

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
“ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ”**

Серіков Георгій Сергійович

УДК 621.318

**УДОСКОНАЛЕННЯ ІНДУКТОРНИХ СИСТЕМ ДЛЯ
МАГНІТНО-ІМПУЛЬСНОГО ФОРМУВАННЯ
МЕТАЛЕВИХ ЛИСТІВ**

Спеціальність 05.09.13 – техніка сильних електричних та магнітних полів

Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Харків – 2010

Дисертацією є рукопис

Робота виконана на кафедрі автомобільної електроніки в Харківському національному автомобільно-дорожньому університеті Міністерства освіти і науки України

Науковий керівник: доктор технічних наук, професор
Батигін Юрій Вікторович,
Харківський національний автомобільно-
дорожній університет,
завідувач кафедри фізики

Офіційні опоненти: доктор технічних наук,
старший науковий співробітник
Баранов Михайло Іванович,
Науково-дослідний та проектно-конструкторський
інститут «Молнія» Національного технічного
університету «Харківський політехнічний інститут»,
головний науковий співробітник

кандидат технічних наук
Богуславський Леонід Зиновійович,
Інститут імпульсних процесів і технологій
Національної академії наук України, м. Миколаїв,
завідувач відділу високовольтних імпульсних систем

Захист відбудеться “17” червня 2010 р. о 14.30 год. на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.050.08 в електророботострої, ауд. 1 у Національному технічному університеті «Харківський політехнічний інститут» за адресою:
61002, м. Харків, вул. Фрунзе, 21.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут».

Автореферат розісланий « ____ » _____ 2010 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради

О. Ю. Юр'єва

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Магнітно-імпульсна обробка металів належить до переліку прогресивних технологій, що відповідають усім вимогам сучасності: екологічна чистота, економна витрата енергетичних та матеріальних ресурсів, висока продуктивність. Створення дієздатних інструментів потребує проведення теоретичних і експериментальних досліджень, які направлені на впровадження нових сучасних технологій та обладнання. Перспективним є використання конструкцій ефективних індукторних систем, які дозволяють здійснювати задані виробничі операції з обробки металів без механічних контактів за рахунок дії сильних імпульсних магнітних полів. З великого переліку таких виробничих операцій виділяються такі, що не можуть бути виконані за допомогою звичайних традиційних методів, а саме: формування заданого профілю кутових вигинів у металевих листах, притягнення заданих ділянок пошкодженої поверхні автомобільних кузовів та ін. Таким чином, розробка теоретичних засад та створення магнітно-імпульсних методів обробки металів є актуальною темою науково-прикладних досліджень, які визначили тему дисертаційної роботи.

Зв'язок дисертаційної роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота виконана на кафедрі автомобільної електроніки Харківського національного автомобільно-дорожнього університету та пов'язана з участю здобувача як виконавця у держбюджетній НДР МОН України: «Теоретичне обґрунтування методу імпульсної обробки тонких листових металевих заготовок» (ДР №0107U004556).

Мета і задачі дослідження. Метою дисертаційної роботи є удосконалення індукторних систем для магнітно-імпульсного формування кутів у металевих листах і притягнення заданих ділянок тонкостінних провідникових об'єктів.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі задачі:

- провести аналіз індукторних систем для виконання виробничих операцій з формування заданого профілю ділянок поверхні металевих листів;
- сформулювати, теоретично та експериментально обґрунтувати шляхи підвищення електродинамічного зв'язку інструмента для отримання заданого профілю кутів з металевою заготовкою;
- сформулювати, теоретично та експериментально обґрунтувати науково-технічне рішення про можливість підвищення силових характеристик інструмента для притягнення заданих ділянок поверхні тонких металевих листів у вигляді індукторної системи з додатковим допоміжним екраном і подвійним витком прямокутної геометрії;
- розробити системи автоматики та управління модельного джерела потужності для моделювання електромагнітних процесів у діапазоні робочих частот діючих полів (1...35 кГц);

- розробити системи вимірювання основних характеристик електромагнітних процесів (напруженостей магнітних полів, амплітуд індукованих струмів);
- провести експериментальні дослідження запропонованих конструкцій індукторних систем з метою визначення рівня достовірності розвинутих у дисертаційній роботі теоретичних положень щодо реалізації магнітно-імпульсних технологій.

Об'єкт дослідження – електромагнітні процеси та електродинамічні зусилля в індукторних системах для формування заданого профілю кутових вигинів у металевих листах і індукційних індукторних системах прямокутної геометрії з подвійним витком, призначених для притягнення заданих ділянок металевих поверхонь силами імпульсних полів.

Предмет дослідження – інструмент магнітно-імпульсного формування заданого профілю ділянок на поверхні металевих листів.

Методи дослідження. Теоретичні дослідження електромагнітних процесів у запропонованих індукторних системах проводилися за допомогою апарата теорії електромагнітного поля та технічної електродинаміки, рішення поставлених крайових задач здійснювалося аналітичними методами математичної фізики з наступною комп'ютерною обробкою отриманих результатів. Експериментальні дослідження виконувалися на спеціально розробленому стенді для моделювання електромагнітних процесів в інструментах для магнітно-імпульсного формування тонкостінних листових металів.

Наукова новизна одержаних результатів:

1. Розроблені фізико-математичні моделі електромагнітних процесів, що протікають у вдосконалених індукторних системах для деформації магнітним тиском кутових вигинів і притягнення прямокутних ділянок листових металевих заготовок;
2. Вперше показано, що максимальна концентрація сил тиску в кутах зігнутих металевих листів реалізується за допомогою індукторної системи у вигляді двох витків, площини яких розташовані під кутом одна до одної;
3. Вперше показано, що притягнення прямокутних ділянок тонкостінних металевих листів можливе за допомогою індукційної індукторної системи, робоча зона якої знаходиться між паралельними струмопроводами подвійного витка.

Практичне значення одержаних результатів для техніки сильних електричних та магнітних полів полягає у наданні практичних рекомендацій щодо створення індукційних індукторних систем для притягнення листових металів, що дозволяють деформувати прямокутні ділянки і формувати в робочій зоні заданий поперечний розподіл діючих полів. Створено індукторну систему, що дозволяє в режимі різкого поверхневого ефекту реалізувати цілеспрямовану силову дію на внутрішню порожнину у вигині металевих листів.

Результати дисертаційної роботи знайшли подальше продовження в практичних розробках інструментів – індукторних систем для електромагнітного штампування металевих частин обшивки транспортних засобів, а також для безконтактного зовнішнього рихтування вм'ятин у металевих обшивках автомобільних кузовів і літаків без порушення захисного лакофарбового покриття.

Створено універсальне модельне джерело потужності та автоматизований вимірювальний комплекс, що дозволяє проводити дослідження просторового розподілу вихрових струмів і компонент магнітного поля в діапазоні робочих частот магнітних полів 1...35 кГц.

Вдосконалено методику вимірювання індукованих струмів без порушення цілісності досліджуваного об'єкта, яка істотно розширює перелік експериментальних методик визначення характеристик електромагнітних полів.

Розроблено електронну систему управління тиристорними комутаторами сучасних комплексів з контролю і діагностики стану кузовів автотранспортних засобів, а також методику контролю силових систем у зарядно-розрядних колах електротехнічних пристроїв, які застосовуються на СТО ТОВ "Реал" (м. Харків).

Впроваджено електронну система керування тиристорними комутаторами у стенд по контролю гальмівних систем СТМ 8000 «ХарТрансПас» (м. Харків).

За результатами досліджень було отримано 2 патенти України на корисну модель.

Особистий внесок здобувача. Всі результати дисертаційної роботи здобувачем отримані одноосібно, серед них: рішення задач та аналіз електродинамічних процесів в індукторних системах для формування заданого профілю кутових вигинів у попередньо вигнутих металевих листах; формулювання завдань дослідження особливостей електромагнітних процесів при інтенсивній дифузії діючих полів в індукційних індукторних системах прямокутної геометрії для притягнення заданих ділянок листових металів; розробка системи автоматики та управління для модельного джерела потужності; проведення експериментів; обробка отриманих результатів; формулювання висновків за розділами та основних висновків по всій дисертаційній роботі.

Апробація результатів дисертації. Основні положення і результати дисертаційної роботи доповідалися та обговорювалися на міжнародних науково-технічних конференціях: «Физические и компьютерные технологии» (м. Харків; 2007 р.), «Современное состояние использования импульсных источников энергии в промышленности» (м. Харків; 2007 р.), а також на міжнародному симпозіумі «Проблемы совершенствования электрических машин и аппаратов. Теория и практика (SIEMA)» (м. Харків, 2007 - 2008 рр.).

Публікації. За результатами дисертації опубліковано 11 наукових праць, з них 9 статей у фахових наукових виданнях ВАК України, отримано 2 патенти на корисну модель.

Структура та обсяг дисертації. Дисертація складається зі вступу, 4 розділів, висновків, 4 додатків та списку використаних джерел. Повний обсяг роботи становить 161 сторінку, серед них: 50 рисунків по тексту, 4 таблиці по тексту, 4 додатки на 17 сторінках; список використаних джерел із 145 найменувань на 18 сторінках.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обгрунтовано актуальність дисертаційної роботи, сформульовані мета та задачі дослідження, представлено об'єкти дисертаційного дослідження. Викладено основні наукові та практичні результати. Наведено дані щодо апробації результатів роботи.

У першому розділі проведено аналіз літератури за проблемою магнітно-імпульсної обробки тонкостінних металів (МІОМ). Описано особливості і проблеми, що виникають, порівняно з традиційними способами обробки металів тиском. Особливу увагу приділено використанню МІОМ у машинобудівній та транспортній промисловості.

Значний внесок у розробку загальнотеоретичних та інженерно-прикладних проблем, пов'язаних з використанням МІОМ у різних галузях промисловості, зробили багато дослідників. Серед них: М. М. Балтаханов, М. І. Баранов, Ю. В. Батигін, І. В. Белий, В. М. Бондалетов, О. Ю. Бондаренко, С. С. Вдовін, В. О. Глущенко, В. О. Говорков, Л. Д. Горкін, Є. Г. Іванов, П. Л. Калантаров, Г. Кнопфель, В. П. Князев, А. Н. Кравченко, В. І. Лавінський, О. В. Легеза, Дж. Мет'юз, В. М. Михайлов, Д. Монтгомері, Ш. А. Немсадзе, О. Л. Новгородцев, Д. Паркінсон, Л. В. Півоваров, О. Д. Подольцев, В. В. Решетников, В. В. Рудаков, А. І. Титко, Р. Уокер, Л. Т. Хіменко, Л. О. Цейтлін, В. Т. Чемерис, Г. А. Шнеерсон та інші.

Аналіз існуючих напрямків технічної реалізації магнітно-імпульсних технологій, у тому числі при обробці металів, ступеня їх теоретичного обгрунтування та фізико-математичного осмислення свідчить, що на сучасному етапі існує достатньо розвинута галузь наукових знань, підкріплена відповідною експериментальною базою та різноманітними реальними втіленнями технологій у різні галузі промислового виробництва.

Відзначимо, що для подальшого розвитку технологій МІОМ необхідно розширення переліку виробничих операцій. Це стосується технічних рішень при виготовленні інструментів з використанням вказаних магнітно-імпульсних систем шляхом розширення діапазону струмів, застосуванням нових конструктивних варіантів, що здатні суттєво знизити енергоємність обробки металів.

В автомобільній промисловості досить актуальним є виробниче завдання «заповнення кутів» (термін технологів) в елементах кузовної обшивки до заданого рівня чіткості. Відзначимо одне з можливих рішень цього завдання,

де значне місце займає обґрунтування практичної працездатності індукторних систем, які дозволяють реалізувати цілеспрямований силовий вплив на внутрішню порожнину плоского кута у вигині металевго листа в режимі різкого поверхневого ефекту.

Застосування МІОМ у практичній реалізації значно розширюється, завдяки можливості притягнення оброблюваної заготовки до індуктора. У теперішній час найбільш очевидним і яскравим прикладом практичного застосування методів магнітно-імпульсного притягнення може бути операція з видалення вм'ятин у металевих обшивках автомобільних кузовів і літаків без механічних контактів з ними та порушення їхнього зовнішнього захисного лакофарбового покриття.

У другому розділі досліджено аспекти підвищення електромагнітного зв'язку прямокутних індукторних систем із заготівкою, які дозволяють в режимі різкого поверхневого ефекту реалізувати цілеспрямовану силову дію на внутрішню порожнину плоского кута у вигині металевго листа з високою питомою електропровідністю.

Для рішення поставлених задач за основу взято систему рівнянь Максвелла для збуджуваних нетривіальних складових вектора електромагнітного поля $E_x(t, y, z) \neq 0$, $H_y(t, y, z) \neq 0$, $H_z(t, y, z) \neq 0$, перетворених за Лапласом з урахуванням нульових початкових умов:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial H_z(p, y, z)}{\partial y} - \frac{\partial H_y(p, y, z)}{\partial z} = j_x(p, y, z), \\ \frac{\partial E_x(p, y, z)}{\partial z} = -p\mu_0 H_y(p, y, z), \\ \frac{\partial E_x(p, y, z)}{\partial y} = p\mu_0 H_z(p, y, z), \end{array} \right. \quad (1)$$

$$\frac{\partial E_x(p, y, z)}{\partial z} = -p\mu_0 H_y(p, y, z), \quad (2)$$

$$\frac{\partial E_x(p, y, z)}{\partial y} = p\mu_0 H_z(p, y, z), \quad (3)$$

де p – параметр інтегрального перетворення Лапласа; $j_x(p, y, z)$ – щільність стороннього струму – струму в струмопроводі; $\delta(z)$, $\delta(y)$ – дельта-функції Дірака; $j_x(p, y, z) = I(p) \cdot [\delta(z - h) \cdot \delta(y - \ell) - \delta(z - H) \cdot \delta(y - L)]$, $I(p) = L\{I(t)\}$.

У ході аналітичного рішення системи рівнянь було знайдено залежності розподілу магнітного поля і струму, що збуджується прямокутним одновитковим індуктором з тонкими струмопроводами, на поверхнях кутового вигину листової заготовки (рис. 1, а). Достовірність виразів, знайдених для компонент напруженості магнітного поля, виражається в їхній симетрії відносно ортогональних поверхонь $z = 0$ і $y = 0$.

Для оцінки впливу поперечних розмірів джерел на процеси збудження індукторної системи розглянуто модель розрахунку, де струмопроводи мають задану кінцеву протяжність, але їхня товщина є досить малою (рис. 1, б).

a

б

Рис. 1. Розрахункові моделі індукторної системи з одновитковим соленоїдом:
a - з тонкими струмопроводами; *б* - зі струмопроводами кінцевої ширини

Графічні залежності розподілу сили магнітного тиску наведено на рис. 2.

a

б

Рис. 2. Розрахункові залежності сили магнітного тиску, які було нормовано на власний максимум: *a* - з тонкими струмопроводами; *б* - зі струмопроводами кінцевої ширини

Запропоновано та розраховано варіант конструктивного виконання індукторної системи з двома витками прямокутної форми (рис. 3). Це дозволяє максимально сконцентрувати сили магнітного тиску в центрі кута зігнутого металевго листа та одночасно розвантажити віддалені зони заготовки, що деформується. Таким чином реалізується цілеспрямована силова дія з амплітудою в десятки мегапаскалів. У даній індукторній системі на поверхню поблизу кутового вигину металевго листа діятимуть однакові за величиною сили магнітного тиску. Їхня рівнодіюча буде спрямована до центру кута, а її амплітуда перевищує амплітуду координатної складової в $\sqrt{2}$ разів. Принципова сутність сформульованої пропозиції захищена патентом України на корисну модель № u200701443, одним із співавторів якого є здобувач.

Рис. 3. Розрахункова модель індукційної системи з двома витками прямокутної форми та відносні амплітуди збуджувального тиску

У третьому розділі, використовуючи аналітичний розв'язок крайової задачі, досліджено електромагнітні процеси в запропонованій індукційній індукторній системі для притягнення ділянок плоскої листової заготовки. Розглянуто принцип дії та фізику процесів, що протікають у конструкції, схему якої наведено на рис. 4.

a

б

Рис. 4. Розрахункова модель індукційної індукторної системи:
a - власне індуктор; *б* - індукторна система в поперечному перерізу

Аналогічно системі з циліндричним витком і масивним допоміжним екраном ефективною є індукційна індукторна система з масивним провідним екраном, де на робочій поверхні з боку листової заготовки в спеціально

виконаному заглибленні розташовується подвійний виток, між суміжними паралельними струмопроводами якого концентрується максимум збуджуваних сил притягнення.

Відмінність полягає у такому: вибрана геометрія індуктора в прямокутній системі дозволяє подвоїти збуджений в робочій зоні струм, що істотно збільшує її ефективність, порівняно з циліндричною конструкцією. Крім цього, розподіл сил притягнення, порівняно з циліндричною конструкцією, є суттєво більш рівномірним та не спадає до нуля в її геометричному центрі.

Запропонований індуктор виконується з двох плоских прямокутних витків, розташованих в одній площині та з'єднаних послідовно. Таке рішення забезпечує протікання рівних та однаково спрямованих струмів у двох паралельних суміжних провідниках, між якими розташована робоча зона інструмента.

У ході аналітичного рішення системи рівнянь (1) – (3) було вирішено електродинамічну задачу про збудження прямокутною індукційною індукторною системою з ідентичними екраном і листовою заготовкою діючих полів у низькочастотному режимі.

Напруженість електричного поля становить

$$E_x(t, y, \zeta) = -\frac{\mu_0}{2} \cdot \frac{dj(t)}{dt} \cdot \int_0^{\infty} \frac{f(\lambda)}{\lambda} \cdot e^{-\lambda(h+\zeta)} \cdot \cos(\lambda y) d\lambda, \quad (7)$$

де $\zeta \in [0, d]$.

Напруженість магнітного поля становить

$$H_y(t, y, \zeta) = -\frac{j(t)}{2} \cdot \int_0^{\infty} f(\lambda) \cdot e^{-\lambda(h+\zeta)} \cdot \cos(\lambda y) d\lambda. \quad (8)$$

За допомогою виразів (7), (8) було знайдено індуквані струми та діючі магнітні сили

$$J_x(\varphi, y) = -\frac{(\omega \cdot \tau)}{2d^2} \cdot \frac{dj(\varphi)}{d\varphi} \cdot \int_0^{\infty} \frac{f(\lambda)}{\lambda^2} \cdot e^{-\lambda h} \cdot (1 - e^{-\lambda d}) \cdot \cos(\lambda y) d\lambda, \quad (9)$$

де $\tau = \mu_0 \gamma d^2$ – характерний час дифузії поля в провідний шар з питомою електропроводністю γ і товщиною d ; $\varphi = \omega \cdot t$ – фаза діючого поля.

Нормальна розподілена сила притягнення провідників, розміщених на відстані один від одного, з індукваними струмами (9) визначається за допомогою закону Ампера

$$P_{attr}(\varphi, y) = \frac{\mu_0}{2\pi} \cdot \frac{J_x^2(\varphi, y) \cdot D}{(2h)} =$$

$$= \frac{\mu_0 D}{\pi h} \left(\frac{dj(\varphi)}{d\varphi} \right)^2 \left(\frac{j_m \omega \tau}{\pi} \right)^2 \left(\int_0^\infty \frac{f(x)}{x^3} e^{-x \frac{h}{d}} (1 - e^{-x}) \cos\left(x \frac{y}{d}\right) dx \right)^2. \quad (10)$$

Сила відштовхування, яка виникає при взаємодії струму індуктора з індуктованими струмами, була знайдена як інтеграл за товщиною екрана від густини вихрового струму і дотичної компоненти напруженості магнітного поля

$$P_{rep}(\varphi, y) = \mu_0 j_m^2 \cdot j(\varphi) \frac{dj(\varphi)}{d\varphi} \cdot \left(\frac{4\omega\tau}{\pi^2} \right) \cdot \int_0^\infty \int_0^\infty \frac{f(x_1)}{x_1} \cdot e^{-x_1 \frac{h}{d}} \cos\left(x_1 \frac{y}{d}\right) \cdot$$

$$\cdot \frac{f(x_2)}{x_2} \cdot e^{-x_2 \frac{h}{d}} \cdot \cos\left(x_2 \frac{y}{d}\right) \cdot \frac{(1 - e^{-(x_1+x_2)})}{(x_1 + x_2)} dx_1 dx_2, \quad (11)$$

де x_1, x_2 - змінні інтегрування, введені у вирази для напруженості магнітного поля і густини індуктованого струму відповідно.

За чисельними розрахунками сил електромагнітної взаємодії екрана та заготовки за допомогою комп'ютера отримано такі результати: при амплітуді струму в індукторі 40 кА амплітуди збуджуваних електродинамічних сил притягнення перевищують 4 МПа; величина інтегральної сили становить 12 кН; абсолютна величина амплітуди сил відштовхування - $1,7 \cdot 10^5$ Па; амплітуди розподілених сил складають $17 \cdot 10^5 \dots 46 \cdot 10^5$ Па; величина інтегральної сили притягнення в робочій зоні даної індукційної системи може досягати 3,7 кН.

На рис. 5, а наведено результати обчислень, виконаних за формулою (10). Сили відштовхування (рис. 5, б) розраховані за формулою (11).

а

б

Рис. 5. Поперечний розподіл сил електромагнітної взаємодії при частоті діючого струму 1,5 кГц: а - сили притягнення з урахуванням екранування струмопроводами індуктора; б - сили відштовхування

Як впливає з наведеної залежності, запропонована конструкція струмопроводів індуктора дозволяє істотно сконцентрувати і збільшити вихрові струми в робочій зоні. На відміну від циліндричної системи, амплітуда індуктованого струму не падає в геометричному центрі до нуля, а становить 50 % від максимуму. Причому, величина цього «провалу» може регулюватися вибором поперечного розміру робочої зони.

Принципова сутність сформульованої пропозиції захищена патентом

України на корисну модель № u200712252, одним з співавторів якого є здобувач.

У четвертому розділі наводиться опис експериментальних досліджень електромагнітних процесів в індукторних системах, які були запропоновані у дисертаційній роботі. Для підтвердження теоретичних результатів розрахунків були проведені експерименти на модельній установці та апробація в реальних умовах.

Для проведення модельних експериментів на кафедрі автомобільної електроніки ХНАДУ було створено експериментальний стенд, що складається з джерела потужності та погоджувальних пристроїв для варіації частот.

Вимірювання розподілу компонент вектора напруженості магнітного поля між індукторами та оброблюваними об'єктами виконувалися за допомогою традиційних датчиків індукційного типу. Вимірювання розподілу індукованих струмів у металі оброблюваного об'єкта вздовж робочої зони робилися за допомогою поясів Роговського та «схеми із впаяними електродами».

Дослідження електродинамічних характеристик індукторної системи для формування заданого профілю кутових вигинів у тонких металевих листах проводилися на модельному варіанті (рис. 6).

a *б*

Рис. 6. Модельний варіант індукторної системи для формування заданого профілю кутових вигинів у тонких металевих листах: *a* - модель, що досліджується; *б* - відносна величина дотичної компоненти напруженості магнітного поля на кутових поверхнях вигину, виконаного з радіусом 0,01 м

У проведених експериментах вимірювалася дотична компонента напруженості магнітного поля в просторі між витками індуктора і листовою заготовкою. Її значення інтерпретувалися в термінах індукованого струму. Проте вимірювана напруженість – це характеристика поля в повітряному зазорі, а не на поверхні металу. Для підтвердження достовірності висновків щодо електромагнітних процесів, що протикають, було проведено безпосереднє вимірювання струмів, індукованих у заготовці, за допомогою поясів Роговського. Модельні експерименти підтвердили достовірність теоретичних досліджень концентрації магнітного тиску в центр кутового вигину заготовки. Запропонована індукційна система дозволяє також знизити амплітуду магнітного тиску під струмопроводом за зоною обробки на порядок.

Експериментальні дослідження характеристик індукційної індукторної системи для притягнення заданих ділянок листових металів виконувалися на модельному варіанті, що складається з власне індуктора, допоміжного екрана і заготовки (рис. 7, *a*).

Вимірювання компонент напруженості магнітного поля проводилися за допомогою традиційних індукційних датчиків. Вимірювання вихрових

струмів, які виникають у заготовці, проводилися за допомогою способу впаяних в заготовку електродів, результати дублювалися поясом Роговського.

Результати вимірювань способом упаяних в заготовку електродів у порівнянні з відповідною розрахунковою залежністю за формулами, отриманими для низькочастотного часового режиму досліджуваної системи, наведені на рис. 7, б.

a

б

Рис. 7. Модельний варіант індукційної індукторної системи з подвійним прямокутним витком у зборі: *a* - модель, що досліджується; *б* - розрахований та вимірюваний поперечний розподіл індуктованих струмів в досліджуваній індукторній системі при робочій частоті 1,33 кГц

На підставі отриманих значень, струмів які виникають у заготовці, було побудовано якісну експериментальну картину просторового розподілу сил тяжіння в індукційній індукторній системі з подвійним витком прямокутної геометрії. Профіль цієї залежності в робочій зоні між внутрішніми струмопроводами подвійного витка наведено на рис. 8.

Рис. 8. Просторовий розподіл сил електромагнітного притягнення в центральній частині робочої зони індукторної системи

Сигнали в різних способах вимірювання оброблялися за відповідними методиками (пояс Роговського – інтегрування, за допомогою впаяних електродів – ділення на опір між електродами). Їхнє порівняння за амплітудою і розбіжністю часових параметрів показало відмінності, що не перевищують 7 %.

З наведеної на рис. 8 залежності видно, що індукційна індукторна система, яку було запропоновано здобувачем, забезпечує рівномірний розподіл сил притягнення в робочій зоні. На відміну від індукційної індукторної системи циліндричної геометрії, яка вже існує, розроблена система забезпечує ці ненульові сили в геометричному центрі робочої зони.

Силу апробацію запропонованої системи з формовки кутів було проведено на базі лабораторії фірми «Ford Motor Comp» (м. Детройт, США). Здобувачем проведена силова апробація запропонованої індукційної індукторної системи для притягнення тонких металевих листів. Успішна формовка заданих ділянок підтвердила дієздатність запропонованих рішень. Результати експериментів наведено на рис. 9 та рис. 10.

a

б

Рис. 9. Формовка задньої панелі кузовної обшивки автомобілю марки Ford: *a* - за допомогою електрогідравлічного методу, який застосовувався раніше; *б* - за допомогою магнітно-імпульсної обробки з індуктором, який було запропоновано здобувачем

a

б

Рис. 10. Експериментальна заготовка з витягнутою ділянкою (*a*) та запропонована здобувачем індукційна індукторна система (*б*)

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі вирішено науково-практичні задачі зі створення, підвищення силових характеристик та розробки індукційних індукторних систем для магнітно-імпульсного притягнення металевих листів з прямокутною робочою зоною та індукторних систем для магнітно-імпульсного «заповнення» в кутовому вигині металевих листів. У процесі досліджень зроблені такі висновки.

1. Аналіз стану магнітно-імпульсних технологій показує, що сучасне промислове виробництво вимагає подальшого розширення переліку технологічних процесів, де магнітно-імпульсні методи мають незаперечні переваги в порівнянні з відомими механічними або хімічними аналогами. Особливе місце тут займають виробничі операції магнітно-імпульсного притягнення заданих ділянок плоских металевих поверхонь.

2. Проведено розрахунок збуджуваних полів у запропонованому варіанті індукторної системи з двома витками прямокутної форми. Це дозволяє максимально сконцентрувати сили магнітного тиску в центрі кута вигнутого металевого листа та одночасно розвантажити зовнішні зони заготовки, що деформується. Таким чином реалізується цілеспрямований силовий вплив з амплітудою в десятки мегапаскалів. Принципова сутність пропозиції захищена патентом України на корисну модель.

3. Як показали вимірювання, послідовне з'єднання витків індукторної системи зі спареними нахиленими соленоїдами забезпечує істотно зростаючу

ефективність силового впливу за рахунок подвоєння струму в центральному струмопроводі, розташованому уздовж лінії вигину.

4. Запропоновано та теоретично обґрунтовано працездатність індукційних індукторних систем з подвійним витком прямокутної геометрії, істотною перевагою яких, на відміну від подібних циліндричних конструкцій, є збудження ненульових вихрових струмів у геометричному центрі робочої зони інструмента. Принципова сутність пропозиції захищена патентом України на корисну модель.

5. Експериментально підтверджені теоретичні висновки про те, що індукційні індукторні системи з подвійним прямокутним витком дозволяють значно згладити провал у поперечному розподілі індукованих струмів у листовій заготовці та допоміжному екрані, зробити цей розподіл більш однорідним і тим самим поліпшити силові характеристики інструмента даного типу і призначення.

6. Технологічні експерименти, проведені на високовольтній магнітно-імпульсній установці МІУ-48 НТУ «ХПІ», показали практичну дієздатність запропонованих інструментів магнітно-імпульсної обробки металевих листів.

7. Сформульовано та обґрунтовано пропозиції щодо вибору індукторних систем для заповнення кутів у листових металах і притягнення заданих ділянок тонкостінних провідних заготовок. Ці пропозиції можна розглядати як можливі технічні рішення для виконання реальних робочих інструментів для здійснення виробничих операцій по магнітно-імпульсному формуванню елементів автомобільних кузовів.

8. Результати дисертаційної роботи впроваджені на СТО підприємств «ХарТрансПас» і «Реал», на кафедрі автомобільної електроніки ХНАДУ при експериментальному електромагнітному рихтуванні тонких металевих частин кузова автомобіля та використовуються у навчальному процесі.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Сериков Г.С. Реализация и перспективы магнитно-импульсных методов в развитии передовых технологий современности / Ю.В. Батыгин, Г.С. Сериков, Е.А. Чаплыгин // Автомобильный транспорт / Сб. науч. трудов.– Харьков: ХНАДУ, 2006. – Вып. 18. – С.83–87. *Здобувачем виконаний огляд досягнень з магнітно-імпульсного рихтування автомобільних кузовів.*
2. Сериков Г.С. Магнитное поле и давления, возбуждаемые одновитковым индуктором в угловом изгибе листовой заготовки / Ю.В. Батыгин, Г.С. Сериков, С.Ф. Головащенко // Електротехніка і електромеханіка. – Харків. – 2006. – №6. – С.66–71. *Здобувачем отримані розрахункові співвідношення та виконані чисельні оцінки.*
3. Сериков Г.С. Электродинамические процессы в индукционной индукторной системе с прямоугольной формой рабочей зоны / Ю.В. Батыгин, А.Ю. Бондаренко, Г.С. Сериков // Авіаційно-космічна техніка і технологія. – 2008. - №2 (49). - С.45–50. *Здобувачем отримані розрахункові співвідношення, та на основі чисельних оцінок*

сформульовані висновки.

4. Сериков Г.С. Низковольтный генератор импульсов тока широкого частотного диапазона для физического моделирования / А.Ю. Бондаренко, Г.С. Сериков, Е.А. Чаплыгин // *Електротехніка і електромеханіка.* – 2007. – №6. – С.66–69. *Розроблено електронну систему управління та синхронізації зарядного і розрядного контурів генератора. Запропоновано та обґрунтовано використання вбудованого інтерфейсу у вимірювальному комплексі.*
5. Сериков Г.С. Магнитное поле и давления, возбуждаемые индуктором с токопроводами конечной ширины в угловых изгибах заготовки / Г.С. Сериков // *Електротехніка і електромеханіка.* - 2008. - №5. - С.70-71.
6. Сериков Г.С. Исследования индукторной системы для формирования угловых изгибов в листовых заготовках / Ю.В. Батыгин, Г.С. Сериков, Бижар Мадрид // *Електротехніка і електромеханіка.* - 2008. - №6. - С.60-63. *Здобувачем виконана постановка експерименту, розроблені вимірювальні системи. Безпосередня участь у вимірюваннях.*
7. Сериков Г.С. Индукционная индукторная система с двойным витком / Ю.В. Батыгин, А.Ю. Бондаренко, Г.С. Сериков // *Електротехніка і електромеханіка.* - 2009. - №1. - С.59-61. *Здобувачем обґрунтоване та виготовлене обладнання для проведення експерименту, у тому числі систем вимірювання. Безпосередня участь у вимірюваннях.*
8. Сериков Г.С. Компьютерный комплекс для измерения характеристик магнитно-импульсных индукторных систем / Г.С. Сериков // *Електротехніка і електромеханіка.* - 2009. - №4. - С.65-67.
9. Пат. 31309 України, В 21 Д 26/14. Индуктор для магнітно-імпульсного формування кутів у вигнутих листових металевих заготівках / Батыгин Ю.В., Чаплыгин Е.А., Сериков Г.С.; заявник та патентовласник Харківський нац. автом.-дорожн. ун-т. – № u200701443; заявл. 12.02.2007; опубл. 10.04.08, Бюл. №7.
10. Пат. 31752 України, В 21 Д 26/14. Спосіб магнітно-імпульсної обробки металевих заготівок / Батыгин Ю.В., Бондаренко А.Ю., Сериков Г.С.; заявник та патентовласник Харківський нац. автом.-дорожн. ун-т. – № u200712252; заявл. 05.11.2007; опубл. 25.04.08, Бюл. №8.

АНОТАЦІЇ

Сериков Г.С. Удосконалення індукторних систем для магнітно-імпульсного формування металевих листів. – Рукопис.

Дисертація на здобуття вченого ступеня кандидата технічних наук за фахом 05.09.13 – техніка сильних електричних і магнітних полів. Харківський національний автомобільно-дорожній університет, Харків, 2010.

Проведені теоретичні та експериментальні дослідження процесів у системах магнітно-імпульсної обробки листових металів. У дисертації проаналізовано існуючі теоретичні напрацювання в сфері, що досліджується.

У ході аналізу отриманих залежностей для компонент напруженості магнітного поля і вихрових струмів виявлено основні чинники, що визначають підвищення силових показників запропонованих систем.

Розроблено і виготовлено модельне джерело потужності, що дозволяє проводити експериментальні дослідження характеристик електромагнітних процесів у діапазоні робочих частот діючих полів (1...35 кГц).

Запропоновано спосіб вимірювання струмів у плоских листових заготовках за допомогою упаяних електродів, безперечною перевагою якого є збереження цілісності об'єкта дослідження, також перевагою запропонованого способу є пряма пропорційність вимірюваного струму сигналу, який знімається без додаткових перетворюючих пристроїв.

Основні результати дослідження доведені до кількісних значень, методик, алгоритмів розв'язку задач на комп'ютері, використовуються в наукових дослідженнях і в навчальному процесі. Сформульовано практичні рекомендації, які розширюють існуючі можливості використання технологій магнітно-імпульсної обробки металів у автомобілебудуванні та при ремонті автотранспорту.

Ключові слова: моделювання та дослідження електромагнітних процесів, прямокутна індукційна індукторна система, магнітно-імпульсне притягнення, розроблення систем моделювання сильних електричних і магнітних полів, сильне електричне і магнітне поле, магнітно-імпульсна обробка металів.

Сериков Г.С. Усовершенствование индукторных систем для магнитно-импульсной формовки металлических листов. – Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.09.13 – техника сильных электрических и магнитных полей. – Харьковский национальный автомобильно-дорожный университет, Харьков, 2010.

Проведены теоретические и экспериментальные исследования процессов в системах магнитно-импульсной обработки листовых металлов. Указанная технология обработки листовых металлов обладает неоспоримыми преимуществами перед традиционными механическими или химическими аналогами. В диссертации рассмотрены исторические аспекты развития магнитно-импульсных технологий в различных отраслях отечественной и зарубежной промышленности, осуществлен анализ имеющихся теоретических наработок в исследуемой сфере.

В ходе анализа полученных зависимостей для компонент напряжённости магнитного поля и вихревых токов выявлены основные факторы, определяющие эффективность предложенных систем. В индукторных системах, предназначенных для «заполнения» углов в изогнутых металлических листах, комбинирование угла наклона плоскости, в которой расположены токопроводы, и ширины «дальнего» токопровода позволяет реализовать существенную концентрацию поля и сил магнитного давления в угловой зоне изогнутого металлического листа. В индукционной индукторной системе с двойным витком прямоугольной геометрии для

притяжения заданного участка поверхности обрабатываемого объекта выявлено, что импульс сил притяжения носит кумулятивный характер, импульс силы отталкивания стремится к нулю.

В целом, действенность индукторных систем с двойным прямоугольным витком определяется увеличением амплитуд индуцированных токов в рабочей зоне инструмента за счёт удвоения величины возбуждающего тока индуктора.

Предложены и рассчитаны эффективные варианты конструктивного исполнения индукторных систем, позволяющие существенно увеличить эффективность выполнения соответствующей производственной операции.

Разработан и изготовлен модельный источник мощности для экспериментальных исследований характеристик электромагнитных процессов в широком диапазоне рабочих частот действующих полей (1...35 кГц).

Экспериментальная проверка результатов теоретического анализа реальной эффективности индукторных систем в соответствующих режимах подтвердила сделанные ранее выводы.

Предложен способ измерения токов в плоских листовых заготовках посредством впаянных электродов, несомненным преимуществом которого является отсутствие потребности в повреждении целостности объекта исследования. Также преимуществом предложенного способа является прямая пропорциональность измеряемого тока сигналу, который снимается без дополнительных преобразующих устройств.

Основные результаты исследования доведены до количественных значений, методик, алгоритмов решения задач на компьютере, используются в научных исследованиях и в учебном процессе.

Сформулированы практические рекомендации, расширяющие существующие возможности использования технологий магнитно-импульсной обработки металлов в автомобилестроении и при ремонте автотранспорта.

Ключевые слова: прямоугольная индукционная индукторная система, магнитно-импульсное притяжение, обработка металлов, тонкостенный металл, повышение эффективности магнитно-импульсной обработки.

Serikov G. S. Improvement of the inductor systems for metal sheet magnetic-impulse shaping. Manuscript.

The thesis for candidate's degree of technical sciences byn speciality 05.09.13 - high electric and magnetic field engineering. Kharkiv National Automobile and Highway University, Kharkiv, 2010.

Theoretical and experimental researches of processes in the systems of magnetic-impulsive treatment of sheet metals had been carried out. In the thesis the analysis of the modern theoretical works in the explored sphere is presented. During the analysis of the obtained dependencies of the magnetic field tension component and eddy currents, basic factors were exposed which, determine the rise of power indexes of the proposed systems. The model source of power has been developed that allows to conduct experimental researches of electromagnetic processes

indexes in the range of working frequencies of the operating fields (1...35 kHz). The proposed method of currents measuring in flat sheet blanks by means of soldering electrodes, which indisputable advantage is absence of necessity in the damage of observe, integrity object and also a direct proportion of the measured current signal which is taken off without the additional converting devices. The basic research results led to the quantitative values, methods, tasks decision algorithms on computer, are used in scientific researches and in an educational process. The formulated practical recommendations extend existent possibilities of the technologies implementation of magnetic-impulsive shapin of metals in the motor industry and motor transport repair.

Key words: rectangular induction inductor system, magnetic-impulsive attracting, thin-walled metal blanks, strong electromagnetic field, magnetic-impulsive shapin of metals.

ДЛЯ НОТАТОК

ДЛЯ НОТАТОК