

АНОТАЦІЯ

Стрельнікова В. А. Підвищення ефективності електромагнітних технологій ремонту автомобільного транспорту. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття ступеня доктора філософії за спеціальністю 274 – Автомобільний транспорт. Харківський національний автомобільно-дорожній університет, Харків, 2021.

Роботу виконано на кафедрі фізики Харківського національного автомобільно-дорожнього університету Міністерства освіти і науки України

Об'єктом дослідження є електромагнітні процеси в інструментах електромагнітних технологій ремонту автомобільного транспорту: системах індукційного нагріву із феромагнітними сердечниками та системах магнітно-імпульсного притягання тонкостінних металів із «прямим пропусканням струму».

Предметом дослідження є методи підвищення ефективності інструментів електромагнітних технологій ремонту автомобільного транспорту, заснованих на введенні феромагнітних сердечників до пристроїв індукційного нагріву і використання закону Ампера в системах магнітно-імпульсного притягання із «прямим пропусканням струму».

Дисертація присвячена подальшому розвитку прогресивних технологій ремонту автомобільного транспорту, від елементної бази агрегатів до кузовних панелей, за допомогою використання енергії електромагнітних полів, зокрема, підвищенню інтенсивності впливу на металеві ділянки завдяки введенню до конструкції інструментів ремонту феромагнітних сердечників, а також впровадження магнітно-імпульсного притягання із «прямим пропусканням струму» через об'єкт обробки.

Практичний інтерес до електромагнітних методів ремонту викликаний перш за все їх набагато більшою ефективністю при вирішенні складних технологічних

завдань, таких як рихтування кузовних панелей транспортних засобів без пошкодження лакофарбового покриття та безпосереднього розбирання кузова тощо, ніж виконання тих самих операцій традиційними способами. Перехід індукційного нагріву із суто промислового використання до виробничої галузі має багато застосувань та переваг, що обумовлюють постійну увагу дослідників. Розробка нових ефективних інструментів заснованих на взаємодії електромагнітних полів джерела та об'єкта обробки, аналіз процесів у подібних системах та пошук шляхів оптимізації технології, все це та багато іншого становить актуальність представленого дослідження.

У дисертаційній роботі проведений аналіз технології індукційного нагріву та інструментів для її реалізації, який дозволяє вказати на реальну можливість збільшити амплітуди вихрових струмів і швидкість виконання виробничої операції при незмінному рівні енергоспоживання за рахунок введення додаткових феромагнітних сердечників до конструкції інструментів. Фізично, це рішення дозволяє знизити розсіювання збуджуваних електромагнітних полів і сконцентрувати їх локальну спрямованість в задану область оброблюваного металу.

Досліджений вплив магнітних властивостей внутрішнього заповнення інструменту-індуктору на електромагнітні процеси у оброблюваному металевому об'єкті – масивному зразку та тонкостінному листовому металі, для яких були розглянуті дві цілковито протилежні фізичні ідеалізації: «прозорість» для електромагнітних полів та зверхпровідність. Реальне проблематика обробки металів електромагнітним впливом має місце поміж ними, оскільки, якщо для масивного металевого об'єкту досягти «ідеальної» провідності можливо, бо вона відповідає режиму досить високих частот, коли має місце різкий поверхневий ефект, тоді, як «прозорість» металу залежить від суворого виконання хоча б однієї з двох умов. Перша з них, це прагнення до нуля питомої електропровідності металу ($\gamma_1 \rightarrow 0$), що швидше за все відповідає не провіднику, а діелектрику. Або друга, це прагнення до нуля частоти збуджуючого сигналу ($\omega \rightarrow 0$), що відповідає постійному

струму в обмотці індуктора, коли неможливі ніякі індукційні ефекти. Проте, ідеалізація «прозорості» цікава саме з практичних міркувань, оскільки, нехай якісно, але встановлює можливі орієнтири для реалізації індукційного нагріву досить масивних і погано провідних об'єктів.

Встановлено, що залежність від магнітних властивостей виділених середовищ, індуктора та оброблюваного металу, визначається множителем

$$\beta = \frac{\mu_{r2}}{\left(\left(\frac{\mu_{r2}}{\mu_{r1}} \right) + 1 \right)}$$

Його величина встановлює вплив намагніченості на процес

збудження індукваного струму в металі зразка.

Ситуація з обробкою тонкостінних металів дещо протилежна, ніж із масивними, певної «прозорості» можливо отримати у припущенні його достатньо низької провідності, за реальних значень питомої електропровідності, це режим наднизьких робочих частот.

Аналітичний висновок про дієвість конструкції інструменту із феромагнітним сердечником, визначення коефіцієнту пропорційності між максимумами густини збуджуючого та індукваного струмів, величина якого визначає трансформацію енергії у досліджуваній системі «індуктор – оброблюваний метал», а також відповідні експериментальні дослідження свідчать про досягнення поставленої мети дисертаційної роботи.

Окремою частиною дисертаційного дослідження є магнітно-імпульсне притягання листових металів із «прямим пропусканням струму» через об'єкт обробки. На даний час наукових досліджень за даною тематикою небагато.

Аналіз магнітно-імпульсних методів силового впливу, заснованих на притяганні заданих ділянок листових металів, показав затребуваність електромагнітних технологій відновлення транспортних засобів і необхідність їх подальшого розвитку за рахунок впровадження розробок нових конструкцій інструментів.

Аналіз дієвості інструментів безконтактного магнітно-імпульсного притягання, заснованих на прояві магнітних властивостей оброблюваних металів або на силовій взаємодії індукованих струмів, показав необхідність створення нових інструментів, де притягання можна здійснити за рахунок «прямого пропускання струму» через задану ділянку листового металу.

Наукова новизна отриманих результатів полягає в наступних положеннях.

1. Вперше запропоновано використання феромагнітних сердечників в інструментах індукційного нагріву для ремонту автомобільного транспорту, що призводить до підвищення амплітуд збуджуваних полів, зростання інтенсивності теплових процесів та скорочення часу нагріву об'єктів обробки.

2. Вперше запропоновано використання магнітно-імпульсного притягання із «прямим пропусканням струму» через об'єкт обробки для видалення вм'ятин замість механічних аналогів із важільною системою витягання пошкоджених ділянок листових металів, що дозволило істотно спростити технологію ремонту, зменшити час і собівартість його виконання.

3. Отримала подальший розвиток теорія електромагнітних і теплових процесів у масивних та тонкостінних листових металах за наявності феромагнітного сердечника у конструкції інструментів індукційного нагріву, що дозволяє виконання чисельних оцінок, необхідних для проектування реально дієвих інструментів ремонту.

4. Отримали подальший розвиток аналітичні підходи до теоретичних моделей електромагнітних процесів у робочих зонах інструментів з «прямим пропусканням струму», що дозволяє виконання чисельних оцінок, необхідних для проектування реально дієвих інструментів рихтування автомобільних кузовів.

5. Успішно апробовані експериментальні моделі розроблених зразків інструментів електромагнітних технологій ремонту автомобільного транспорту, як індукційного нагріву, так і притягання тонкостінних металів за «прямого

пропускання струму», що дозволяє проводити достовірні розрахунки параметрів конструкцій інструментів для виконання реальних ремонтних операцій.

Результати дисертаційного дослідження використовувалися у Харківському національному автомобільно-дорожньому університеті в рамках науково-дослідної роботи за держбюджетною темою «Універсальні інструменти безальтернативних електромагнітних технологій ремонту сталевих та алюмінієвих елементів конструкцій автотранспорту (індукторні системи з екраном, що притягає)» (номер державної реєстрації № 0117U002402, 2017-2018 рр.)

Розроблені системи індукційного нагріву та магнітно-імпульсної обробки пройшли апробацію на підприємстві «ТОВ АВТОДОМ ХАРКІВ». Технічна новизна розробок підтверджена 2 патентами України.

Також результати дисертаційної роботи використовуються в навчальному процесі Харківського національного автомобільно-дорожнього університету при викладанні дисциплін «Основи технології виробництва та ремонту автомобілів».

Ключові слова: автомобільний транспорт, ефективні технології ремонту, індукційний нагрів, магнітно-імпульсне притягання, «пряме пропускання струму», електротехніка

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати

Статті у наукових фахових виданнях України:

1. Batygin YV, Sabokar OS, Strelnikova VA. Induction heating. History and development. Application in modern transport repairing technologies. Автомобільний транспорт. 2017;40:75-9.

(Особистий внесок здобувача: аналіз існуючих ремонтних технологій автомобільного транспорту, пропозиція використання індукційного нагріву як сучасної технології, що нівелює недоліки традиційного ремонтного обладнання)

2. Батыгин ЮВ, Стрельникова ВА. Индукционный нагрев и магнитно-импульсное притяжение для промышленных технологий современности. Харьков: Лидер; 2019. 162 с. ISBN 978-617-7476-29-9

(Особистий внесок здобувача: формулювання тематики, збір та опрацювання теоретичного матеріалу, оформлення видання)

Статті у наукових виданнях держав ЄС:

3. Strelnikova V. Experimental research of induction heating in inner hollow of cylindrical solenoid. European Journal of Engineering Research and Science. 2020;5(8):986-9. doi: 10.24018/ejers.2020.5.8.2053

Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

4. Strelnikova VA, Voronova YM. Electromagnetic metal forming. The relevance and prospects for the use in industry. In: Integration processes and innovative technologies. Achievements and prospects of engineering sciences. Зб. наук. пр. Міжнар. наук.-практ. конф.; 2017 Бер. 22; Харків. Харків: ХНАДУ; 2017, 7(2), с. 205-7.

(Особистий внесок здобувача: визначення перспектив застосування електромагнітної формовки металів для ремонтних технологій автомобільного транспорту)

5. Лавінський ДВ, Конкін ВМ, Стрельникова ВА. Чисельні розрахунки температурного поля у елементах енергетичного устаткування з урахуванням впливу електромагнітного поля. В: Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування. Тези доп. XV Міжнар. наук.-техн. конф.; 2019 Квіт. 25-26; Харків; Харків: НТУ «ХП», Вид-во «Лідер»; 2019, с. 66-7.

(Особистий внесок здобувача: участь у розробці ефективного методу аналізу нестационарного температурного поля що виникає у провідних матеріалах під впливом електромагнітного поля)

6. Стрельникова ВА. Сучасні технології ремонту автомобілів з використанням електромагнітної формовки металів. В: Проблеми енергоресурсозбереження в промисловому регіоні. Наука і практика. Тези доп. III

Всеукр. наук-практ. конф. молод. вч., спец. та асп.; 2017 Травн. 11-12; Маріуполь. Маріуполь: Приазовськ. держ. техн. ун-т, 2017, с. 70-2.

7. Стрельникова ВА. Моделювання процесу індукційного нагріву металів засобами скінченно-елементного аналізу ANSYS. В: Математична підготовка у багатоступеневій системі вищої освіти: погляд студентів і молодих вчених. Матеріали Всеукр. наук-практ. конф. студ. і молод. вч.; 2017 Квіт. 13-14; Харків. Харків: ХНАДУ; 2017, с. 412–4.

Статті у наукових фахових виданнях України, що додатково відображають результати дисертації:

Статті у наукових фахових виданнях України,

які входять до міжнародних наукометричних баз даних (Web of Science):

8. Batygin YV, Chaplygin EA, Shinderuk SA, Strelnikova VA. The main inventions for technologies of the magnetic-pulsed attraction of the sheet metals. A brief review. Електротехніка і Електромеханіка. 2018;3:43-52. doi: 10.20998/2074-272X.2018.3.06

(Особистий внесок здобувача: теоретичний огляд існуючих магнітно-імпульсних технологій притягання листових металів, порівняльний аналіз інструментів притягання для виконання виробничих операцій)

9. Батыгин ЮВ, Чаплыгин ЕА, Шиндерук СА, Стрельникова ВА. Численные оценки токов и сил в линейных инструментах магнитно-импульсного притяжения металлов. Часть 1: Металлы с низкой удельной электропроводностью. Електротехніка і Електромеханіка. 2019;5:40-4. doi: 10.20998/2074-272X.2019.5.07

(Особистий внесок здобувача: визначення амплітудно-часових залежностей струмів та електродинамічних зусиль в лінійних магнітно-імпульсних інструментах для обробки металів з низькою питомою електропровідністю)

10. Батыгин ЮВ, Чаплыгин ЕА, Шиндерук СА, Стрельникова ВА. Численные оценки токов и сил в линейных инструментах магнитно-импульсного притяжения металлов. Часть 2: Металлы с высокой удельной электропроводностью.

- Електротехніка і Електромеханіка. 2019;6:39-43. doi: 10.20998/2074-272X.2019.6.05
(*Особистий внесок здобувача: визначення амплітудно-часових залежностей струмів та електродинамічних зусиль в лінійних магнітно-імпульсних інструментах для обробки металів з високою питомою електропровідністю*)
11. Batygin YV, Chaplygin YO, Sabokar OS, Strelnikova VA. Analysis of electromagnetic processes in the system “cylindrical solenoid – massive conductor”
Електротехніка і Електромеханіка. 2018;1:54-8. doi: 10.20998/2074-272X.2018.1.08
(*Особистий внесок здобувача: визначення параметрів багатовиткового циліндричного соленоїда в якості інструменту індукційного нагріву, що впливають на амплітуду збуджуваних вихрових струмів у масивному провіднику*)
- Статті у наукових фахових виданнях України:*
12. Батигін ЮВ, Сабокар ОС, Стрельнікова ВА. Устаткування для практичної реалізації індукційного нагріву в сучасних технологіях машинобудування. Вісник Вінницького політехнічного інституту. 2017;4(133):70-4.
(*Особистий внесок здобувача: аналіз виробничих способів нагріву металів, опис альтернативної системи індукційного нагрівання для вирішення задач ремонту та обслуговування автомобільного транспорту*)
13. Батигін ЮВ, Сабокар ОС, Стрельнікова ВА. Індукційне нагрівання тонкої ферромагнітної пластини в полі плоского кругового соленоїда. Вісник Вінницького політехнічного інституту. 2017;6:135-140.
(*Особистий внесок здобувача: вирішення фізико-математичної задачі для системи індуктор – тонка ферромагнітна пластина, аналіз отриманих результатів*)
14. Стрельнікова ВА. Особенности индукционного нагрева массивных металлических заготовок индукторами с ферромагнитными сердечниками. Вісник НТУ «ХП» Серія: Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів. 2018;32(1308):99-104. doi: 10.20998/2079-3944.2018.32.17
15. Батыгин ЮВ, Ерёмина ЕФ, Чаплыгин ЕА, Стрельникова ВА. Электродинамические процессы в инструментах магнитно-импульсного

притяження при прямом пропусканні тока через обрабатываемый металл. Вісник НТУ «ХП». Математичне моделювання в техніці та технологіях. 2019;8(1333):207-13.

(Особистий внесок здобувача: отримання аналітичних залежностей, що дозволяють розраховувати розподіли струмів у перерізі листового металу під дією інструменту магнітно-імпульсного притягання за прямого пропускання струму через оброблюваний метал)

16. Batygin YV, Yeryomina OF, Shinderuk SO, Strelnikova VA, Chaplygin YO. Magnetic-pulsed attraction of sheet billets with “direct passage of current”. Вісник НТУ «ХП». Нові рішення в сучасних технологіях. 2020;4(6):3-13. doi:10.20998/2413-4295.2020.04.01.

(Особистий внесок здобувача: теоретичне обґрунтування дієвості методу магнітно-імпульсного притягання металів за «прямого пропускання струму» через оброблюваний об’єкт, вирішення крайової електродинамічної задачі для отримання фазових залежностей струмів в експериментальній системі і збуджуваних сил притягання об’єкту обробки)

17. Батыгин ЮВ, Чаплыгин ЕА, Сабокаръ ОС, Стрельникова ВА. Индукционный нагрев во внутренней полости цилиндрического соленоида. Основные соотношения протекающих процессов. Вісник Хмельницького національного університету. 2017;6(255):32-6.

(Особистий внесок здобувача: розробка моделі індукційного нагріву зубчатих циліндричних заготовок та вирішення електродинамічної задачі для представленої моделі)

18. Батыгин ЮВ, Сериков ГС, Шиндерук СА, Стрельникова ВА. Резонансный усилитель реактивной электрической мощности. Анализ электромагнитных процессов. Електротехніка та електроенергетика. 2019;2:34-42.

(Особистий внесок здобувача: формулювання рекомендацій для подальших розробок схемних елементів джерел живлення для магнітно-імпульсного притягання металів)

Патенти:

19. Батигін ЮВ, Чаплигін ЄО, Сабокар ОС, Стрельнікова ВА, винахідники; Харківський нац. автом.-дорожн. ун.-т. патентовласник. Спосіб обробки листових металів концентрованими джерелами енергії магнітних полів з попереднім нагрівом. Патент України № 121597. 2017 Груд. 11.

(Особистий внесок здобувача: розробка формули корисної моделі та опис її функціонування)

20. Батигін ЮВ, Сабокар ОС, Стрельнікова ВА, Шиндерук СО, Чаплигін ЄО, винахідники; Харківський нац. автом.-дорожн. ун.-т. патентовласник. Пристрій індукційного нагріву з магнітним концентратором. Патент України № 122800. 2018 Січ. 25.

(Особистий внесок здобувача: розробка формули корисної моделі та підготовка документації на отримання патенту)

Міжнародні стажування:

«Академічна доброчесність: виклики сучасності»: 14–25 жовтня 2019 р. – 120 год. Вищий Духовний Семінаріум UKSW (Варшава, Польща) та Фундація Інститут міжнародної наукової та академічної співпраці.

Сертифікат KW-102019/010 від 25.10.2019

“ENGR2000X: A Hands-on Introduction to Engineering Simulations” of Cornell University. Сертифікат f154360b025140b5b870c1fb0e8f92d0 від 12.01.2020