ВІДГУК

офіційного опонента д-ра техн. наук, професора В.В.Перемітька
на дисертацію **АГЄЄВОЇ Марини Володимирівни**
«Розвиток наукових і технологічних основ електродугового наплавлення і зварювання з дією керуючих магнітних полів»,
що подана до спеціалізованої вченої ради Д 12.052.01 на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.03.06 – Зварювання та споріднені процеси і технології

Дисертаційна робота складається зі вступу, 6 розділів, загальних висновків, списку використаних літературних джерел з 291 найменувань. Загальний обсяг дисертації складає 343 сторінки тексту, включаючи 121 рисунок, 12 таблиць та 3 додатки.

Актуальність обраної теми дисертації. Ефективність застосування дугового наплавлення та зварювання під флюсом залежить від процесів розплавлення електродного дроту, проплавлення основного металу, кристалізації зварювальної ванни та може бути оцінена, зокрема, подрібненням структури металу валиків або швів, економією електроенергії.

Для керування цими процесами застосування зовнішніх магнітних полів виглядає перспективним, оскільки воно здійснюється без контакту керуючих пристроїв з зоною зварювання, а його реалізація не потребує суттєвих змін стандартного устаткування та техніки зварювання.

Дослідження з визначення оптимального рівня індукції магнітного поля, яке сприяє видаленню краплі з торця електрода, параметрів магнітних полів, що забезпечують ефективне перемішування рідкого металу при наплавленні під шаром флюсу, підвищення продуктивності наплавлення та зварювання, службових характеристик валиків та швів є актуальними для зварювального виробництва.

Про актуальність теми роботи свідчить також її зв'язок з темами фундаментальних та прикладних досліджень, що виконані в ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет» та Донбаській державній машинобудівній академії в рамках науково-дослідних робіт, зокрема: «Дослідження динаміки формування зони проплавлення при зварюванні під флюсом» (номер державної реєстрації 0110U006577), «Дослідження впливу

12.03.2021
192-67/25

металургійних та теплових процесів на якість наплавленого металу» (номер державної реєстрації 0111U009185), «Удосконалення процесів нанесення покриттів на деталі машин методами наплавлення, напилення» (номер державної реєстрації 0112U005780), Дк-06-2009 «Дослідження і розробка зварювальних матеріалів і технології для отримання біметалічного шару з заздалегідь відомими властивостями» (номер державної реєстрації 0109U007793), Дк-02-2014 «Удосконалення наплавлювальних матеріалів, забезпечують підвищення експлуатаційних характеристик інструменту гарячої обробки металів» (номер державної реєстрації 0114U003937).

Ступінь обґрунтованості й достовірності наукових положень, висновків і рекомендацій, сформульованих у дисертації

Для обґрунтування встановлених закономірностей автором виконані численні теоретичні та експериментальні дослідження. Наукові положення, висновки і рекомендації, які сформульовані в дисертаційній роботі Агєєвої М.В., достатньо обґрунтовані, виконані із застосуванням сучасного експериментального обладнання, розроблених методик та методів досліджень. Отримані автором закономірності не мають протиріч з існуючими теоретичними уявленнями та накопиченим досвідом інших дослідників, добре узгоджуються з існуючими концепціями.

Обґрунтованість наукових положень, висновків і рекомендацій підтверджується результатами теоретичних досліджень та їх зіставленням з отриманими експериментальним шляхом, зокрема за допомогою методів оптичної мікроскопії, мікрорентгеноспектрального аналізу. Механічні випробування проводили на атестованому обладнанні із застосуванням стандартизованих методик. Обґрунтованість наукових положень, висновків і рекомендацій, сформульованих в роботі, підтверджується порівняльним аналізом результатів розрахункових та експериментальних досліджень з відомостями з літературних джерел.

Наукова новизна дисертаційної роботи полягає в розвитку методів розрахунку індукції магнітних полів; оптимальних параметрів знакозмінних

поздовжнього і поперечного магнітних полів для ефективного перемішування металу ванни; розширенні уявлень про механізм подрібнення металу валиків, наплавлених під дією керуючих магнітних полів.

Так, на основі теорії векторного магнітного потенціалу в стаціонарних плоскомеридіанних магнітних полях вперше визначено вплив магнітних властивостей виробу, дроту та осердя пристрою введення магнітного поля на характер розподілу та значення індукції магнітного поля при дуговому наплавленні з дією поздовжнього магнітного поля. Показано, що магнітні властивості електродного дроту чинять найбільший вплив на ці параметри.

Отримало подальший розвиток уявлення, що на основі аналогії між магнітостатичним і електростатичним полем можливо визначити розподіл індукції магнітного поля в зоні краплі під торцем феромагнітного електроду та зварювальної ванни, якщо виріб з немагнітного або з феромагнітного матеріалу.

Оригінальним виглядає встановлений факт того, що при дуговому наплавленні під флюсом з дією знакозмінного поперечного магнітного поля при частоті в межах 5…10 Гц в діапазоні струмів 400…1000 А мінімальний рівень індукції, що видаляє краплю з торця електродного дроту, складає 50…100 мТл.

Авторкою вперше встановлено, що коефіцієнт розплавлення суцільних та порошкових дротів зростає на 23…30 % із підвищенням індукції постійного поперечного магнітного поля до 30…35 мТл. При збільшенні ж частоти знакозмінного поперечного магнітного поля приріст коефіцієнту розплавлення електродів знижується до нульових значень при частоті 20 Гц, що обумовлено недостатнім рівнем індукції магнітного поля.

Показано, що при дуговому зварюванні стикових з'єднань пластин з дією знакозмінних магнітних полів індукцією 25...30 мТл та частотою 5 Гц міцність металу шва має максимальне значення по причині подрібнення зерен металу зварних швів через перемішування металу в ванні під дією магнітних полів.

Вперше встановлені параметри знакозмінних магнітних полів, при яких забезпечується найефективніше перемішування рідкого металу зварювальної ванни при дуговому наплавленні під флюсом.

Показано також, що відновлення зношених поверхонь деталей металургійного обладнання (на прикладі роликів машин безперервного лиття заготовок) дуговим наплавленням під флюсом при дії керуючого знакозмінного поздовжнього магнітного поля забезпечує підвищення стійкості наплавлених шарів до термічної втоми в 2 рази, а зносостійкості при 600°С – на 20…25 %.

Практичне значення одержаних результатів та впровадження результатів

Розроблені практичні рекомендації щодо вдосконалення технологій дугового наплавлення та зварювання виробів із застосуванням керуючих магнітних полів, які дозволили подрібнити структуру наплавлених валиків та зварних швів, підвищити продуктивність до 30 %, енергозбереження до 20 % , а також працездатність конструкцій.

Вдосконалені конструктивні розміри пристрою введення для електродугового наплавлення та зварювання, розроблена технологія дугового зварювання плавким електродом стикових з’єднань пластин із феромагнітних і немагнітних сталей, що дозволило підвищити продуктивність процесів.

Розроблені практичні рекомендації для впровадження у виробництво при відновленні зношених поверхонь деталей металургійного виробництва, електродугового наплавлення шарів зі сталей 30ХГСА, 15Х4МФС, 12Х13 електродними дротами під шаром флюсу із застосуванням знакозмінного поздовжнього магнітного поля.

На основі отриманих дисертантом результатів теоретичних та експериментальних досліджень реалізовані технології дугового наплавлення та зварювання дротом під флюсом з дією керуючих магнітних полів деталей металургійного та прокатного виробництва на підприємствах України. В умовах ПрАТ «Краматорський феросплавний завод» при відновленні зношених плит, що дроблять феросплави, впроваджено технологію дугового наплавлення з використанням поздовжнього магнітного поля з економічним ефектом 478400,5 грн. В умовах ТОВ «НВО Маріленд» (м. Маріуполь) впроваджені у виробництво технологія електродугового зварювання фланців сталевих типу

Ду-500 зі сталі ВМСт3сп з нагнітальним трубопроводом та технологія електродугового наплавлення валів редуктора із загальним економічним ефектом в розмірі 1250,4 тис. грн. грн.

Ряд розробок впроваджено в навчальний процес в рамках викладання навчальних дисциплін «Технологія та устаткування зварювання плавленням», «Напилення та наплавлення», «Спецкурс за напрямком магістерської роботи» кафедри «Обладнання і технологій зварювального виробництва» ДДМА (м. Краматорськ).

Розширення обсягів впровадження результатів досліджень має перспективу на інших підприємствах металургії та машинобудування.

Повнота викладу основних результатів дисертації у фахових виданнях

Основні результати досліджень дисертації опубліковані в 49 наукових працях, у тому числі в 1 монографії, 22 статтях у спеціалізованих фахових виданнях, з них 6 статей, що внесені до реєстру міжнародної наукометричної бази даних Scopus, з яких 5 статей за Q3; 5 статтях у спеціалізованих виданнях, 3 патентах України, 18 тезах доповідей на конференціях.

Обсяг друкованих робіт та їх кількість відповідають вимогам МОН України щодо публікації основного змісту дисертації на здобуття наукового ступеню доктора технічних наук.

Зміст автореферату є ідентичним до змісту дисертації і достатньо повно відображає основні положення дослідження.

Результати досліджень, які були одержані при виконанні кандидатської дисертації «Підвищення ефективності процесу електродугового наплавлення у поздовжньому магнітному полі» (2009 р.), у представленій докторській дисертації не використовуються.

Аналіз змісту дисертації.

У вступі обґрунтовано актуальність теми дисертації, наведені мета й основні завдання досліджень, визначені наукова новизна та практичне значення отриманих результатів, містяться відомості про їх впровадження, визначений

особистий внесок автора, представлений перелік публікацій за темою дисертаційної роботи.

Перший розділ містить аналіз існуючих способів підвищення коефіцієнту розплавлення дроту, керування глибиною та формою проплавлення валиків і швів при дуговому наплавленні та зварюванні електродним дротом, огляд взаємодії поперечних і поздовжніх магнітних полів зі зварювальною дугою, краплею на торці електродного дроту та розплавом зварювальної ванни. Відзначено, що відомі розрахункові методики визначення поздовжньої величини індукції для поздовжнього магнітного поля і поперечної – для поперечного магнітного поля складні у використанні. Показано, що відсутні розрахункові методики для визначення оптимальних параметрів магнітних полів для ефективного перемішування металу в зварювальній ванні; не уточнено механізм подрібнення структури металу швів або валиків.

За результатами проведеного аналізу автор обґрунтував мету та визначив задачі дисертаційної роботи.

У розділі 2 наведені розробленні розрахункові методики визначення індукції керуючих магнітних полів у зоні краплі та зварювальної ванни для електродугових процесів під флюсом. У результаті розрахунку індукції поздовжнього магнітного поля з використанням методу векторного магнітного потенціалу в стаціонарних плоскомеридіанних магнітних полях та урахування магнітних властивостей осердя, дроту та виробу встановлено, що основний вплив на значення й характер розподілу поздовжньої компоненти індукції поля біля поверхні феромагнітного виробу надають феромагнітні властивості електродного дроту. Для практичного застосування розроблено розрахункову методику розрахунку компонент індукції поздовжнього магнітного поля під торцем феромагнітного електрода. Наводиться також розрахункова методика розрахунку компонент індукції поперечного магнітного поля в зоні під торцями стрижнів пристрою введення поперечного магнітного поля. З метою спрощення використання цієї методики виконані розрахунки числових значень компонент індукції поперечного магнітного поля в головній частині ванни. На основі обробки експериментальних даних отримані розрахункові вирази для

визначення індукції в зоні зварювальної ванни, які забезпечують задовільну збіжність розрахункових даних з експериментальними.

У **розділі 3** на основі аналогії між магнітостатичним та електростатичним полями розроблено методику розрахунку компонент індукції поздовжнього магнітного поля в зоні електродної краплі для оцінки поведінки краплі на торці електрода та у дузі. Визначено, що в зоні під торцем феромагнітного електрода поперечна компонента індукції значна та досягає половини величини поздовжньої компоненти індукції, яку генерує пристрій введення поперечного магнітного поля. При феромагнітних електроді і виробі в розрахунковій методиці застосували метод відображень. Отримані значення магнітної проникності зварювальних матеріалів за допомогою вдосконаленої методики розрахунково-експериментального визначення магнітної проникності цих матеріалів.

Проведено дослідження дії поперечного магнітного поля на коефіцієнт розплавлення електродних дротів діаметрами 3...5 мм при дуговому наплавленні під флюсом. Для з'ясування впливу частоти знакозмінного поперечного магнітного поля на коефіцієнт розплавлення електродних дротів запропоновано методику розрахунку мінімального значення поперечної компоненти індукції поля, що видаляє краплю з торця електродного дроту при даній частоті цього поля. Встановлено, що ефект підвищення коефіцієнту розплавлення дроту при дуговому наплавленні та зварюванні з дією знакозмінного поперченого магнітного поля полягає в достатньому рівні індукції в імпульсі поля та тривалості цього імпульсу.

У **розділі 4** наведені результати експериментальних досліджень впливу керуючих магнітних полів на ефективність проплавлення основного металу. Встановлені залежності глибини проплавлення та ширини валика від частоти поздовжнього та поперечного магнітних полів при дуговому зварюванні стикових з'єднань під шаром флюсу. При дуговому наплавленні під флюсом з використанням дроту і пластини з немагнітних матеріалів дія знакозмінного поперечного магнітного поля частотою від 3 до 10 Гц дозволила зменшити

глибину проплавлення основного металу на 15…20 % , зміни ширини наплавлених валиків практично не відбуваються.

У розділі 5 на основі досліджень з встановлення механізму кристалізації металу при дуговому наплавленні з дією поздовжнього магнітного поля і використанням модельного сплаву на основі заліза, який не зазнав поліморфних перетворень при кристалізації, показано, що ефект подрібнення структури металу відбувається при первинній кристалізації. Під дією знакозмінного поздовжнього магнітного поля частотою 6...24 Гц довжина та ширина кристалітів зменшилися в 1,3 та 1,3...1,5 рази відповідно. Це позитивно вплило на механічні та експлуатаційні властивості наплавленого металу.

Виконано дослідження впливу магнітних полів на міцність зварних швів. Встановлено, що при зварюванні стикових з'єднань межа міцності металу шва максимально підвищується при частоті 5 Гц, що є наслідком подрібнення зерен металу зварних швів практично в 2 рази.

Для ефективного перемішування розплаву у ванні при дуговому наплавленні запропоновані розрахункові методики визначення оптимальних параметрів знакозмінних поздовжнього і поперечного магнітних полів. Розрахунками визначено, що при рівні індукції поздовжнього магнітного поля 25 мТл оптимальна частота знаходиться в межах 2…4 Гц. Оптимальні параметри знакозмінного поперечного магнітного поля розраховували, використовуючи рівняння руху Ейлера для ламінарного потоку. Встановлено, що оптимальною є частота поля 1…3 Гц при рівні індукції 25…100 мТл.

Розділ 6 містить результати експериментальних досліджень характеристик металу, наплавленого з дією керуючого поздовжнього магнітного поля та сформульовані рекомендації щодо дугового наплавлення дротом під флюсом з дією знакозмінного поздовжнього магнітного поля зношених поверхонь роликів машин безперервного лиття заготовок.

Представлено інформацію щодо впровадження результатів проведених досліджень, які були апробовані при відновленні і зварюванні металургійного і прокатного виробництва та машинобудування на ряді підприємств України.

Повідомляється, що загальний економічний ефект від впровадження у виробництво результатів дисертаційної роботи склав близько 1 728,8 тис. грн.

Слід додати, що при наведеному вище огляді змісту розділів дисертації коротко відзначені ті результати, які є найбільш вагомими.

Загальні висновки дисертації відображають найважливіші наукові та практичні результати дисертації, в якій наведено теоретичне узагальнення та нове вирішення актуальної науково-технічної проблеми, що полягає у розширені уявлень про вплив поздовжніх і поперечних магнітних полів на процеси дугового наплавлення та зварювання дротом під флюсом, підвищенні ефективності цих процесів. Перераховане дозволило знизити енергоємність технологій, підвищити службові характеристики наплавлених валиків та зварних швів деталей металургійного, прокатного виробництва та машинобудування

Висновки сформульовано конкретно та логічно, відповідно до змісту дисертації.

Зауваження та коментарі до дисертації:

1. У пункті 1 практичного значення отриманих результатів повідомляється про збільшення працездатності зварних конструкцій, виготовлених із застосуванням керуючих магнітних полів, на 11%. Враховуючи, що в процесі виконання роботи для оцінки працездатності бралися до уваги зміни зносостійкості та термічної втоми наплавлених зразків, доцільнішим було б навести саме ці дані.
2. При визначенні параметрів керуючих магнітних полів у зоні електродної краплі та зварювальної ванни (розділ 2) не повідомляється про будь-яке врахування власного магнітного поля дуги та можливі зміни у результатах обчислень та експерименту, які можуть внаслідок цього відбуватися.
3. При розгляді впливу індукції поперечного магнітного поля на продуктивність розплавлення електродного дроту наводяться результати розрахунків, які свідчать про зменшення приблизно удвічі діаметру електродних крапель при

збільшенні індукції B_x постійного магнітного поля (стор.134). Подібному твердженню бракує експериментального підтвердження/перевірки.

4. У дисертації відсутні рисунки 3.11 та 3.13.
5. Викладення не завжди виглядає досить структурованим, це ускладнює сприйняття: п.3.3 присвячено впливу індукції поперечного магнітного поля (ПОМП) на продуктивність розплавлення електродного дроту (α_p), а в наступному п.3.4, в якому йдеться про розрахунок параметрів змінного ПОМП, що видаляють краплю з торця електрода, продовжується розгляд залежності α_p , на цей раз вже від частоти магнітного поля.
6. Деякі висновки зроблені без належної аргументації: на стор.145 рекомендується як оптимальне значення тривалості пауз прямокутних імпульсів t_n=0,01…0,02 с. В експериментах приймали єдине значення – 0,01с, стор.137.
7. Формулу для визначення ефективної потужності q_u нагріву виробу дугою (стор.155) наведено з помилкою.
8. У п.4.1 дисертації при розгляді особливостей проплавлення основного металу та визначенні термічного ККД процесу проплавлення η_t в умовах дугового зварювання під флюсом відсутні дані щодо можливих змін у разі застосування керуючих магнітних полів.
9. Висновок 2 до розділу 4 щодо доцільної частоти зовнішніх магнітних полів при зварюванні металу товщиною ≤4мм виглядає не досить коректним. Авторка при формулюванні висновку брала до уваги залежність глибини проплавлення від частоти на рис.4.6 (стор.171). Згідно ж графіків, при збільшенні частоти магнітних полів від 3 Гц до 50 Гц глибина проплавлення $H_{пр}$ зростає не більше ніж на 0,3…0,5 мм. Глибина при цьому не перевищує 2,8мм.
10. Висновок 3 до розділу 4 не містить цифрових значень зміни глибини проплавлення та ширини валика у разі переходу до наплавлення із застосуванням керуючих магнітних полів. Це не дає можливості судити про суттєвість таких змін.

11. Підписи до рис.5.14, 5.16 та 5.20 є не досить вдалими: насправді частота f зовнішнього магнітного поля не залежить струму або швидкості наплавлення. Скоріше йдеться про значення f, які рекомендуються при зміні $I_н$ та $v_н$ з метою забезпечення просування потоку розплаву на всю довжину хвостової частини ванни.
12. Залишилося незрозумілим, чи викладені у п.5.6.2 результати дослідження структури металу шва отримані при одночасній дії поздовжнього та поперечного магнітного полів чи лише поперечного?
13. У п.6.5.1, при розгляді впливу поздовжнього магнітного поля на геометричні параметри наплавлених валиків авторка позначила їх ширину як B, що дублює позначення індукції.
14. У роботі зустрічаються окремі граматичні помилки за текстом (наприклад, стор.61, 87, 95, 103, 106, 117, 119, 124, 125, 139, 151, 167, 182, 244, 265) та неточності використання понять (площі *„перетину”* (стор.36) замість *„перерізу”*, *„посилення”* шва (стор.37) замість *„опуклість”*).

Однак відзначені недоліки та зауваження не знижують загального високого рівня роботи та цінності отриманих результатів.

Дисертація відповідає вимогам Департаменту атестації кадрів МОН України. Назва та зміст дисертації відповідають паспорту спеціальності 05.03.06 – Зварювання та споріднені процеси і технології, як за формулою спеціальності, так і за напрямками досліджень.

Загальний висновок.

Розглянуті вище результати дають підстави вважати, що дисертаційна робота Агєєвої М.В. є завершеною науково-дослідною роботою, яка узагальнює теоретичні й експериментальні дослідження та вирішує важливу наукову прикладну проблему дугового наплавлення та зварювання дротом під флюсом з дією керуючих магнітних полів. Особистий внесок здобувача визначено як в дисертації, так і в авторефераті для робіт, опублікованих у співавторстві.

Оформлення дисертації і автореферату в цілому, з урахуванням зазначених вище зауважень, відповідає діючим нормативним документам.

За обсягом виконаних досліджень, їх новизною, науковою та практичною значимістю одержаних результатів та їх рівнем, представлена робота відповідає вимогам п. 9, 10 «Порядку присудження наукових ступенів» щодо докторських дисертацій, а її автор – Агєєва Марина Володимирівна – заслуговує на присудження їй наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.03.06 – Зварювання та споріднені процеси і технології.

Декан металургійного факультету
Дніпровського державного технічного
університету, професор кафедри
технології та устаткування зварювання,
д-р техн.наук, професор В.В.Перемітько

Підпис Перемітька В.В. засвідчую:
Вчений секретар ДДТУ,
канд. соціолог. наук, доцент Л.М.Сорокіна