

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ АВТОМОБІЛЬНО-ДОРОЖНІЙ УНІВЕРСИТЕТ

ЩИГОЛЄВА СВІТЛАНА ОЛЕКСАНДРІВНА



УДК 621.318

УДОСКОНАЛЕННЯ СПОСОБІВ ЗОВНІШНЬОГО РИХТУВАННЯ СТАЛЕВИХ
КУЗОВНИХ ПАНЕЛЕЙ АВТОМОБІЛІВ

Спеціальність 05.22.20 – експлуатація та ремонт засобів транспорту

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Харків – 2015

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана у 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, професор Кравченко Олександр Петрович, Житомирський державний технологічний університет професор кафедри автомобілів і автомобільного господарства

кандидат технічних наук, доцент Третяк Володимир Васильович, Національний аерокосмічний університет імені М. Є. Жуковського, доцент кафедри технології виробництва авіаційних двигунів

Захист відбудеться « 11 » листопада 2015 р. о 12 годині 00 хвилин на засіданні спеціалізованої вченої ради Д64.059.02 при Харківському національному автомобільно-дорожньому університеті за адресою: 61002, Україна, м. Харків, вул. Петровського, 25.

З дисертацією можна ознайомитись у науковій бібліотеці Харківського національного автомобільно-дорожнього університету за адресою: 61002, Україна, м. Харків, вул. Петровського, 25.

Автореферат розісланий « 9 » жовтня 2015 р.

Учений секретар
спеціалізованої вченої ради



В. М. Павленко

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Механічні способи рихтування мають ряд суттєвих недоліків, головні з яких – порушення лакофарбового покриття, трудомісткість, розбір корпусу та тривалість операції. Розробка конструкцій дієздатних інструментів, що дозволяють практично реалізувати операцію по зовнішньому рихтуванню вм'ятин в металевих обшивках автомобільних кузовів, допоможе усунути ці недоліки.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота виконана на кафедрах автомобільної електроніки і фізики Харківського національного автомобільно-дорожнього університету і пов'язана з участю здобувача як виконавця в науково-дослідних роботах за держбюджетними науковим темами: «Фізика електромагнітних технологій в автомобілебудуванні» (Державний реєстраційний номер 0110U005847) та «Дослідження принципової можливості магнітно-імпульсних технологій для розділення металевих та діелектричних об'єктів» (Державний реєстраційний номер 0111U003524), які є складовою частиною наукової тематики, що розвивається в університеті і проводяться згідно з держбюджетними науково-дослідницькими темами Міністерства освіти та науки України згідно з Законом України «Про пріоритетні напрями розвитку науки та техніки». Дисертаційна робота виконана відповідно до пріоритетних напрямків наукових досліджень і науково-технічних розробок на період до 2015 року, затвердженими постановою кабінету міністрів України від 7 вересня 2011 року № 942.

Мета і задачі дослідження. Метою дисертаційної роботи є удосконалення способів зовнішнього рихтування сталевих кузовних панелей автомобілів з використанням методів магнітно-імпульсного впливу, що дозволяють підвищити ефективність кузовного ремонту, знизити як трудомісткість процесу, так і матеріальні та енергетичні затрати.

Для досягнення цієї мети необхідно вирішити наступні задачі:

- провести аналіз відомих способів реставрації кузовних панелей автомобілів, конструкцій інструментів, що дозволяють реалізувати дану операцію, та обґрунтувати переваги електромагнітного рихтування;
- визначити закономірності протікання процесів електромагнітного рихтування між сталеною кузовною панеллю автомобіля та інструментом рихтування з конічним профілем індуктора;
- провести теоретичні дослідження електромагнітних процесів в інструменті рихтування з конічним профілем робочої зони та обґрунтувати його переваги над циліндричним інструментом;
- провести експерименти по перевірці теоретичних положень удосконаленої конструкції інструмента з демпферним дисковим узгоджуючим пристроєм та обґрун

тувати її економічну ефективність.

Об'єкти дослідження – електромагнітні процеси зовнішнього рихтування сталевих кузовних панелей автомобілів.

Предмет дослідження – удосконалення способів зовнішнього рихтування сталевих кузовних панелей автомобілів.

Методи дослідження. Теоретичні дослідження електромагнітних процесів в інструментах виконані за допомогою математичного апарату теорії електромагнітного поля з подальшою комп'ютерною обробкою отриманих результатів. Експериментальні дослідження проводилися на спеціально розробленому стенді для моделювання електромагнітних процесів в інструментах магнітно-імпульсного рихтування сталевих кузовних панелях легкових автомобілів. Практична апробація модельних конструкцій запропонованих інструментів здійснена на діючій магнітно-імпульсній установці, розробленій в лабораторії електромагнітних технологій ХНАДУ.

Наукова новизна одержаних результатів. Положення, що характеризують наукову новизну дисертаційної роботи, полягають у тому, що:

- вперше визначені закономірності протікання процесів електромагнітного рихтування сталевих кузовних панелей автомобілів, що враховують вплив магнітної проникності металу, при використанні інструментів з конічним профілем індуктора;
- отримав подальший розвиток спосіб електромагнітного рихтування сталевих кузовних панелей, обумовлений впливом їх магнітних властивостей в низькочастотному режимі діючого поля, що дозволяє розробити та впровадити нові способи реставрації пошкоджених кузовів;
- удосконалений спосіб усунення вм'ятин інструментом, суміщеним з дисковим узгоджувальним пристроєм, за допомогою електромагнітного демпфера, що дозволяє підвищити ефективність рихтування.

Практичне значення отриманих результатів. Обшивку автомобільних кузовів найчастіше виконують із сталевих листів (феромагнітних металів), тому розглянутий спосіб зовнішнього рихтування спрямований на реставрацію саме сталевих елементів кузовів автомобілів.

Результати проведених досліджень і апробовані пропозиції щодо створення діючих інструментів магнітно-імпульсного рихтування успішно впроваджені в ТОВ «Actor-42» та на СТО АвтоDENT.

Результати дисертаційної роботи впроваджені у навчальний процес на факультеті мехатроніки транспортних засобів ХНАДУ в курси дисциплін «Фізика» і «Прогресивні технології в АТЗ».

Особистий внесок здобувача. Результати теоретичних та експериментальних досліджень, які виносяться на захист, отримані особисто автором [1 – 15].

У наукових працях, опублікованих у співавторстві, особистий внесок здобувача полягає у наступному. Розраховані електродинамічні зусилля в одновитковій

індукторній системі з тонкостінним немагнітним провідником [1, 10]; проведений аналіз процесів в тонкостінних листових феромагнетиках [3]; проведено чисельні оцінки сил притягання магнітних листових металів в полі масивного одновиткового соленоїда з внутрішнім отвором конічного профілю [13, 14]; виконані силові експерименти магнітно-імпульсного притягання тонкостінних металів [6]; проведені силові експерименти по притяганню тонкостінних металевих листів магнітним полем одновиткового індуктора [4], проведено модельні експерименти та порівняльний аналіз отриманих розрахункових і експериментальних зусиль [8, 15]; запропоновано, теоретично та експериментально обґрунтовано суміщений дисковий погоджувальний пристрій [9], в процесі дисертаційного дослідження були отримані аналітичні та розрахункові результати по індукційній індукторній системі з немагнітним масивним екраном та феромагнітною листовою заготівкою [2, 5, 11,12].

Апробація результатів дисертації. У повному обсязі дисертаційна робота обговорювалась та була схвалена на науково-практичному семінарі «Електромагнітні технології в автомобілебудуванні» кафедр фізики та автомобільної електроніки, а також на розширеному засіданні кафедр фізики, автомобільної електроніки, технічної експлуатації та сервісу автомобілів, прикладної математики, інформаційних технологій та мехатроніки ХНАДУ.

Основні положення і результати дисертаційної роботи доповідалися, обговорювалися та отримали позитивну оцінку на наступних міжнародних науково - технічних конференціях: «Міжнародний симпозіум. Проблеми вдосконалення електричних машин і апаратів. Теорія і практика» SIEMA 2009-2011, на міжнародній науково-технічній конференції 12 – 15 травня 2009р., Тольятти, на міжнародній науково-практичній конференції «Сучасні інформаційні та електронні технології» («CIET - 2010») 24-28 травня 2010р. Одеса, на другій міжнародній науково-технічній конференції «Автомобіль та електроніка. Сучасні технології», ХНАДУ, Харків, 15 - 17 листопада 2011 р., на XV-й міжнародній науково-технічній конференції «Автомобільний транспорт: проблеми і перспективи», Севастополь, 10 - 17 вересня 2012 р.

Публікації. Основні результати досліджень опубліковані у 15 роботах, з яких 8 у фахових виданнях, що входять до переліку МОН України та міжнародних наукометричних баз, в тому числі 1 – у іноземному виданні, 6 тез у збірниках доповідей на наукових конференціях. За матеріалами дослідження отримано 1 патент.

Структура та обсяг дисертації. Дисертація складається зі вступу, 4 розділів, висновків, списку використаних джерел і додатків. Повний обсяг роботи становить 199 сторінку, у тому числі 49 рисунків, 1 таблиця, 4 додатки на 53 сторінках, список використаних джерел зі 108 найменувань на 15 сторінках.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовано актуальність дисертаційної роботи, сформульовано мету та задачі досліджень. Показано наукову новизну, а також викладено основні наукові та практичні результати, що були отримані під час виконання роботи. Наведено дані щодо апробації та публікацій результатів досліджень.

У першому розділі приведено основні сучасні способи рихтування, такі як холодне та гаряче рихтування; метод усунення вм'ятин з використанням тимчасових зачепів (рис. 1, а). Більш докладно розглянуто магнітно-імпульсне притягання (рис. 1, б), як операцію, актуальну у безконтактному рихтуванні кузовних панелей автомобілів. Приведено історію виникнення та розвитку магнітно-імпульсного рихтування.

На основі ефекту магнітно-імпульсного притягання тонкостінного металу розроблюються нові варіанти конструкцій інструментів зовнішнього рихтування. Так, при зниженні робочої частоти імпульсу струму, силовий вплив магнітного поля призводив до притягання ділянки рівної поверхні кузовної панелі до індуктора-інструмента та утворення на ній вм'ятини сферичної форми. Тобто, це вже не відомий в традиційній магнітно-імпульсній обробці металів тиск на оброблюваний об'єкт.



а)



б)

а – PDR-рихтування, б – зовнішнє безконтактне рихтування

Рисунок 1 – Технології ремонту кузова легкового автомобіля

Низькочастотний метод електромагнітного впливу дозволяє виконувати операцію зовнішнього рихтування сталевих кузовних панелей завдяки феромагнітним властивостям металу.

У прагненні до найбільшої концентрації електродинамічних зусиль до центру робочої зони і, отже, більш ефективного усунення вм'ятин при магнітно-імпульсному рихтуванні автомобільних кузовів, спроектовано та розроблено інструмент, робоча зона якого має конічний профіль. Така форма внутрішнього

отвору дозволяє зрушити максимум вертикальних складових сил магнітного впливу до центру системи і забезпечує більш інтенсивну силову дію на оброблювану ділянку кузовної панелі автомобіля.

Вказані положення пояснюють актуальність подальших досліджень електромагнітних процесів в циліндричних інструментах різної конфігурації. Отже, у дисертаційній роботі зроблено акцент на:

- визначення закономірності протікання процесів електромагнітного рихтування сталевих кузовних панелей автомобілів, що враховують вплив магнітної проникності металу, при використанні інструментів з конічним профілем індуктора;
- спосіб електромагнітного рихтування сталевих кузовних панелей, обумовлений впливом їх магнітних властивостей в низькочастотному режимі діючого поля, що дозволяє розробити та впровадити нові способи реставрації пошкоджених кузовів;
- удосконалення способу усунення вм'ятин інструментом, суміщеним з дисковим узгоджувальним пристроєм, за допомогою електромагнітного демпфера, що дозволяє підвищити ефективність рихтування.

У другому розділі виконано теоретичне обґрунтування методів зовнішнього рихтування за допомогою магнітно-імпульсного притягання на прикладі одновиткової індукторної системи з тонкостінними феро- та не феромагнітними металами. Представлено фізико-математичне обґрунтування основних співвідношень і дослідження сил, що діють на тонкостінний алюмінієвий та сталевий фрагмент кузовної панелі автомобіля в інструменті з одновитковим циліндричним соленоїдом.

У випадку плоскої циліндричної системи з аксіальною симетрією та азимутальним струмом в інструменті в металі оброблюваної панелі кузова автомобіля збуджуються H_r – тангенціальна, H_z – нормальна складові вектора напруженості магнітного поля та, відповідно, азимутальна компонента густини індукованого струму – j_ϕ . Фізично причиною появи електродинамічних зусиль (сил Лоренца) в немагнітному провіднику є взаємодія індукований струмів – $\vec{j}$ та зовнішнього магнітного поля з напруженістю – $\vec{H}$. Вираз для магнітного тиску враховує обидві компоненти поля.

$$P_L = \frac{\mu_0}{2} \cdot H_r^2 - H_z^2 + \mu_0 \int_0^d \frac{\partial H_z}{\partial r} H_r \cdot dz. \quad (1)$$

Напруженість магнітного поля в листовій заготовці визначається

$$H_r(\varphi, \rho, z) = -\frac{2j_m}{(\omega \cdot \tau)} \int_0^\infty f(x) \cdot x \cdot e^{-x \cdot \frac{h}{d}} \cdot J_1 \left(x \cdot \left(\frac{R_2}{d} \right) \cdot \rho \right) \cdot \sum_{k=0}^\infty \frac{\beta_k^2 \cdot F_{1k}(x, \beta_k, z) \cdot f_k(x, \varphi)}{\Phi_{1k}(x)} \cdot dx, \quad (2)$$

де $\rho = \frac{r}{R_2}$ – відносна радіальна координата,

$$\beta_k - \text{корні рівняння: } \operatorname{ctg} \beta_k = 0.5 \cdot \left(\frac{\beta_k}{x} - \frac{x}{\beta_k} \right) \quad f(x) = \frac{1}{x^2} \cdot \int_{x \cdot \frac{R_1}{d}}^{x \cdot \frac{R_2}{d}} y \cdot J_1(y) dy, \quad (3)$$

$$F_{1k}(x, \beta_k, z) = x \cdot \cos \left(\beta_k \left(1 - \frac{z}{d} \right) \right) - \beta_k \cdot \sin \left(\beta_k \left(1 - \frac{z}{d} \right) \right), \quad (4)$$

$$f_k(x, \varphi) = \frac{1}{1 + \left[\frac{\beta_k^2 + x^2}{\omega \tau} - \delta_0 \right]^2} \cdot \left[e^{-\delta_0 \varphi} \left\{ \left[\frac{\beta_k^2 + x^2}{\omega \tau} - \delta_0 \right] \sin \varphi - \cos \varphi \right\} + e^{-\frac{\beta_k^2 + x^2}{\omega \tau} \varphi} \right], \quad (5)$$

$$\Phi_{1k}(x) = \cos \beta_k \cdot \left[x^2 + 2 \cdot x - \beta_k^2 \right] - 2 \cdot \beta_k \cdot \sin \beta_k \cdot 1 + x. \quad (6)$$

Результатом розрахунків є фазові залежності, представлені на рис. 2.

Для оцінки отриманих результатів слід провести розрахунок по класичній формулі для сил Лоренца

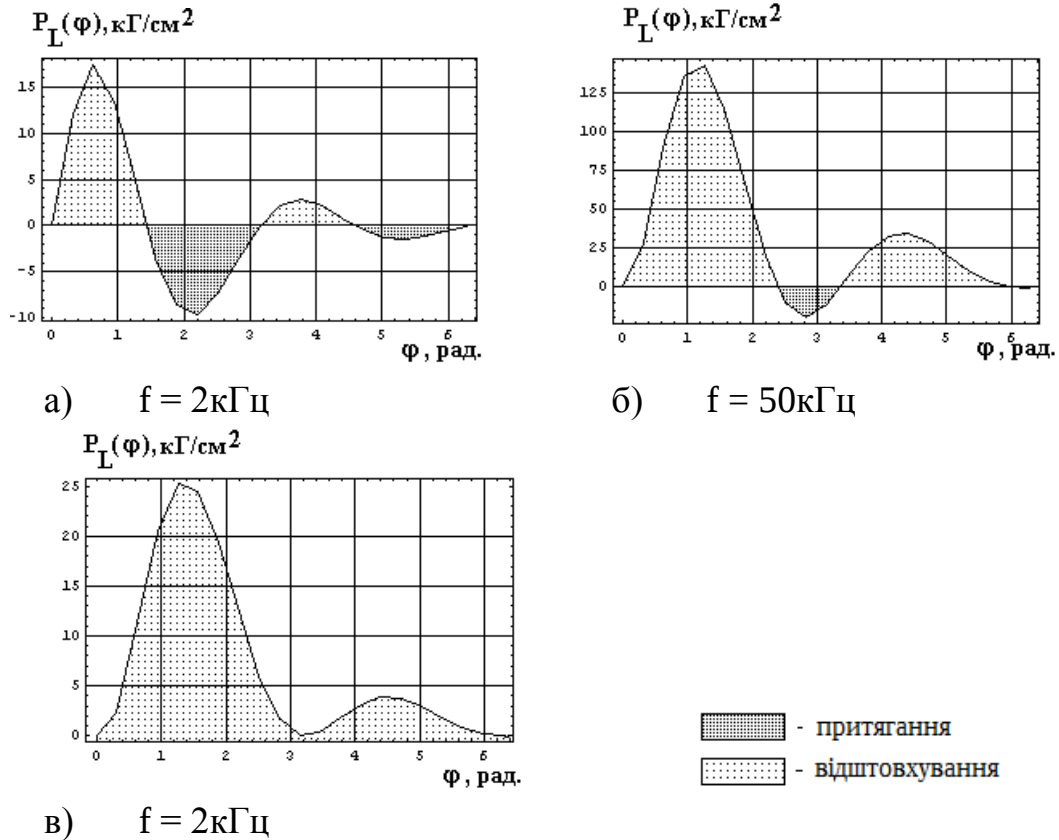
$$P = \frac{\mu_0}{2} \cdot H_1^2 - H_2^2. \quad (7)$$

Проведені обчислення показали, що:

– при зниженні робочих частот діючих полів осциляція електродинамічних зусиль у часі підсилюється, їх інтегральна дія падає та, зрештою, прагне до нуля (рис. 2, а, б, $\bar{P}_L \Big|_{f=50 \text{ кГц}}^{(1)} \approx 34 \text{ кГ / см}^2 \rightarrow \bar{P}_L \Big|_{f=2 \text{ кГц}}^{(1)} \approx 0.85 \text{ кГ / см}^2$);

– розрахунок за традиційною методикою (формула (3)) при низьких значеннях робочих частот не адекватний реальності (рис. 2, а, в, $\bar{P}_L \Big|_{f=2 \text{ кГц}}^{(1)} \approx 0.85 \text{ кГ / см}^2 \ll \bar{P}_L \Big|_{f=2 \text{ кГц}}^{(3)} \approx 6.76 \text{ кГ / см}^2$);

– при підвищенні частот діючих полів часові форми збуджуваних зусиль, обчислені без урахування (формула – (3)) та з урахуванням (формула – (1)) нормальних компонент напруженості магнітного поля, наближаються один до одного.



Величина зусилля рихтування залежатиме від магнітної проникності металу, а також від відстані між інструментом та кузовною панеллю.

Проведений аналіз електромагнітних процесів дозволив визначити аналітичний вираз для густини індукованого струму в металі кузовної панелі.

$$j_{\varphi}(z, r, t) = \frac{2 \cdot j_m}{d} \cdot \int_0^{\infty} f(\lambda) \cdot e^{-\lambda h} \lambda \cdot J_1(\lambda r) \cdot \sum_{k=0}^{\infty} \frac{\beta_k \cdot F_{1k}(\mu_r \cdot (\lambda d), z)}{\Phi_k(\mu_r \cdot (\lambda d))} \cdot \frac{dj(t)}{dt} e^{-\frac{\beta_k^2 + (\lambda d)^2}{\tau} \cdot t} d\lambda, (8)$$

де j_m и $j(t)$ – амплітуда та часова залежність струму в індукторі,

$$f(\lambda) = \int_{R_1}^{R_2} f(r) \cdot r \cdot J_1(\lambda \cdot r) \cdot dr, f(r) – \text{радіальний розподіл струму в індукторі},$$

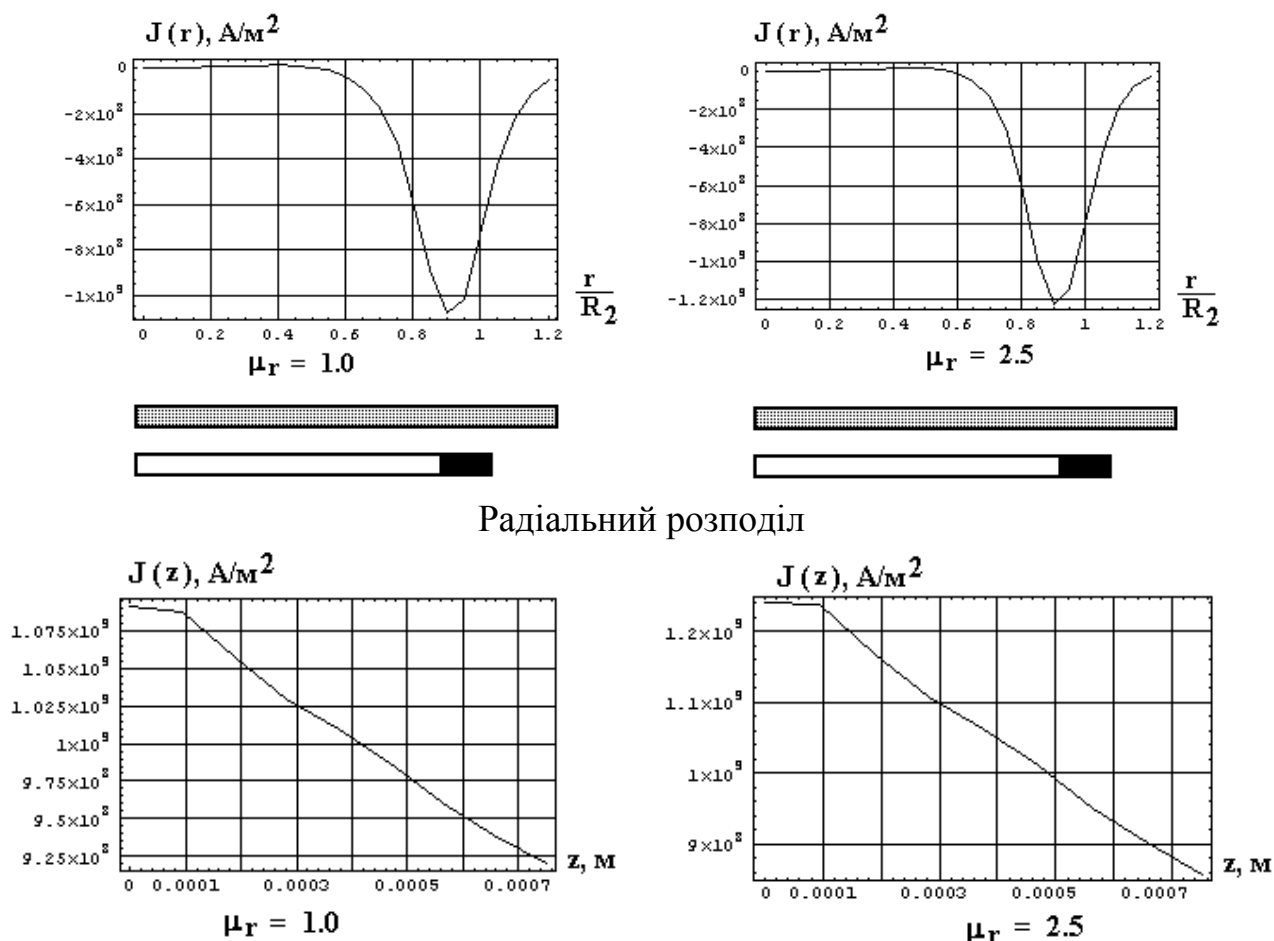
$$F_{1k}(\mu_r \cdot (\lambda d), z) = \mu_r \cdot (\lambda d) \cdot \sin \left(\beta_k \left(1 - \frac{z}{d} \right) \right) + \beta_k \cdot \cos \left(\beta_k \left(1 - \frac{z}{d} \right) \right), (9)$$

$$\Phi_k(\mu_r \cdot (\lambda d)) = \cos \beta_k \left[(\mu_r(\lambda d))^2 + 2(\mu_r(\lambda d)) - \beta_k^2 \right] - 2\beta_k \sin \beta_k \left[1 + (\mu_r(\lambda d)) \right]. (10)$$

Для проведення чисельних оцінок задамо параметри інструменту: $R_1 = 0,025\text{м}$, $R_2 = 0,03\text{м}$; зазор між витком індуктора та кузовною панеллю $-h = 0.0005\text{м}$, $\gamma = 0,4 \cdot 10^7 \text{ 1/ (Ом}\cdot\text{м)}$, товщина кузовної панелі $d = 0.00075\text{м}$. Величина відносної магнітної проникності складає $\mu_r \approx 2.5$. Амплітуда струму в індукторі – $I_m = 50\text{кА}$, частота в імпульсі – $f = 2 \div 8 \text{ кГц}$, відносний декремент затухання – $\delta_0 = 0.3$.

Представляє інтерес оцінка впливу магнітних властивостей на основі параметрів індукованих струмів. На рис. 3 представлені результати проведених обчислень.

З порівняння відповідних графічних залежностей на рис. 3 випливає, що на рівні заданої відносної магнітної проникності металу пластини істотного впливу на характер електромагнітних процесів її магнітні властивості не чинять. Хоча необхідно відмітити, що збільшення μ_r до 2.5 позначає зменшення величини скіншару в ~ 1.6 разів. Що, в свою чергу, як видно з ілюстрацій рис. 3,б, знижує дієвість дифузійних ефектів и веде до збільшення амплітуд індукованих струмів та зосередженню їх поблизу поверхні зі сторони джерела магнітного поля – індуктора.



Розподіл за товщиною

Рисунок 3 – Струми, що індуковані в металі тонкостінного листового зразку при варіації магнітних характеристик в полі з частотою 2кГц

За отриманими розрахунковими співвідношеннями проведено розрахунок зусиль тиску та рихтування від радіусу отвору інструмента. Проведені розрахунки показали, що при робочій частоті біля 8 кГц превалює зусилля відштовхування (сила Лоренца), але при зниженні частоти до 2 кГц відштовхування змінюється на притягання і з'являється зусилля рихтування.

Для порівняння в цифрах слід перейти до усереднених характеристик табл.1: розподілених сил за часом – за період діючого поля (табл. 1, поз. 1, 2) і за радіусом – на інтервалі, де величини сил складають не менш, наприклад, ~ 0.05 максимального значення (табл. 1, поз. 3, 4). Цікавою характеристикою представляється власне сила як інтеграл за площею. (табл. 1, поз. 5, 6).

Таблица 1 – Зависимость усреднённых силовых показателей от рабочей частоты

№ п/п	Робочі частоти	2.0 кГц	8.0 кГц
	Усереднені силові показники		
1	Розподілена сила відштовхування за період діючого поля (в радіальному максимумі)	1.98 кГ/см ²	18.27 кГ/см ²
2	Розподілена сила притягання за період діючого поля (в радіальному максимумі)	– 9.86 кГ/см ²	– 8.37 кГ/см ²
3	Розподілена сила відштовхування на площі $\frac{r}{R_2} \in [0.7, 1.1]$ (в часовому максимумі)	12.8 кГ/см ²	42.8 кГ/см ²
4	Розподілена сила притягання на площі $\frac{r}{R_2} \in [0.7, 1.1]$ (в часовому максимумі)	– 16.9 кГ/см ²	– 13.85 кГ/см ²
5	Сила відштовхування на площі $\frac{r}{R_2} \in [0.7, 1.1]$ (в часовому максимумі)	260.56кГ	871.6кГ
6	Сила притягання на площі $\frac{r}{R_2} \in [0.7, 1.1]$ (в часовому максимумі)	– 344.86кГ	– 281.9кГ

Проведені розрахунки дозволяють визначити, що:

– різні фізичні механізми збудження сил в розглянутому інструменті призводять до того, що максимуми сил відштовхування та притягання рознесені у часі та в просторовому прикладанні. Ця обставина може стати причиною неоднорідного деформування феромагнітних листових заготовок при дії імпульсних магнітних полів;

– амплітуди сил відштовхування істотно зростають при підвищенні робочих частот діючих полів. В свою чергу, амплітуди сил магнітного притягання падають.

У третьому розділі дисертації розглянуто варіант інструменту, де замість циліндричної використано робочу зону конічного профілю. Конічний профіль внутрішнього отвору індуктора повторює форму торцевих поверхонь концентраторів магнітного потоку, що широко використовуються для підвищення сил тиску на порожні металеві труби. Принципова відмінність індуктора в експериментах по притягання від вказаного аналогу присутня у відмінності їх робочих зон: в концентраторі – це внутрішня циліндрична порожнина між торцями, де розташовується оброблювана труба, в інструменті з отвором конічного профілю – це поверхня більшої основи зрізаного конусу (рис. 4).

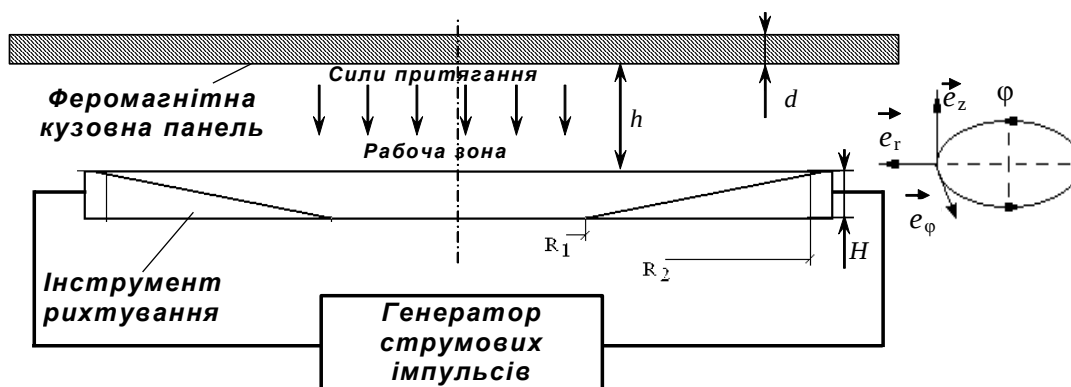


Рисунок 4 – Розрахункова модель інструменту з внутрішнім отвором конічного профілю

Представлена на рис. 4 розрахункова модель відрізняється від попередньої геометрією робочої зони, та відповідно збуджуваними зусиллями. Для розрахункової моделі, рис. 4 складено систему рівнянь Максвелла (11) – (13) для збуджуваних складових поля над інструментом-індуктором.

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial H_r(p, z, r)}{\partial z} - \frac{\partial H_z(p, z, r)}{\partial r} = j_\phi(p, r, z); \end{array} \right. \quad (11)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial}{\partial r} r \cdot E_\phi(p, r, z) = -\mu_1 \cdot p \cdot H_z(p, r, z); \end{array} \right. \quad (12)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial E_\phi(p, z, r)}{\partial z} = \mu_1 \cdot p \cdot H_r(p, r, z), \end{array} \right. \quad (13)$$

де p – параметр перетворення Лапласа;

$$E_{\varphi}(p, r, z) = L E_{\varphi}(t, r, z) ; H_{r,z}(p, r, z) = L H_{r,z}(t, r, z) ;$$

$$j_{\varphi}(p, r, z) = L j_{\varphi}(t, r, z) ; j_{\varphi}(p, r, z) \approx \gamma \cdot E_{\varphi}(p, r, z);$$

$j_{\varphi}(t, r, z)$ – густина струму, збуджуваного в металі листової заготовки,

$$\mu_1 = \mu_0 \cdot \mu_r$$

Розв'язуючи складені рівняння Максвелла відомими методами математичного аналізу було отримано вирази для компонент напруженості магнітного поля (14), (15) та густини індукованого струму в металі листової заготовки (16):

$$H_r^{(2)}(\varphi, r, \zeta) = -\frac{L_i I(\varphi)}{2\pi(1 - \cos \beta) d^2} \times \\ \times \int_0^{\infty} \frac{x \cdot \left(\mu_r \operatorname{ch} x \left(\frac{\zeta}{d} - 1 \right) - \operatorname{sh} x \left(\frac{\zeta}{d} - 1 \right) \right)}{(\mu_r^2 \operatorname{ch}(x \frac{h}{d}) + \operatorname{sh}(x \frac{h}{d})) \operatorname{sh}(x) + \mu_r e^{x \frac{h}{d}} \operatorname{ch}(x)} \int_0^{R_2} \frac{r(R_2 \operatorname{ctg} \beta + h) J_0(x \frac{r}{d}) dr}{r^2 + (R_2 \operatorname{ctg} \beta + h)^2} J_1(x \frac{r}{d}) dx, \quad (14)$$

$$H_z^{(2)}(\varphi, r, \zeta) = \frac{L_i I(\varphi)}{2\pi(1 - \cos \beta) d^2} \times \\ \times \int_0^{\infty} \frac{x \cdot \left(\operatorname{ch} x \left(\frac{\zeta}{d} - 1 \right) - \mu_r \operatorname{sh} x \left(\frac{\zeta}{d} - 1 \right) \right)}{(\mu_r^2 \operatorname{ch}(x \frac{h}{d}) + \operatorname{sh}(x \frac{h}{d})) \operatorname{sh}(x) + \mu_r e^{x \frac{h}{d}} \operatorname{ch}(x)} \int_0^{R_2} \frac{r(R_2 \operatorname{ctg} \beta + h) J_0(x \frac{r}{d}) dr}{r^2 + (R_2 \operatorname{ctg} \beta + h)^2} J_1(x \frac{r}{d}) dx, \quad (15)$$

$$j_{\varphi}^{(2)}(\varphi, r, \zeta) = \frac{\gamma \cdot L_i \omega}{2\pi(1 - \cos \beta) d} \cdot \frac{\partial I(\varphi)}{\partial \varphi} \times \\ \times \int_0^{\infty} \frac{\left(\operatorname{ch} x \left(\frac{\zeta}{d} - 1 \right) - \mu_r \operatorname{sh} x \left(\frac{\zeta}{d} - 1 \right) \right)}{(\mu_r^2 \operatorname{ch}(x \frac{h}{d}) + \operatorname{sh}(x \frac{h}{d})) \operatorname{sh}(x) + \mu_r e^{x \frac{h}{d}} \operatorname{ch}(x)} \int_0^{R_2} \frac{r(R_2 \operatorname{ctg} \beta + h) J_0(x \frac{r}{d}) dr}{r^2 + (R_2 \operatorname{ctg} \beta + h)^2} J_1(x \frac{r}{d}) dx. \quad (16)$$

Зусилля рихтування, обумовлене магнітними властивостями металу кузовної панелі, описується залежністю:

$$F_M(\varphi, r) = \frac{\mu_0}{2} (\mu_r - 1) (\mu_r \cdot [H_z^2(\zeta = 0) - H_z^2(\zeta = d)] + [H_r^2(\zeta = 0) - H_r^2(\zeta = d)]), \quad (17)$$

де $H_{z,r}(\zeta = 0)$, $H_{z,r}(\zeta = d)$ – компоненти напруженості магнітного поля на граничних поверхнях оброблюваного металу.

За отриманими аналітичними виразами проведено чисельні оцінки, рис. 5.

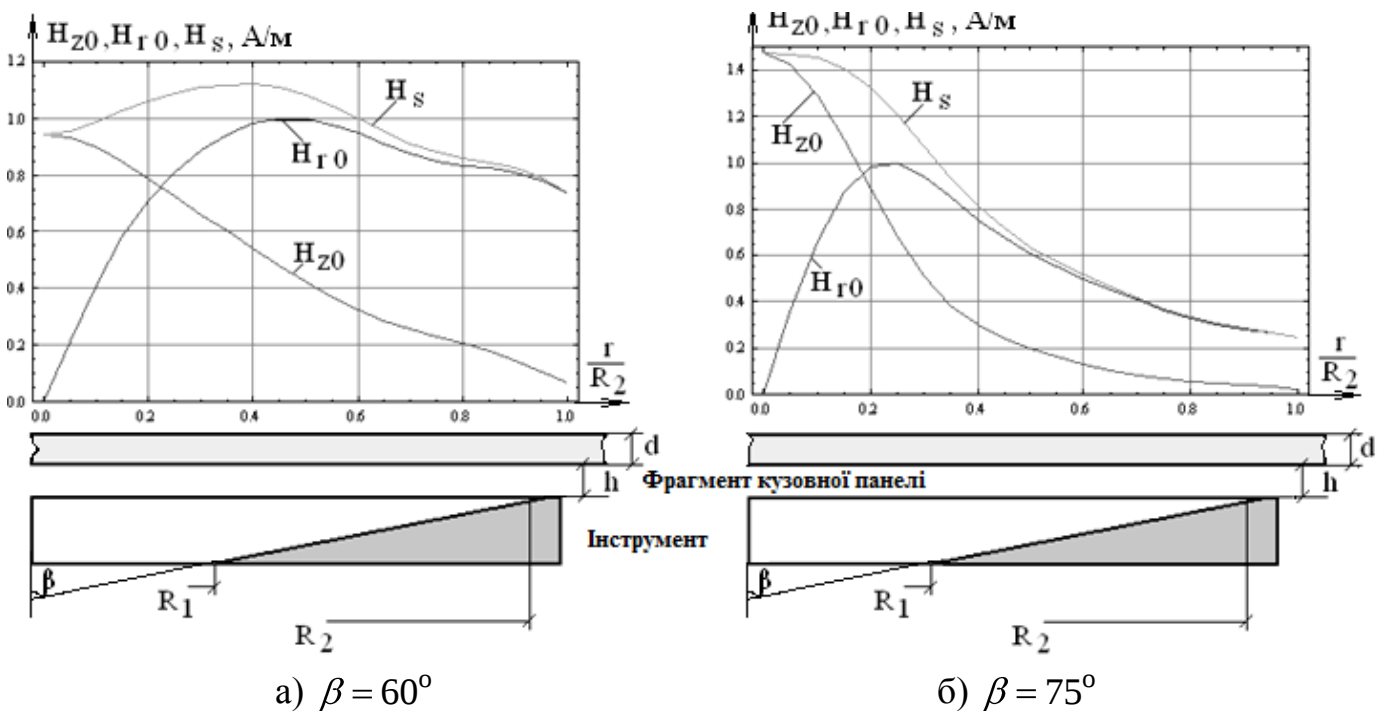


Рисунок 5 – Радіальний розподіл магнітного поля на поверхні магнітного металу – $\mu_r \approx 2$ зі сторони індуктора (нормування на максимум – $H_{r \max}$ при $\beta = 60^\circ$),

$$H_s = \sqrt{H_{r0}^2 + H_{z0}^2} - \text{модуль вектора напруженості}$$

Результати проведених обчислень для індуктора з внутрішнім отвором у вигляді різаного конуса показали, що:

- індуктивність в діапазоні розглянутих кутів досить слабо залежить від куту нахилу твірних конічної поверхні внутрішнього вікна, розбіжності складають не більш $\sim 9\%$;

- залежність індуктованих струмів від радіуса має зростаючий характер від центра витка до його периферії;

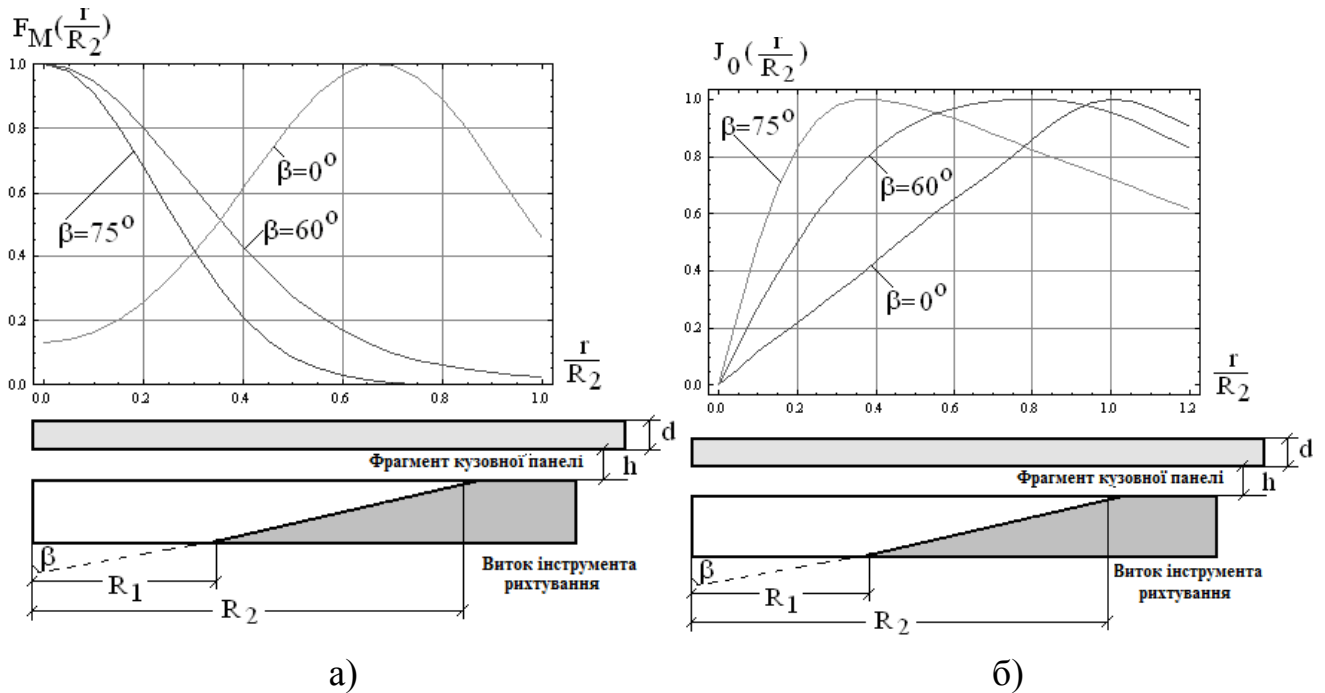
- радіальні розподіли індуктованих струмів вельми відчутно залежать від кута нахилу твірних:

- 1) при $\beta \rightarrow 0^\circ$, що відповідає циліндричній формі внутрішнього отвору витка, максимум розподілу приходить на його край,

- 2) при збільшенні $\beta > 0^\circ$ (відповідає формі конуса) максимум розподілу зміщується до центру витка;

- магнітні властивості оброблюваного металу слабо впливають на амплітуди (має місце зниження до $\sim 10\%$) та характер радіального розподілу індуктованих

струмів, що підтверджує результати якісного аналізу для «граничних» фізичних ситуацій, проведеного для $\mu_r \rightarrow 1$ і $\mu_r \gg 1$.



а – розподілені зусилля рихтування сталеві кузовної панелі; б – розподіл індукованих струмів в металі кузовної панелі

Рисунок 6 – Радіальні залежності при $\mu_r = 2$

У четвертому розділі проведено модельні експерименти по перевірці теоретичних положень та експериментальну апробацію реально діючих конструкцій інструментів для зовнішнього магнітно-імпульсного рихтування поверхні сталевих кузовних панелей автомобілів.

Модельні експерименти проводились у лабораторії електромагнітних технологій ХНАДУ з круговим масивним інструментом конічного профілю та сталеву кузовною панеллю автомобіля «Субару» з питомою електропровідністю $\gamma = 0,4 \cdot 10^7$ 1/(Ом·м) і товщиною $d = 0,001$ м. Відстань від витка індуктора до заготовки $h = 0,001$ м.

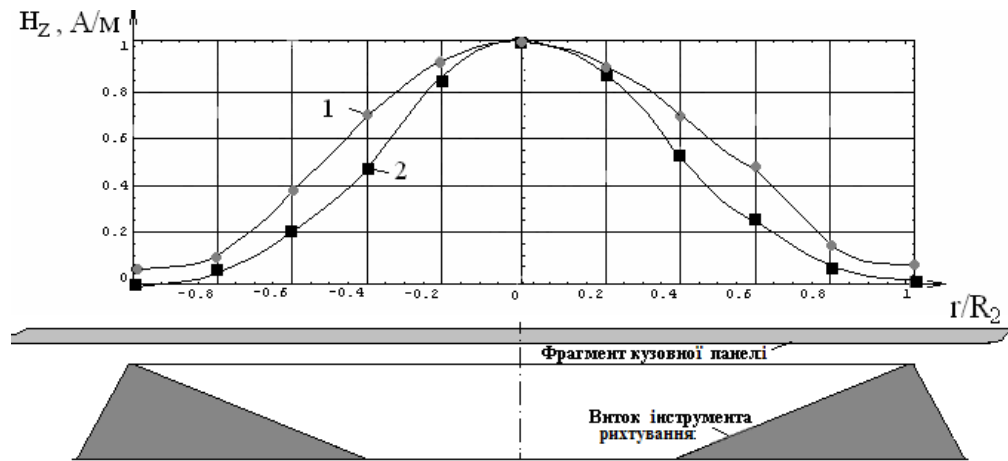
Ідентичність експериментальних та розрахункових даних підтверджується на рис. 8, де 1 – залежність поля від радіусу при куті нахилу твірної конічного отвору 60° , а 2 - залежність поля від радіусу при куті нахилу твірної конічного отвору 75° .

Проведені дослідження дозволяють зробити наступні висновки:

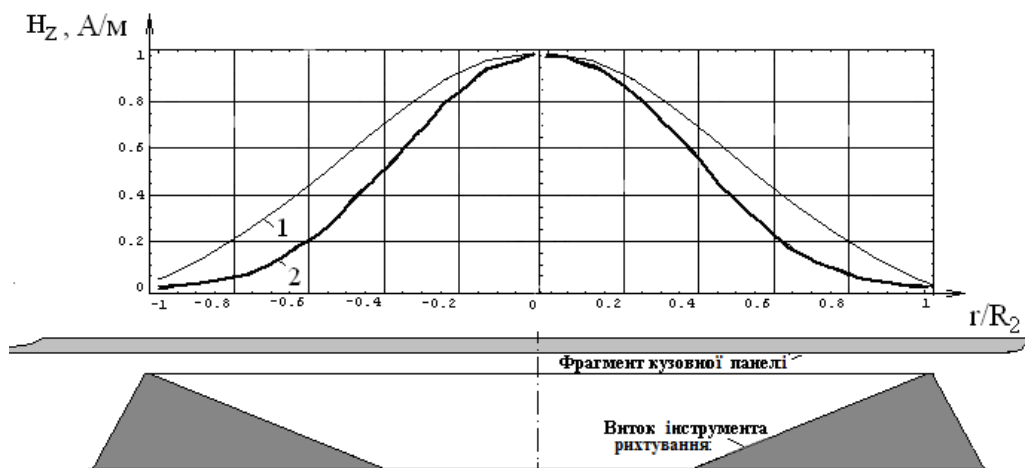
а) експериментально підтверджені висновки теорії про природу виявленого ефекту, зумовленого превалюванням зусиль рихтування за рахунок магнітних властивостей оброблюваної деталі в порівнянні з силами фундаментального відштовхування, відомими в традиційній магнітно-імпульсній обробці металів та названими «силами магнітного тиску».

б) експериментально показано, що при значенні робочої частоти $\sim 1,8$ кГц

– в низькочастотному режимі феромагнітна деталь корпусу автомобіля відчуває виключно притягання зі сторони магнітного поля інструмента, відштовхування не відчуває;



Експеримент



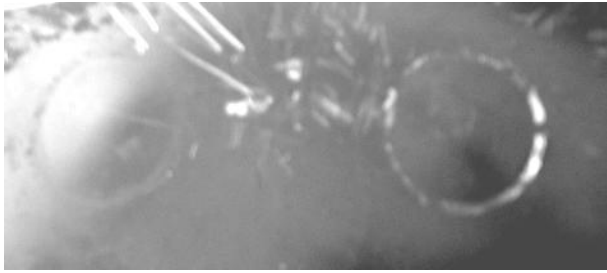
Розрахунок

Рисунок 7 – Радіальний розподіл нормальної компоненти поля

– інтегральна дієвість фундаментальної сили прагне до нуля, для немагнітної тонкостінної деталі кузова автомобіля відсутні як відштовхування, так і притягання.

– концентрація поля в центрі системи призводить до зосередження діючих сил в центральній області оброблюваної частини кузова автомобіля, про що свідчить геометрична форма вм'ятини, отриманої методом магнітно-імпульсного рихтування.

Експериментальні зразки операцій «отримання – усунення» вм'ятин на поверхні листових сталей кузовної панелі автомобіля приведені на рис. 8, де зображено дві ідентичні вм'ятини (а) до та після (б) видалення їх за допомогою способу магнітно-імпульсного рихтування.



а)



б)

а – зразок з двома ідентичними вм'ятинами, отриманими магнітно-імпульсним притяганням на рівній поверхні пластини; б – той же зразок з видаленою магнітно-імпульсним притяганням вм'ятиною – зліва, справа – контрольна вм'ятина

Рисунок 8 – Експериментальні зразки обшивки кузова автомобіля «Субару»

ВИСНОВКИ

1. Проведений аналіз існуючих способів реставрації пошкоджених автомобільних кузовів показав, що необхідні подальші дослідження в цій області для зниження енергетичних і матеріальних витрат, трудомісткості процесу та підвищення екологічної безпеки, де магнітно-імпульсні методи мають незаперечні переваги.

2. Визначено закономірності протікання процесів у полі одновиткового циліндричного соленоїда, що враховують вплив магнітної проникності металу і варіацію робочої частоти. Вони дозволяють застосувати електромагнітні технології в галузі зовнішнього рихтування сталевих кузовних панелей легкових автомобілів:

- при низьких робочих частотах діючих полів превалюють сили притягання, обумовлені магнітними властивостями металу. При підвищенні частот понад 6 кГц притягання змінюється на відштовхування, обумовлене превалюючим впливом сил Лоренца;

- запропонована закономірність силової взаємодії магнітних полів зі струмом підтверджується проведеними обчисленнями і пояснює результати експерименту, де був зафіксований ефект зміни напрямку силового впливу на сталеву кузовну панель автомобіля.

3. Проведені аналітичні дослідження і розрахунки показали, що кінчна форма внутрішнього отвору є причиною концентрації індукованих струмів в центральній частині листа металу. При збільшенні кута нахилу твірної з 0° (циліндричний отвір) до 60° максимум радіального розподілу зміщується до центру витка. Магнітні властивості оброблюваного металу слабо впливають на амплітуди і характер радіального розподілу індукованих струмів.

4. Збільшення кута нахилу твірної кінчної поверхні внутрішнього отвору з 60° до 75° сприяє більшій концентрації сил притягання в центральній частині

робочої зони інструменту і призводить до «втягуванню» відповідної ділянки кузовної панелі автомобіля з подальшим утворенням опуклості.

5. Модельні вимірювання в робочій зоні масивного одновиткового інструменту рихтування з внутрішнім конічним отвором показали, що має місце достовірність розрахункових залежностей для компонент напруженості збуджуваного магнітного поля і струму, індукованого в металі кузовної панелі автомобіля. Проведені силові експерименти продемонстрували високу ефективність рихтування, операція здійснена при набагато менших енергетичних витратах (в $6 \div 7$ разів) і меншій напрузі (в 2.5 рази), ніж в аналогічних експериментах НТУ «ХПІ» 2004р.

6. Удосконалений інструмент рихтування, що суміщає узгоджувальний пристрій дискового типу і масивний одновитковий індуктор-інструмент з внутрішнім отвором конічного профілю, за рахунок додавання в конструкцію електромагнітної демпфуючої системи, дозволяє підвищити якість електромагнітного зв'язку, величину струму, індукованого в індукторі і, як наслідок, підвищити ефективність системи магнітно-імпульсного притягання в цілому. Використання електромагнітного демпфера дозволить збільшити число імпульсів від 10 до 200 безперебійної роботи інструменту рихтування.

7. Основним показником ефективності є трудомісткість виконання операції в нормо-годинах, що складає для зовнішнього магнітно-імпульсного рихтування близько 1-2 хвилин на одне пошкодження, тоді як для механічних – від декількох хвилин до декількох годин (з урахуванням проведення додаткових операцій).

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Батыгин Ю. В. Электродинамические усилия в одновитковой индукторной системе с тонкостенным немагнитным проводником / Ю. В. Батыгин, А. Ю. Бондаренко, С. А. Драченко // Електротехніка і електромеханіка. – 2009. – №3. – С.48–60.

2. Батыгин Ю. В. Расчёт электродинамических усилий в индукционной индукторной системе с неферромагнитным массивным экраном и ферромагнитной листовой заготовкой / Ю. В. Батыгин, А. В. Гнатов, С. А. Драченко, Т. В. Гаврилова // Електротехніка і електромеханіка – 2010. - №6. – С.60-63.

3. Батыгин Ю. В., Направление сил, действующих на ферромагнетик, в зависимости от временных характеристик при МИОМ / Ю. В. Батыгин, А. В. Гнатов, С. А. Щиголева // Електротехніка і електромеханіка. Харків: 2011, №3, С.56-61.

4. Батыгин Ю. В. Притяжение тонкостенных металлических листов магнитным полем одновиткового индуктора / Ю. В. Батыгин, А. В. Гнатов, С. А. Щиголева // Электричество. - 2011. - № 4. - С. 55-62.

5. Батыгин Ю. В. Анализ электродинамических усилий в индукционной индукторной системе с массивным неферромагнитным экраном и ферромагнитной листовой заготовкой / Ю. В. Батыгин, А. В. Гнатов, С. А. Щиголева, М. В. Барбашова // *Электротехника и электромеханика* – 2011. - №5. – С. 61 – 65.

6. Батыгин Ю. В. Эксперименты магнитно-импульсного притяжения тонкостенных металлов при низких частотах действующих полей / Ю. В. Батыгин, А. В. Гнатов, С. А. Щиголева, Е. Ф. Ерёмина // *Электротехника и электромеханика* – 2011. - № 6. – С. 64 – 66.

7. Щиголева С. А. Сравнительный анализ экспериментальных и теоретических результатов исследований для возбуждаемых полей и токов в индукторной системе с коническим отверстием / С. А. Щиголева // *«Вестник ХНАДУ»* 2012. - №56. – С. 61 – 65.

8. Щиголева С. А. Анализ теоретических и экспериментальных результатов исследований электродинамических характеристик поля в индукторной системе с коническим отверстием / С. А. Щиголева, М. В. Барбашова // *Вестник СевНТУ: - Сборник научных трудов – Севастополь, 2012, - С. 212-216.*

9. Пат. 75790 України, B21 D26/14. Способ магнитно-импульсного притяжения металлических объектов совмещенным дисковым согласующим устройством с демпферной конструкцией / Батыгин Ю. В., Гнатов А. В., Чаплыгин Е. А., Аргун Щ. В., Трунова И. С., Щиголева С. А.; заявник та патентовласник Харківський нац. автом-дорожн. ун-т. – № u2012 07313; заявл. 15.06.2012; опубл. 10.12.2012, Бюл. №23.

10. Батыгин Ю. В. Электродинамические усилия в одновитковой индукторной системе с тонкостенным немагнитным проводником / Ю. В. Батыгин, А. Ю. Бондаренко, С. А. Драченко // *Международный симпозиум. Проблемы совершенствования электрических машин и аппаратов. Теория и практика. SIEMA 2009. – Харьков: 24 – 26 октября, 2009. – 22с.*

11. Батыгин Ю. В. Индукционная индукторная система с одновитковым соленоидом в полости массивного экрана и листовой заготовкой / Ю. В. Батыгин, А. В. Гнатов, С. А. Драченко // *Проблемы электротехники, электроэнергетики и электротехнологии. Сборник трудов Международной научно-технической конференции. – Тольятти, 12 – 15 мая 2009г. В 3-х ч.– Тольятти: ТГУ, 2009. –Ч.1 – С.26 – 29.*

12. Батыгин Ю. В. Цилиндрическая индукционная индукторная система с массивным экраном и тонкостенным листовым ферромагнетиком, расчётные соотношения / Ю. В. Батыгин, А. В. Гнатов, С. А. Драченко, Т. В. Гаврилова, // *Международный симпозиум. Проблемы совершенствования электрических машин и аппаратов. Теория и практика. SIEMA 2010. – Харьков: 27 – 29 октября, 2010 – 22с.*

13. Батыгин Ю. В. Деформирование тонкостенного металла в поле одновиткового соленоида с внутренним отверстием конической формы /

Ю. В. Батыгин, А. В. Гнатов, С. А. Щиголева // Международный симпозиум. Проблемы совершенствования электрических машин и аппаратов. Теория и практика. SIEMA 2011. – Харьков: 27 – 29 октября, 2011 – 24с.

14. 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 // Сборник научных трудов SWorld по материалов международной научно-практической конференции «Современные проблемы и пути их решения в науке, транспорте, производстве и образовании» - Одесса 2011. – т. 2 – С. 11 – 17.

15. Щиголева С. А. Анализ теоретических и экспериментальных результатов исследований электродинамических характеристик поля в индукторной системе с коническим отверстием / С. А. Щиголева, М. В. Барбашова // XV-я международная научно-техническая конференция «Автомобильный транспорт: проблемы и перспективы» – Севастополь: 10 – 17 сентября 2012г. – 30с.

АНОТАЦІЯ

Щиголева С. О. Удосконалення способів зовнішнього рихтування сталевих кузовних панелей автомобілів. – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.22.20 - експлуатація та ремонт засобів транспорту. – Харківський національний автомобільно-дорожній університет, МОН України, Харків, 2015.

У сфері обслуговування автомобілів рихтування кузова може реалізовуватися не тільки механічними методами, але і за допомогою більш прогресивної магнітно-імпульсної технології. Основною відмінністю такої технології є зовнішня обробка пошкодженої поверхні корпусу без розбору конструкції і пошкодження лакофарбового покриття деталі.

У дисертаційній роботі визначені закономірності протікання процесів електромагнітного рихтування сталевих кузовних панелей автомобілів, що враховують вплив магнітної проникності металу, при використанні інструментів з конічним профілем індуктора. Удосконалений спосіб усунення вм'ятин інструментом, суміщеним з дисковим узгоджувальним пристроєм, за допомогою електромагнітного демпфера, що дозволяє підвищити ефективність рихтування.

Ключові слова: сталева кузовна панель, магнітно-імпульсне рихтування, узгоджувальний пристрій, індукторна система, інструмент зовнішнього рихтування.

АННОТАЦИЯ

Щиголева С. А. Усовершенствование способов внешней рихтовки стальных кузовных панелей автомобилей. – На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.22.20 – эксплуатация и ремонт средств транспорта. – Харьковский национальный автомобильно-дорожный университет, МОН Украины, Харьков, 2015.

В сфере обслуживания автомобилей рихтовка кузова может реализовываться не только механическими методами, но и с помощью более прогрессивных магнитно-импульсных технологий, основным отличием которых является внешняя обработка повреждённой поверхности корпуса без разбора конструкции и повреждения лакокрасочного покрытия детали. Используемый в ней режим резкого скин-эффекта позволяет производить ремонт металлических кузовных панелей в условиях высокоскоростного отталкивания инструмента от металла. В этом случае обрабатываемый металл переходит в состояние гиперпластичности, что допускает его растяжение без разрушений до 200% относительной деформации. Практическое использование этого явления позволяет осуществлять ремонт кузовных покрытий автомобиля намного быстрее и с наименьшими энергетическими и денежными затратами. Кроме того, недавно зафиксированный эффект электромагнитного притяжения позволяет формулировать новые технические решения.

Проведённые теоретические и экспериментальные исследования электромагнитных процессов в цилиндрических инструментах рихтовки показали, что при понижении рабочих частот действующих полей растёт осцилляция во времени возбуждаемых фундаментальных усилий, что объясняется ростом влияния нормальной компоненты напряжённости магнитного поля. В конечном итоге, интегральное воздействие пондеромоторных сил на тонкостенные стальные элементы корпуса легкового автомобиля стремится к нулю. Предложенный механизм силового взаимодействия магнитных полей с тонкостенными ферромагнитными проводниками подтверждается проведенными вычислениями и объясняет результаты эксперимента, где был зафиксирован эффект изменения направленности силового воздействия на стальные тонкостенные заготовки в зависимости от рабочей частоты магнитного поля одновиткового цилиндрического соленоида.

К новым техническим решениям относится предложенная в диссертационной работе конструкция инструмента рихтовки, совмещающей в себе согласующее устройство дискового типа с электромагнитным демпфером и сам соленоид, рабочая зона которого имеет конический профиль.

Доказано, что при переходе от цилиндрической формы отверстия инструмента к конической максимумы усилий рихтовки, возбуждаемых в металле стальной кузовной панели, будут концентрироваться в центре рабочей зоны (удаляемой вмятины). Это позволяет снизить энергетические затраты и развить значительные усилия для качественного ремонта кузовных панелей автомобилей.

Ключевые слова: стальная кузовная панель, магнитно-импульсная рихтовка, согласующее устройство, индукторная система, инструмент внешней рихтовки.

ABSTRACT

Shchigoleva S. A. The external straightening way improving of steel car body panels. – Manuscript copyright.

The dissertation for the degree of technical sciences candidate, specialty 05.22.20 - Operation and repair of transport means. - Kharkov National Automobile and Highway University, MES of Ukraine, Kharkov, 2015.

In the car repair services field the body straightening can be realized not only by mechanical methods, but also by more advanced magnetic-pulse technology. The main technology difference is the exterior finish of the damaged body surface indiscriminately design and damage to paint coating of detail.

In dissertation work the electromagnetic processes regularities of straightening steel body panels of cars are defined that take into account the influence of the magnetic permeability of the metal, using tools with a tapered profile inductor. Improved Method for dents tool combined with a matching disk device using electromagnetic damper that improves the efficiency of straightening.

Keywords: steel body panel, magnetic-pulse straightening, matching device, inductor system, internal straightening instrument.

