конического профиля [3], электродинамические усилия, развиваемые в такой системе, значительны по амплитуде и их максимум концентрируется ближе к центру рабочей зоны, что обеспечивает более эффективное устранение вмятин металла.

Цель и постановка задачи

Цель настоящей работы – сравнительный анализ экспериментальных и теоретических результатов исследований, полученных для возбуждаемых полей и токов при магнитно-импульсной обработке металлов в системе с одновитковым индуктором с коническим отверстием и тонкостенным листовым металлом в низкочастотном режиме действующих полей.

Экспериментальные исследования

Теоретические исследования [3] для полноты и целостности рассматриваемого вопроса следует подтвердить экспериментально.

На рис. 1 представлены расчётная модель индукторной системы из одновиткового соленоида с внутренним отверстием конической формы и тонкостенной листовой заготовки (а) и фото индуктора, который непосредственно использовался в экспериментах (б).

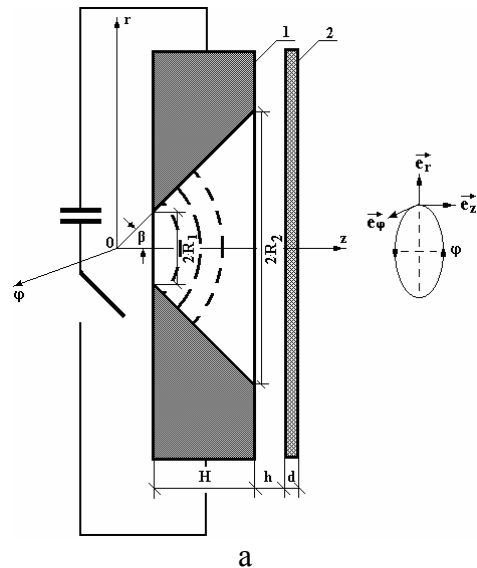


Рис. 1. Индукторная система из одновиткового соленоида с внутренним отверстием конической формы: а – расчётная модель, 1 – виток индуктора, плоская листовая заготовка, 2 – $(\vec{e}_r, \vec{e}_\varphi, \vec{e}_z)$ – направляющие орты цилиндрической системы координат); б – собственно индуктор в экспериментах

Для расчётных радиальных зависимостей были использованы выведенные ранее аналитические соотношения, представленные в [3]

$$j_\varphi(\varphi, r, z) = \frac{\gamma L_t \omega}{2\pi d(1 - \cos\beta)} \cdot \frac{\partial I(\varphi)}{\partial \varphi} \cdot \frac{\left(\operatorname{ch}x \left(\frac{\zeta}{d} - 1 \right) - \mu_r \cdot \operatorname{sh}x \left(\frac{\zeta}{d} - 1 \right) \right)}{\int_0^\infty \left(\mu_r^2 \operatorname{ch} \left(x \frac{h}{d} \right) + \operatorname{sh} \left(x \frac{h}{d} \right) \right) \operatorname{sh}x + \mu_r e^{\frac{xh}{d}} \operatorname{ch}x}, \quad (1)$$

$$\int_0^{R_2} \frac{r(R_2 \operatorname{ctg}\beta + h) J_0 \left(x \frac{r}{d} \right) dr}{\left(r^2 + (R_2 \operatorname{ctg}\beta + h)^2 \right)^{3/2}} J_1 \left(x \frac{r}{d} \right) dx$$

$$H_r(\varphi, r, z) = \frac{-L_i I(\varphi)}{2\pi d^2(1 - \cos\beta)} \cdot \frac{x \left(\mu_r \cdot \operatorname{chx} \left(\frac{\zeta}{d} - 1 \right) - \operatorname{shx} \left(\frac{\zeta}{d} - 1 \right) \right)}{\int_0^\infty \left(\mu_r^2 \operatorname{ch} \left(x \frac{h}{d} \right) + \operatorname{sh} \left(x \frac{h}{d} \right) \right) \operatorname{shx} + \mu_r e^{x \frac{h}{d}} \operatorname{chx} \, dx}, \quad (2)$$

$$\int_0^{R_2} \frac{r(R_2 \operatorname{ctg}\beta + h) J_0 \left(x \frac{r}{d} \right) dr}{\left(r^2 + (R_2 \operatorname{ctg}\beta + h)^2 \right)^{3/2}} J_1 \left(x \frac{r}{d} \right) dx$$

$$H_z(\varphi, r, z) = \frac{L_i I(\varphi)}{2\pi d^2(1 - \cos\beta)} \cdot \frac{x \left(\operatorname{chx} \left(\frac{\zeta}{d} - 1 \right) - \mu_r \cdot \operatorname{shx} \left(\frac{\zeta}{d} - 1 \right) \right)}{\int_0^\infty \left(\mu_r^2 \operatorname{ch} \left(x \frac{h}{d} \right) + \operatorname{sh} \left(x \frac{h}{d} \right) \right) \operatorname{shx} + \mu_r e^{x \frac{h}{d}} \operatorname{chx} \, dx}, \quad (3)$$

$$\int_0^{R_2} \frac{r(R_2 \operatorname{ctg}\beta + h) J_0 \left(x \frac{r}{d} \right) dr}{\left(r^2 + (R_2 \operatorname{ctg}\beta + h)^2 \right)^{3/2}} J_0 \left(x \frac{r}{d} \right) dx$$

где $j_\varphi(\varphi, r, z)$ – линейная плотность тока, индуцированного магнитным полем индуктора в металле листовой заготовки; $H_r(\varphi, r, z)$ и $H_z(\varphi, r, z)$ – тангенциальная и нормальная компоненты напряжённости магнитного поля в металле листовой заготовки; γ – удельная электропроводность металла заготовки; L_i – индуктивность витка индуктора; ω – циклическая частота процесса; d – толщина листового металла; β – угол наклона образующей конуса; $\frac{\partial I(\varphi)}{\partial \varphi}$ – производная силы тока индуктора по фазе φ ; ζ – переменная по оси z , связанная с заготовкой, $\zeta = z - (H + h)$; h – расстояние между витком индуктора и листовой заготовкой; R_2 – больший радиус конического отверстия; μ_r – относительная магнитная проницаемость металла заготовки и x – дополнительно введенная переменная для упрощения расчёта, равная $\lambda \cdot d$.

Оборудование для эксперимента включало: низковольтный генератор токовых импульсов [4], согласующее устройство, рассчитанное на рабочую частоту в диапазоне $-f \sim 1,5-2$ кГц [4], индукторные системы – источники магнитного поля, индукционные датчики

тангенциальной и нормальной составляющей электромагнитного поля [5], интегратор, рассчитанный на указанную частоту, и осциллограф.

Источниками магнитного поля служили одновитковые индукторы с коническим отверстием с внутренним и внешним радиусами, соответственно, $R_1 = 0,0075$ м и $R_2 = 0,019$ м. Угол наклона образующей конуса $\beta = 60^\circ$ и $\beta = 75^\circ$. В качестве заготовки был взят листовый металл – образец из немагнитной стали с удельной электропроводностью $\gamma = 0,4 \cdot 10^7$ 1/Ом·м и толщиной $d = 0,001$ м. Расстояние от витка индуктора до заготовки $h = 0,001$ м.

Результаты измерений формировались в относительных единицах (нормировка на максимальную амплитуду). Измерения компонент напряжённости магнитного поля проводились по направлению «А» (рис. 2) между индуктором и заготовкой.

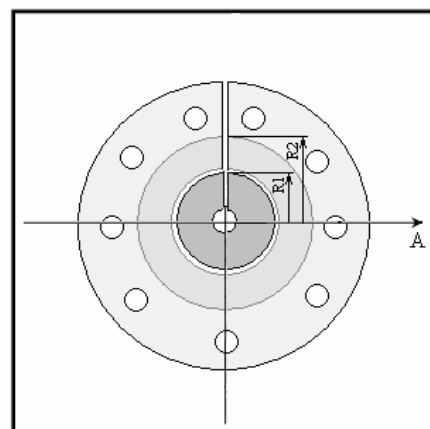


Рис. 2. Схема системы с индуктором, имеющим отверстие конической формы, с указанием направления для измерений индукционными датчиками

Индукционные датчики представляли собой катушки из достаточно тонкого провода, намотанные на диэлектрические полосы с шириной до $\approx 0,01$ м и толщиной до $\approx 0,00025$ м. В зоне измерения поперечный размер намотки не превышал $\approx 0,001$ м.

На графиках ниже приведены экспериментальные и расчётные радиальные распределения тангенциальной (рис. 3 и 4) и нормальной (рис. 5 и 6) составляющих напряжённости магнитного поля на внутренней поверхности заготовки.

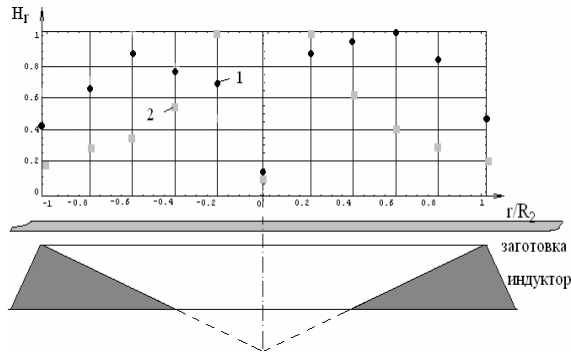


Рис. 3. Результаты измерений радиального распределения тангенциальной компоненты напряжённости магнитного поля в относительных единицах (нормировка на собственный максимум): 1 – угол наклона образующей конического отверстия индуктора 60° , 2 – угол наклона образующей конического отверстия индуктора 75°

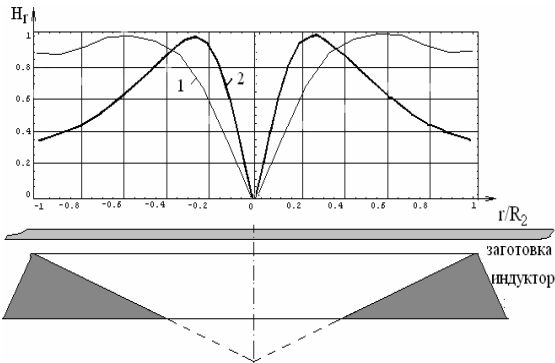


Рис. 4. Результаты расчёта радиального распределения тангенциальной компоненты напряжённости магнитного поля в относительных единицах (нормировка на собственный максимум): 1 и 2 – аналогично

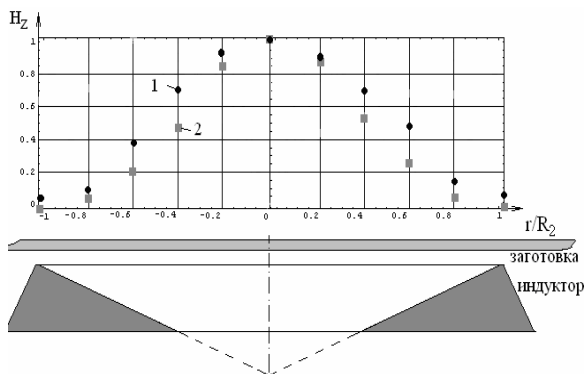


Рис. 5. Результаты измерений радиального распределения нормальной компоненты напряжённости магнитного поля в относительных единицах (нормировка на собственный максимум): 1 и 2 – аналогично

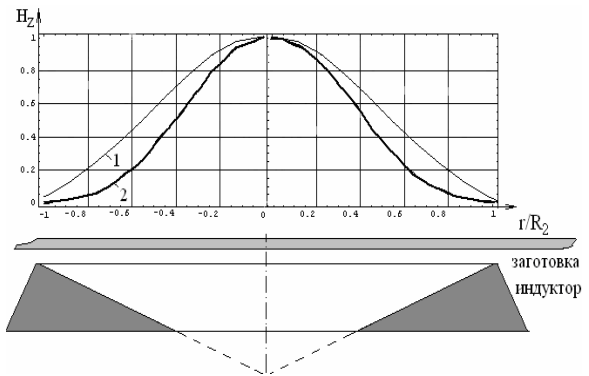


Рис. 6. Результаты расчёта радиального распределения нормальной компоненты напряжённости магнитного поля в относительных единицах (нормировка на собственный максимум): 1 и 2 – аналогично

Эксперименты по измерению плотности тока, индуцированного в металле заготовки, проводились при тех же исходных данных и условиях, но без интегратора и индукционных датчиков (катушечных зондов) – напрямую на осциллограф (рис. 7). Для сравнения с расчётным распределением плотности тока в заготовке приведён рис. 8.

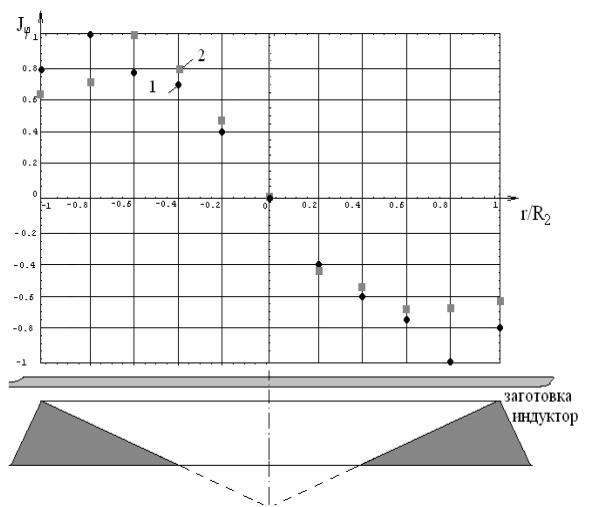


Рис. 7. Экспериментальное радиальное распределение линейной плотности тока в относительных единицах (нормировка на собственный максимум), индуцированного в металле заготовки: 1 и 2 – аналогично

Как видно из сравнения рисунков, характер экспериментального распределения компонент напряжённости магнитного поля и плотности тока с небольшой погрешностью совпадает с теоретическими исследованиями для данной индукторной системы.

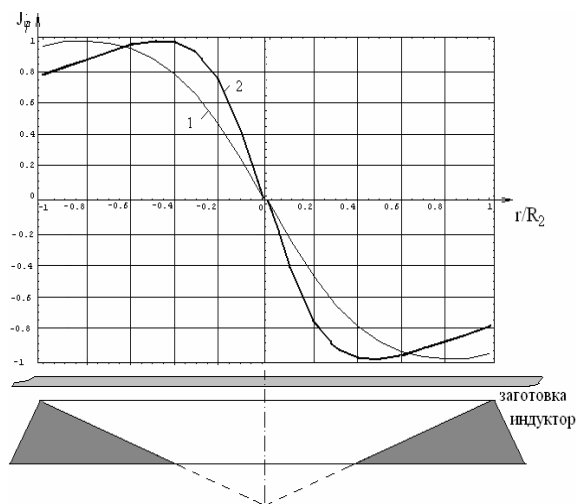


Рис. 8. Расчётное радиальное распределение линейной плотности тока в относительных единицах (нормировка на собственный максимум), индуцированного в металле заготовки: 1 и 2 – аналогично

В заключение хочу выразить благодарность сотрудникам лаборатории электромагнитных технологий – Батыгину Ю. В., Чаплыгину Е. А. и Смирнову Д.О. за содействие в проведении данных экспериментальных исследований.

Выводы

Проведенные измерения показали, что:
– можно считать достоверными расчётные зависимости для компонент напряжённости возбуждаемого магнитного поля и плотности тока, индуцированного в металле листовой заготовки;

– коническая форма внутреннего окна индуктора позволяет сконцентрировать возбуждаемый магнитный поток, а следовательно, и компоненты напряжённости, и индуцированные токи в центральной области системы;

– вариация угла наклона образующих внутреннего конуса в исследованных пределах несколько изменяет характер распределения возбуждаемых полей и токов.

Литература

1. Белый И.В. Справочник по магнитноимпульсной обработке металлов / И.В. Белый, С.М. Фертик, Л.Т. Хищенко. – Х.: Вища школа, 1977. – 168 с.
2. Batygin Yu. Direction Change of the Force Action upon Conductor under Frequency Variation of the Acting magnetic Field / Yu. Batygin, V. Lavinsky, L. Khimenko // Proceedings of the 1-st International Conference on High Speed Metal Forming, March 31/ Dortmund, Germany. – 2004. – Vol. 1. – P. 157–160.
3. Батыгин Ю.В. Анализ электродинамических процессов при деформировании тонкостенного металла в поле одновиткового соленоида с внутренним отверстием конической формы / Ю.В. Батыгин, А.В. Гнатов, С.А. Щиголева // Современные проблемы и пути их решения в науке, транспорте, производстве и образовании: сб. науч. тр. по материалам международной научно-практической конференции. – 2011. – Т. 2 – С. 11 – 17.
4. Туренко А.Н. Импульсные магнитные поля для прогрессивных технологий. – Т. 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.
5. Батигін Ю.В. Прогресивні технології в автотранспортних засобах. Ч. I. Фізичні основи магнітно-імпульсних технологій для формування кузовних елементів автомобіля: навчальний посібник / Ю.В. Батигін, А.В. Гнатов, Е.А. Чаплигін. – Х.: ХНАДУ, 2011. – 160 с.

Рецензент: О.П. Алексеев, профессор, д.т.н., ХНАДУ.

Статья поступила в редакцию 28 марта 2012 г.