МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ДЕРЖАВНИЙ ВИЩИЙ НАВЧАЛЬНИЙ ЗАКЛАД
«ПРИАЗОВСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ»

АГЄЄВА МАРИНА ВОЛОДИМИРІВНА

УДК 621.791.92

РОЗВИТОК НАУКОВИХ І ТЕХНОЛОГІЧНИХ ОСНОВ ЕЛЕКТРОДУГОВОГО НАПЛАВЛЕННЯ І ЗВАРЮВАННЯ З ДІЄЮ КЕРУЮЧИХ МАГНІТНИХ ПОЛІВ

05.03.06 – «Зварювання та споріднені процеси і технології»

АВТОРЕФЕРАТ
дисертації на здобуття наукового ступеня
доктора технічних наук

Маріуполь, 2020

На правах рукопису.

Робота виконана в Державному вищому навчальному закладі «Приазовський державний технічний університет» (ДВНЗ «ПДТУ», м. Маріуполь) і Донбаській державній машинобудівній академії (м. Краматорськ) Міністерства освіти і науки України.

Науковий консультант: доктор технічних наук, професор
Размишляєв Олександр Денисович
ДВНЗ «ПДТУ», професор кафедри «Автоматизація та механізація зварювального виробництва»

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Лебедєв Володимир Олександрович,
ДП «ДКТБ ІЕЗ ім. Є.О. Патона» НАН України,
головний конструктор;

доктор технічних наук, професор
Перемітько Валерій Вікторович
Дніпровський державний технічний університет, декан металургійного факультету, професор кафедри технології та устаткування зварювання;

доктор технічних наук, доцент
Малінов Володимир Леонідович
експерт з матеріалів та зварювання
ТОВ «Бюро Верітас Україна», м. Маріуполь

Захист відбудеться "26" березня 2021р. в 13^{00} год. на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 12.052.01 при Державному вищому навчальному закладі «Приазовський державний технічний університет» за адресою: 87555, м. Маріуполь, вул. Університетська, 7.

З дисертацією можна ознайомитися в бібліотеці ДВНЗ «ПДТУ» за адресою: 87555, м. Маріуполь, вул. Італійська, 115.

Автореферат розісланий "25" лютого 2021 р.

Вчений секретар
Спеціалізованої вченої ради Д 12.052.01
кандидат технічних наук, доцент І.Ю. Малишева

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Процеси дугового наплавлення і зварювання під флюсом займають одне з найважливіших місць при з'єднанні та відновленні конструкцій у галузі машинобудуванні. Ефективність процесу дугового наплавлення і зварювання залежить від продуктивності розплавлення електродного дроту, можливості керування глибиною і площею проплавлення основного металу, керування процесом кристалізації рідкого металу зварювальної ванни. Для підвищення ефективності цих процесів перспективним є використання керуючих зовнішніх магнітних полів. Найчастіше при дуговому зварюванні та наплавленні використовують поздовжні магнітні поля (ПДМП) і поперечні магнітні поля (ПОМП).

Відсутність науково обґрунтованої технології дугового наплавлення та зварювання дротом під флюсом з дією керуючих зовнішніх магнітних полів, методик для практичного використання, що дозволяють визначити значення компонент індукції магнітних полів під торцем електроду і в зоні зварювальної ванни, методик для визначення рівня індукції і частоти знакозмінних ПДМП та ПОМП, що забезпечують ефективне перемішування рідкого металу ванни при дуговому наплавленні дротом під флюсом, стримують розвиток подальших розробок. Відсутні розрахункові методики для визначення оптимальних параметрів магнітних полів та оптимальних розмірів пристрою введення (ПВ) ПОМП для практичного використання при дуговому наплавленні і зварюванні. Не уточнений механізм подрібнення структури швів при дуговому наплавленні та зварюванні. Розробка таких методик дозволить підвищити продуктивність наплавлення та зварювання, забезпечить ефективну дію магнітних полів на метал зварювальної ванни і якісне формування наплавлених валиків та зварних з'єднань. У зв'язку з цим робота є актуальною для машинобудівної галузі виробництва.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертація виконана відповідно тематиці науково-дослідних робіт кафедр «Автоматизація та механізація зварювального виробництва» ДВНЗ «ПДТУ» та «Обладнання і технологій зварювального виробництва» Донбаської державної машинобудівної академії. Результати наукових досліджень викладені в держбюджетних науково-дослідних роботах: «Дослідження динаміки формування зони проплавлення при зварюванні під флюсом» (номер державної реєстрації 0110U006577), «Дослідження впливу 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 наплавлю-вальних матеріалів, забезпечують підвищення експлуатаційних характеристик інструменту гарячої обробки металів» (номер державної реєстрації 0114U003937).

Мета і завдання дослідження. Основною метою роботи є підвищення ефективності процесів електродугового наплавлення та зварювання під флюсом

стикових з’єднань електродними дротами з дією зовнішніх керуючих магнітних полів.

Для досягнення поставленої мети були поставлені наступні наукові задачі:

1. На основі теорії векторного магнітного потенціалу встановити розподіл індукції поздовжнього магнітного поля в феромагнітних ділянках магнітного кола від обмотки зі струмом до виробу для досягнення максимальних значень поздовжньої компоненти індукції магнітного поля в зоні зварювальної дуги з урахуванням намагніченості феромагнітних осердя пристрою введення поздовжнього магнітного поля, дроту і виробу.

2. Визначити значення компонент індукцій поздовжнього і поперечного магнітних полів в зоні електродної краплі і рідкого металу в головній частині зварювальної ванни для підвищення ефективності розплавлення електродних дротів при дуговому наплавленні і зварюванні дротом під флюсом.

3. Визначити мінімальний рівень компонент індукції поперечного магнітного поля різної частоти, що видаляють краплі з торця електродного дроту при наплавленні і зварюванні під флюсом, щоб максимально підвищити продуктивність процесу розплавлення електродного дроту.

4. Дослідити особливості проплавлення основного металу при дуговому наплавленні і зварюванні стикових з'єднань з дією знакозмінного поперечного магнітного поля з метою визначення оптимальних значень індукції і частоти вказаного поля, при яких досягається потрібний рівень глибини проплавлення основного металу.

5. Визначити рівень індукції і частоти знакозмінних поздовжнього і поперечного магнітних полів, при яких забезпечується ефективне перемішування рідкого металу в зварювальній ванні, подрібнення структурних складових металу при кристалізації, підвищення службових характеристик наплавлених та зварних деталей і виробів.

6. Розробити і впровадити технології дугового наплавлення і зварювання дротом під флюсом з дією керуючих магнітних полів деталей і виробів в промислове виробництво.

Об'єкт дослідження – процеси автоматичного електродугового наплавлення та зварювання під флюсом з дією зовнішніх керуючих магнітних полів.

Предмет дослідження – вплив параметрів поздовжнього і поперечного магнітних полів на електромагнітні процеси в краплі електродного металу і в рідкому металі зварювальної ванни при електродуговому наплавленні та зварюванні під флюсом з дією зовнішніх керуючих магнітних полів.

Методи дослідження. При виконанні дисертаційної роботи і вирішенні поставлених завдань використані наступні методи: металографічний, сканувальна електронна мікроскопія, мікрорентгеноспектральний аналіз;розрахункові методики: з використанням теорії векторного магнітного потенціалу, моделювання індукції постійного магнітного поля електростатичним полем; експериментальні дослідження: індукції – універсальним тесламетром43205 з датчиком Хола з базою 0,9х0,9 мм, коефіцієнту розплавлення електродного дроту – методом зважування, показника міцності зварних швів – випробуванням на статич-

ний розтяг, випробування на зношування і стійкості проти термічної втоми наплавлених шарів при підвищених температурах.

Наукова новизна отриманих результатів.

1. Вперше, на основі теорії векторного магнітного потенціалу в стаціонарних плоскомеридіанних магнітних полях, визначено вплив магнітних властивостей виробу, що наплавляється, та елементів пристрою введення магнітного поля на характер розподілу і значення індукції магнітного поля між торцем електрода і виробом, а також в середині виробу і електродного дроту при дуговому наплавленні з дією поздовжнього магнітного поля. Показано, що саме магнітні властивості електродного дроту справляють найбільший вплив на вказані параметри, причому оптимальні їх значення для керування краплеперенесенням при дуговому наплавленні досягаються при намагнічувальній силі обмотки в межах 1600…2000 ампервитків.

2. З використанням аналогії магнітостатичних і електростатичних полів розраховано значення компоненти індукції магнітного поля в зоні краплі під торцем феромагнітного електродного дроту та у зварювальній ванні і показано, що в зоні електродної краплі на відстані 4…7 мм від осі електрода значення компоненти індукції зменшується в 3…6 разів, а поперечна компонента індукції сягає половини значень поздовжньої компоненти індукції цього поля.

3. Виявлено ефект підвищення коефіцієнту розплавлення електродних дротів діаметрами 3…5 мм при дуговому наплавленні під флюсом із силою струму 400…1000 А внаслідок накладення знакозмінного поперечного магнітного поля з частотою 5…10 Гц, яке забезпечує ефективний відрив краплі металу із торця електродного дроту при мінімальному рівні індукції, що становить 50…100 мТл.

4. Вперше встановлено, що із підвищенням індукції постійного поперечного магнітного поля до 30…35 мТл коефіцієнт розплавлення суцільних і порошкових дротів з магнітних і немагнітних матеріалів зростає на 23…30 %, стабілізуючись на цьому рівні при подальшому збільшенні індукції поля. При збільшенні частоти зміни поперечного магнітного поля і індукції 25…30 мТл приріст коефіцієнту розплавлення електродів поступово знижується, сягаючи нуля при частоті 20 Гц, що обумовлено недостатнім рівнем індукції магнітного поля.

5. Показано, що при зварюванні стикових з'єднань пластин зі сталі 12Х18Н10Т товщиною 4 мм з дією знакозмінного поперечного магнітного поля і індукцією в зоні зварювальної ванни 25...30 мТл та частотою 5 Гц межа міцності металу шва підвищується максимально на 11,5%, а при дії знакозмінного поздовжнього магнітного поля з індукцією 25...30 мТл і частотою 5 Гц – на 11,0%, що є наслідком подрібнення зерен металу зварних швів майже в 2 рази і обумовлено перемішуванням металу в ванні під дією магнітних полів.

6. Вперше встановлено, що ефективне перемішування рідкого металу в ванні при дуговому наплавленні під флюсом дротами 3…5 мм в діапазонах сили струму 400...1000 А і швидкості наплавлення 5...40 м/год забезпечується при рівні індукції знакозмінного поздовжнього магнітного поля 25…30мТл і частоті цього поля в межах 2...4 Гц, а також при дії знакозмінного поперечного магніт-

ного поля – при поперечній компоненті індукції 25…100 мТл і частоті поля в діапазоні 1...3 Гц.

7. Показано, що відновлення зношених поверхонь деталей металургійного обладнання дуговим наплавленням під флюсом електродними дротами різного ступеню легування доцільно виконувати при дії керуючого знакозмінного поздовжнього магнітного поля з індукцією в межах 25…30 мТл і частотою поля в межах 3…6 Гц, що забезпечує підвищення стійкості наплавлених шарів до термічної втоми в 2 рази, а зносостійкості при 600 ºС – на 20…25 %.

Практичне значення отриманих результатів.

1. Розроблені технології дугового наплавлення і зварювання виробів із застосуванням керуючих поздовжнього і поперечного магнітних полів, які дозволили керувати мікроструктурою наплавлених валиків та зварних швів,підвищити продуктивність до 30 % і енергозбереження до 20 % процесів, а також працездатність наплавлених і зварних конструкцій металургійного і машинобудівного виробництва на 11 %.

2. Вдосконалені конструктивні розміри пристрою введення поперечного магнітного поля для електродугового наплавлення та зварювання (патент України № 141514)і розроблена технологія дугового зварювання плавким електродом стикових з’єднань пластин із феромагнітних і немагнітних сталей з дією поперечного магнітного поля (патент України № 142804), що підвищило продуктивність цих процесів.

3. Розроблені практичні рекомендації для впровадження у виробництво при відновленні зношених поверхонь деталей металургійного виробництва, наприклад, роликів машин безперервного лиття заготівок, електродугового наплавлення шарів електродними дротами Нп-30ХГСА, ПП-15Х4МФС, ПП-12Х13 під шаром флюсу з застосуванням знакозмінного поздовжнього магнітного поля.

4. Результати дисертаційної роботи впроваджені на ряді промислових підприємств України при наплавленні і зварюванні дротом деталей металургійного і прокатного виробництва та машинобудування. В умовах ПрАТ «Краматорський феросплавний завод» впроваджена технологія дугового наплавлення при відновленні зношених плит, що дроблять феросплави, з економічним ефектом 478 тис. 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 розмірі1250,4 тис. грн. грн.

5. 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» Донбаської державної машинобудівної академії (м. Краматорськ).

Особистий внесок здобувача. Основні наукові положення, представлені в роботі, є самостійно отриманими і сформульованими результатами теоретичних

і експериментальних досліджень, виконаних особисто автором, або з його безпосередньою участю. Автор самостійно удосконалив конструкції пристроїв поперечного і поздовжнього магнітних полів, що генерують зовнішнє магнітне поле. Розрахункові методики, представлені автором в роботі, розроблені з безпосередньою за участю автора, а всі розрахунки автор виконав самостійно. Узагальнення й аналіз отриманих результатів проводилося з науковим консультантом та співавторами. Автор самостійно або зі співавторами підготовив статті, і оформив заявки на винаходи. Освоєння, впровадження у виробництво розроблених пристроїв введення магнітних полів, запропонованих технологічних рішень та супровід під час експлуатації наплавлених виробів здійснювалися під керівництвом автора разом з працівниками відповідних підприємств.

Апробація результатів досліджень. Матеріали роботи були представлені на конференціях: IV Міжнародній науково-технічній конференції «Зварювання та споріднені технології: перспективи розвитку» (Краматорськ, 2010, 2016); VI Всеукраїнська науково-технічна конференція молодих учених та спеціалістів «Зварювання та суміжні технології» (Київ, 2011); Всеукраїнських науково-технічний конференціях «Сучасні проблеми зварювання та споріднених технологій, удосконалювання підготовки кадрів» (Маріуполь, 2016); 9th International conference of young scientists on welding and related technologies (Kyiv, 2017); Міжнародна конференція «Зварювання та споріднені технології – сьогодення і майбутнє» (Київ, 2018); Міжнародних науково-технічних конференціях «Університетська наука» (Маріуполь, 2018-2020); VIII Міжнародна науково-практична конференція «Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем» (Чернігів, 2018);VI-а Міжнародна конференція «Проблеми довговічності матеріалів, покриттів та конструкцій» (Вінниця, 2018); IX Міжнародній науково-практичній конференції «Инновационные технологии в машиностроении» (Томськ, 2018); Наукова конференція «Фундаментальні та прикладні дослідження у сучасній науці» (Харків, 2019); Surles matériaux de la conference scientifique et pratique internationale «Problèmes et perspectives d'introduction de la recherché scientifique innovante» (Bruxelles, Belgique, 2019); VIII Міжнародної науково-технічної конференції молодих учених та студентів «Актуальні задачі сучасних технологій» (Тернопіль, 2019), Conactas de la conferencia internacional científica y práctica «Integración de las ciencias fundamentales y aplicadas en el paradigma de la sociedad post-industrial»(Barcelona, España, 2020).

Публікації. За матеріалами дисертації здобувачем опубліковано 49 робіт, з них: 1 монографія, 22 статті у спеціалізованих фахових виданнях, з них 6 статей, що входять до НБД Scopus, з яких 5 статей Q3; 5 статей у спеціалізованих виданнях, 3 патенти України, 18 тез доповідей на конференціях та 2 сертифікати учасника Міжнародних конференцій.

Структура і обсяг роботи. Дисертація складається зі вступу, 6 розділів,загальних висновків, переліку посилань (найменувань) і додатків. Дисертаційна робота включає в себе 343 сторінки, в тому числі 121 рисунок, 12 таблиць, і перелік використаних джерел з 291 найменування.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовано актуальність розв'язуваної в дисертації проблеми, її наукове і виробниче значення; сформульовані мета і завдання, які необхідно було вирішити в процесі виконання роботи; описані об'єкт, предмет і методи досліджень; наведені наукові і практичні результати, дані про впровадження у виробництво.

В першому розділі проведено аналіз способів керування формою і розмірами валика і шва при дуговому наплавленні і зварюванні плавким електродом, огляд взаємодії зовнішніх керуючих магнітних полів зі зварювальною дугою, краплею на торці електрода і рідким металом зварювальної ванни.

Основні теоретичні аспекти дії магнітних полів на зварювальну дугу, краплю на торці електрода та рідкий метал зварювальної ванни, подрібнення структури металу валиків і швів, оптимізації конструкції пристроїв введення магнітних полів при дуговому зварюванні та наплавленні були дослідженні такими вченими, як В.П. Черниш, В.Д. Кузнєцов, О.Д. Размишляєв, А.М. Болдирєв,І. В. Крівцун, В.М. Сидорець, С.Ю Максімов, А.В. Черних, В.О. Роянов, В.В. Чигарьов, S. Chen, Y. Chang, В. Ю. Білоус, С.В. Ахонін та інші. Дослідженню впливу магнітних полів на подрібнення структури металу наплавлених валиків і зварних швів присвятили свої роботи В.А. Биржев, Р.М. Рижов, М.А. Абралов, Р.У. Абдурахманов, J. Luo, A.Hua, Z. Liu, І.В. Малинкін та інші вчені.

В результаті аналізу відзначено, що дія магнітних полів при дуговому наплавленні та зварюванні призводить до підвищення коефіцієнту розплавлення електродного дроту. Методом фізичного моделювання були визначені швидкості потоків рідкого металу в зварювальній ванні з дією постійного ПОМП. Однак при дії постійного ПОМП індукувався усталений рух металу в ванні, який є замкнутим, і дані не можуть бути перенесені на варіант, коли на рідкий метал зварювальної ванни впливає індукція і частота знакозмінного ПОМП, які забезпечують ефективне (по всій довжині ванни) перемішування рідкого металу при електродуговому наплавленні (зварюванні) дротом під флюсом.

Розглянуті розрахункові методики визначення величини компоненти індукції магнітних полів (поздовжньої величини індукції для поздовжнього магнітного поля і поперечної – для поперечного магнітного поля). Однак ці методики не дозволяють отримати чисельні значення індукції під стрижнями для різних конструктивних параметрів ПВ ПОМП. Показано, що відсутні розрахункові методики для визначення параметрів магнітних полів для практичного використання при дуговому наплавленні і зварюванні дротом під флюсом.

Експериментально було показано, що радіальна компонента індукції ПДМП в зоні електродної краплі пропорційна значенню магнітної проникності електродних дротів, а ефект підвищення коефіцієнту розплавлення дроту при дії ПДМП пропорційний величині магнітної проникності матеріалу електрода і обумовлений зростаючим при цьому рівнем радіальної компоненти індукції ПДМП в зоні краплі. Однак немає простих методик, що дозволяють розрахувати значення радіальної компоненти індукції ПДМП в присутності еле-

ктрода і виробу з феромагнітних матеріалів. При дуговому наплавленні (зварюванні) з дією постійного ПОМП розроблена методика для розрахунку мінімального рівня індукції ПОМП, що забезпечує видалення краплі з торця електрода. Однак застосувати до знакозмінного ПОМП, коли при дуговому наплавленні не утворюється скіс торця електрода, цю методику неможливо, що стримує раціональне використання знакозмінних ПОМП при дуговому наплавленні та зварюванні. Тому необхідно розробити розрахункову методику, яка дозволяє визначити мінімальний рівень поперечної компоненти індукції ПОМП різної частоти, що видаляє краплю з торця електродного дроту і щоб підвищити за рахунок цього коефіцієнт розплавлення електродних дротів при дуговому наплавленні і зварюванні під флюсом.

Не встановлений зв'язок подрібнення структур при кристалізації металу шва (валика) з перемішуванням рідкого металу в зварювальній ванні при дуговому зварюванні і наплавленні з дією магнітних полів.

Не встановлено, на якій стадії відбувається подрібнення структури металу зварних швів при дії магнітних полів: при первинній кристалізації, або при вторинних перетвореннях. Відзначено, що відсутні дані про оптимальні параметри знакозмінних магнітних полів для ефективного перемішування розплаву в зварювальній ванні.

Другий розділ присвячений визначенню індукцій, що генерують пристрої введення ПДМП і ПОМП при електродуговому наплавленні і зварюванні.

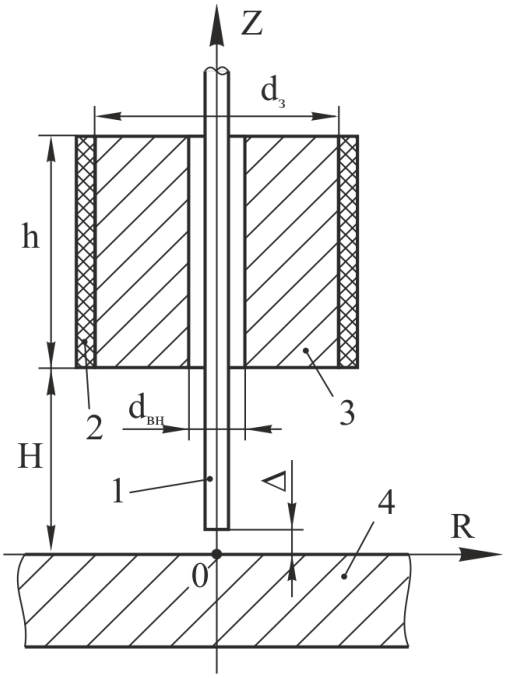


Рис. 1. Схема пристрою для дослідження будови ПДМП: 1 – електродний дріт; 2 – обмотка пристрою; 3 – осердя пристрою; 4 – виріб (пластина)

Для отримання максимальних значень поздовжньої компоненти індукції B_z магнітного поля в зоні зварювальної дуги необхідно отримати дані про розподіл індукції магнітного поля у феромагнітних складових (ділянках) магнітного ланцюга від обмотки зі струмом до наплавлювального виробу з урахуванням магнітних властивостей осердя, дроту і виробу.

На рис. 1 приведена система тіл на шляху магнітного потоку, створеного постійним струмом, що протікає в обмотці.

Значення поздовжньої компоненти індукції B_z ПДМП отримували розрахунковим шляхом з застосуванням теорії векторного магнітного потенціалу. В якості вихідного використано рівняння розподілу векторного
магнітного потенціалу в стаціонарних плоскомеридіанних магнітних полях після введення функції потоку $\psi = r \cdot A$:

$$\frac{\partial}{\partial r}\left(\frac{\nu_a}{r}\frac{\partial\psi}{\partial r}\right)+\frac{\partial}{\partial z}\left(\frac{\nu_a}{r}\frac{\partial\psi}{\partial z}\right)=-J, \qquad (1)$$

де J – густина струму в точці з координатами (r, z), А/м^2; ν_a– зворотне значення магнітної проникності середовища.

Розрахунок складових магнітної індукції з використанням функції потоку ψ виконували за формулами:

$$B_r=-\frac{1}{r}\frac{\partial\psi}{\partial z};\ B_z=-\frac{1}{r}\frac{\partial\psi}{\partial r};\ |B|=\sqrt{B_r^2+B_z^2}. \qquad (2)$$

На межах розрахункової області, яка розглядається у вигляді циліндра, задаються наступні граничні умови:

на верхній та нижній границях:

$$\frac{\partial A}{\partial z}=\frac{\partial\psi}{\partial z}=0; \qquad (3)$$

на зовнішній границі і на осі системи:

$$\frac{\partial\psi}{\partial n}\Big|s=0; \qquad (4)$$

на осі системи:

$$\psi=0. \qquad (5)$$

Рівняння (1) вирішували методом кінцевих різниць. Рішення різницевого рівняння здійснювали ітераційним методом.

Для оцінки впливу магнітної проникності μ на величину і характер розподілу поздовжньої компоненти індукції магнітного поля B_z в осерді, дроті і виробі змінювали величину μ цих складових магнітної системи. На наведених нижче графіках номера кривих відповідають наступним прийнятим в розрахунках значень магнітної проникності μ (табл.).

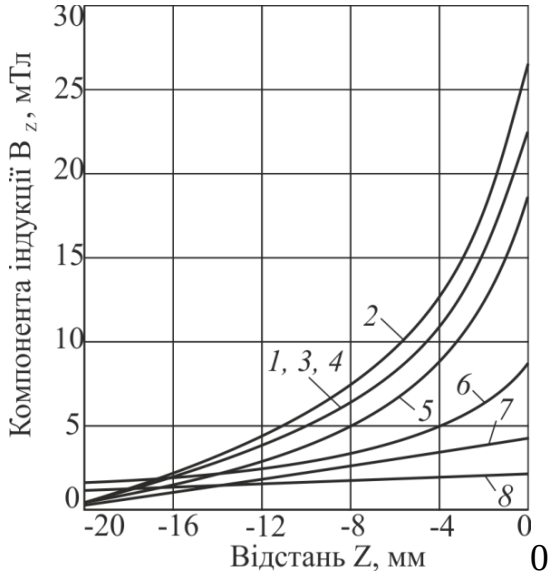
Встановлено, що при дуговому наплавленні та зварюванні з дією ПДМП основний вплив на значення і характер розподілу поздовжньої компоненти індукції поля у поверхні феромагнітного виробу надають феромагнітні властивості електродного дроту (рис. 2).

Дані на рис. 2 отримані при IW = 400 ампервитків, однак, для отримання рівня B_z в зоні зварювальної дуги, необхідного для управління геометри-ними розмірами валика при дуговому наплавленні ця намагнічувальна сила повинна складати близько 2000 ампервитків. Також потрібно було враховувати залежності $B = f(H)$ і $\mu = f(H)$, прийнятих для маловуглецевої сталі за літературними даними.

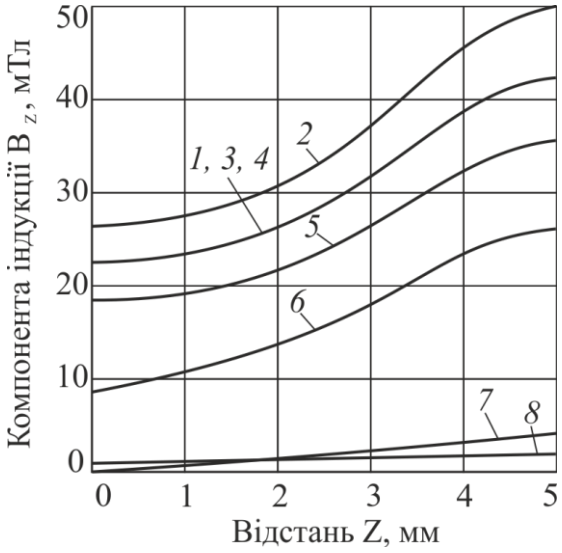
Таблиця

Значення магнітної проникності μ, прийнятих в розрахунках

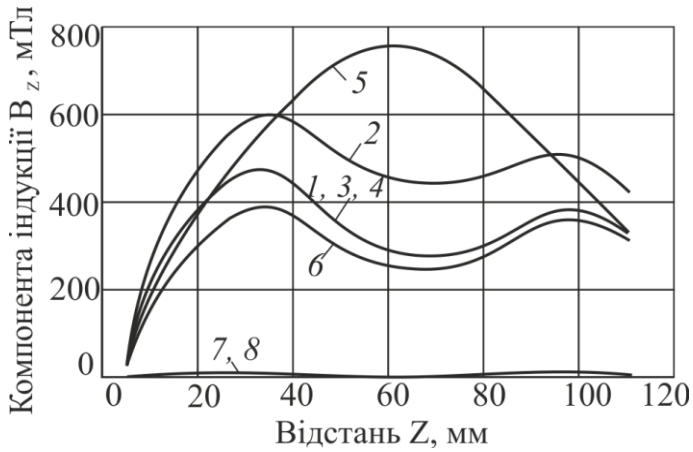
№№ кривих	Значення μ для		
	осердя	пластини	дроту
1	250	250	250
2	250	250	500
3	500	250	250
4	250	500	250
5	1	250	250
6	250	1	250
7	250	250	1
8	250	1	1



а



б



В

Рис. 2. Розподіл компоненти індукції B_z по осі OZ в пластині (а), в зазорі між пластиною і торцем електроду (б) і в електрод-ному дроті (в): (1-8 – магнітні проникності еле-ментів системи за даними табл.)

Розрахункові дані показали, що для значної намагнічувальної сили соленоїду (2000 ампервитків), якщо врахувати реальні дані про залежності $B = f(H)$ і $\mu = f(H)$, то розрахункові значення величини B_z в дроті декілька менші, ніж, якщо використовувати в розрахунках постійне значення $\mu = 500$.

Встановлено, що при значній намагнічувальній силі соленоїду розрахункові значення поздовжньої компоненти індукції ПДМП у поверхні феромагнітного виробу (пластини) задовільно збігаються з експериментальними даними, якщо в розрахунках враховувати залежність $B = f(H)$ матеріалу електродного дроту (рис. 3). Але ця розрахункова методика складна.

Була розроблена розрахункова методика визначення чисельних значень компонент індукції ПДМП під торцем феромагнітного електрода, якщо виріб з немагнітного, або феромагнітного матеріалу.

В цій методиці індукцію на поздовжній осі соленоїда довжиною L (без феромагнітного осердя в середині його) в точці А, яка розташована у його торця (рис. 4) визначали за формулою:

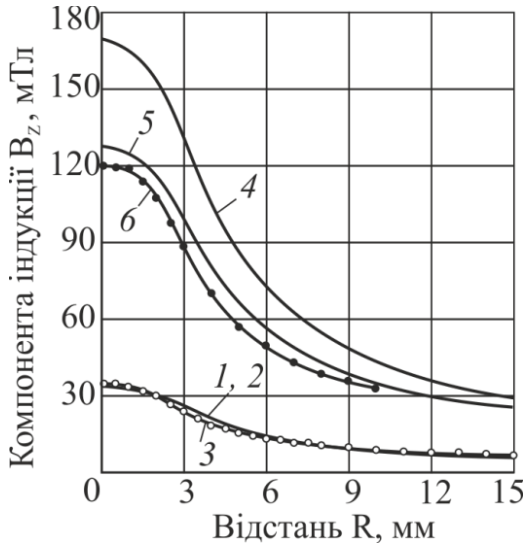


Рис. 3. Радіальний розподіл компонент індукції B_z при Z = 2,5 мм: *1, 2, 3* – при IW = 400 ампер-витків; *4, 5, 6* – при IW = 2000 ампервитків; *1, 4* – при постійних значеннях μ = 500 для феромаг-нітних складових системи тіл; *2, 5* – з урахуванням залежності $\mu = f(H)$ для зазначених складових системи; *3, 6* – експериментальні дані

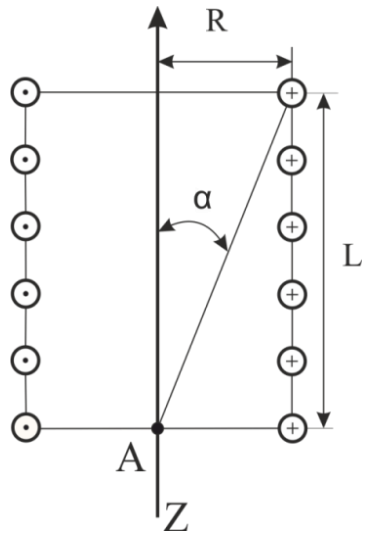


Рис. 4. Схема до розрахунку індукції B_z в точці А на осі Z: R – радіус витків соленоїду, L – довжина соленоїдv

$$B_z = \mu_0 \frac{I \cdot W}{2L} \cos\alpha, \tag{6}$$

де μ_0 – магнітна постійна, Гн/м; $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$Гн/м; $I \cdot W$ – число ампервитків в соленоїді;

$$\cos\alpha = \frac{L}{\sqrt{R^2 + L^2}}, \tag{7}$$

де R – радіус «вікна» соленоїда, м

Значення індукції B_z в точці на осі OZ на рівні торця осердя, враховуючи формули (6) і (7),розраховували за формулою:

$$B_z = \mu_0 \frac{IW}{2L} \cdot \frac{L}{\sqrt{R^2 + L^2}}, \tag{8}$$

де R – радіус витків, $R = d_з/2 = 25$ мм.

При наявності фероосердя для розрахунків можна використовувати коефіцієнт n, що враховує наявність феромагнітного осердя в (соленоїді) котушці:

$$n = \frac{B_{zmax}}{B_z}, \tag{9}$$

де B_{zmax}– індукція у торця фероосердя, Тл; B_z – індукція у торця соленоїда без осердя, розрахована за формулою (8), Тл.

На основі експериментальних досліджень встановлено, що значення коефіцієнта n можна визначити по формулі:

$$n = 3{,}75 - 0{,}0912(F_c - 2{,}08), \tag{10}$$

де F_c – поперечний переріз фероосердя (рис. 1, поз. 1) ПВ ПДМП, м^2.

На основі розрахунків встановлено, що, якщо електрод феромагнетик, а виріб немагнітний, то індукція ПДМП під торцем електрода зростає в 7 разів у порівнянні з її значеннями, коли електрод не є феромагнетиком. Якщо і електрод, і виріб – феромагнетики, то індукція зростає під торцем електрода в 9 разів.

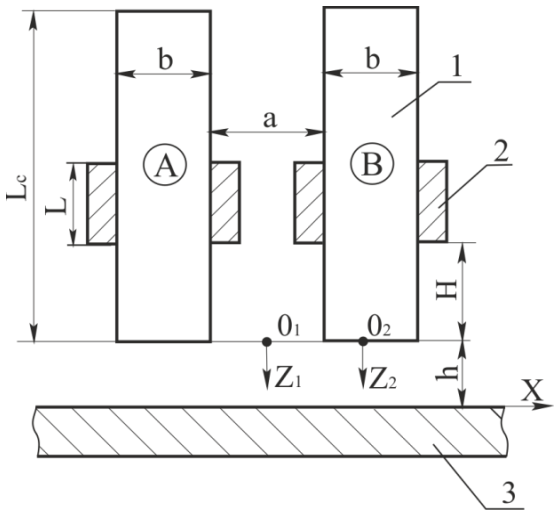


Рис. 5. Схема пристрою введення ПОМП з двома стрижнями: 1 – стрижень; 2– обмотка; 3 – виріб

Розроблена методика для визначення чисельних значень компонент індукції ПОМП в зоні електродної краплі і зварювальної ванни. Спочатку визначаються значення компоненти індукції в зоні під торцями стрижнів ПВ ПОМП, а потім визначаються значення поперечної компоненти індукції в зоні зварювальної ванни. Була досліджена конструкція пристрою ПВ ПОМП (рис. 5) у вигляді двох стрижнів з обмотками на кожному стрижні.

Експериментально встановлено, що індукція в т. 0_2 (рис. 5) підпорядковується залежності:

$$\frac{B_{z2\,max}}{B_{z1\,max}} = \frac{1}{\left(1 + 0{,}04 \cdot H_2{}^2\right)}, \qquad (11)$$

де B_{z1max}– значення індукції у торця стрижня при H_1 = 0, Тл; B_{z2max} – значення індукції у торця стрижня при прийнятому в розрахунках значенні розміру H, Тл.

На основі експериментальних даних встановлено, що значення B_z у торців стрижнів (з котушками, коли H = 0) значно більше, ніж у котушок без стрижнів і при збільшенні F_c лінійно зменшуються по залежності (для IW=1600):

$$B_z = 90 - 2{,}37(F_c - 2{,}08). \qquad (12)$$

Для реалізації цієї методики спочатку визначають значення індукції B_z у торців стрижнів ПВ ПОМП (при H = 0) в залежності від перетину стрижнів і числа ампервитків розміщених на них обмотках. При других значеннях ампервитків (IW) в котушках отримані по формулі (12) дані необхідно пропорційно збільшити.

Слід ще зазначити, що обчислені дані про B_z у торців стрижнів, є вихідними для подальших розрахунків значень B_x в точках на осі O_1Z_1 за формулою:

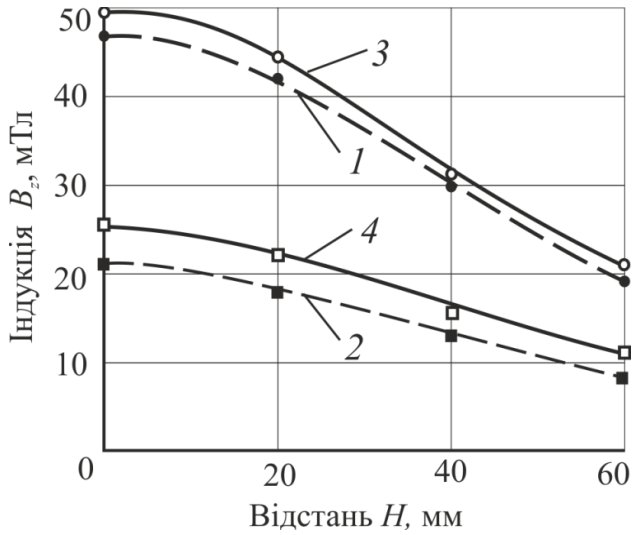


Рис. 6. Залежність індукції B_z від відстані H (IW = 1600): *1, 2* – F_c = 26х16 мм; *3, 4* – F_c = 26х32 мм; *1, 3* – h = 15 мм; *2, 4* – h = 30 мм

$$B_x = B_{z\,max}\frac{\left(R^2 + Z^2\right)^n}{R^2 + Z^2}, \qquad (13)$$

де R– еквівалентний радіус стрижнів, $R = \sqrt{\frac{F_c}{\pi}}$, м; Z – коорди-ната точки, м; B_{zmax} – значення індукції у торця стрижня уздовж осі O_2Z_2, Тл; n = 1 при a = 20 мм, n = 0,8 при a = 40 мм та n = 0,5 при a = 60 мм.

На рис. 6 наведені обчислені значення індукції B_z під стрижнями ПВ ПОМП перетином 26×16 мм і 26×32 мм. При збільшенні відстані H від котушок до торців стрижнів індукція B_z зменшується практично лінійно.

На рис. 7 наведені обчислені значення компонент індукції B_x в точці 0 по осі O_1Z_1 (рис. 5) в залежності від відстані H. Характерно, що значення поперечної компоненти індукції B_x у поверхні виробу – пластини значно змен-шуються при збільшенні відстані a і практично лінійно зменшуються при збільшенні відстані H.

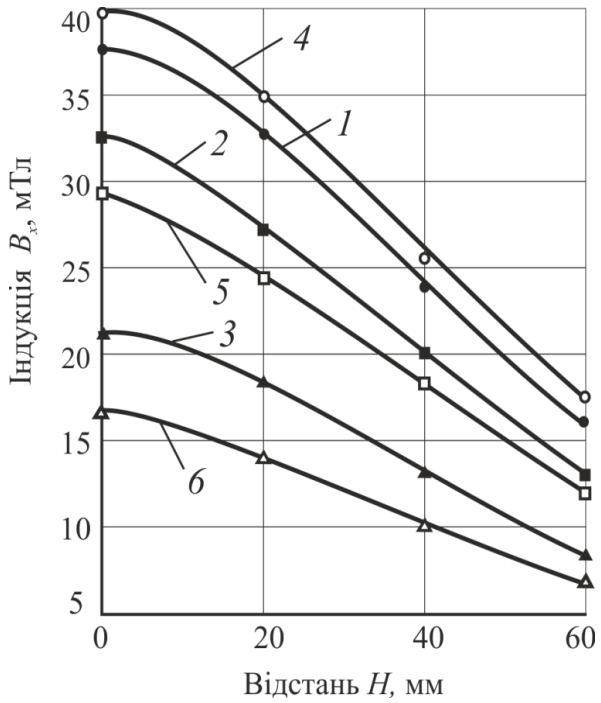


Рис. 7. Залежність індукції B_x ПОМП від відстані H (IW = 1600, h = 15 мм): *1, 2, 3* – F_c = 26х16 мм; *4, 5, 6* – F_c = 26х32 мм; *1, 4* – a = 20 мм; *2, 5* – a = 40 мм; *3, 6* – a = 60 мм

Для збільшення індукції B_x в головній частині ванни доцільно використовувати мінімальні значення параметрів h і a.

Таким чином, за розробленою методикою можливо визначити чисельні значення компонент індукції B_z і B_x відповідно уздовж осей O_2Z_2 та O_1Z_1 (рис. 5) при різних значеннях параметрів:F_c; a; $I{\cdot}W$; H.

Розроблена методика рекомендується не тільки для конструкції ПВ ПОМП, що складається зі стрижнів прямокутного перерізу, а й для стрижнів циліндричної форми, коли виріб не з феромагнітного матеріалу.

Третій розділ присвячений підвищенню продуктивності розплавлення електродного металу при електродуговому наплавленні та зварюванні з дією магнітних полів.

Для оцінки поведінки електродної краплі на торці електрода і зварювальної дуги при дуговому наплавленні дротом під флюсом з дією ПДМП розроблена розрахункова методика визначення компонент індукції ПДМП в зоні електродної краплі під торцем феромагнітного електрода, якщо виріб немагнітний і електростатичним полем.

Якщо виріб виконаний з немагнітного матеріалу, то в точках під торцем електрода в складі ПВ ПДМП визначали поздовжню і поперечну компоненти напруженості електростатичного поля. Феромагнітні (намагнічені) тіла замінюються таких же розмірів зарядженими електростатичними тілами з точковими однаковими зарядами q на їх поверхні. Розглянуто заряджений електрод (6 зарядів, рис. 8). Заряди q розміщені на глибині 0,5 мм від поверхні електрода. У певних точках під торцем електроду визначали значення поздовжньої і поперечної компонент напруженості поля від дії кожного з 6-ти зазначених зарядів, наприклад, в точці C (в одиницях) за формулами:

$$E_{zi} = E_i \cdot \frac{Z_i}{R_i};\ E_{ri} = E_i \cdot \frac{r_i}{R_i},\ E_i = \frac{q_i}{R_i^2}, \qquad (14)$$

де Z_i, r_i – координати т. C, м; R_i – радіус-відстань від т. C до відповідного заряду q_i (прийнято q_i = 4 Кл), м; E_i – напруженість поля, Кл/м^2.

Для отримання повних значень компонент напруженості поля в даній точці C виконували підсумовування їх значень від дії кожного з 6-ти зарядів.

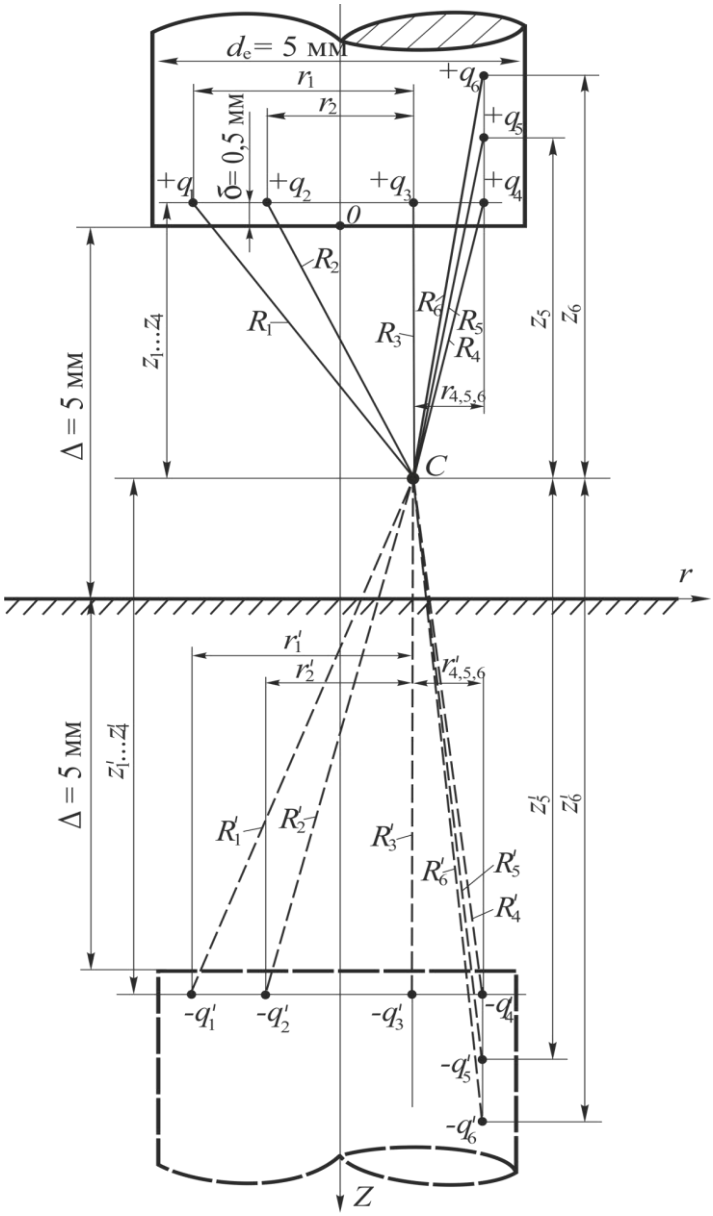


Рис. 8. Схема до розрахунку напруженості електростатичного поля *E* в точці *C* (позначення наведені в тексті)

Якщо не тільки електрод, а й виріб виконані з феромагнітних матеріалів, то в розрахунковій методиці застосовували метод відображень, тобто під поверхнею виробу-пластини розмістили фіктивні заряди, що рівні тим, які були розміщені на поверхні електрода, але є негативними $-q'$ ($-q'_1$...$-q'_6$) (рис. 8). В точці *C* додаються компоненти напруженості поля E'_z та E'_r. Вони розраховуються за формулами:

$$E'_{z_i} = E'_i \cdot \frac{Z'_i}{R'_i};\ E'_{ri} = E'_i \cdot \frac{r'_i}{R'_i},$$

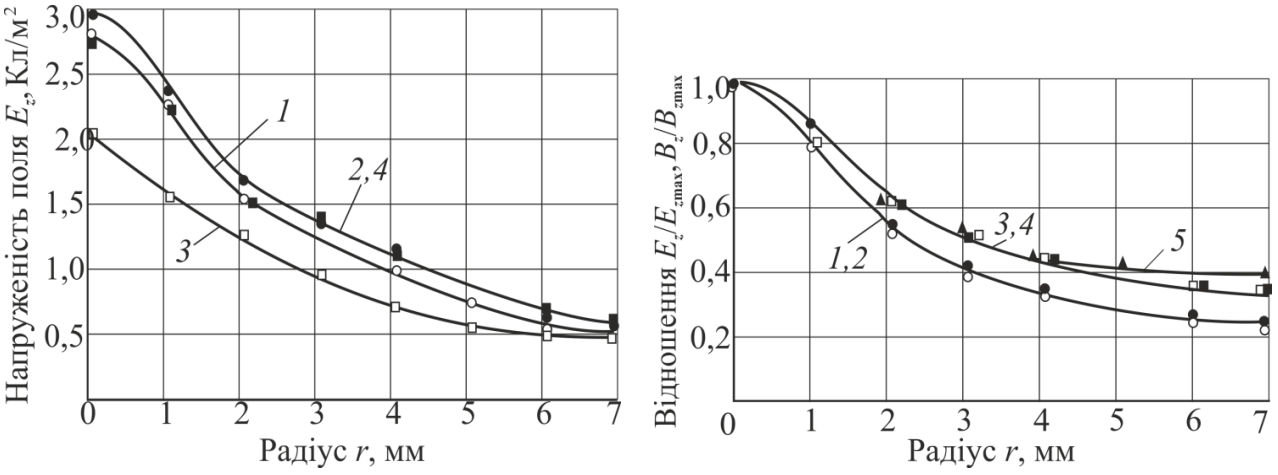
$$E'_i = \frac{q'_i}{R_i'^2}. \qquad (15)$$

Дані про компоненти напруженості поля в т. *C* підсумовуються від дії всіх зарядів $+q'_1$...$+q'_6$та $-q'_1$...$-q'_6$.

Виконані розрахунки показали хорошу збіжність визначених значень компонент напруженості електростатичного поля з компонентами індукції, які генерує ПВ ПДМП під торцем електрода.

Результати показали, що E_z різко зменшується при збільшенні параметра «*r*», якщо *Z* = 0, або *Z* = 2,5 мм, тобто в зоні розташування електродної краплі і зварювальної дуги (рис. 9). Тобто, феромагнітний електрод концентрує поле саме в районі торця електрода, і на відстані *r* = 4...7 мм від осі електрода електростатичне поле (і магніто-статичне) зменшується в 3...6 разів.

Результати розрахунків по цій методиці показали, що в зоні під торцем феромагнітного електрода поперечна компонента індукції значна і досягає половини величини поздовжньої компоненти індукції, яку генерує ПВ ПДМП. Цей висновок підтверджується експериментальними даними.



а *б*

Рис. 9. Розподіл E_z (а) та E_z/E_{zmax} (б) вздовж радіусу r: *1, 3* – виріб немагнітний; *2, 4* – виріб феромагнетик; *1, 2* – z = 0; *3, 4* – z = 2,5 мм; *5* – експериментальні дані про B_z/B_{zmax}

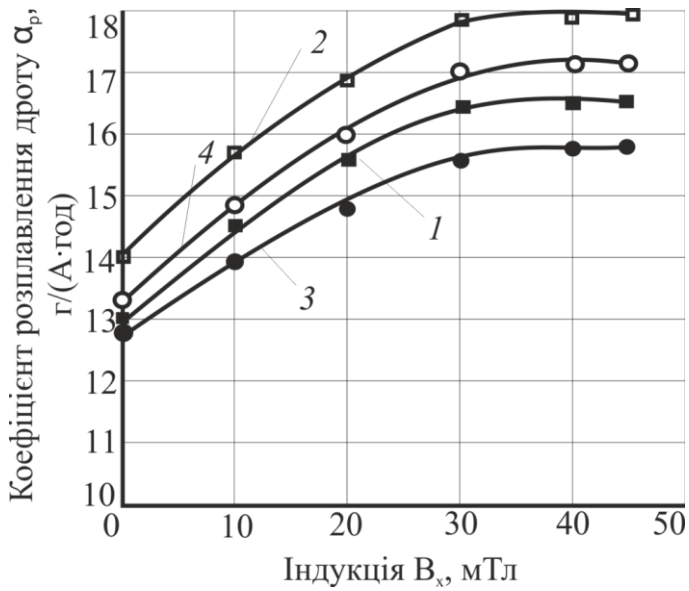


Рис. 10. Вплив компоненти індукції B_x постійного ПОМП на α_p електродних дротів при дуговому наплавленні ($U_д$ = 30…32 В): $d_е$ = 4 мм; *1* – дріт Св-08А; *2* – дріт Св-12Х18Н10Т; *3* – дріт ПП-12Х13, *4* – дріт Нп-30ХГСА; *1, 2, 4* – $I_н$ = 480...520 А; *3* – $I_н$ = 380...420 А

Експериментально визначали вплив постійного ПОМП на коефіцієнт розплавлення (α_p) електродних дротів суцільного перерізу Св-08А діаметром 4 мм, Нп-30ХГСА діаметром 4 мм під флюсом АН-348А і під флюсом АН-26П при наплавленні дротом Св-12Х18Н10Т діаметром 4 мм та порошковим дротом ПП-12Х13 діаметром 3,6 мм.Результати експериментальних досліджень показали, що α_p дротів,як з феромагнітного матеріалу (Св-08А), так і немагнітного матеріалу (Св-12Х18Н10Т) підвищується при збільшенні індукції постійного ПОМП (рис. 10).

Коефіцієнт розплавлення дроту Св-08А зростає на 30 %, дроту Св-12Х18Н10Т зростає на 30 %, дроту Нп-30ХГСА – на 27 %, дроту ПП-12Х13 – на 23 %.

Визначали вплив знако-змінного ПОМП на α_p дротуСв-08А діаметрами 3; 4; 5 мм та дроту ПП-12Х13 діаметром 3,6 мм при наплавленні під флюсом на зворотній полярності постійного струму. При цьому виконували наплавлення з дією знакозмінного ПОМП частотою 2; 5; 10; 24; 33 і 50 Гц. Схема прямокут-

них імпульсів (струму $I_к$ в котушках ПВ ПОМП і індукції B_x) приведена на рис. 11.

Встановлено, що зі збільшенням частоти ПОМП ефект підвищення α_p електродних дротів зменшується (рис. 12) і при частоті ПОМП близько 10...20 Гц ефект підвищення коефіцієнту розплавлення дротів знижується до нульових значень.

Визначення причин підвищення коефіцієнту розплавлення електродних дротів при дуговому наплавленні і зварюванні з дією знакозмінного ПОМП здійснено за допомогою розробленої розрахункової методики.

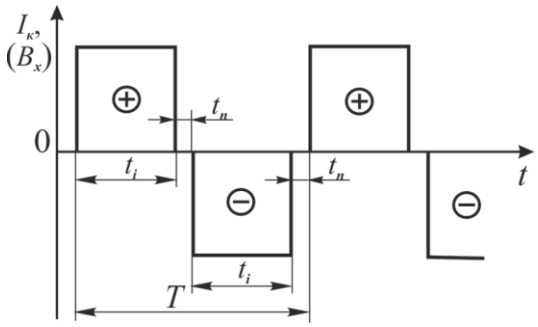


Рис. 11. Схема імпульсів струму ($I_к$), що живить котушки ПВ ПОМП($t_п$ = 0,01 с)

Прийнято, що на торці електрода, що плавиться, до дії імпульсів ПОМП (B_x) була крапля в вигляді напівкулі з радіусом кулі $r = d/2$ (d – діаметр електродного дроту, м).

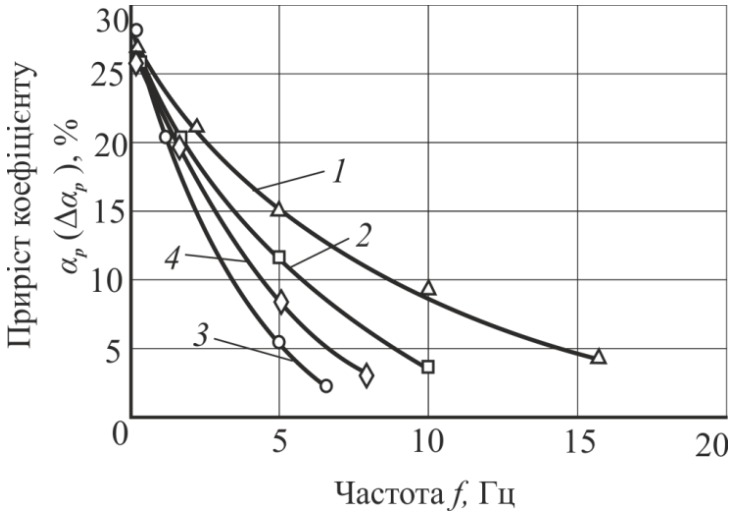


Рис. 12. Вплив частоти (f) ПОМП на приріст коефіцієнта α_p ($\Delta\alpha_p$) ($U_д$ = 30…32 В, B_x = 30 мТл): *1, 2, 3* – діаметри електродів 3; 4; 5 мм суцільного перерізу Св-08А ($I_н$= 480…520 А;); *4*–дріт ПП-12Х13 діаметром 3,6 мм ($I_н$=380…420 А)

У цьому випадку об'ємом краплі $V_к$:

$$V_к = \frac{1}{12}\pi d^3, \text{ м}^3. \quad (16)$$

Маса краплі:

$$m = \rho \cdot V_к, \text{ кг}, \quad (17)$$

де ρ – густина рідкого металу краплі, кг/м^3, $\rho = 7 \cdot 10^3$ кг/м^3.

На краплю діє (горизонтально) електромагнітна сила (в напрямку осі X):

$$F_{ем} = F_{ем} \cdot V_к, \text{ Н}, \quad (18)$$

де $F_{ем}$ – густина електромагнітної сили в краплі, Н/м^3.

При струмі наплавлення $I_н$ і дії індукції B_x:

$$F'_{ем} = \frac{4I_н}{\pi d^2} B_x \cdot \rho \cdot V_к, \text{ Н}. \quad (19)$$

Під дією сили $F_{ем}$ крапля об'ємом $V_к$ отримає прискорення:

$$a = \frac{F'_{ем}}{m}, \text{ м/с}^2. \quad (20)$$

Тоді

$$F'_{ем} \cdot V_к = \rho \cdot V_к \cdot a; \; F'_{ем} = \rho \cdot a. \quad (21)$$

З урахуванням (19) та (21) отримаємо:

$$a = \frac{F'_{ем}}{\rho} = \frac{4I_н \cdot B_x}{\pi d^2}, \text{ м/с}^2. \quad (22)$$

Крапля під дією сили $F_{ем}$ видаляється (горизонтально уздовж осі X) зі швидкістю:

$$V = \sqrt{2L \cdot a}, \text{ м/с}. \quad (23)$$

де L – довжина «розгону» краплі на торці електрода, м.

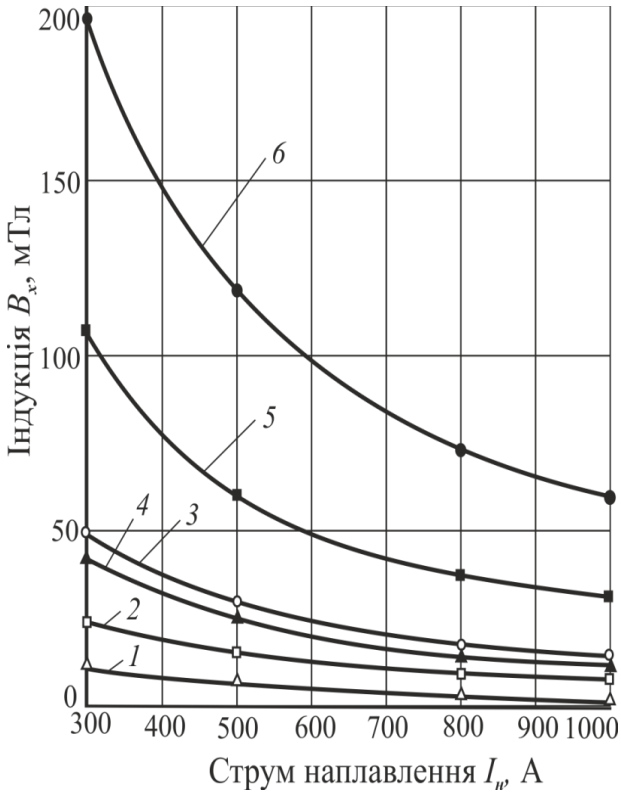


Рис. 13. Залежність індукції B_x, що видаляє краплю, від струму наплавлення $I_н$: *1, 4* – d = 3 мм; *2, 5* – d = 4 мм; *3, 6* – d = 5 мм; *1, 2, 3* – f = 5 Гц; 4, 5, 6 – f = 10 Гц

Очевидно, що $L = d$, тоді

$$V = \sqrt{2d \cdot a}, \text{ м/с}. \quad (24)$$

Час видалення краплі з торця електрода (переміщення на шляху $L = d$):

$$t = \sqrt{\frac{2d}{a}}, \text{ с}. \quad (25)$$

З урахуванням формул (16…25) мінімальний рівень індукції B_x, що видаляє краплю при даній частоті:

$$B_x = \frac{2\rho\pi d^3 f^2}{I_н}, \text{ Тл}. \quad (26)$$

За формулою (26) обчислені значення індукції B_x, як мінімальний рівень, що видаляє краплю з торця еле-

ктрода при дуговому наплавленні дротом Св-08А діаметрами 3; 4; 5 мм, струмі $I_н$ = 300...1000 А і різній частоті f ПОМП. Дані показали (рис. 13), що з ростом струму $I_н$ і даній частоті ПОМП рівень індукції B_x, при якій крапля видаляється з торця електрода, зменшується. При збільшенні частоти f ПОМП від 5 до 10 Гц рівень індукції B_x істотно зростає.

Це пов'язано з тим, що із зрос-танням частоти f ПОМП зменшується тривалість дії імпульсу (t_i) ПОМП.

При заданому струмі ($I_н$ = 500 А на рис. 14) збільшення частоти f ПОМП призводить до різкого збільшення (по квадратичній залежності відповідно до формули (26)) індукції B_x ПОМП. Це також обумовлено різким зменшенням тривалості імпульсів (t_i) ПОМП при збільшенні частоти f ПОМП. З рис. 14 видно, що при рівні індукції B_x = 30 мТл (і струмі $I_н$ = 500 А), при якій виконані наплавлення, зменшення росту α_p пов'язано з недостатнім рівнем індукції B_x. Ефект зниження α_p при збільшенні частоти ПОМП зумовлений зменшенням тривалості імпульсів ПОМП.

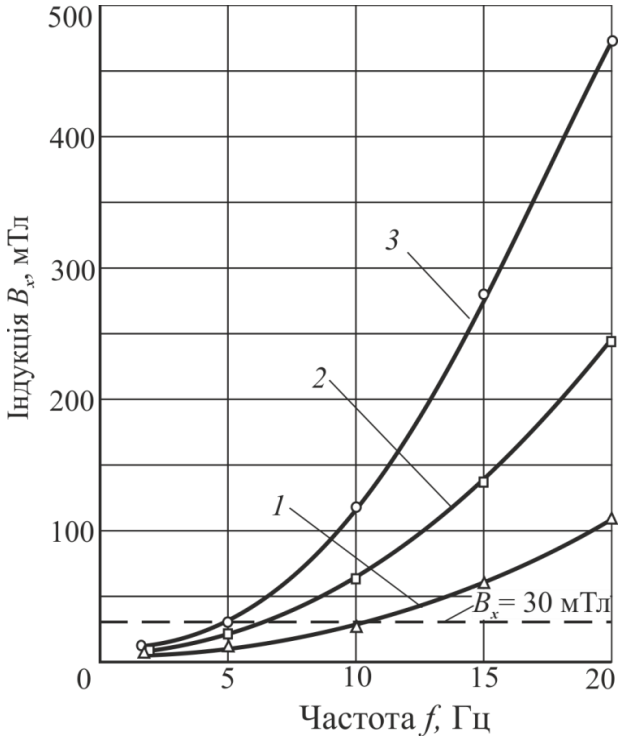


Рис. 14. Залежність індукції B_x, що видаляє краплю, від частоти f ($I_н$= 500 А): *1, 2, 3* – діаметри дротів 3; 4; 5 мм

Розрахунки за цією методикою дозволяють визначити оптимальні значення індукції і частоти знакозмінного ПОМП та ефективно підвищувати рівень коефіцієнта α_p дротів при дуговому наплавленні (зварюванні) під флюсом.

Ефект підвищення коефіцієнту розплавлення дроту при дуговому наплавленні і зварюванні з дією знакозмінного ПОМП полягає в достатньому рівні індукції в імпульсі ПОМП і тривалості імпульсу (і відповідно - частоти) ПОМП. Слід рекомендувати до застосування ПОМП частотою не вище 15...20 Гц (краще - 5...10 Гц) для підвищення продуктивності процесів дугового наплавлення та зварювання дротом під флюсом.

В четвертому розділі розглянуто вплив ПДМП і ПОМП на ефективність проплавлення основного металу при дуговому зварюванні і наплавленні дротом під шаром флюсу.

При дуговому зварюванні стикових з'єднань дротом Св-06Х19Н9Т діаметром 3 мм під флюсом АН-26П пластин із немагнітних сталей 12Х18Н10Т товщиною 4 мм на режимі $I_{зв}$ = 280…320 А; $U_д$ = 30…32 В; $V_{зв}$ = 30 м/год. встановлено, що при дії знакозмінних ПДМП і ПОМП глибина проплавлення основного металу зменшується в порівнянні з глибиною проплавлення, яка характерна для зва-

рювання без дії ПДМП. З ростом частоти ПДМП і ПОМП глибина проплавлення незначно зростає (рис. 15). Доцільно використовувати ПДМП і ПОМП частотою 3...10 Гц при зварюванні стикових з'єднань металу товщиною 4 мм і менше.

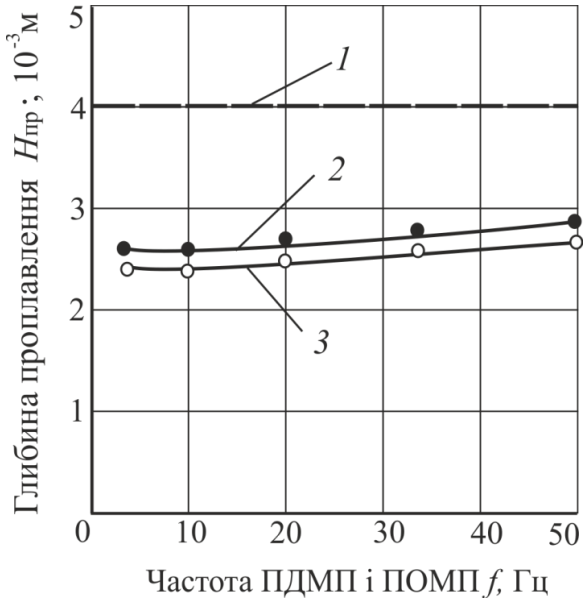


Рис. 15. Вплив частоти ПДМП і ПОМП на глибину проплавлення $H_{пр}$ основного металу: *1* – без поля; *2* – при дії знакозмінного ПДМП; *3* – при дії знакозмінного ПОМП

Проведеними експериментами по визначенню впливу ПОМП на глибину проплавлення і ширину валика при наплавленні під флюсом з використанням дроту і пластини з немагнітних матеріалів встановлено, що при наплавленні без магнітного поля глибина проплавлення основного металу $H_{пр}$ становила 5,5 мм, а при дії постійного ПОМП, коли дуга відхилялася назад (а рідкий метал зварювальної ванни відтіснявся до хвостової її частини), $H_{пр}$ збільшувалася до 8,0 мм (рис. 16, а, поз. 2), коли дуга відхилялася вперед, а рідкий метал ванни був направлений до передньої її частини, $H_{пр}$ зменшилася до 2,4 мм, тобто більш ніж в 2 рази (рис. 16, а, поз. 3). Знакозмінне ПОМП практично не впливає на ширину валиків (рис. 16, б, поз. 4-7). Глибина проплавлення при дії знакозмінного частотою від 3 до 50 Гц ПОМП (при поперечному розташуванні стрижнів ПВ ПОМП щодо осі валика)зменшується на 15…20 % (рис. 16, а, поз. 4-7).

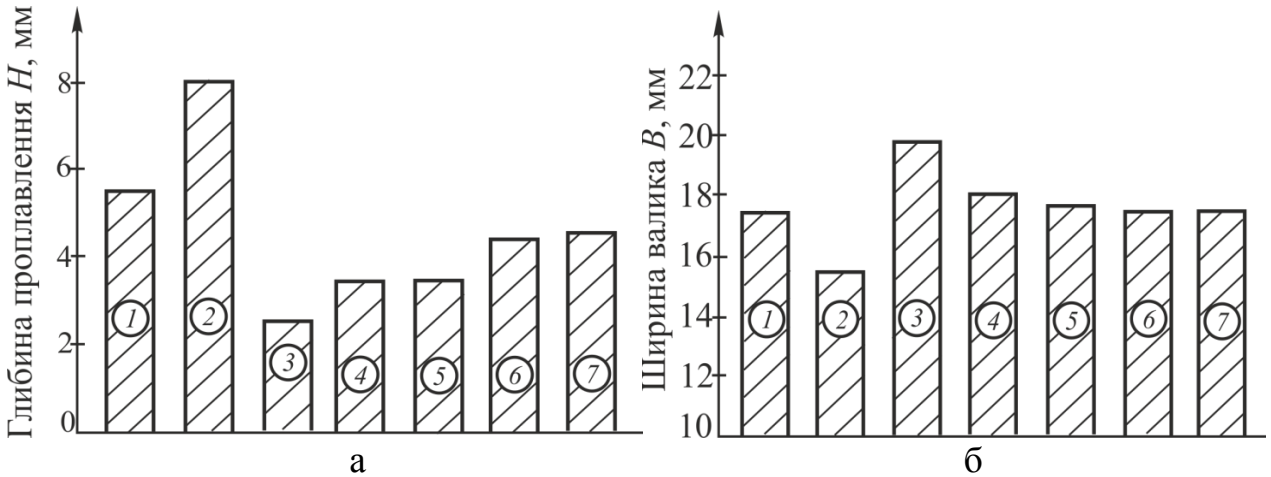


Рис. 16. Вплив ПОМП на глибину проплавлення валика (а) і його ширину (б) (*IW* = 1600): *1* – без ПОМП; *2* – постійне ПОМП, (відхилення дуги назад); *3* – постійне ПОМП (відхилення дуги вперед); *4,5, 6, 7* – знакозмінне ПОМП частотою f = 3, 10, 20, 50 Гц (режим наплавлення: $I_н$ = 500…520 А; $U_д$ = 30…32 В; $V_н$ = 30 м/год.

П'ятий розділ присвячений впливу ПДМП і ПОМП на перемішування і структуру металу валиків і швів при дуговому наплавленні та зварюванні.

Проведені дослідження по установленню механізму кристалізації металу при дуговому наплавленні з дією керуючих магнітних полів з метою вирішення питання, на якій стадії процесу кристалізації металу валиків при наплавленні з дією магнітних полів відбувається подрібнення структури валиків: при первинній кристалізації або на стадії фазових перетворень металу в твердому стані. Для вирішення цього питання виконували наплавлення з використанням спеціально виготовленого порошкового дроту – сплав на основі заліза, який забезпечував не більше 0,08 % C і не менше 17 % Cr в наплавленому металі і який не зазнав поліморфних перетворень при кристалізації. Наплавлення виконані без дії ПДМП і з дією знакозмінного ПДМП частотою 6; 12; 24; 33 Гц. Дослідженнями макро- і мікроструктури наплавленого металу встановлено, що спостерігалося зменшення довжини кристалітів в 1,3 рази і ширини їх в 1,3...1,5 рази при дії знакозмінного ПДМП частотою 6...24 Гц (рис. 17).

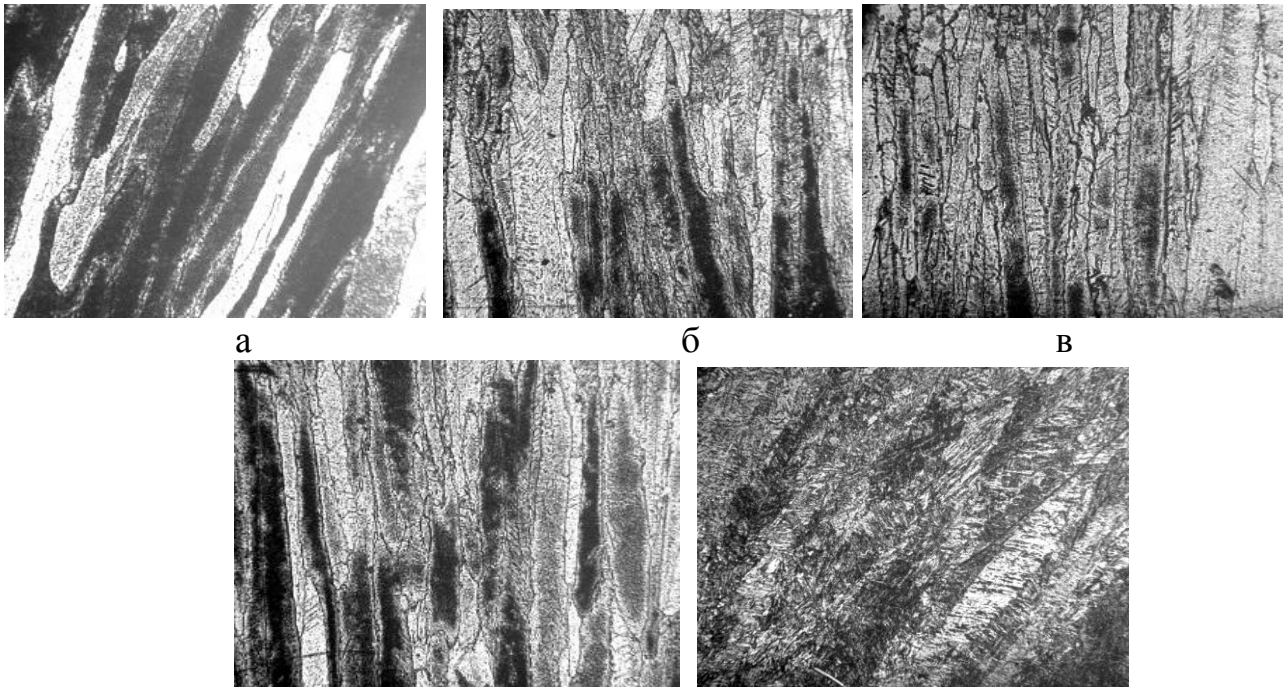


Рис. 17. Мікроструктури наплавленого металу (× 60): а – без дії ПДМП; б, в, г, д –з дією ПДМП відповідно частотою 6, 12, 24, 33 Гц

При частоті ПДМП f = 33 Гц (рис. 17, д) довжина кристалітів така ж, як і в наплавленні, виконаному без дії ПДМП (рис. 17, а). Аналогічно і ширина кристалітів при частоті 33 Гц ПДМП також не змінилася. Оскільки у всіх зразках наплавленого металу містилося: C < 0,08 %; Cr > 17 %, то ефект подрібнення структури в валиках, виконаних при дуговому наплавленні з дією ПДМП, обумовлений рухом рідкого металу в ванні під дією магнітного поля і був отриманий на стадії первинної кристалізації рідкого металу ванни, а не на стадії фазових перетворень металу в твердому стані (поліморфних перетворень). В спла-

вах, в яких може відбуватися вторинна кристалізація, подрібнення структури металу шва, або валика також відбувається при первинній кристалізації, але можливо, що продовжується і на стадії фазових перетворень металу в твердому стані.

Вивчали питання впливу знакозмінного ПДМП і ПОМП на перемішування рідкого металу в зварювальній ванні і на міцність швів стикових зварних з'єднань. Для цього виконували зварювання пластин зі сталі 12Х18Н10Т товщиною 4 мм дротом Св-06Х19Н9Т діаметром 3 мм під флюсом АН-26П наф-люсо-мідній підкладці (тип з'єднання С4 по ГОСТ 8713-79). Режим зварювання: $I_{зв}$= 280…320 А; $U_д$= 30…32 В; $V_{зв}$ = 30 м/год. Зварювання здійснювали без дії магнітного поля і з дією ПДМП і ПОМП частотою f = 5; 10; 20; 50 Гц. Із зварних з'єднань вирізали зразки для випробувань на міцність швів при руйнуванні, які відповідали вимогам ГОСТу 6966-66 (тип XXIV).

Дані випробувань показали, що максимальну міцність ($\sigma_в$) мали зразки, зварені при дії ПОМП частотою f = 5 Гц (600 МПа), тобто показник $\sigma_в$ збільшувався на 11,5 % (стовпчики 2, 3 на рис. 18, а). Для зразків, зварених при дії ПОМП частотою 10 Гц, показник $\sigma_в$ збільшився на 5,1 %, а при частотах 20 і 50 Гц збільшення показника $\sigma_в$ не спостерігалось (рис. 18, а).

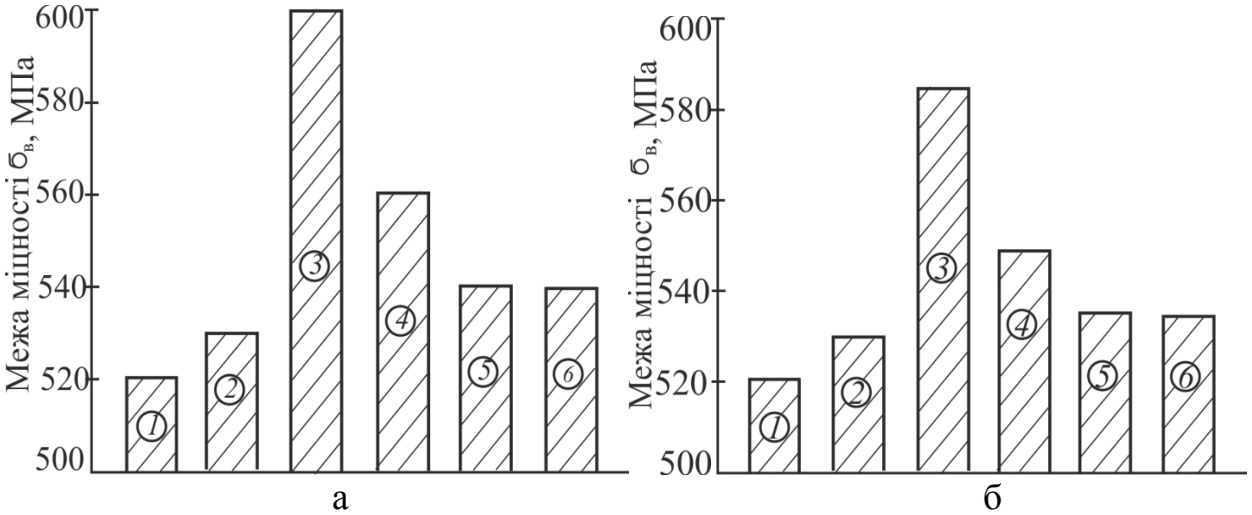
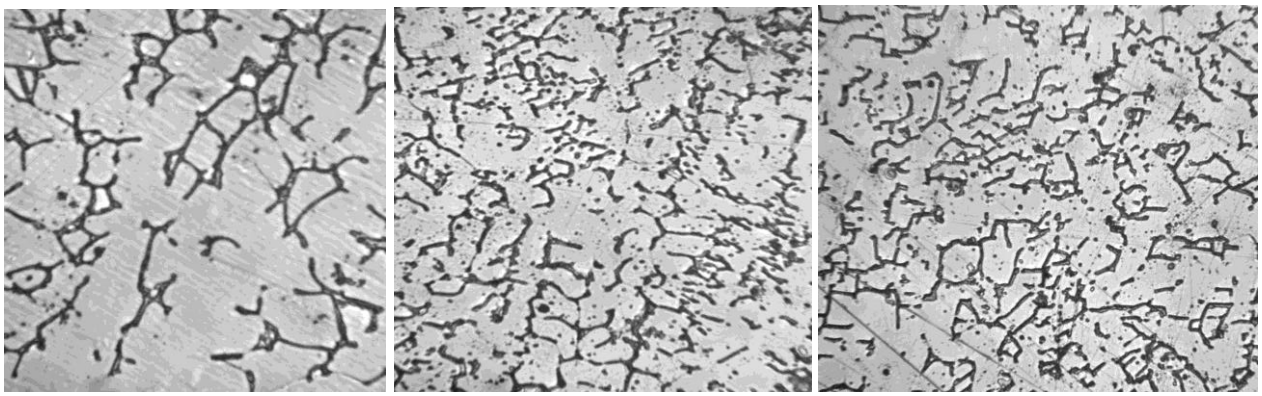


Рис. 18. Залежність межі міцності ($\sigma_в$) від частоти f ПОМП (B_x = 30 мТл) (а) і від частоти f ПДМП (B_z = 30 мТл) (б): *1* – основний метал; *2* – зварювання без дії ПОМП; *3, 4, 5, 6* – зварювання з дією ПОМП і ПДМП відповідно частотою f = 5; 10; 20; 50 Гц

Аналогічні дані отримані для зразків, зварених з дією ПДМП. При цьому максимальну міцність $\sigma_в$ мали зразки, що зварені з дією ПДМП частотою 5 Гц (585 МПа, рис. 18, б). Межа міцності $\sigma_в$ зразків, зварених при дії ПОМП частотою 5; 10; 20; 50 Гц збільшилась відповідно на 11,0; 3,5; 1,5; 1,5 %. Ці дані показують,що при частоті ПОМП і ПДМП f = 5 Гц ($B_y \geq$ 25 мТл, $B_z \geq$ 25 мТл), коли має місце повне перемішування рідкого металу, то відбувається подрібнення структури металу шва і підвищення показника міцності $\sigma_в$ зварних з'єднань (рис. 18).

Вивчали вплив ПДМП і ПОМП на подрібнення структури металу зварних швів стикових з'єднань пластин зі сталі типу 12Х18Н9Т при зварюванні під флюсом дротом Св-06Х19Н9Т діаметром 4 мм з при дією знакозмінного частотою 5 Гц ПОМП. Величина поздовжньої компоненти індукції ПДМП і поперечної компоненти індукції ПОМП в зоні металу шва становила 25...30 мТл. Встановлено, що при цьому забезпечується перемішування металу у ванні та подрібнення зерен металу зварних швів практично в 2 рази (рис. 19).



а б в

Рис. 19. Мікроструктура (× 500) зварних швів, виконаних без дії магнітного поля (а), з дією знакозмінного ПОМП частотою 5 Гц (б) і з дією знакозмінного ПДМП частотою 5 Гц (в)

Таким чином, підвищення показника $\sigma_в$ зварних швів при дії магнітних полів пов’язано з подрібненням структури металу швів.

Для ефективного перемішування розплаву у ванні (по всій її довжині) при дуговому наплавленні з дією ПДМП запропонована розрахункова методика визначення оптимальних параметрів знакозмінного ПДМП. У цій методиці прийняли, що через головну частину ванни (перед дугою) протікає 90% всього струму наплавлення. За допомогою тугоплавких вставок експериментально визначили розміри кратеру під дугою в рідкому металі при наплавленні дротом під флюсом.

Стосовно до процесу дугового наплавлення дротом Св-08А діаметром 5 мм під флюсом АН-348 були визначені всі необхідні для подальших розрахунків геометричні розміри зварювальних ванн. Розрахунки виконувалися з використанням теорії теплових процесів при дуговому зварюванні. Отримані дані розрахунків про геометричні розміри ванн практично збіглися з експериментальними.

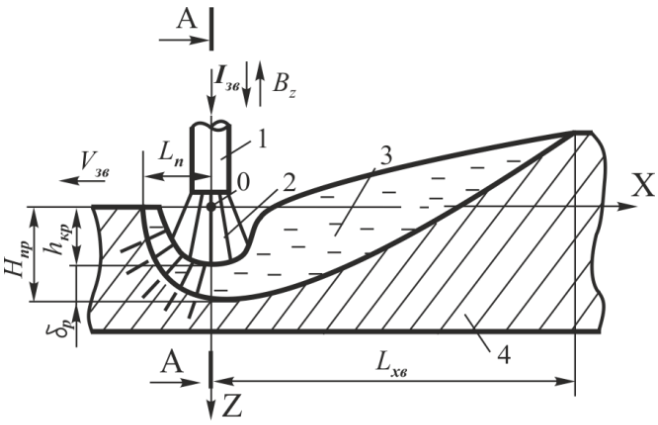
При розрахунках форму поверхні контакту дуги з рідким металом в кратері ванни апроксимували частиною кульового сегмента (рис. 20). Струм наплавлення протікає перпендикулярно до цієї поверхні в кожній точці (на поверхні S_1).

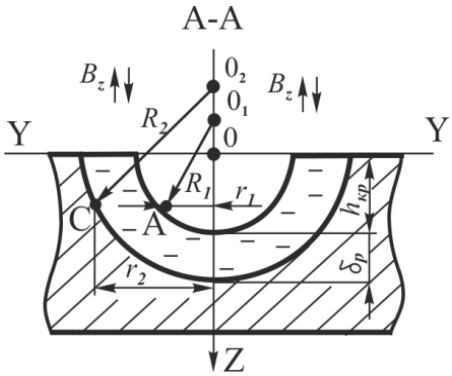
Якщо провести на глибині Z від поверхні Z = 0 горизонтальну площину (рис. 20), то для точки А на поверхні S_1 значення радіальної (в горизонтальній площині) компоненти густини струму:

$$j_{r_1} = j_{R_1} \cdot \frac{r_1}{R_1},\ j_{R_1} = \frac{0{,}9 I_н}{\pi R_1^2},\ \text{А/м}^2, \tag{27}$$

де

$$R_1 = \frac{\left(0{,}5 d_{кр}\right)^2 + h_{кр}^2}{2 h_{кр}},\ \text{м}. \tag{28}$$





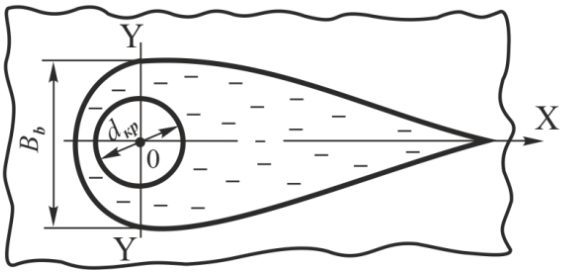


Рис. 20. Схема зварювальної ванни при дуговому наплавленні і її геометричні розміри: *1* – електрод; *2* – зварювальна дуга; *3* – рідкий метал у ванні; *4* – виріб-пластина (розплавлений шлак не показаний, B_z – лінії індукції ПДМП, пунктирні лінії - лінії струму)

Для точок, що лежать на поверхні контакту рідкого металу з твердим (поверхня S_2), наприклад, для точки С (рис. 20) аналогічно:

$$j_{r_2} = j_{R_2} \cdot \frac{r_2}{R_2},\ j_{R_2} = \frac{0{,}9 I_н}{\pi R_2^2},\ \text{А/м}^2, \tag{29}$$

де

$$R_2 = \frac{\left(0{,}5 B_в\right)^2 + H_{пр}^2}{2 H_{пр}},\ \text{м}. \tag{30}$$

Значення густини електромагнітних сил (F, Н/м^3), що забезпечують обертання кожного мікрооб'єму рідкого металу навколо осі 0Z (рис. 20), визначали за формулою:

$$F = j_r \times B_z,\ \text{Н/м}^3 \tag{31}$$

де j_r – радіальні складові густини струму вздовж радіусів r, А/м^2.

Під дією сили F кожен елемент (об'єм) рідини в передній частині ванни отримує прискорення:

$$a = g\frac{F}{G}, \text{ м/с}^2, \tag{32}$$

де g – прискорення сили тяжіння, g = 9,81 м/с^2; G – густина сил тяжіння, $G = 7 \cdot 10^4$ Н/м^3.

Під дією сили F (і дією прискорення – a) швидкість елементів рідини щодо осі Z:

$$V_\tau = \sqrt{2L \cdot a}, \text{ м/с}, \tag{33}$$

де L – «шлях розгону» елементів рідини в головній частині ванни, м.

Приймали, що «розгін» елементів рідини отримують на довжині L, що дорівнює довжині середньої лінії (частини сегмента) в головній частині ванни, яку визначали за рівнянням:

$$L = \sqrt{b^2 + \frac{16}{3}h^2}, \text{ м}, \tag{34}$$

де $b = \dfrac{B_в + d_{кр}}{2}$, $h = \dfrac{L_n}{2} + \dfrac{1}{4}d_{кр}$.

Розрахунки виконані, використовуючи середні значення j_z в шарі між рівнями Z = 0…$h_{кр}$.

Визначали питання про темп гальмування потоку (швидкості V_τ) по мірі просування його по бічним стінкам ванни до хвостової її частини. Відеозйомка фізичного моделювання процесу показала, що рідкий метал у ванні під дією ПДМП не просто закручується навколо осі електрода, а направляється в хвостову частину ванни. Це можливо пояснити тим, що велика частина розплаву розташована по боках передньої частини кратеру (в зоні осі Y-Y по рис. 20). При дії ПДМП цей об'єм металу прямує по бічним стінкам ванни в її хвостову частину. При русі потік рідкого металу гальмується і при деяких параметрах ПДМП в крайніх точках хвостової частини - до нульових значень. У розрахунках взяли, що середня швидкість (при гальмуванні з V_x до $V_x = 0$ в кінцевій точці довжини хвостової частини ванни) $V_{x\,ср} = 1/2\ V_\tau$.

Розрахунок значень частоти f знакозмінного з довжиною пауз t_n = 0,01 с ПДМП для різних параметрів режиму наплавлення виконували за формулою:

$$f = \frac{1}{T} = \frac{1}{2t_i + 2t_n} \approx \frac{1}{2t_i}. \tag{35}$$

Час дії імпульсу:

$$t_i = \frac{L_{хв}}{V_{x\,ср}}, \text{ с}, \tag{36}$$

де $L_{хв}$ – довжина хвостової частини ванни, м.

Розрахунками визначені значення швидкості і прискорення, які досягає рідкий метал під дією знакозмінного ПДМП, а також визначено оптимальні значення індукції і частоти ПДМП, що забезпечують ефективне перемішування розплаву у ванні по всій її довжині при електродуговому наплавленні дротом під флюсом. Встановлено, що при рівні індукції ПДМП 25 мТл оптимальною є частота цього поля в межах 2...4 Гц в діапазоні струмів наплавлення 400...1000 А і швидкості наплавлення 5...40 м/год.

Для ефективного перемішування розплаву у ванні при дуговому наплавленні з дією знакозмінного ПОМП визначали швидкість потоків розрахунковим шляхом, використовуючи рівняння руху Ейлера для ламінарного потоку:

$$\rho \frac{\partial \overline{V}}{\partial t} = \overline{j} \times \overline{B} - grad\ p, \tag{37}$$

де $\overline{V}$ – вектор швидкості потоку рідини в даній точці простору;
$\overline{j}$, $\overline{B}$ – відповідно вектори густини струму і індукції.

Прийняли, що $\frac{\partial \overline{V}}{\partial t} = 0$, тоді рівняння (37) приводиться до вигляду:

$$\overline{j} \times \overline{B} = grad\left(\rho \frac{V^2}{2} + p\right), \tag{38}$$

де $\rho \frac{V^2}{2} + p$ – гідродинамічний тиск, Па;
$\overline{j} \times \overline{B} = \overline{F}$ – густина електромагнітної сили, Н/м^3.

Об'ємні сили Лоренца, що виникають в розплаві, врівноважуються градієнтом поля гідродинамічних тисків. З урахуванням координат, характер-них для процесу дугового наплавлення і зварювання з дією ПОМП (рис. 21), рівняння (38) набуває вигляду:

$$j_z \times B_y = \frac{1}{\Delta X}\left(\rho \frac{V_x^2}{2} + p\right), \tag{39}$$

де p – гідростатичний тиск стовпа рідини (посилення валика), Па;ΔX – шлях, на якому спостерігається grad в правій частині рівняння (38); ρ – густина рідкого металу, $\rho = 7 \cdot 10^4$Н/м^3;

$$p = \rho \cdot H_{пос}, \tag{40}$$

де $H_{пос}$ – висота посилення валика (шва), м.

У лівій частині рівняння (39) представлена густина електромагнітної сили (в напрямку осі OX) – F_x:

$$F_x = j_z \times B_y, \tag{41}$$

де j_z – складова густини струму в рідкому металі ванни (уздовж осі OZ) під зварювальної дугою, А/м^2;B_y – компонента індукції ПОМП (вздовж осі Y-Y), Тл.

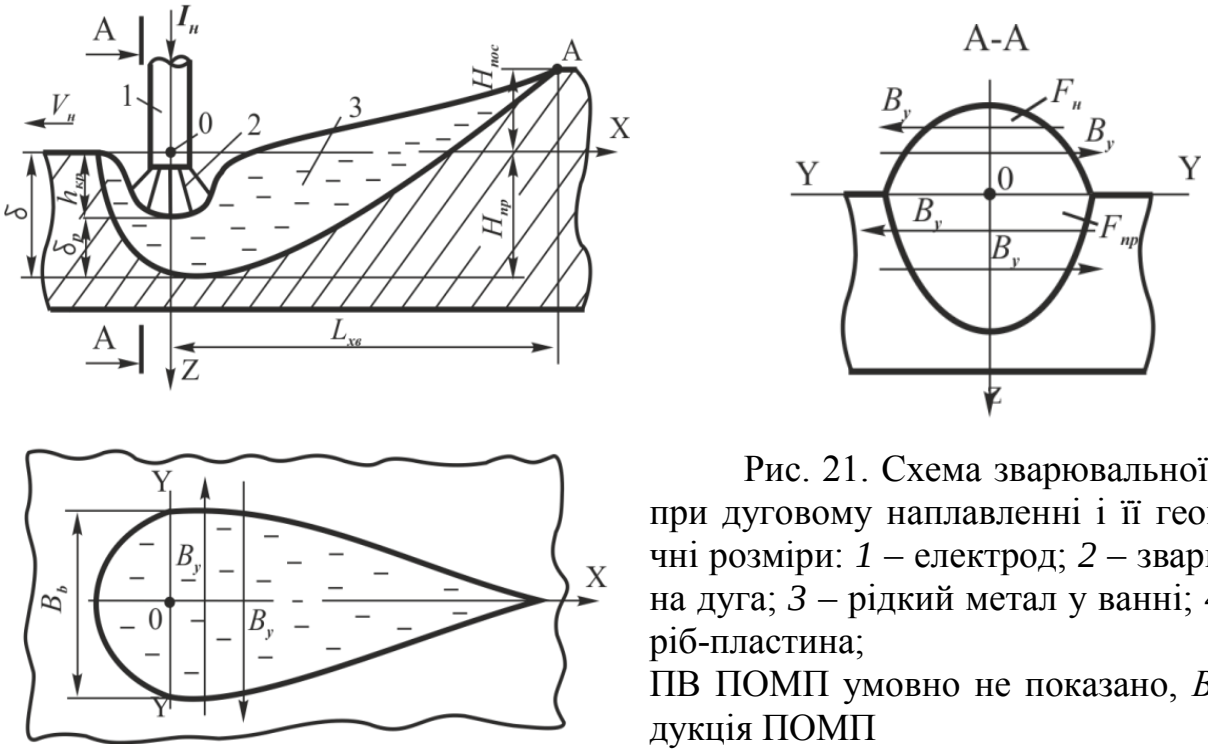


Рис. 21. Схема зварювальної ванни при дуговому наплавленні і її геометричні розміри: *1* – електрод; *2* – зварювальна дуга; *3* – рідкий метал у ванні; *4* – виріб-пластина;
ПВ ПОМП умовно не показано, B_y – індукція ПОМП

З урахуванням формул (39…41) можна записати:

$$F_x = \frac{1}{\Delta X}\left(\rho \frac{V_x^2}{2} + \rho \cdot H_{пос}\right), \tag{42}$$

Звідки

$$V_x = \sqrt{\frac{2 \cdot F_x \cdot \Delta X - \rho \cdot H_{пос}}{\rho}}. \tag{43}$$

Максимальна швидкість потоку V_x спостерігалась в шарі рідкого металу під дугою, де максимальна густина струму j_z. На поверхні рідкого металу за дугою $V_x = 0$, аналогічно і на дні кратера ($Z = h_{кр}$) $V_x = 0$. Після розгону на відрізку

d_n (ΔX) до максимальної швидкості V_x потім із-за внутрішнього тертя швидкість V_x зменшується. Крім того, гальмуючу дію має і розплавлений флюс. Але в крайній точці ванни (в точці А по рис. 21) $V_x = 0$. Тоді середня швидкість потоку $V_{xcp} = 0{,}5V_x$.

Значення тривалості імпульсу (B_y) ПОМП:

$$t_i = \frac{L_{xв}}{V_{xcp}}, \tag{44}$$

де V_{xcp} – середня по довжині ванни швидкість потоку ($V_{xcp} = 0{,}5V_x$).

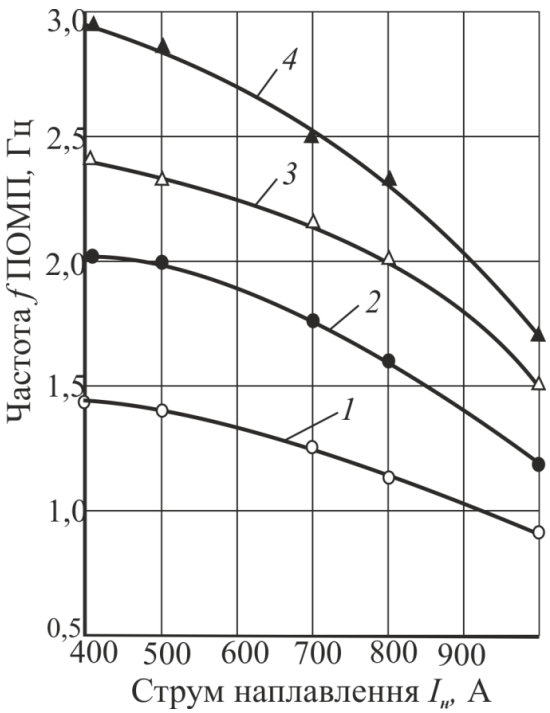


Рис. 22. Залежність частоти f ПОМП від струму наплавлення ($I_н$): *1, 2, 3, 4* – відповідно для індукцій ПОМП B_y = 25; 50; 75; 100 мТл

Розрахунковим шляхом встановлено, що при збільшенні струму наплавлення $I_н$ значення частоти f знакозмінного ПОМП при даному рівні індукції B_y зменшуються (рис. 22). При збільшенні індукції B_y ПОМП (від 25 мТл до 100 мТл) значення частоти f ПОМП збільшуються.

Таким, чином, для повного перемішування рідкого металу (по всій довжині хвостової частині ванни $L_{xв}$) і подрібнення структурних складових в наплавленому металі (шві) при дуговому наплавленні (зварюванні) з дією ПОМП необхідна частота ПОМП близько 1...1,5 Гц при рівні індукції B_z = 25 мТл. Якщо збільшити індукцію B_y ПОМП до 100 мТл, то оптимальні значення частоти лежать в діапазоні 1,7...3 Гц. Ці дані є оптимальними для забезпечення перемішування рідкого металу і подрібнення структури металу.

В шостому розділі були розроблені технологічні рекомендації для наплавлення зношених поверхонь деталей металургійного виробництва (наприклад, роликів МБЛЗ) в умовах ПрАТ МК «Азовсталь». Для зміцнення зношених поверхонь валків і роликів доцільно використання сталей типу 30ХГСА,15Х4МФС і 12Х13. Такі сталі протистоять зношуванню при роботі при значних контактних напруженнях і термічній втомі при роботі в умовах нагріву до 600 ºС з наступним охолодженням на повітрі, або водою.

Виконували експериментальні дослідження характеристик наплавленого металу з дією керуючого ПДМП. Наплавлення виконували на пластини зі сталі ВМСт3сп товщиною 30 мм в 4 шари без дії і з дією ПДМП. Наплавлення дротом Нп-30ХГСА діаметром 5 мм виконували під шаром флюсу АН-60 на режимі: $I_н$ = 650…680 А; $U_д$ = 34…35 В, $V_н$ =20 м/год. Рівень індукції B_z ПДМП час-

тотою 3 Гц у поверхні виробів складав 25…30 мТл. Наплавлення порошковими дротами ПП-15Х4МФС та ПП-12Х13 діаметрами 3,6 мм виконували під шаром флюсуАН-26П на режимі: $I_н$ = 320…340 А; $U_д$ = 32…34 В, $V_н$ =20 м/год. Виконували наплавлення зразків без дії ПДМП і з дією ПДМП частотою 5 Гц. При цьому рівень поздовжньої компоненти індукції ПДМП у поверхні виробів (наплавлених попередньо шарів) складав 25…30 мТл. Наплавлення виконували з попереднім підігрівом металу (пластин і попередньо наплавлених шарів) до температури 200 ºС.

Для оцінки металу наплавлених зразків на термічну втому застосовували такий метод. З наплавлених шарів вирізали зразки прямокутного перерізу розміром 6×12×30 мм. Ці зразки закріплювали нерухомо і пропускали через них струм. Нагрів зразків виконували зі швидкістю 50ºС/с до температури 600ºС.В процесі випробувань при досягненні заданої температури струм автоматично відключався і зразок охолоджувався проточною водою, або повітрям. При температурі 200 ºС охолодження припиняли і знову виконували нагрів. Число циклів до появлення тріщини реєструвалось лічильником. Отримані результати показника підвищення стійкості проти термічної втоми для зразків, наплавлених дротом ПП-12Х13, приведені на рис. 23.

Досліджували зносостійкість зразків при температурі 600ºС (з урахуванням умов експлуатації валків гарячої прокатки). Випробування на зношування при підвищених температурах проводили на установці зі зворотно-поступальним рухом тіла тертя (зі сталі Р18 розмірами 24×24×80 мм), нагрітого до температури випробувань (600 ºС), щодо нерухомих випробовуваних зразків при певному зусиллі притиснення їх до тіла тертя (тиск до 5 кг/мм^2). Зразки наплавлених металів мали розміри: висота - 15 мм, діаметр - 16 мм. Поверхня зразків, яка терлась мала закруглення радіусом R= 8 мм. Показником зносу служила втрата маси зразка за певний час випробувань. Результати випробувань зразків, наплавлених дротом ПП-12Х13 наведені на рис. 24. Максимальною зносостійкістю при температурі 600° С характеризується зразок, виготовлений з металу, наплавленого з дією магнітного поля.

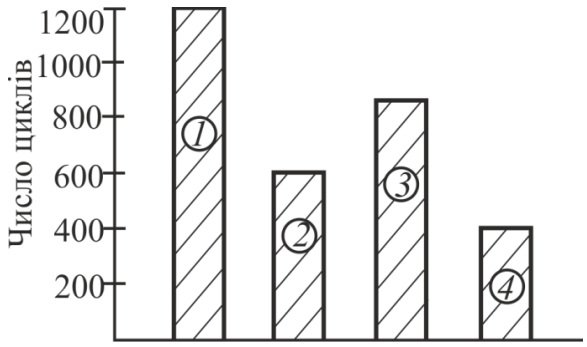


Рис. 23. Термічна втома металу 12Х13, наплавленого: *1, 2* – з магнітним полем; *3, 4* – без магнітного поля; *1, 3* – охолодження повітрям; *2, 4* – охолодження водою

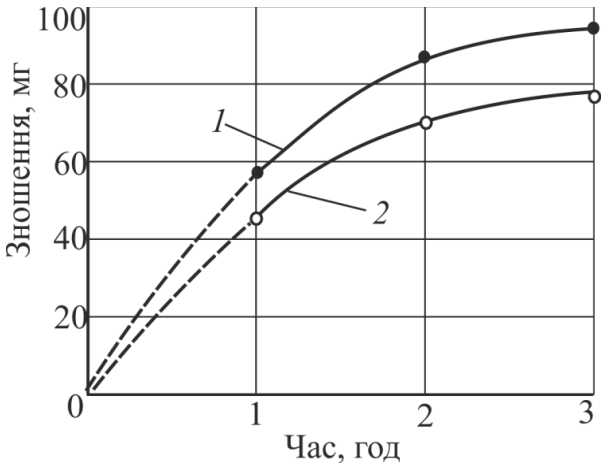


Рис. 24. Зносостійкість металу 12Х13, наплавленого: *1* – без магнітного поля; *2* – з магнітним полем

Отримані також дані для сплавів 30ХГСА, 15Х4МФС при наплавленні з дією ПДМП. В зразках наплавлених з дією ПДМП спостерігали подрібнення структурних складових металу і підвищення стійкості проти термічної втоми і зносостійкості металу при температурі 600ºС, але ці показники декілька нижчі, ніж для сплаву 12Х13.

Для дугового наплавлення з дією ПОМП вдосконалена конструкція ПВ ПОМП, яка дозволяє підвищити продуктивність процесу дугового зварювання та службові характеристики наплавленого валика. При цьому розміри сторін стрижня ПВ ПОМП розраховуються з урахуванням режиму електродугового наплавлення (зварювання) та теплофізичних властивостей металу зварювальних пластин.

Розроблені автором технології наплавлення і зварювання дротом під флюсом з дією керуючих ПДМП та ПОМП деталей металургійного і прокатного виробництва та машинобудування впроваджені на підприємствах ПрАТ «Краматорський феросплавний завод» та ТОВ « НВО Маріленд». Отримано сумарний економічний ефект у розмірі 1 728,8 тис. грн.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі наведено теоретичне узагальнення і нове вирішення актуальної науково-технічної проблеми підвищення ефективності процесів електродугового наплавлення та зварювання з дією керуючих магнітних полів, що дозволило знизити енергоємність технологій, підвищити службові характеристики наплавлених валиків та зварних швів деталей металургійного, прокатного виробництва та машинобудування.

За результатами роботи зроблено наступні висновки:

1. Шляхом використання методу векторного магнітного потенціалу в стаціонарних плоскомеридіанних магнітних полях визначено вплив значень магнітної проникності електродного дроту, осердя соленоїда і виробу при наплавленні з дією ПДМП на характер розподілу і значення індукції магнітного поля в зоні між торцем електрода і виробом, а також в середині виробу і електродного дроту. Показано, що при дуговому наплавленні і зварюванні з дією ПДМП основний вплив на значення і характер розподілу поздовжньої компоненти індукції цього поля в зоні електродної краплі і у поверхні феромагнітного виробу надають феромагнітні властивості електродного дроту.

2. На основі експериментальних досліджень доведено, що при використанні феромагнітного електроду і немагнітного виробу поздовжня компонента індукції під торцем електрода зростає в 7 разів у порівнянні з її значеннями, коли електрод не є феромагнетиком. Якщо і електрод, і виріб - феромагнетики, то ця індукція ПДМП зростає під торцем електрода в 9 разів. Таке положення дозволило встановити оптимальні значення поздовжньої компоненти індукції в зоні електродної краплі і зварювальної ванни і рекомендувати їх для практичного застосування при дуговому наплавленні і зварюванні з дією керуючих ПДМП.

3. Показана принципова можливість використання аналогій магнітостатичного поля з електростатичним полем для визначення будови магнітного поля в зоні під торцем феромагнітного електрода в складі ПВ ПДМП. Показано, що в зоні електродної краплі на відстані 4…7 мм від осі електрода значення компоненти індукції зменшується в 3…6 разів, а поперечна компонента індукції досягає половини значень поздовжньої компоненти індукції цього. Це дозволило оцінити поведінку електродної краплі на торці електрода і зварювальної дуги при дуговому наплавленні дротом під флюсом з дією ПДМП та підвищити продуктивність процесу розплавлення електродних дротів.

4. На підставі експериментальних досліджень встановлено, що при наплавленні з дією постійного ПОМП коефіцієнт розплавлення дротів суцільного перерізу і порошкових дротів з магнітних і немагнітних матеріалів підвищується на 23…30 %. При дії знакозмінного ПОМП при зростанні значень частоти магнітного поля в діапазоні частот приблизно 1,0...10 Гц ефект підвищення коефіцієнту розплавлення електродів знижується. Це дозволило встановити, що для підвищення продуктивності розплавлення дротів під флюсом доцільно застосовувати знакозмінні ПОМП частотою до 10 Гц.

5. На підставі експериментальних досліджень визначений вплив ПДМП і ПОМП на глибину проплавлення і ширину валика при дуговому наплавленні і зварюванні стикових з’єднань пластин з немагнітних сталей. Встановлено, що при зварюванні стикових з'єднань металу товщиною 4 мм і менше доцільно використовувати знакозмінні ПДМП і ПОМП частотою 3...10 Гц при рівні індукцій таких полів в межах 25…30 мТл.

6. При дуговому наплавленні під шаром флюсу з використанням дроту і пластини з немагнітних матеріалів дія знакозмінного ПОМП частотою від 3 до 10 Гц при поперечному розташуванні стрижнів ПВ ПОМП щодо осі валика забезпечила вплив на зварювальну дугу і рідкий метал ванни і дозволила зменшити глибину проплавлення основного металу на 15…20 %, а ширину наплавлених валиків збільшити на 5…10 %.

7. На прикладі наплавлення корозійно-стійкої сталі феритного класу, яка не зазнає твердофазних поліморфних перетворень, показано, що ефект подрібнення структури металу, наплавленого з дією ПДМП, відбувається при первинній кристалізації. Показано, що електромагнітне перемішування рідкого металу в зварювальній ванні під дією знакозмінного ПДМП частотою 6...24 Гц супроводжується зменшенням довжини і ширини кристалітів в 1,3 та 1,3...1,5 рази відповідно, що позитивно вплило на механічні та експлуатаційні властивості наплавленого металу.

8. Розрахунками доведено, що при наплавленні електродними дротами діаметром 3, 4 і 5 мм з дією ПДМП ефективне перемішування рідкого металу в зварювальній ванні відбувається при рівні індукції 25 мТл і частоті поля в межах 2...4 Гц в діапазоні струмів наплавлення 400...1000 А і швидкості наплавлення 5...40 м/год. При наплавленні з дією ПОМП при величині індукції ПОМП 25...100 мТл оптимальною є частота ПОМП в діапазоні 1,0…3 Гц.

9. При відновлені зношених поверхонь деталей металургійного виробництва, наприклад, роликів машин безперервного лиття заготовок, доцільно застосовувати дугове наплавлення електродними дротами Нп-30ХГСА, ПП-15Х4МФС, ПП-12Х13 під шаром флюсу з застосуванням керуючого поздовжнього магнітного поля при індукції поля в межах 25…30 мТл і частоті знакозмінного поля в межах 3…6 Гц. При цьому підвищується стійкість наплавлених такого складу шарів металу проти термічної втоми в 2 рази, а стійкість проти зношування при терті пари: «сталь-сталь» при температурі 600 ºС підвищується на 20…25 %.

10. На основі порівняльного аналізу встановлені області раціонального використання керуючих магнітних полів (ПДМП і ПОМП) при дуговому наплавленні та зварюванні дротом під флюсом з урахуванням магнітних властивостей зварювальних і основних матеріалів. Впровадження у виробництво розроблених технологій наплавлення і зварювання дротом під флюсом з дією керуючих ПДМП та ПОМП деталей металургійного і прокатного виробництва та машинобудування дозволило отримати загальний економічний ефект у розмірі 1 728,8 тис. грн.

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧАЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Публікації, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації

1. RazmyshlyaevA.D. About Rational Using of the Controlling Longitudinal and Transverse Magnetic Fields at arc Welding and Surfacing / A.D. Razmyshlyaev, M.V. Ahieieva // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 582. – 2019. – 012054. (**Scopus).**
2. Размышляев А.Д. Расчет характеристик знакопеременного поперечного магнитного поля, влияющего на перенос капель при дуговой сварке и наплавке / А.Д. Размышляев, М.В. Агеева // Автоматическая сварка. – 2019. – № 4. – С. 30-34.
3. Размышляев А.Д. Измельчение структуры металла при дуговой наплавке под воздействием продольного магнитного поля / А.Д. Размышляев, М.В. Агеева // Автоматическая сварка. – 2019. – № 2. – С. 25-28.
4. Размышляев А.Д. Влияние магнитного поля на кристаллизацию швов при дуговой сварке / А.Д. Размышляев, М.В. Агеева // Автоматическая сварка. – 2019. – № 1. – С. 40-43.
5. Размышляев А.Д. Оптимальные параметры продольного магнитного поля, обеспечивающие перемешивание расплава в ванне при электродуговой наплавке / А. Д. Размышляев, М.В. Агеева // Технічні науки та технології. – 2019. – № 2 (16). – С. 7-15. [НБД IndexCopernicus, ResearchBib, Base, WorldCat, CrossRef)
6. Агеева М.В. Влияние комбинированного магнитного поля на производительность расплавления проволоки при дуговой наплавке / М.В. Агеева, А.

Д. Размышляев // Технічні науки та технології. – 2019. – № 4 (18). – С. 22-27. [НБД IndexCopernicus, ResearchBib, Base, WorldCat, CrossRef).

7. Razmyshlyaev A. D. TMF Influence on Weld Structure at the Welding of 12Х18Н9Т / A. D. Razmyshlyaev, M.V. Ahieieva // Materials Science Forum. – 2018. –Vol. 927. – P. 1-5. (**Scopus Q3**).
8. RazmyshlyaevA. D. Magnetic Properties of Materials Used in Electric Arc Welding and Surfacing / A. D. Razmyshlyaev, M.V. Ahieieva // Materials Science Forum. – 2018. – Vol. 938. – P. 33-40. (**Scopus Q3**).
9. Размышляев А.Д. О механизме измельчения структуры металла шва при дуговой сварке с воздействием магнитных полей (Обзор). / А.Д. Размышляев, М.В. Агеева// Автоматическая сварка. – 2018. – № 3. – С. 29-33.
10. Размышляев А.Д. Методика определения индукции управляющего магнитного поля в зоне ванны при дуговой сварке / А. Д. Размышляев, П.А. Выдмыш, М.В. Агеева// Автоматическая сварка. – 2018. – № 8. – С. 51-55.
11. Размышляев А.Д. К вопросу моделирования строения поперечного магнитного поля в зоне сварочной ванны / А. Д. Размышляев, П.А. Выдмыш, М.В. Агеева. // Автоматическая сварка. – 2018. – № 7. – С. 18-23.
12. Размышляев А.Д. О слоистости кристаллизации металла шва при дуговой сварке и оптимальных параметрах управляющих магнитных полей / А. Д. Размышляев, М.В. Агеева // Вісник Донбаської державної машинобудівної академії. Зб. наук. пр. – Краматорськ : ДДМА – 2018. – № 2 (44). – С. 80-83.
13. Размышляев А.Д. К расчету численных значений индукции управляющего поперечного магнитного поля в головной части сварочной ванны / А. Д. Размышляев, М.В. Агеева // Наука та виробництво. Міжвуз. тематичний зб. наук. пр. Вип. 19. – ДВНЗ «ПДТУ». – Маріуполь, ПДТУ, 2018. – С. 51-59.
14. Размышляев А.Д. Особенности плавления электродной проволоки при дуговой наплавке под флюсом с воздействием поперечного магнитного поля / А.Д. Размышляев, М.В. Агеева, П.А. Выдмыш // Вісник Донбаської державної машинобудівної академії. Зб. наук. пр. – Краматорськ : ДДМА. – 2015. – № 1 (34). – С. 74-77.
15. RazmyshlyaevA.D. The speed of flows in the pool in arc welding in a transverse magnetic field / A.D. Razmyshlyaev, M.V. Mironova, S.V. Yarmonov, P.A. Vydmysh // Welding International. – 2015. – Vol. 29. – Issue 4. – P. 296-300 (**Scopus Q3**).
16. Efficiency of the process of penetration of the parent metal in submerged-arc surfacing / A.D. Razmyshlyayev, M.V. Mironova // Welding International. – 2012. – Vol. 26. – Issue 11. – P. 862-866. (**Scopus Q3**)
17. RazmyshlyaevA.D. Modeling the transverse magnetic field generated by equipment in arc welding / A.D. Razmyshlyaev, S.V. Yarmonov, P.A. Vydmysh, M.V. Ageeva // Welding International. – Vol. 30. – Issue 6. – 2016. – P. 463-466. (**Scopus Q3**).

18. Размышляев А.Д. Производительность расплавления электродной проволоки при дуговой наплавке под флюсом с воздействием поперечного магнитного поля / А.Д. Размышляев, М.В. Миронова, К.Г. Кузьменко, П.А. Выдмыш // Автоматическая сварка. – 2011. – № 5. – С. 48-51.
19. Размышляев А.Д. Особенности проплавления метала при аргонодуговой сварке вольфрамовым электродом в продольном магнитном поле / А.Д. Размышляев, М.В. Миронова, А.А. Дели // Вісник Приазовського державного технічного університету: Збірник наук.пр. – Маріуполь : ПДТУ. – 2009. – Вип. 19. – С. 185-187. (НБД IndexCopernicus)
20. РазмышляевА.Д. Расчет индукции управляющего продольного магнитного поля с учетом магнитных свойств сердечника, проволоки и изделия применительно к дуговой наплавке / А.Д. Размышляев, А.А. Дели, М.В. Миронова // Автоматическая сварка. – 2006. – №8. – С. 12-15.
21. Размышляев А.Д. Методика расчета индукции продольного магнитного поля под торцом ферромагнитного электрода применительно к дуговой наплавке / А. Д. Размышляев, М.В. Агеева // Наука та виробництво: міжвуз. темат. зб. наук. пр. – 2019. Вип. 21. – С. 80-88.
22. Размышляев А.Д. Расчет индукции продольного магнитного поля при дуговой наплавке / А.Д. Размышляев, М.В. Агеева // Наука та виробництво: міжвуз. темат. зб. наук.пр. – 2019. –Вип. 20. – С. 110-116.
23. Размышляев А.Д. Автоматическая электродуговая сварка под флюсом с воздействием внешнего магнитного поля / А.Д. Размышляев, П.А. Выдмыш, М.В. Агеева // Монография. – Мариуполь : ГВУЗ «ПГТУ», 2017. – 209 с.

Публікації, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

24. Razmyshlyaev A.D. Features of metal crystallization in arc surfacing and welding with a longitudinal magnetic field action / A.D. Razmyshlyaev, M.V. Ahieieva // Con actas de la conferencia internacional científica y práctica «Integración de las ciencias fundamentales y aplicadas en el paradigma de la sociedad post-industrial», Barcelona, España, 24 deabrilde 2020. – P. 21-22.
25. Ahieieva M.V. About mixing a liquid metal of a welding pool in arc surfacing with a transverse magnetic field effect / M.V. Ahieieva, A.D. Razmyshlyaev // Problèmes et perspectives d'introduction de la recherchescientifiqueinnovante: collection de papiersscientifiques «ΛΌΓΟΣ» avec des matériaux de la conférencescientifique et pratiqueinternationale, Bruxelles, Belgique, 29 Novembre 2019. – Bruxelles, Belgique: Plateformescientifiqueeuropéenne, 2019. – P. 56-57.
26. Агєєва М.В. Розрахунок індукції поздовжнього магнітного поля під торцем феромагнітного електрода при дуговому наплавленні під флюсом / М.В. Агєєва, О.Д. Размишляєв // Актуальні задачі сучасних технологій: VIII міжнародна науково-технічна конференція молодих учених та студентів, 27-28 листопада 2019 року. – Тернопіль: ТНТУ. – 2019. – С. 5.

27. Агеева М.В. О перемешивании расплава в сварочной ванне при электродуговой наплавке в продольном магнитном поле / М.В. Агеева, А. Д. Размышляев // «Фундаментальні та прикладні дослідження у сучасній науці»: VII Наукова конференція, Харків, 30 жовтня 2019 р. – Харків: «Технологічний центр», 2019. – С. 54.
28. Размышляев А.Д. Сравнение эффективности продольного и поперечного магнитных полей при дуговой сварке и наплавке / А. Д. Размышляев, М.В. Агеева // Університетська наука – 2019: Міжнародна науково-технічна конференція, Маріуполь, 16-17 травня 2019 р. – Маріуполь: ДВНЗ «ПДТУ», 2019. – Т.2. – 168 с.
29. Размишляєв О.Д. Геометричні характеристики валиків при дуговому наплавленні під флюсом в поперечному магнітному полі / О.Д. Размишляєв, М.В. Агєєва // Проблеми довговічності матеріалів, покриттів та конструкцій: VI-а Міжнародна конференція, Вінниця, 13-15 вересня 2018 р. – Вінниця: ВНТУ, 2018. – С. 59-60.
30. Размышляев А.Д. Влияние поперечного магнитного поля на геометрию валиков при дуговой наплавке под флюсом / А. Д. Размышляев, М.В. Агеева // Університетська наука – 2018: Міжнародна науково-технічна конференція, Маріуполь, 23-24 травня 2018 р. – Маріуполь: ДВНЗ «ПДТУ», 2018.– Т2. - С.359.
31. Размышляев А.Д. Методика расчетно-экспериментального опреде-ления магнитной проницаемости материалов, применяемых при дуговой сварке / А. Д. Размышляев, М.В. Агеева // Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем: VIII Міжнародна науково-практична конференція, Чернігів,10-12 травня 2018 р. - Чернігів: ЧНТУ, 2018. – Т.2. – С.82.
32. Размышляев А.Д. Моделирование индукции поперечного магнит-ного поля в зоне ванны при дуговой сварке и наплавке / А. Д. Размышляев, М.В. Агеева // «Зварювання та споріднені технології – сьогодення і майбутнє»: Міжнародна конференція, Київ, 5-6 грудня 2018 р. – Київ, 2018. – С.49-50.
33. Razmyshlyaev A.D. Calculation method of modeling the distribution of transverse magnetic field induction in the bath area at arc welding / A.D. Razmyshlyayev, M.V. Ahieieva // The materials of the 9th International conference of young scientists on welding and related technologies, Kyiv, 26-28 May 2017. – Kyiv. – P. 96.
34. Размышляев А.Д. Повышение эффективности сварки стыковых соединений воздействием внешних управляющих магнитных полей / А.Д. Размышляев, М.В. Агеева // Сварка и родственные технологии : перспективы развития. IV международная научно-техническая конференция, под общ. ред. д-ра техн. наук Н.А. Макаренко, 04-07 октября 2016 г. – Краматорск : ДГМА, 2016. – С. 52-54.
35. Размышляев А.Д. Влияние частоты поперечного магнитного поля на плавление электродной проволоки при дуговой сварке и наплавке под флюсом / А.Д. Размышляев, М.В. Агеева, П.А. Выдмыш //Сварка и родственные тех-

нологии: VIII Международная конференция молодых ученых и специалистов, Киев, 20-22 мая 2015. – Киев. – С.124.

36. Миронова М.В. Повышение эффективности дуговой сварки и наплавки при воздействии управляющих магнитных полей / М.В. Миронова, С.В. Ярмонов, П.А. Выдмыш // Зварювання та споріднені технології – теперішнє і майбутнє : Міжнародна конференція, Київ, 25-26 листопада 2013 р. – К.: ІЕЗ ім. Є. О. Патона. – С.97.
37. Размышляев А.Д. Особенности процесса расплавления электродной проволоки при наплавке под флюсом в поперечном магнитном поле / А.Д. Размышляев, М.В. Миронова // Зварювання та суміжні технології: VI Всеукраїнська науково-техн. конф. молодих учених та спеціалістів, Київ, 25-27 травня 2011 р. – К., 2011. – С. 95.
38. Размышляев А.Д. Производительность расплавления электродной проволоки при дуговой наплавке под флюсом с воздействием поперечного магнитного поля / А.Д. Размышляев, М.В. Миронова // Сварочное производство в машиностроении: перспективы развития. II Международная научно-техническая конференция, Краматорск, 7-9 октября 2010 г. – Краматорск: ДГМА, 2010. – С. 56-57/

Публікації, які додатково відображають наукові результати дисертації:

39. Патент України на корисну модель № 142804, МПК B23K (9/04 (2006.01), B23K 9/08 (2006.01). Спосіб дугового зварювання плавким електродом стикових з’єднань типів С18 та С25 пластин із феромагнітних сталей / М.В. Агєєва, О.Д. Размишляєв (Україна). – № 202000622. – Заявл. 03.02.2020. Опубл. 25.06.2020. Бюл. № 12/2020.
40. Патент України на корисну модель № 141514, , МПК B23K (9/04 (2006.01), B23K 9/08 (2006.01). Пристрій для створення поперечного магнітного поля при електродуговому наплавленні та зварюванні / М.В. Агєєва, О.Д. Размишляєв (Україна). № 201910424. – Заявл. 17.10.2019. Опубл. 10.04.2020. Бюл. № 7/2020.
41. Агєєва М.В. Енергозберігаючі технології електродугового зварювання та наплавлення з використанням керуючих магнітних полів / М.В. Агєєва, П.С. Сергієнко// Проблеми енергозбереження в промисловому регіоні. Наука і практика: V Всеукраїнська наукова-практична конференція молодих вчених, фахівців, аспірантів, Маріуполь, 19-21 листопада 2019 р. – Маріуполь: ДВНЗ «ПДТУ». – С. 72-73.
42. Миронова М.В. К выбору оптимальных схем устройств ввода поперечного магнитного поля для процессов дуговой сварки и наплавки / М.В. Миронова // Збірник наук. пр. Дніпродзержинського державного технічного університету (технічні науки). – Дніпродзержинськ: ДДТУ. – 2013. – Вип. 1(21). – С.74-78.

43. Размышляев А.Д. Новая методика определения магнитных свойств материалов, применяемых при дуговой сварке / А. Д. Размышляев, М.В. Агеева // Вісник ДДМА. Зб. наук. пр. – 2018. – № 2 (44). – С. 74-76.
44. Размышляев А.Д. Методика расчета индукции поперечного магнитного поля в зоне ванны при дуговой сварке [Електронний ресурс] / А.Д. Размышляев, М.В. Агеева // Научный Вестник ДГМА. – 2017. – № 1 (22Е). – С. 35-41. http://www.dgma.donetsk.ua/science_public/science_vesnik/№1(22E)_ 2017article/8.pdf
45. Агеева М.В. Влияние продольного магнитного поля на эффективность процесса дуговой наплавки под флюсом металлургического оборудования / М.В. Агеева, А.С. Забара // Вестник ДГМА. – 2016. – № 2 (38). – С. 6-11.
46. Агеева М.В. Влияние продольного магнитного поля на энергоемкость процесса дуговой наплавки // М.В Агеева, Д.И. Залесный, В.В. Наталенко // Проблеми енергоресурсозбереження в промисловому регіоні. Наука і практика:II Всеукраинская научно-практическая конференция молодых ученых, специалистов, аспирантов, Мариуполь, 11-12 мая 2016 г. – Мариуполь: ГВУЗ «ПГТУ» – С. 91.
47. Размышляев А.Д. Влияние частоты продольного магнитного поля на твердость и структуру наплавленного металла при дуговой наплавке под флюсом [Електронний ресурс]/ А.Д. Размышляев, М.В. Агеева // Научный Вестник ДГМА. – 2015. – № 3 (18Е). – С. 236-241. – Режим доступу до журналу : http://www.dgma.donetsk.ua/science_public/science_vesnik/%E2% 84%963 (18%D0%95) _2015/article/34.pdf
48. Размышляев А.Д. О коэффициенте расплавления электродной проволоки при дуговой наплавке под флюсом с воздействием поперечного магнитного поля / А.Д. Размышляев, М.В. Миронова // Инновационные технологии и экономика в машиностроении: II Международная научно-практ. конф. с элементами научной школы для молодых ученых, Юрга, 19-20 мая2011 г. – Томск: ТПИ, 2011. – С. 33-36.
49. Патент України на корисну модель № 58770, МПК (2011) В 23 К 9/04, 9/08. Пристрій для електромагнітного перемішування металу ванни при дуговому зварюванні та наплавленні / О.Д. Размишляєв, М.В. Міронова, К.Г. Кузьменко, П.О. Видмиш (Україна). – № u201011471. – Заявл. 27.09.10. Опубл. 26.04.11, Бюл. № 8/2010.

Особистий внесок автора в роботах, опублікованих у співавторстві:

Особистий внесок автора в роботах, опублікованих у співавторстві: [1] – участь у узагальненні результатів і написанні статті; [2, 5, 10, 11, 13, 21, 22, 44] – участь у розробці розрахункової методики, обробці результатів і написанні статті; [4, 9, 12] – огляд існуючих літературних даних; [3, 6-8, 15, 17, 19, 20, 43, 47] – участь в проведенні експериментів, обробці результатів досліджень та написанні статей; [14, 18] – участь у проведенні досліджень коефіцієнту розплавлення дроту; [16] – участь у обробці результатів і написанні статті; [25-38, 41,

46, 48] - узагальнення результатів експериментальних досліджень і написання тез доповідей; [23] – участь у оформленні роботи; [39, 40, 49] – участь у виготовленні пристрою, виконання експериментальних досліджень, написані формули і оформлені патенти України.

АНОТАЦІЯ

Агєєва М. В. Наукові і технологічні основи електродугового наплавлення і зварювання з дією керуючих магнітних полів. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.03.06 «Зварювання та споріднені процеси і технології» (132 – «Матеріалознавство») – ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет» МОН України, Маріуполь, 2021.

Дисертація присвячена вирішенню актуальної проблеми підвищення ефективності процесу дугового наплавлення і зварювання під флюсом плавким електродом з дією керуючих магнітних полів, що дозволило підвищити продуктивність процесу розплавлення електродного дроту, ефективність керування глибиною та шириною зварювальних швів та наплавлених валиків, перемішування рідкого металу зварювальної ванни, подрібнити структурні складові валиків і швів, знизити енергоємність процесу електродугового наплавлення та зварювання.

Розрахунком індукції поздовжнього магнітного поля (ПДМП) з використанням методу векторного магнітного потенціалу в стаціонарних плоскомеридіанних магнітних полях і з урахуванням магнітних властивостей осердя, дроту і виробу встановлено, що при дуговому наплавленні та зварюванні в ПДМП основний вплив на значення і характер розподілу поздовжньої компоненти індукції поля у поверхні феромагнітного виробу надають феромагнітні властивості електродного дроту. Для практичного використання розроблена розрахунково-експериментальна методика визначення чисельних значень компонент індукції ПДМП під торцем феромагнітного електрода, якщо виріб з немагнітного, або феромагнітного матеріалу. Розроблена розрахунково-експериментальна методика, що дозволила визначити чисельні значення компонент індукції ПОМП в зоні під торцями стрижнів ПВ ПОМП.

На основі аналогії магнітостатичного поля з електростатичним полем розроблена розрахункова методика визначення індукції ПДМП в зоні електродної краплі під торцем феромагнітного електрода, якщо виріб немагнітний для оцінки поведінки електродної краплі на торці електрода і зварювальної дуги при дуговому наплавленні з дією ПДМП. Розрахунками показано, що в зоні під торцем феромагнітного електрода поперечна компонента індукції значна і досягає половини величини поздовжньої компоненти індукції, яку генерує ПВ ПДМП.

Розроблена розрахункова методика для визначення мінімального значення поперечної компоненти індукції ПОМП, що видаляє краплю з торця електродного дроту при даній частоті цього поля, і, що підвищує коефіцієнт розплавлення дротів при дуговому наплавленні. Експериментально показано, що збі-

льшення індукції ПОМП в зоні під торцем електрода підвищує коефіцієнт розплавлення дротів з феромагнітних і немагнітних матеріалів.

Встановлені залежності глибини проплавлення та ширини валика від частоти ПДМП і ПОМП при дуговому наплавленні і зварюванні під шаром флюсу.

На основі дугового наплавлення з дією магнітного поля сплаву на основі заліза, який містить не більше 0,08% C і не менше 17% Cr і не зазнає вторинних перетворень при кристалізації встановлено, що подрібнення структури металу, наплавленого з дією магнітних полів, відбувається на первинній стадії кристалізації, а не на стадії фазових перетворень металу в твердому стані. Подрібнення структурних складових в наплавленого металу (зварному шві) при його кристалізації відбувається за рахунок перемішування рідкого металу по всій довжині хвостової частини зварювальної ванни.

Розроблені розрахункові методики визначення оптимальних параметрів знакозмінних ПДМП і ПОМП для ефективного перемішування розплаву у ванні по всій її довжині при дуговому наплавленні під флюсом. Експерименти підтвердили, що використання знакозмінних ПДМП і ПОМП з оптимальними параметрами сприятливо впливає на структуру наплавленого металу і забезпечує подрібнення зерен металу валиків (швів).

Ефективність розроблених технологій наплавлення і зварювання дротом під флюсом з дією керуючих магнітних полів підтверджена впровадженням їх на ряді підприємств при відновленні і зварюванні виробів металургійного та машинобудівного виробництва.

Ключові слова: дугове наплавлення та зварювання, поздовжнє магнітне поля, поперечне магнітне поле, коефіцієнт розплавлення дроту, проплавлення основного металу, перемішування, кристалізація.

SUMMARY

Ahieieva M.V. Scientific and technological fundamentals of electric arc surfacing and welding with the control magnetic fields action. – Qualifying scientific work on the rights of the manuscript.

Dissertation for the degree of Doctor of Technical Sciences, specialty 05.03.06 – "Welding and Related Processes and Technologies" (132 – "Material Science") - State Enterprise "Priazovsky State Technical University", Ministry of Education and Science of Ukraine, Mariupol, 2021.

The dissertation is devoted to solving the actual problem of increasing the submerged arc surfacing and welding process efficiency by consumable electrode with the control magnetic fields action, which allowed to increase the productivity of the electrode wire melting process, the efficiency of controlling the depth and width of welds and surfaced beads, grind the structural components of the beads and welds, reduce the energy intensity of the electric arc surfacing and welding process.

It is stated that the ferromagnetic properties of the electrode wire have the main influence on the value and nature of the distribution of the longitudinal field induction component in the surface of the ferromagnetic product at arc surfacing and welding by calculation of longitudinal magnetic field (LMF) induction using the method

of vector magnetic potential in the stationary flat-meridian magnetic fields and taking into account the magnetic properties of the core, wire and product. A calculation-experimental method for determining the numerical values of the LMF induction components under the end of a ferromagnetic electrode, if a product of non-magnetic or ferromagnetic material, has been developed for practical use. A calculation-experimental method was developed that allowed to determine the numerical values of TMF induction components in the area under the ends of the rods of the ID TMF.

A calculation metod for determining the radial component of LMF induction in an electrode droplet area under the ferromagnetic electrode end is developed on the basis of the analogy of the magnetostatic field with the electrostatic field, if the product is non-magnetic to evaluate the behavior of the electrode droplet at the electrode end and the welding arc at the arc surfacing with the action of LMF. The calculations show that in the area under the ferromagnetic electrode end the induction transverse component is significant and reaches half the magnitude of the induction longitudinal component generated by the ID LMF.

A computational technique is developed to determine the minimum value of the transverse component of the TMF induction, which removes a drop from the electrode wire end, at a given frequency of this field, and to increase the melting coefficient of the wires at arc surfacing. It is experimentally shown that an increase of the TMF induction in the area under the electrode end increases the melting coefficient of the wires of ferromagnetic and non-magnetic materials.

Dependences of the penetration depth and the width of the bead on the frequency of LMF and TMF at submerged arc surfacing and welding are established.

On the basis of arc surfacing with the magnetic field action of an alloy based on iron, which contains not more than 0.08% C and not less than 17% Cr and does not undergo secondary transformations during crystallization, it is established that the grinding of the metal structure surfaced with the magnetic fields action occurs on the primary stage of crystallization, and not at the stage of phase transformations of the metal in the solid state. Grinding of structural components in the surfaced metal (weld) during its crystallization occurs due to mixing of the liquid metal along the entire length of the tail of the welding bath.

Calculation methods have been developed to determine the optimal parameters of alternating LMF and TMF for effective mixing of the melt in the bath along its entire length at submerged arc surfacing. The experiments confirmed that the use of alternating LMF and TMF with optimal parameters favorably affects the structure of the weld metal and provides the grinding of the metal grains of the beads (welds).

The efficiency of the developed technology of submerged arc surfacing and welding by wire with the control magnetic fields action has been implemented at a number of enterprises in the restoration and welding of metallurgical and mechanical engineering products.

Keywords: arc surfacing and welding, longitudinal magnetic field, transverse magnetic field, wire melting coefficient, basic metal penetration, mixing, crystallization.

Наукове видання

РОЗВИТОК НАУКОВИХ І ТЕХНОЛОГІЧНИХ ОСНОВ ЕЛЕКТРО-ДУГОВОГО НАПЛАВЛЕННЯ І ЗВАРЮВАННЯ З ДІЄЮ КЕРУЮЧИХ МАГНІТНИХ ПОЛІВ

05.03.06 – «Зварювання та споріднені процеси і технології»

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
доктора технічних наук

АГЄЄВА Марина Володимирівна

Підписано до друку 22.02.2021 р. Формат 60х84/16.
Ум. друк. арк. 2,25. Тираж 100 прим. Зам. № 79.

Надруковано в поліграфічному центрі
ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет»
вул. Університетська, 7, м. Маріуполь, 87555,
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи
ДК № 3729 від 15.03.2010 р.