

Голові разової спеціалізованої вченої ради
Національного університету
кораблебудування
імені адмірала Макарова,
доктору технічних наук, доценту
Андрію ОБРУБОВУ

ВІДГУК

**кандидата технічних наук
Садового Олексія Степановича**

**на дисертаційну роботу Честних Миколи Володимировича
«Матрична формалізація розподілу характеристик електромагнітного поля
у металевому розплаві при протіканні електричного струму»,
представлену на здобуття наукового ступеня доктора філософії
за спеціальністю 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка,
галузь знань 14 – Електрична інженерія**

Актуальність теми дисертаційної роботи.

Розвиток електротехнологій для ливарного виробництва пов'язаний з необхідністю підвищення якості виливків за одночасного зниження ресурсної складової технологічних процесів. Наукові дослідження у цій галузі охоплюють як модернізацію традиційних методів обробки розплавів, включаючи електромагнітне перемішування, магнітно-гідродинамічну обробку, ультразвукову обробку, так і формування нових підходів. Одним із таких нових методів є кондукційна електрострумова обробка. Існуючі дані свідчать, що її ефективність залежить не тільки від параметрів джерел струму, а й від електрофізичних характеристик об'єкта обробки, типів електродних систем та температурних інтервалів обробки.

Кондукційна електрострумова обробка розплаву здатна забезпечити високі показники характеристик якості виливка, про що свідчать наявні експериментальні дані. Однак реалізація такого потенціалу потребує технологічних регламентів, заснованих на наукових даних, які наразі не охоплюють усього розмаїття умов ливарного виробництва. Це зумовлено його багатоваріантністю, багатofакторністю та багатopараметричністю, а також просторово-часовою складністю технологічних ланок, що традиційно описуються переважно емпіричними підходами. У цьому контексті постає необхідність створення регламентів на основі сучасних наукових методів. Для дослідження процесів електрострумової обробки дедалі активніше застосовують математичне моделювання – зокрема методи скінченних елементів, скінченних різниць та інтегральних рівнянь. Попри переваги, кожен із них має обмеження й не є універсальним, що пов'язано з багатofакторною природою ливарних процесів. Запропонований у роботі метод розбиття масивних провідників на елементарні комірки здатний розширити функціональні можливості методів математичного моделювання процесів у розплаві при протіканні електричного струму за умови відповідної його адаптації. Визначення відповідних умов та факторів, які для кондукційної електрострумової обробки забезпечать ефективне керування технологічними регламентами, починаючи від етапу проектування технології і закінчуючи етапом аналізу якості кінцевого продукту (виливка) також є актуальною задачею.

Актуальність теми дисертаційної роботи додатково підтверджено тим, що вона виконувалась в рамках Пріоритетних напрямків розвитку науки й техніки в Україні:

напрямок 3 «Енергетика та енергоефективність», а її результати були використані при виконанні НДР “Дослідження процесів, що супроводжують одночасну обробку розплаву силумінів різними типами струмів, та визначення умов і параметрів електромагнітного навантаження розплаву, яке забезпечує підвищення показників якості литого металу”. (№ДР 0121U109433), “Дослідження процесів електрострумової обробки ливарних сплавів на основі алюмінію під час плавлення та кристалізації, які забезпечують сприятливу морфологію залізовмісної фази та підвищення службових характеристик виливків” (№ДР 0118U000341) і “Розробка гібридного методу кондукційної електрострумової та індукційної магнітно-імпульсної обробки розплаву, який забезпечить підвищення показників якості литого сплаву” (№ДР 0124U000815), що виконувались за бюджетним фінансуванням, де автор був виконавцем.

Структура та зміст основних положень дисертаційної роботи.

Представлена дисертаційна робота за структурою та змістом відповідає тексту дисертації. Матеріал викладено чітко та лаконічно, формулювання відповідають загальноприйнятій термінології в галузі електричної інженерії.

Отримані положення, наукові та практичні результати, узагальнення і висновки повністю відповідають темі роботи та її меті, розкривають суть розв’язаної наукової задачі та завдань дослідження.

Дисертаційна робота викладена на 148 сторінках, складається зі вступу, 4 розділів, загальних висновків, списку використаних джерел та додатків. Обсяг основного тексту дисертації складає 113 сторінок друкованого тексту. Робота ілюстрована 3 таблицями та 81 рисунком. Список використаних джерел містить 83 найменування.

У **вступі** обґрунтовано актуальність роботи, розкрито стан та сутність науково-технічної проблеми, що досліджується, обґрунтовано доцільність дослідження, наведено зв'язок із науковими програмами та планами науково-дослідних робіт Інституту імпульсних процесів і технологій НАН України, сформульовано мету та задачі досліджень, наукову новизну та практичне значення отриманих результатів, наведено відомості про наукові публікації та апробацію результатів роботи.

У **першому розділі** представлено огляд науково-технічної інформації, присвяченої вивченню особливостей кондукційної електрострумової обробки розплавів алюмінієвих сплавів різними типами струмів, а також методів моделювання процесів у розплаві при такому його навантаженні. Показано, що процеси у рідкому металі під час пропускання електричного струму мають ознаки багатопараметричних та мультифізичних, а результат обробки залежить від багатьох факторів, серед яких: тип струму та тип електродної системи, форма ємності з розплавом, доза введеної у розплав енергії. Проаналізовано методи моделювання, які застосовують для дослідження процесів у розплаві при його обробці струмом, а також вказано на труднощі, які при цьому виникають. Показано, що використання методу розбиття масивних провідників на елементарні комірки може суттєво доповнити науковий доробок щодо кондукційної електрострумової обробки розплавів алюмінієвих сплавів.

Другий розділ автор присвятив розробці розрахункових алгоритмів методу розбиття масивних провідників на елементарні комірки для моделювання розподілу електромагнітних полів у 2D/3D форматах.

Автором показано, що використання цього методу із застосуванням розроблених алгоритмів дає змогу з задовільною точністю та при значно менших витратах часу оцінювати розподіл електромагнітного поля у розплаві при його обробці електричними струмами у порівнянні з методом скінченних елементів, а також визначати розподіл характеристик електромагнітного поля на стінках ємності з розплавом, що може бути використано у подальшому моделюванні іншими методами.

Третій розділ зосереджено на розробці парадигми спрощеної наскрізної системи енергетичного керування якістю литого металу у технологіях ливарного виробництва при застосуванні енергетичних методів обробки розплаву.

Автор пропонує застосовувати наскрізну систему керування, що включає три послідовні стадії: проєктування, виготовлення, споживання. На стадії проєктування пропонується проведення аналізу потенційних функціональних можливостей і цільових наслідків використання методу енергетичної обробки розплаву із застосуванням системи відповідних умов та факторів. Така система дозволяє знаходити обґрунтовані раціональні практичні рішення для створення відповідного технологічного модуля та технологічних регламентів.

Стадія виготовлення передбачає підтримку стабільного значення величини енергії, яка вводиться у розплав при обробці. Для цього пропонується використовувати фундаментальний принцип – регулювання за відхиленням. Таким чином, процедура регулювання, яка надає змогу стабільно досягати необхідного рівня навантаження рідкометалевої системи електромагнітним полем визначається тільки комбінацією параметрів джерела струму та конкретної електродної системи. Таке регулювання дає принципову змогу організації ефективної кондукційної електрострумової обробки розплаву та забезпечує отримання виливків високої якості.

На завершальному етапі здійснюється вибіркове тестування характеристик якості вже готового виливка, орієнтована на виявлення можливих дефектів з позиції виробника.

Четвертий розділ присвячено експериментальним дослідженням електрострумової обробки розплаву алюмінієвого сплаву АК7 з метою перевірки енергетичного регулювання параметрів розплаву.

Згідно представленими даним всі режими обробки показали позитивний ефект, а найкращий результат отримано саме при скороченні часу обробки практично у три рази, тобто при суттєвому скороченні енерговитрат.

Також у цьому розділі наведено розроблені автором рекомендації щодо проєктування технологічних процесів електрострумової обробки масивних провідників у технологіях ливарного виробництва.

Наукова новизна результатів роботи полягає в наступному:

- здійснено розвиток методу розбиття масивних провідників на елементарні комірки в частині формалізації розподілу характеристик електромагнітного поля, що дозволило досліджувати процеси електрострумової обробки металевих розплавів з урахуванням особливостей їх енергетичного навантаження для визначення ефективних режимів обробки;

- вперше запропоновано спрощену концепцію наскрізного енергетичного керування інтенсивністю електротехнологічних процесів навантаження об'єкта обробки задля отримання виливків високої якості;

- визначено умови та фактори, за яких застосування удосконаленого методу розбиття масивних провідників на елементарні комірки забезпечує достатній рівень верифікації отриманих результатів, що дає можливість ефективного використання даного методу при моделюванні процесів електрострумової обробки розплавів.

Практичне значення отриманих здобувачем результатів полягає в наступному:

- розроблено науково обґрунтовані рекомендації щодо проєктування технологічних процесів електрострумової обробки масивних провідників у технологіях ливарного виробництва;

- спрощена система наскрізного енергетичного керування ефективністю технологічних регламентів, яку розроблено в дисертаційній роботі, дозволяє визначати умови та фактори, за яких метод електрофізичної обробки рідкого сплаву надає можливість отримувати високу якість виливків (тимчасовий опір σ_b виріс на 13%, відносні видовження δ збільшено у 1,5 рази, а відносне звуження ψ отримано на рівні 4,4%);

- удосконалено програмну реалізацію матричної формалізації розподілу електричних характеристик у металевому провіднику при застосуванні методу розбиття масивних провідників на елементарні комірки для 2D та 3D форматів. Показано, що метод

розбиття масивних провідників на елементарні комірки дає змогу суттєво доповнити функціональні можливості методу скінченних елементів та методу інтегральних рівнянь, а також скоротити витрати часу, фінансові та матеріальні ресурси на розробку і впровадження нових технологій обробки розплавів.

Методи досліджень, використані в дисертаційній роботі.

У дисертаційній роботі автор для розв'язання поставлених задач використав низку методів. Дослідження процесів електрострумowego навантаження масивних рідкометалевих провідників виконувалось із застосуванням методів імітаційного моделювання. При моделюванні електромагнітних полів основним з них був метод розбиття масивних провідників на елементарні комірки. Для підтвердження коректності результатів, отриманих цим методом, у роботі застосовано метод скінченних елементів та фізичне моделювання. Розробка парадигми побудови системи наскрізного керування якістю у ливарному виробництві виконувалась із застосуванням системного аналізу. Перевірка енергетичного регулювання параметрів розплаву здійснена шляхом фізичного експерименту з використанням методів вимірювання електричних характеристик, термографії, металографії, механічних випробувань та математичної статистики для обробки експериментальних даних.

Наукова обґрунтованість результатів досліджень та відповідність темі дисертації

Отримані автором наукові результати у відповідності до мети та поставлених задач є логічними, не суперечать фундаментальним фізичним і математичним закономірностям та підтверджуються апробацією на науковому семінарі та науково-технічних конференціях. Достовірність отриманих у дисертації наукових положень, висновків і рекомендацій підтверджується достатнім збігом результатів, отриманих методом розбиття масивних провідників на елементарні комірки з результатами, отриманими із застосуванням методу скінченних елементів, фізичного моделювання, а також експериментальних досліджень.

Повнота викладення основних результатів дослідження в опублікованих наукових працях.

Результати дисертаційної роботи висвітлено у 9 друкованих наукових працях, 5 з яких є основними публікаціями (у тому числі 3 – у виданнях, які включені до наукометричної бази Scopus (квартиль Q3), 2 – у наукових фахових виданнях України), 3 – матеріали науково-технічних конференцій, 1 – наукова стаття, що додатково відображає наукові результати дисертації. В опублікованих наукових працях повністю розкрито основний зміст та отримані наукові результати й висновки, що складають основу дисертації.

Рівень виконання поставленого наукового завдання та оволодіння здобувачем методологією наукової діяльності.

Поставлене в дисертаційній роботі наукове завдання реалізоване у повному обсязі відповідно до мети та задач дослідження. В ході роботи продемонстровано глибоке оволодіння методологією наукових досліджень, що виявляється у комплексному застосуванні методів імітаційного і фізичного моделювання електромагнітних полів у металевому розплаві при його кондукційній електрострумовой обробці, а також у проведенні фізичного експерименту. Це свідчить про сформованість у здобувача необхідних компетенцій для самостійної науково-дослідної діяльності.

Дискусійні положення, зауваження та пропозиції щодо дисертації.

1. У роботі зустрічається таке поняття, як “базове електромагнітне поле”, однак з контексту не зрозуміло, що мається на увазі.

2. Автором розроблено два варіанта реалізації методу розбиття масивних провідників на елементарні комірки, проте в роботі не вказано їх переваги та недоліки.

3. Було б добре доповнити роботу рисунками, які більш детально показують етап побудови моделей при застосуванні методу розбиття масивних провідників на елементарні комірки.

4. У дисертаційній роботі використовуються різні назви для рисунків, що відображають кольоровий розподіл електричного поля та потенціалів. Так, рисунок 2.10 називається “Теплова карта електричного поля”, рисунок 2.15 – “Кольорова гамма електричного поля у розплаві”, рисунок 2.60 – “Теплова карта розподілу потенціалів на поверхні”. Доречніше було б застосовувати назву “Кольорова гамма електричного поля у розплаві” та “Кольорова гамма розподілу потенціалів на поверхні” для подібних рисунків.

5. В анотації дисертаційної роботи вказано, що список використаних джерел складається з 86 публікацій, а в самому списку літератури міститься 83 найменування.

Загальна оцінка дисертаційної роботи та висновки.

Виходячи з вищевикладеного, вважаю, що представлена до захисту дисертація Честних Миколи Володимировича «Матрична формалізація розподілу характеристик електромагнітного поля у металевому розплаві при протіканні електричного струму» є завершеною кваліфікаційною науковою працею, яка розв’язує актуальну наукову задачу визначення ефективної методики дослідження процесів формування у рідкометалевій системі первинного електромагнітного поля та визначення спрощеної ефективної парадигми наскрізного керування ефективністю технологічних регламентів, починаючи від етапу проєктування технології і закінчуючи етапом аналізу якості кінцевого продукту – виливка.

Враховуючи актуальність теми дисертаційної роботи, а також достовірні наукові результати, що мають наукову новизну і практичну значимість, і враховуючи повноту висвітлення основних положень дисертаційної роботи в опублікованих працях, вважаю, що представлена дисертаційна робота відповідає вимогам Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії, затвердженого Постановою Кабінету Міністрів України від 12 січня 2022 року № 44 (із змінами, внесеними згідно з Постановами Кабінету Міністрів України № 341 від 21 березня 2022 року; № 502 від 19.05.2023; № 507 від 03.05.2024), вимогам до оформлення дисертації, затвердженим Наказом Міністерства освіти і науки України від 12 січня 2017 року № 40 (із змінами, внесеними згідно з Наказом Міністерства освіти і науки № 759 від 31.05.2019), а її автор, Честних Микола Володимирович, заслуговує присудження наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка, галузь знань 14 – Електрична інженерія.

Офіційний опонент,
кандидат технічних наук,
доцент кафедри електроенергетики,
електротехніки та електромеханіки
Миколаївського
національного
аграрного університету

Олексій САДОВИЙ