

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

ВІДГУК

кандидата технічних наук

Петриченка Сергія Вікторовича

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 – Електрична інженерія

Актуальність теми дисертаційної роботи.

Одним із перспективних електротехнологічних методів покращення якості литого металу в ливарному виробництві є кондукційна електрострумова обробка розплавів (КЕСО). КЕСО є методом прямої дії, характеризується багатфакторним впливом на рідкометалеву систему, широкими можливостями їх варіювання, простотою та багатоваріантністю реалізації, помірними енерговитратами. Емпірично доведено можливість отримання із застосуванням КЕСО виливків з високими показниками якості. Такі показники пов'язані, насамперед, з характером і інтенсивністю термосилового впливу на розплав під час та внаслідок його електрострумової обробки за температур вищих рівня ліквідус. Багатоваріантність КЕСО зумовлена як можливостями з боку розробників методу та обладнання (різні види струму, їх комбінування, різні види електродних систем тощо) так і примусовими умовами ливарного виробництва (марка сплаву, виробнича стадія – ковш, форма, жолоб, об'єм

розплаву тощо). Тому проектування електротехнологічного обладнання і розробка регламентів потребують постійних досліджень процесів і результативності КЕСО за різних умов для забезпечення високої якості виливків і прийнятних енерговитрат. Вочевидь, проводити такі дослідження суто експериментальним шляхом недоцільно, необхідне застосування засобів математичного моделювання, зокрема щодо розподілу електромагнітного поля в рідкометалевій системі, оскільки саме цей розподіл визначає характер і інтенсивність термосилової дії на розплав. Застосування поширених і достатньо точних методів реалізації математичного моделювання, таких як методи скінчених елементів і інтегральних рівнянь пов'язане з рядом обмежень. Вони є ресурсоемними по відношенню до обчислювальних потужностей, проблематичним є і визначення граничних умов. Метод розбиття масивних провідників на елементарні комірки за умови відповідної його адаптації здатний розширити функціональні можливості математичного моделювання процесів у розплаві при протіканні електричного струму, а комбінування з поширеними методами, разом з розробкою алгоритмів керування інтенсивністю електротехнологічних процесів навантаження об'єкта обробки може стати ефективним інструментом проектування і застосування електротехнологій КЕСО для покращення якості виливків, тому тема роботи є актуальною.

Актуальність дисертації підтверджується тим, що дослідження проводилися в рамках тем 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); "Розробка гібридного методу кондукційної електрострумової та індукційної магнітно-імпульсної обробки розплаву, який забезпечить підвищення показників якості литого сплаву" (№ ДР 0124U000815), у виконанні яких здобувач приймав безпосередню участь.

Структура та зміст основних положень дисертаційної роботи.

Дисертаційна робота має загальний об'єм 148 сторінок, складається зі вступу, чотирьох розділів, загальних висновків, списку використаних джерел з 83 найменувань, трьох додатків, включаючи акт впровадження результатів роботи, містить 3 таблиці та 81 рисунок.

За структурою та змістом дисертаційна робота відповідає представленому матеріалу, який викладено логічно і послідовно, текстовий – у лаконічній формі. Формулювання основних положень відповідають загальноприйнятій термінології в галузі електричної інженерії.

У **вступі** обґрунтована актуальність теми дисертаційної роботи, сформульована її мета і наведені основні задачі для її досягнення, що є цілком достатніми, визначені об'єкт та предмет досліджень, комплекс методів досліджень та обґрунтування достовірності їх результатів, показаний зв'язок роботи з трьома науковими темами. Сформульовані наукова новизна та практичне значення отриманих результатів, наведені відомості про апробацію результатів дисертації на науково-практичних конференціях і наукових семінарах, об'єм і структуру рукопису.

Перший розділ дисертаційної роботи присвячений аналізу сучасних енергетичних, зокрема електротехнологічних методів обробки розплавів, феноменології, варіантів та умов реалізації, результативності (щодо якості литих металів) електрострумової обробки матеріалу на різних стадіях твердіння розплаву, математичних методів моделювання мультифізичних процесів в рідкометалевому середовищі, та розподілу електромагнітних полів, що до них призводить. Автором показано, що удосконалення методу розбиття масивних провідників на елементарні комірки в частині матричної формалізації розподілу характеристик електромагнітного поля у середовищі дозволить застосовувати його разом з більш точними традиційними методами для скорочення об'ємів обчислень та оцінки граничних і початкових умов для таких методів, а також самостійно, для оцінки характеру та параметрів термосилової дії на розплав з метою інтенсифікації процесів обробки.

Другий розділ можна вважати основним, як за об'ємом так і по направленості на досягнення поставленої в роботі мети. Розділ присвячено розробці розрахункових алгоритмів для формалізації розподілу характеристик електромагнітного поля у металевому розплаві при протіканні електричного струму методом розбиття масивних провідників на елементарні комірки у двовимірному і тривимірному просторі. Показано, що у порівнянні із розрахунками методом скінчених елементів, вдосконалений метод розбиття на елементарні комірки забезпечує задовільну точність розподілу, його реалізація займає менше часу на тих самих обчислювальних потужностях. Також показано, що використання вдосконаленого методу дозволяє визначати розподіл характеристик електромагнітного поля на стінках ємності з розплавом, що може детермінувати граничні умови для більш точного моделювання іншими методами.

У **третьому розділі** представлено концепцію спрощеної системи наскрізного енергетичного керування якістю литва у ливарному виробництві при застосуванні КЕСО (і взагалі енергетичних методів обробки) розплавів. Вона охоплює три стадії: проектування – виготовлення – споживання і дозволяє(звісно на рівні парадигми – принципово) відповідно: знаходити рішення для створення технологічних модулів і регламентів; здійснювати регулювання по величині енергії введеної в розплав за відхиленням в ході обробок (засоби – параметри джерела струму та електродної системи за умови забезпечення для необхідного рівня навантаження розплаву розподілу електромагнітного поля); здійснювати тестування характеристик якості та дефектацію продукції.

Четвертий розділ містить методику і результати натурних експериментальних досліджень електрострумової обробки розплаву сплаву АК7 та рекомендації з проектування технологічних процесів КЕСО розплавів в ливарному виробництві. Перша частина розділу в цілому підтверджує теоретичні положення дисертаційної роботи.

У **загальних висновках** сформульовані основні результати дисертаційної роботи.

Таким чином, за структурою та змістом дисертаційна робота Честних Миколи Володимировича відповідає вимогам Міністерства освіти і науки України та предметній області спеціальності 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка.

Наукова новизна результатів роботи полягає у наступному:

- запропонована ресурсозберігаюча методика формалізації розподілу у рідкометалевій системі первинного електромагнітного поля, що ґрунтується на сумісному застосуванні вдосконаленого методу розбиття масивних провідників на елементарні комірки та методу скінчених елементів і дозволяє для електрострумової обробки металевих розплавів з урахуванням їх енергетичного навантаження оцінювати та визначати ефективні режими обробки;

- розвинута концепція енергетичного керування інтенсивністю електротехнологічних процесів навантаження розплаву для забезпечення високої якості виливків ;

- визначені умови та фактори, що дозволяють ефективно використовувати вдосконалений метод розбиття масивних провідників на елементарні комірки при моделюванні процесів електрострумової обробки розплавів окремо, з достатнім рівнем верифікації отриманих результатів.

Практичне значення отриманих здобувачем результатів полягає у наступному:

- розроблені науково обґрунтовані рекомендації для проектування технологічних процесів і обладнання електрострумової обробки розплавів у технологіях ливарного виробництва на підставі яких запропоновано гнучкий варіант блочної компоновки технологічного модуля з можливістю обробки розплаву у печі, проміжній ємності, жолобі і у формі та варіанти схемотехнічних рішень енерговузла.

- запропонована спрощена концепція наскрізного керування технологічними регламентами від етапу проектування ефективних технологій кондукційної електрострумової обробки розплавів до етапу аналізу якості готового виливка. Її використання дозволило визначити умови та фактори, за

яких в результаті натурного експерименту отримано виливки з суттєво покращеними механічними властивостями;

– здійснена програмна реалізація матричної формалізації розподілу електричних характеристик у металевому провіднику при застосуванні вдосконаленого методу розбиття масивних провідників на елементарні комірки для 2D та 3D форматів.

Методи досліджень, використані в дисертаційній роботі.

Під час виконання дисертаційних досліджень доцільно і коректно використовувалися методи математичного моделювання, зокрема – імітаційного з реалізацією методами розбиття на елементарні комірки та скінченних елементів, натурний експеримент з синхронною реєстрацією електричних характеристик в динаміці, термографією, металографією і механічними випробуваннями зразків литва. Методи математичної статистики для обробки результатів реєстрації та вимірювань.

Наукова обґрунтованість результатів досліджень та відповідність темі дисертації.

Наукова обґрунтованість представлених результатів підтверджена достатнім їх збігом (для фактичного матеріалу): щодо розподілу електромагнітних характеристик в масивному провіднику – результатів моделювання методами розбиття на елементарні комірки та скінчених елементів між собою і з результатами фізичного моделювання; для положень щодо енергетичного навантаження – шляхом порівняння з результатами натурного експерименту (обробка розплаву). Крім того, результати роботи не суперечать фундаментальним фізичним і математичним закономірностям, або традиційним усталеним уявленням де таких закономірностей немає. Результати досліджень (у формі узагальнюючих положень, висновків і рекомендацій) є логічними, пройшли апробацію на науково-технічних конференціях і наукових семінарах та відповідають темі дисертації.

Повнота викладення основних результатів дослідження в наукових працях.

Основні результати дослідження повною мірою викладені 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.

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

Поставлене наукове завдання виконане в повному обсязі (у відповідності до мети та задач дисертаційної роботи) і на достатньо високому рівні, що підтверджується публікацією наукових положень дисертації в різних рецензованих і авторитетних фахових виданнях, означених вище. Здобувач, судячи з матеріалів дисертації та особистого професійного спілкування достатньо оволодів методологією наукових досліджень взагалі, і її особливостями, пов'язаними із галуззю електричної інженерії, зокрема. Здатний самостійно формулювати наукові завдання, формувати і реалізовувати оригінальні ідеї щодо нових засобів їх вирішення (наприклад, фізичні моделі, що їх використано в роботі). Вважаю, що у здобувача сформовані необхідні компетенції для самостійної науково-дослідної роботи

Дискусійні положення та зауваження щодо дисертації.

1. У першому розділі корисно було б надати більше інформації щодо традиційних енергетичних методів обробки розплаву, зокрема, відносно густини енергії обробки (в термінології дисертації) і відповідного ефекту по якості литого металу та більше уваги приділити порівняльному аналізу цих характеристикам у комплексі з результативністю електрострумової обробки (вже відомими, або прогнозованими).

2 Дисертаційна робота дещо перевантажені графічним матеріалом (81 рисунок). Сприйняття, на мій погляд, спростилося б у разі перенесення частини рисунків у додатки та більш активного застосування таблиць з ключовими параметрами тих чи інших величин.

3. У п. 4.2 дисертаційної роботи зазначено, що найкращий результат (щодо механічних властивостей) отримано при скороченні часу обробки (відповідно і сумарної енергії за тих самих умов) у три рази (сторінки 142-143, табл. 4.1). Експериментальну обробку проводили відповідно до положень дисертації і її результати підтверджують ці положення. Однак, це найменший з трьох реалізованих варіантів час обробки (16, 10 і 5 хв.) і логічним було б доповнити експериментальні результати подальшим зменшенням тривалості обробки, оскільки екстремальна ситуація по показникам якості виливка не була досягнута.

4. Можливі варіанти схемних рішень генераторів, представлені на рис. 4.5 і рис. 4.6, крім робочих параметрів не супроводжуються поясненнями по тексту дисертації тому можуть розглядатися лише як демонстративний матеріал.

5. У тексті дисертації зустрічаються неprinципові помилки, або ж неточності, наприклад, на сторінці 18 для питомого опору ρ_{Al} вказана розмірність Ом/м, на рис. 2.15 – рис. 2.17 – не підписані вісі, на сторінці 25, у Вступі, вказана помилкова загальна кількість сторінок дисертації, в формулі (2.22) густина наведених струмів з верхнім індексом, а у підпису – з нижнім тощо.

Вищезазначене не стосується основних положень та результатів дисертаційної роботи, не знижує її наукової та практичної цінності і не впливає на загальний позитивний висновок по роботі.

Загальна оцінка дисертаційної роботи та висновки.

Враховуючи вищезазначене вважаю, що надана на оцінку дисертаційна робота виконана на достатньому науковому рівні, представлені наукові результати достовірні, мають наукову новизну, основні положення висвітлені достатньо повно і практично значимі. Дисертація є завершеною науковою кваліфікаційною працею за актуальною темою і вирішує наукову задачу синтезу комбінованої методики дослідження процесів формування у рідкометалевій системі первинного електромагнітного поля та визначення спрощеної концепції наскрізного керування технологічними регламентами від

етапу проектування ефективних технологій кондукційної електрострумової обробки розплавів до етапу аналізу якості готового виливка.

Підбиваючи підсумки вважаю, що дисертаційна робота Честних Миколи Володимировича "Матрична формалізація розподілу характеристик електромагнітного поля у металевому розплаві при протіканні електричного струму" представлена до захисту на спеціалізованій вченій раді 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 (зі змінами, внесеними згідно з Постановами Кабінету міністрів України: від 21 березня 2022 року № 341; від 19 травня 2023 року № 502; від 03 травня 2024 року № 507), а також вимогам до оформлення дисертаційної роботи, затвердженим Наказом Міністерства освіти і науки України від 12 січня 2017 року № 40 (зі змінами, внесеними згідно з Наказом Міністерства освіти і науки України від 31 травня 2019 року № 759), 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,
провідний науковий співробітник,
в.о. завідувача наукового відділу
імпульсних електротехнічних систем
Інституту імпульсних процесів і
технологій НАН України

Сергій ПЕТРИЧЕНКО