

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ  
“КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ”

**РИЖОВ РОМАН МИКОЛАЙОВИЧ**

УДК 621.791.753:691

**ДУГОВЕ ЗВАРЮВАННЯ З КОМБІНОВАНИМИ  
ЕЛЕКТРОМАГНІТНИМИ ДІЯМИ**

Спеціальність 05.03.06 – Зварювання та споріднені процеси і технології

**АВТОРЕФЕРАТ**

дисертації на здобуття наукового ступеня  
доктора технічних наук

Київ 2008

Дисертацією є рукопис

Робота виконана у Національному технічному університеті України “Київський політехнічний інститут” на кафедрі електрозварювальних установок

Науковий консультант доктор технічних наук, професор  
**Кузнєцов Валерій Дмитрович**  
НТУУ “Київський політехнічний інститут”,  
в.о. завідувача кафедри “Відновлення деталей машин”

Офіційні опоненти: академік НАН України, доктор технічних наук,  
професор **Ющенко Костянтин Андрійович**,  
Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона  
НАН України, заступник директора

доктор технічних наук, професор  
**Биковський Олег Григорович**,  
Запорізький національний технічний університет,  
професор кафедри “Обладнання та технологія зварювального виробництва”

доктор технічних наук, професор  
**Размишляєв Олександр Денисович**,  
Приазовський державний технічний університет,  
професор кафедри “Обладнання та технологія зварювального виробництва”

Захист відбудеться 17.03.2008 о 15 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 26.002.15 НТУУ “КПІ”, м. Київ-56, проспект Перемоги 37, корп. 19, ауд. 417.  
З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці НТУУ “КПІ”, м. Київ-56, проспект Перемоги 37

Відгук на автореферат, затверджений печаткою, прохання надсилати за вказаною адресою на ім'я вченого секретаря ради.

Автореферат розіслано 15.02.2008 р.

Вчений секретар спеціалізованої  
вченої ради Д 26.002.15  
професор, д.т.н.

Головко Л.Ф.

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** Промислове виробництво провідних країн світу характеризується пріоритетним розвитком високотехнологічних галузей, таких як хімічне і енергетичне машинобудування, судно і літакобудування. Складність конструкцій виробів цих галузей обумовлює широке застосування при їх виробництві різних способів зварювання, серед яких дугові за об'ємом є найпоширенішими. Підвищені вимоги щодо показників якості швів, необхідність гарантованого їх збереження на заданому рівні впродовж усього строку експлуатації виробів обумовлюють часте використання у технологічних процесах зварювання зовнішніх імпульсних дій. Серед них зовнішні електромагнітні дії (ЕМД) мають найбільші технологічні можливості і не потребують для реалізації громіздких додаткових пристроїв.

Дослідження, виконані В.П. Чернишом, В.Д. Кузнєцовим, А.М. Болдирєвим, А.І. Акуловим, М.А. Абраловим, Г.Г. Чернишовим, Б.Ф. Якушиним і іншими авторами показали, що застосування ЕМД з аксіальними керуючими магнітними полями (КМП) при зварюванні середньо і високолегованих сталей, жароміцних і жаростійких сплавів, алюмінієвих і титанових сплавів дозволяє здійснювати дегазацію швів, значно підвищувати їх опір утворенню гарячих і холодних тріщин, зменшувати швидкість міжкристалітної корозії.

У попередні роки визначено спектр показників якості швів, на які є можливість ефективно впливати відомими видами ЕМД. Але при цьому ряд показників може навіть погіршуватись, що стримує розробки і впровадження технологій зварювання з їх використанням. Наприклад, при MIG-зварюванні з аксіальним КМП одночасно з поліпшенням кристалізації і, відповідно, підвищенням технологічних та фізико-механічних характеристик зварних швів зменшується глибина проплавлення та збільшуються втрати металу електродного дроту на розбризкування. Тому актуальною науково-технічною проблемою є пошук та розробка нових підходів до дугового зварювання з ЕМД, при яких одночасно підвищуються технологічні та фізико-механічні характеристики швів і покращуються показники їх формування та перенос електродного металу.

Аналіз показав, що найбільш перспективним напрямом підвищення ефективності ЕМД, за яких забезпечується комплексне поліпшення процесів формування і кристалізації швів, є застосування комбінованих КМП, які створюються при одночасному або почерговому генеруванні у зоні зварювання магнітних полів з різними амплітудними, частотними і векторними характеристиками. У минулі роки були окремі спроби їх застосування тільки для поліпшення формування швів із тонколистового матеріалу. Тому проведення комплексу робіт, спрямованих на визначення найбільш результативних комбінацій різних видів ЕМД з урахуванням специфіки найбільш поширених способів зварювання, є актуальним.

Крім того, для визначення перспективних напрямів розробок технологій зварювання з ЕМД і розширення областей їх застосування необхідні додаткові дослідження їх технологічних можливостей в умовах, що відрізняються від звичайних, наприклад, підводного мокрого зварювання.

Виходячи із зазначеного вище, для розвитку наукового напрямку, пов'язаного з підвищенням показників якості зварних з'єднань шляхом застосування зовнішніх електромагнітних дій, необхідне проведення комплексу теоретичних і експериментальних робіт, спрямованих на виявлення закономірностей впливу комбінованих магнітних полів на процеси кристалізації та формування швів і переносу електродного металу.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** В роботі відображено результати експериментальних і теоретичних досліджень, отриманих впродовж 2003 – 2005 років при виконанні завдання Міністерства освіти і науки України №ДП/232 – 2003 “Стабілізація і поточний контроль якості швів при дуговому підводному зварюванні трубопроводів” (номер держреєстрації 0100U000939) і впродовж 2006 – 2007 років при виконанні завдання №2993 “Наукові основи формування наплавлених шарів з мінімальним тепловнесенням” (номер держреєстрації 0106U007331).

**Мета роботи та задачі досліджень.** Метою роботи є створення наукових основ процесів дугового зварювання з комбінованими електромагнітними діями і принципів конструювання спеціалізованого обладнання для їх реалізації на основі досліджень закономірностей впливу векторних, амплітудних і частотних характеристик зовнішніх керуючих магнітних полів на формування і кристалізацію зварних швів, масоперенос електродного металу і їх взаємозв'язків з конструктивними і енергетичними параметрами електромагнітних систем.

У відповідності до поставленої мети вирішувались такі задачі:

- теоретичне і експериментальне дослідження характеристик комбінованих КМП у зоні зварювання і визначення оптимальних конструктивних схем багатополосних електромагнітних систем для умов зварювання плавким і неплавким електродом;

- теоретичне і експериментальне дослідження процесів формування та кристалізації швів і масопереносу електродного дроту при дуговому зварюванні з комбінованими ЕМД;

- узагальнення закономірностей змін параметрів формування і кристалізації швів, наплавлених шарів, переносу електродного металу, створення на цій основі розрахункових схем для визначення умов оптимальності параметрів КМП при реалізації процесів дугового зварювання з комбінованими ЕМД;

- розробка конструктивних схем спеціалізованих пальників і головок для наплавлення з багатополосними електромагнітними системами та конструктивних схем і алгоритмів функціонування пристроїв автоматичного керування комбінованими ЕМД.

**Об'єкт досліджень** – процеси формування і кристалізації швів при дуговому зварюванні з комбінованими ЕМД.

**Предмет досліджень** – закономірності формування і кристалізації, їх взаємозв'язки з параметрами керуючих ЕМД.

**Методи досліджень.** Методичну і теоретичну основу досліджень складають основні положення теорії зварювальних процесів. Експериментальні дослідження

проведено у лабораторних умовах на установках зі стабілізованими параметрами режимів зварювання. Вивчення процесів формування і кристалізації швів проведені методами оптичної металографії, а їх насичення газами – хроматографією. Визначення місць положення дуги та її швидкості переміщення здійснювалось цифровим кінозніманням. Для оцінки границь температурного інтервалу крихкості використовували методику, що ґрунтується на надшвидкісному деформуванні зразків з одночасною фіксацією температури на характерних ділянках тріщини. В процесі обробки експериментальних даних і при математичному моделюванні магнітогідродинамічних процесів у ванні використовували сучасне прикладне програмне забезпечення. Математичні моделі розподілу індукції керуючого магнітного поля у робочій зоні ґрунтуються на методі вторинних джерел.

**Наукова новизна одержаних результатів** визначається результатами комплексу теоретичних і експериментальних досліджень, спрямованих на створення наукових основ дугового зварювання з комбінованими електромагнітними діями, які забезпечують комплексне поліпшення показників якості швів. Вона полягає у наступному.

1. Електромагнітні дії на основі комбінованих магнітних полів, створених по черговим генеруванням у зоні зварювання аксіальних і центральносиметричних та аксіальних і поперечних магнітних полів призводять до подрібнення структури швів і підвищення по відношенню до аксіальних КМП глибини їх проплавлення на 40ч45%.

2. Періодичне регульоване переміщення перегрітого розплаву із головної та центральної областей ванни на всю довжину її хвостової частини спричинює повторну кристалізацію з частотою для нержавіючих сталей 0,03ч0,06с, що узгоджується з частотою електромагнітних дій при індукціях керуючого магнітного поля 5ч20мТл.

3. Відтискання за допомогою зовнішніх електромагнітних дій розплаву із головної частини ванни вздовж її донної поверхні спричинює збільшення до 65% глибини проплавлення швів, що пояснюється зменшенням на 20ч30% товщини екрануючого рідкого прошарку під дугою, дослідженим теоретичним моделюванням і експериментально.

4. Індукування в розплаві ванни імпульсної електромагнітної сили, спрямованої до її дна, з частотою, близькою до резонансної, спричинює коливання всього її об'єму і супроводжується подрібненням структури швів. Дія електромагнітної сили в об'ємі крапель дозволяє збільшувати частоту їх переносу, зменшувати у 2 рази їх розміри і на 20% втрати металу на розбризкування.

5. У зоні горіння дуги, формування крапель і шву комбінуванням зовнішніх магнітних полів досягаються всі необхідні їх амплітудні (5ч50мТл) і частотні (до 250Гц) характеристики для реалізації електромагнітних дій, які забезпечують одночасне чи по чергове створення електромагнітної сили різного заданого спрямування відносно площини дзеркала ванни, дуги і крапель електродного металу.

6. Однакова глибина проплавлення по всій ширині шару, що наплавляється досягається покрововим з частотою 15ч50 Гц переміщенням дуги з регулюванням часу її зупинок у кожній точці робочої зони і забезпечується створенням у дуговому

проміжку електромагнітної сили, що діє на дугу, перпендикулярно напрямку наплавлення.

**Практичне значення одержаних результатів.** Створені наукові підходи щодо застосування комбінованих електромагнітних дій і розроблені технологічні рішення дозволяють підвищити ефективність дугових способів зварювання шляхом забезпечення гарантованої якості металу швів, збільшити їх продуктивність, зменшити енергомісткість і витрати металу електродного дроту на розбризкування.

На основі проведених науково-дослідних робіт сформульовані основні вимоги і принципи конструювання апаратних засобів для зварювання і наплавлення з електромагнітними діями. Використовуючи розроблені функціональні схеми, алгоритми роботи і комплекти конструкторської документації виготовлені лабораторні зразки спеціалізованих пальників, насадок і головок, апаратів автоматичного керування електромагнітними діями. В процесі тривалої експлуатації даного обладнання в умовах науково-дослідних установ і підприємств підтверджено його високу працездатність і надійність. Зазначені чинники є вагомим підґрунтям для його промислового виробництва.

Розроблені програмні засоби визначення індукції керуючого магнітного поля у робочій зоні і оптимальних параметрів електромагнітних дій з урахуванням рекомендованих режимів зварювання, теплофізичних властивостей матеріалів з'єднань забезпечують максимальну ефективність запропонованих технологічних рішень при їх практичній реалізації.

**Особиста участь автора в одержанні наукових результатів.** В дисертаційній роботі внесок автора полягає в обґрунтуванні загальної концепції роботи, формулюванні мети і задач досліджень, розробці наукових основ дугового зварювання з комбінованими електромагнітними діями, фізичних і математичних моделей пристроїв генерування керуючих магнітних полів, розрахункових схем для оптимізації їх параметрів і принципів створення спеціалізованого обладнання. В дисертації узагальнені результати експериментальних досліджень, виконаних автором самостійно та спільно із співробітниками кафедри електрозварювальних установок НТУУ КПІ та інституту електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України. Переважну більшість наукових результатів автором отримано самостійно. Здобувачу також належать загальні висновки дисертаційної роботи і положення, які виносяться на захист:

1. Висновок про доцільність застосування комбінованих керуючих магнітних полів в технологічних процесах дугового зварювання з електромагнітними діями з метою розширення їх технологічних можливостей і комплексного поліпшення показників якості з'єднань.

2. Розрахункові моделі спеціалізованих пальників і головок для дугового зварювання і широкошарового наплавлення з електромагнітними діями, взаємозв'язки їх структур і конструктивних параметрів з розподілом індукції керуючого магнітного поля у робочій зоні і способи коректування його амплітудних і векторних характеристик для реалізації різних видів зазначених імпульсних дій.

3. Закономірності змін параметрів формування і кристалізації швів при зварюванні неплавким електродом з електромагнітними діями, їх кількісні і якісні характеристики при генеруванні в робочій зоні різних комбінованих керуючих магнітних полів.

4. Розрахункові схеми для оптимізації параметрів постійних і знакозмінних, низькочастотних і модульованих керуючих магнітних полів для умов дугового зварювання з електромагнітними діями.

5. Принципові рішення щодо створення комплексу спеціалізованого обладнання для практичної реалізації технологічних процесів дугового зварювання з електромагнітними діями.

**Апробація результатів дисертації.** Основні положення, наукові і практичні результати роботи доповідались і обговорювались на республіканських і міжнародних конференціях: “Современные проблемы развития сварочного производства и совершенствование подготовки кадров” (Маріуполь 1996 р.); “Сварка и родственные технологии в XXI век” (Київ 1999 р.); Міжнародний симпозіум українських інженерів-механіків у Львові (Львів 2001 р.); “Современные проблемы сварки и ресурса конструкций” (Київ, ІЕЗ ім. Є.О. Патона, 2003 р.); “Зварювання та суміжні технології” (Київ 2003 р., 2005р., 2007р). “Досконалість зварювання - комплексний підхід” (Київ, НТУУ “КПІ”, 2007р).

**Публікації.** По темі дисертації опубліковано 35 робіт, серед яких 20 публікації у провідних фахових виданнях, 6 патентів України, 9 - у збірниках матеріалів конференцій.

**Структура і обсяг роботи.** Дисертаційна робота складається із вступу, п'яти розділів, висновків по роботі, переліку посилань і додатків. Загальний обсяг роботи становить 315 сторінок машинописного тексту, включаючи 90 малюнків на 56 сторінках, 1 таблицю, перелік посилань із 209 найменувань на 22 сторінках і додатків на 27 сторінках.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовано актуальність напряму досліджень, сформульовано мету роботи, її наукову новизну і практичне значення. Визначено задачі досліджень, показано їх взаємозв'язки з науковими програмами, планами темами.

**У першому розділі** на основі аналізу впливу різних видів зовнішніх імпульсних дій на процеси дугового зварювання показано переваги ЕМД, які полягають в тому, що вони є об'ємними, безконтактними із елементами системи джерело живлення – дуга – зварювальна ванна, не потребують для реалізації громіздких додаткових пристроїв і мають найкращі динамічні характеристики.

У розробленій класифікації керуючих магнітних полів (рис.1) основною ознакою, що якісно їх відрізняє, є напрям вектору магнітної індукції КМП по відношенню до об'єкту керування. За цією ознакою магнітні поля розділяють на аксіальні (поздовжні) і радіальні (поперечні). У перших вектор індукції паралельний, а у других - перпендикулярний вісі електроду. Додатковими, не менш важливими відзначеними ознаками зазначених двох груп КМП, є їх частотні і амплітудні характеристики. Аксіальні КМП умовно можна розділити на однополярні, низькочастотні і високочастотні. При цьому низькочастотні у більшому ступені характеризуються діапазоном індукцій 5ч50 мТл, а високочастотні - 50ч200 мТл. У групі радіальних КМП

за частотними характеристиками виділяють пульсуючі, низькочастотні і постійні. Для усіх характерний діапазон індукцій 5ч20 мТл. КМП першої групи (з аксіальними векторними характеристиками) частіше застосовують у випадках, коли об'єктом керування є зварювальна ванна і масоперенос електродного металу, другої (з радіальними) – дуга як джерело нагріву.

Виявлено, що від параметрів використаного КМП залежить характер впливу ЕМД на об'єкти керування, змінюються як спектр видів зварювання, у яких їх доцільно застосовувати, так і показників якості швів, на які є можливість максимально ефективно впливати. При цьому одночасно з поліпшенням одних показників інші можуть і погіршуватись. Так ЕМД на основі аксіальних низькочастотних КМП дозволяють керувати гідродинамікою ванни і тому ефективні для поліпшення процесів кристалізації швів. Однак через розконцентрацію дуги як джерела нагріву їх застосування призводить до істотного зменшення глибини проплавлення, що у багатьох випадках є неприпустимим. До того, через ймовірність збільшення рівня розбрикування металу електродного дроту їх обмежено використовують при зварюванні плавким електродом. Менш ефективними ніж попередні для керування кристалізацією швів є ЕМД, які спричинюють поздовжні коливання або відхилення дуги радіальним КМП. При цьому часто їх застосування призводить до утворення на поверхнях швів бічних підрізів.

Аналіз показав, що для комплексного поліпшення завдяки ЕМД показників якості швів необхідне застосування магнітних полів з просторовими конфігураціями, які ще не використовувались.

Так центральносиметричні радіальні КМП (рис.1) характеризуються відсутністю індукції на поздовжній осі пальника і додатнім її градієнтом у напрямках до фронтів плавлення і кристалізації зварювальної ванни. Їх взаємодія в об'ємі ванни з електричним полем зварювального струму спричинює виникнення силової дії на розплав, перпендикулярної поверхні шву.

При взаємодії радіальної складової індукції з поздовжньою складовою струму дуги виникає електромагнітна сила, що її відхиляє у відповідному напрямку. Динамічні зміни у площині дзеркала ванни векторних характеристик радіальної складової індукції КМП є головною ознакою обертальних магнітних полів (рис.1). За їх використання існує можливість відхилити дугу не в одному, а у заданих напрямках.

При тримірних динамічних змінах напрямів потоку магнітної індукції (на рис.1 - муьтивекторні ортогональні магнітні поля) і її взаємодії в об'ємі ванни з електричним полем зварювального струму можливе створення об'ємної силової дії на розплав ванни.

Одночасним генеруванням КМП різної частоти можна формувати модульовані аксіальні і радіальні магнітні поля і досягати за їх використання змін як у процесах кристалізації і формування швів, так і переносу електродного металу.

Зазначені нові просторові конфігурації магнітних полів за всіма ознаками є комбінованими. Аналіз показав, що їх створення потребує якісно нових підходів до розробки пристроїв генерування магнітних полів, зокрема на базі багатополюсних електромагнітних систем.



У публікаціях в провідних фахових виданнях не виявлено достатнього для практичної реалізації комбінованих ЕМД об'єму теоретичних і експериментальних розробок. Це обумовило необхідність проведення комплексу робіт, спрямованих на їх отримання з метою визначення умов оптимальності параметрів різних видів ЕМД і максимально результативних комбінацій КМП з урахуванням специфіки найбільш поширених способів дугового зварювання.

У другому розділі викладені результати математичного моделювання просторових конфігурацій і розподілів індукції керуючих магнітних полів відносно дуги і зварювальної ванни залежно від розташування полюсів електромагнітних систем. При виборі розрахункових схем виходили із умов конструктивної сумісності електромагнітів з існуючими зразками пристроїв для зварювання і наплавлення.

Відповідно до цього розрахункова схема циліндричної однополюсної ЕМС для реалізації ЕМД на основі аксіальних модульованих КМП за формою мала конфігурацію, подібну до наведеної на рис.2. Вона характеризується використанням корпусних елементів осердя у якості каркасів котушок намагнічування і соплових його частин у якості магнітопроводу. Досліджувані багатополюсні електромагнітні системи сформовано із електромагнітів зі стрижневими циліндричними осердями, на бічних поверхнях яких розміщено багатополюсні котушки намагнічування.

Шестиполюсна циліндрична ЕМС для генерування комбінованих аксіальних низькочастотних, центральносиметричних радіальних, обертальних і мультивекторних ортогональних магнітних полів містила шість електромагнітів, розміщених з однаковим кутовим кроком на однаковій відстані  $R_{II}$  від поздовжньої осі пальника (рис.3). Радіальна координата точки  $Q$ , у якій розраховується КМП, у даному випадку дорівнює: де  $x_Q$  і  $y_Q$  – її декартові координати. точки;  $\gamma$  - кут, на який зміщено полюс відносно початкового положення.

Лінійна багатополюсна ЕМС для широкошарового наплавлення у середовищі інертних газів з ЕМД на основі комбінованих радіальних КМП (рис. 4) характеризується розташуванням полюсів один до одного по обидва боки від струмопідвідного вузла і відхилених на кут  $\beta$  від вертикальної осі. У випадку, коли точка  $Q$  знаходиться на робочій поверхні: при її розташуванні на нижній поверхні електроду: де  $d_{mag}$  – діаметр магнітопроводів полюсів;  $x_{II}$  – їх віддалення від осі ЕМС;  $z_0$  – відстань від їх нижніх кінцівок до робочої поверхні.

При створенні математичних моделей розподілу індукції КМП у робочій зоні використовували метод вторинних джерел, якими були фіктивні магнітні заряди з об'ємними ( $\rho_M$ ) і поверхневими ( $\sigma_M$ ) густинами, локалізовані у мікрооб'ємах осердь спеціалізованих пальників (на рис 2-4  $dV_M$ ). Їх величини визначали із співвідношень:

, де;  $\mu_Q$  - магнітна проникність у точці  $Q$ ;  $n_Q$  - одинична нормаль до поверхні осердя. Первинні джерела магнітного поля задавали густиною струмів намагнічування  $J$  у котушках електромагнітів. При цьому їх плоскі круглі витки також вважали складеними із сукупності дуже коротких ділянок.

Напруженість еквівалентного магнітного поля у точці  $Q$  дорівнює:

де:  $J(A)$  - густина струму намагнічування у точці  $A$ ;  $r_{MQ}$  і  $r_{AQ}$  - вектори, що з'єднують точку  $Q$  із точками  $A$  і  $M$ , у яких знаходяться відповідно первинний і еквівалентний вторинний джерела магнітного поля;  $V_k$  і  $V_m$  - об'єми відповідно котушки намагнічування і магнітопроводу із загальною площею поверхні  $S_m$ .

Підставивши вираз для  $H(Q)$  у формули для  $\rho_m(Q)$  і  $\sigma_m(Q)$  отримували систему інтегральних рівнянь.

При розрахунках КМП, генерованого багатополосними ЕМС, сумарну напруженість КМП у точці  $Q$  знаходили як: де  $N$  - кількість полюсів ЕМС. Враховуючи, що розрахункова область обмежена об'ємом розплаву зварювальної ванни, у якому відносна магнітна проникність близька до одиниці, індукцію КМП вважали рівною, де  $m_0$  - магнітна стала.

Виявлено, що при генеруванні КМП одним полюсом ЕМС на рис.3 радіальна складова індукції у робочій зоні набуває значень 3ч5mT, що свідчить про можливість реалізації технологій з відхиленнями або коливаннями дуги. Однак наявність її градієнту спричинює порушення ортогональності напрямку ЕМД. Генеруванням КМП парами протилежно розташованих електромагнітів з  $I_n$  різних полярностей досягається більш рівномірний розподіл індукції і істотне збільшення її величини. До того, використання такої ЕМС дозволяє змінювати напрям ЕМД без переорієнтації спеціалізованого пальника. При цьому за однакових  $I_n$  кількість напрямів відхилень або коливань дуги відповідає кількості її полюсів. Це дозволяє реалізовувати ЕМД на основі обертальних КМП.

Дослідження варіантів комутації полюсів шестиполосної ЕМС для створення центральносиметричних КМП показали (рис.5, рис.6), що у площині дзеркала ванни на її поздовжній осі найбільша індукція поперечної до напрямку зварювання складової КМП ( $B_y$ ) генерується при реалізації схеми комутації, наведеної на рис.5.б. У випадку живлення усіх котушок полюсів ЕМС однаковим  $I_n$  спостерігали зміщення відносно осі електрода точки, у якій  $B_y=0$ . Залежно від напрямку магнітного потоку наявність  $B_y$  у області горіння дуги призводить до її відхилення в процесі зварювання у бік головної або хвостової частин ванни, у наслідок чого погіршуються процеси формування швів. Для усунення асиметрії параметрів КМП у центральній області ванни необхідне збільшення у два рази  $I_n$  у котушках задньої пари полюсів ЕМС. Одночасно це призводить до значного збільшення  $B_y$  у хвостовій частині ванни. При моделюванні схеми на рис.5.а виявлене однакове спрямування магнітних потоків у головній і хвостовій частинах ванни (рис.6).

У випадку, коли через котушки усіх полюсів шестиполосної ЕМС пропускали  $I_n$  однакових амплітуд і полярностей, у зоні зварювання генерували аксіальне результуюче КМП ( $B_z$ ). При цьому, через взаємну компенсацію радіальних складових індукції магнітних полів протилежних полюсів, на поздовжній осі ЕМС  $B_y=0$ .

Дослідження показали, що при використанні багатополосних лінійних ЕМС, конструктивні схеми яких подібні до наведеної на рис.4, досягається стабільний розподіл поздовжньої до напрямку широкошарового наплавлення складової радіального КМП ( $B_x$ ) (рис.7). Для його генерування у всіх котушках намагнічування полюсів,

розташованих протилежно,  $I_n$  повинен бути однакових амплітуд і різних полярностей. Для обмеження зони, у якій переміщується дуга, крайні пари полюсів із заданою частотою вмикали на зустріч іншим, що спричинює зміни полярності  $B_x$  на краях робочої зони. Реверсування напрямку руху дуги досягали зміною на протилежну полярностей струмів через всі котушки полюсів ЕМС.

Таким чином, за результатами теоретичного і експериментального аналізу встановлено, що зміною схем комутації полюсів розглянутих ЕМС можна у широкому діапазоні змінювати амплітудні і векторні характеристики КМП у робочій зоні.

**У третьому розділі** узагальнено результати досліджень впливу різних видів комбінованих ЕМД на показники формування і кристалізації швів, перенос електродного металу.

При проведенні досліджень для генерування у зоні зварювання комбінованих аксіальних, обертальних, радіальних центральносиметричних і мультивекторних ортогональних КМП використовували шестиполіусну ЕМС.

Ефективність впливу ЕМД на основі низькочастотних аксіальних КМП на гідродинаміку ванни і керування у такий спосіб кристалізацією швів якісно оцінювали за змінами параметрів температурного інтервалу крихкості (ТІК). Виявлено, що залежності протяжності ТІК ( $\Delta T_k$ ) від параметрів магнітного поля мають вид кривих з мінімумом, який відповідає максимальному подрібненню структури. Це пояснюється максимальним проявленням ефекту повторної кристалізації при почергових переміщеннях перегрітого розплаву до фронту кристалізації і його оплавленням. З підвищенням енерговнесень у стик максимальне скорочення  $\Delta T_k$  відбувалось при більш високих значеннях параметрів КМП. Зміни  $\Delta T_k$  у наслідок застосування ЕМД зафіксовано при зварюванні нержавіючих сталей і сплавів з різними хімічними композиціями. Так максимальне скорочення  $\Delta T_k$  для сплаву ЕП718 складало 30%, для сталі Х17Н13М2Т - 25%, а 08Х18Н10Т - 24%.

Експериментальні дослідження геометричних параметрів швів при зварюванні неплавким електродом нержавіючої сталі 12Х18Н10Т з використанням зазначених ЕМД показали, що збільшенню індукції КМП відповідає експоненціальне збільшення  $6 \div 10\%$  ширини швів. Це пояснюється “розмиванням” бічних поверхонь ванни гарячими потоками розплаву. На режимах ЕМД з індукціями КМП до 5 мТл збільшення на  $10 \div 25\%$  глибини проплавлення ( $h$ ) відбувалось у наслідок стабілізації просторового положення дуги. Підвищення індукції КМП до рівня, достатнього для керування процесами кристалізації швів (10ч20 мТл), супроводжувалось істотним розосередженням дуги як джерела нагрівання і, як наслідок, зниженням на  $25 \div 30\%$  порівняно з вихідною глибиною проплавлення.

Таким чином, ЕМД на основі результуючих аксіальних низькочастотних КМП, що генеруються шестиполіусною ЕМС, забезпечують істотне покращення кристалізації швів, однак призводять до зменшення глибини їх проплавлення.

При зварюванні з ЕМД на основі радіальних центральносиметричних КМП, схеми генерування яких наведено на рис.5, незалежно від спрямування (до поверхні ванни, або до її дна) силової дії на розплав у секторі головної частини ванни, обмеженому  $\beta_n = 60^\circ$  і  $120^\circ$ , підвищення  $B_y$  до  $6 \div 9$  мТл призводило до збільшення на

50÷65% глибини проплавлення швів. У даному діапазоні індукції ширина швів істотно не змінювалась. Однак при  $b_n=60^\circ$  у випадку, коли силова дія спрямована до дна ванни, підвищенню  $B_V$  більше за 10mТл відповідало збільшення ширини на 35%. Серед тих, що досліджувались, схема ввімкнення з  $b_n=180^\circ$  була найменш ефективною. Слід зазначити, що при спрямуваннях силової дії на розплав до верхні ванни, спостерігали деяке зменшення площі перерізу швів, що є неприпустимим.

Механізм змін параметрів формування швів при зварюванні з даними ЕМД ґрунтується на змінах товщини рідкого прошарку розплаву під дугою. Через те, що у межах ванни зварювальний струм в основному тече у напрямку її головної частини, інтенсивність електромагнітних дій у даній області набагато вища, ніж у інших областях. Вертикально спрямована до дна ванни силова дія сприяє відтисканню розплаву з під дуги, що і спричинює збільшення її проплавлювальної здатності. Однак при надмірному збільшенні інтенсивності ЕМД у хвостовій частині ванни формуються вихрові потоки розплаву зі зворотним струменем у напрямку до її центру. При цьому ефективність дуги як джерела нагріву погіршується і, як наслідок, відбувається зменшення глибини проплавлення швів.

Дослідження ефективності ЕМД на основі радіальних низькочастотних і комбінованих обертальних КМП, які спричинюють відповідно відхилення і коливально-обертальні рухи дуги, показали, що істотні зміни параметрів формування швів відбуваються при тривалості дій у одному напрямку в межах 0,03ч0,05с. Глибина проплавлення швів зростала тільки при поздовжніх відносно напрямку зварювання коливаннях дуги. Це пояснюється відтискуванням розплаву із центральної області ванни у її головну і хвостову частини, що сприяє зменшенню товщини рідкого прошарку під дугою і інтенсифікації процесу плавлення основного металу. При поперечних коливаннях анодна пляма дуги частіше знаходиться поблизу бічних поверхонь ванни, чим пояснюється збільшення на 56% ширини швів.

Застосування відхилень дуги магнітним полем дозволяє ефективно керувати процесами кристалізації швів (рис.8). У порівнянні з первинними структурами, отриманими при зварюванні у звичайних умовах, найбільше подрібнювання структури зафіксовано при поздовжніх коливаннях дуги у всьому перерізі швів (рис.8а) і при поперечних коливаннях у центральній їх області (рис.8б). Цей ефект пояснюється тим, що дані імпульсні дії характеризуються найбільшою частотою переміщення анодної плями дуги до фронту кристалізації і відповідними змінами частоти його підплавлення.

Слід зазначити, що при даних ЕМД схеми кристалізації істотно відрізняються. При поздовжніх коливаннях дуги кристаліти спрямовані практично перпендикулярно лінії сплавлення. При поперечних коливаннях дуги виділяються центральна зона, у якій напрямок зростання кристалітів співпадає із поздовжньою віссю шва, і зони, що примикають до лінії сплавлення з крупнокристалічною структурою. Зі збільшенням до 0,05с тривалості дій у поперечних напрямках ширина подрібненої центральної зони зменшувалась.

Порівнюючи макрошліфи швів, отриманих при зварюванні з нереверсивними і реверсивними коливально-обертальними рухами дуги (відповідно рис.8в і рис.8г),

виявлено, що у першому випадку досягається більш істотне подрібнювання структури. При цьому ступінь подрібнювання структури практично однакова зі швами, отриманими при поздовжніх коливаннях дуги, але кут зрощування кристалітів менше, що сприяє підвищенню пластичності швів.

Результати проведених досліджень дозволили зробити висновок, що ЕМД на основі аксіальних низькочастотних КМП більш ефективні для керування кристалізацією, а радіальні - геометричними параметрами швів.

Комплексного поліпшення якості швів досягали шляхом їх комбінованого використання. Сутність таких ЕМД полягала у почерговому генеруванні у зоні зварювання аксіального і радіального КМП.

В процесі досліджень період електромагнітних дій змінювали шляхом регулювання тривалості генерування останнього. Наступний період відрізнявся від попереднього тільки полярністю аксіального КМП, чим досягали реверсивного руху розплаву вздовж бічних поверхонь ванни. Окремо досліджували комбіновані з аксіальним низькочастотним центральносиметричні радіальні КМП (у класифікації на рис.1 – мультивекторні ортогональні) і радіальні КМП, що спричинюють поздовжні коливання дуги. У випадку, коли індукція радіального КМП дорівнювала нулю отримували пульсуючі аксіальні магнітні поля.

Виявлено, що застосування мультивекторних ортогональних КМП дозволяє збільшувати на 40-45% глибину проплавлення швів ( $h$ ). При реалізації ЕМД з пульсуючими аксіальними КМП збільшенню паузи між імпульсними послідовностями відповідало монотонне, однак менш значне збільшення  $h$ .

Застосування ЕМД на основі комбінованих КМП, які періодично під час дії радіального магнітного поля відхиляли дугу до фронту кристалізації, супроводжувалось збільшенням  $h$  на 35%. Однак у даному випадку при переміщенні окремих порцій розплаву з підвищеними швидкостями у напрямку хвостової частини ванни створювались умови, коли частина їх об'єму при досягненні границь ванни швидко охолоджувалась і кристалізувалась з утворенням напливів. У наслідок цього поверхні швів набували лускоподібного виду. До того, зазначені відхилення дуги впливають головним чином на швидкість потоків у областях, близьких до поздовжньої осі швів, що спричинювало утворення подрізів вздовж ліній сплавлення, глибина яких ставала більш значною при збільшенні тривалості періодів генерування радіального КМП.

Експериментально визначено, що при зварюванні з ЕМД на основі мультивекторних ортогональних КМП зі збільшенням тривалості періодів генерування центральносиметричних радіальних магнітних полів ширина швів ( $b$ ) зростає тільки у випадку спрямування об'ємної силової дії на розплав до дна ванни. При зміні її напрямку на протилежний величина  $b$  зменшується. Аналогічні результати отримані як при зварюванні з комбінованими ЕМД, у яких радіальне КМП періодично відхиляє дугу до фронту кристалізації, так і при зварюванні з пульсуючими аксіальними КМП.

При зварюванні з використанням пульсуючих аксіальних КМП зі збільшенням пауз між імпульсними послідовностями зменшується інтенсивність ЕМД, у наслідок

чого структури швів не значно відрізняються від вихідних (рис.9.а). Комбіновані ЕМД, при яких під час генерування радіальних магнітних полів або відбуваються відхилення дуги до фронту кристалізації, або створюється об'ємна силова дія на розплав, спрямована до дна ванни, характеризуються постійним, а не імпульсним, його переміщенням із головної у хвостову частину. Це призводить до деякого зниження швидкості охолодження центральної області швів, у наслідок чого формується транскристалітна структура (рис.9.б,в). Найбільш істотне подрібнювання структури спостерігали при застосуванні мультивекторних ортогональних КМП, при яких під час генерування центральносиметричного магнітного поля силова дія на розплав була спрямована до поверхні ванни (рис.9.г). Однак при цьому спостерігали деяке зменшення площі перерізу швів, що є неприпустимим.

Таким чином, найбільш ефективними для одночасного поліпшення кристалізації і геометрії формування швів є ЕМД, що ґрунтуються на використанні мультивекторних ортогональних КМП. При їх застосуванні досягається повне компенсування характерного для зварювання з аксіальними низькочастотними КМП зменшення глибини проплавлення швів без зниження ефективності впливу на кристалізацію.

При широкошаровому ТІГ-наплавленні комбіновані ЕМД застосовували для керування зворотно-поступальними рухами дуги у робочій зоні з метою поліпшення показників якості формування наплавлених шарів. В процесі експериментальних досліджень пластини із нержавіючої сталі 12Х18Н10Т товщиною 0,5ч1,0мм наплавляли на плоскі зразки із сталі Ст3 товщиною до 20мм на режимах: струм наплавлення  $I_n=120\text{ч}180\text{А}$ ;  $U_0=10\text{В}$ ; середня швидкість наплавлення  $V_n=0,5\text{м/г}$  при ширині шару 90мм; індукція КМП  $B_x=5\text{ч}10\text{тТ}$ .

Для реалізації досліджуваного технологічного процесу необхідне забезпечення стабільності горіння дуги, яка в основному залежить від її енергетичних характеристик, розподілу індукції КМП в робочій зоні і теплових процесів в електроді і виробі, на характер яких в свою чергу впливають як особливості їх конструкцій, так і теплофізичні властивості використаних при їх виготовленні матеріалів. При розміщенні ЕМС над поверхнею, яку наплавляють, існує від'ємний градієнт індукції КМП в напрямку від електроду до виробу, у наслідок чого анодна і катодна області дуги переміщуються з різними швидкостями. При ширині шару, що наплавляється, більшій за 40ч50мм це призводить до її обриву. Зазначений негативний ефект мінімізували відхиленням полюсів ЕМС від вертикального положення на кут  $15^\circ$ , величина якого залежить від конструктивних особливостей даних пристроїв.

Показано, що обмеження зони, у якій переміщується дуга, зустрічним ввімкненням крайніх пар полюсів (рис.7) дозволяє стабілізувати форму периферійних областей шарів, що наплавляються. Однак при цьому звужується область робочої зони, у якій індукція КМП не змінює своїх значень. Враховуючи те, що швидкість переміщення дуги прямо пропорційна  $B_x$ , при наплавленні це призводить до нерівномірності прогріву матеріалу основи і виникненню на поверхнях зазначених областей дефектів формування у вигляді кратерів. Виявлено, що найбільш дієвим способом уникнення цього негативного ефекту є застосування покрокового переміщення дуги

з регулюванням часу її зупинок у кожній точці робочої зони. При цьому імпульси КМП повинні відставати по фазі від імпульсів  $I_n$  на час, який залежить від динамічних характеристик джерела живлення дуги.

У процесі широкошарового наплавлення з ЕМД часто на окремих ділянках робочої зони має місце нещільність прилягання пластини або стрічки, яку наплавляють, до матеріалу основи. При живленні дуги постійним струмом це призводить до надмірного розігріву зазначених областей і, як наслідок, утворення пропалів. За для уникнення цього при проведенні експериментальних робіт успішно застосовували імпульсний процес горіння дуги.

Слід зазначити, що при тривалості імпульсів струму наплавлення, більшій за 0,06с, спостерігали порушення пропорційності між енерговнесенням у виріб і глибиною проплавлення робочої зони. Це пояснюється збільшенням радіальних розмірів катодної плями дуги, що горить на вольфрамовій пластині шириною 100мм, і відповідним зменшенням густини струму у її стовпі. Тому при заданій амплітуді  $I_n$  для забезпечення заданої глибини проплавлення необхідно регулювати кількість імпульсів струму наплавлення, а тривалість кожного із них повинна бути в межах 0,02ч0,06с. Розділення у часі імпульсних процесів переміщення дуги і проплавлення робочої зони дозволило якісно формувати наплавлені шари і мінімізувати енерговнесення у матеріал основи.

Пошукові експерименти показали, що крім наплавлення перспективним напрямом застосування зазначених комбінованих ЕМД є поверхнева обробка виробів. Отримано дані, що свідчать про можливість здійснення у такий спосіб поверхневого загартування на задану глибину і азотування.

При реалізації ЕМД на основі аксіальних модульованих КМП у зоні зварювання одночасно генерували аксіальні низькочастотні і імпульсні високочастотні магнітні поля. Останні спричинювали індукування у об'ємах ванни і крапель металу електродного дроту вихрових струмів. Їх взаємодія з радіальною складовою КМП створювала об'ємну силу, що діяла у напрямку до ванни. У процесі досліджень величину імпульсу зазначеної електромагнітної сили змінювали генеруванням або одинарних, або подвійних імпульсів КМП кожний тривалістю 0,075мс, які повторювались з частотою  $f_{imn}=20ч200$ Гц.

Виявлено, що при MIG- зварюванні сталі 12X18H10T збільшення частоти досліджуваних ЕМД супроводжувалось зменшенням за експоненціальним законом коефіцієнту втрат металу електродного дроту на розбризкування (рис. 10). Це підтверджує можливість керування за їх допомогою траєкторією переносу крапель. При цьому на частоті  $f_{imn}=30$ Гц ЕМД з одинарними імпульсами КМП поліпшували зазначений показник на 10%, а з подвійними – на 20%. Одночасно із збільшенням у 2ч2,5 рази загальної кількості крапель істотно зменшувався їх діаметр.

Зафіксовано зростання коефіцієнтів форми шву і валика, що пояснюється практично лінійним збільшенням на 20% ширини швів, зменшенням на 40% висоти валиків та на 70% глибини проплавлення. Це свідчить про доцільність застосування досліджуваних ЕМД у процесах дугового наплавлення. До того, зменшення глибини проплавлення дозволяє підвищувати величину зварювального струму і збільшувати

у такий спосіб інтенсивність плавлення електродного дроту, що актуально при багатопрохідному зварюванні.

Вплив модульованих аксіальних КМП на кристалізацію і, відповідно, показник якості швів, оцінювали за їх стійкістю до утворення гарячих тріщин при ТІГ - зварюванні алюмінієвого сплаву АМгб. У процесі експериментальних досліджень істотне скорочення у пробах довжин гарячих тріщин фіксували у випадках, коли частота імпульсів КМП була 170ч220Гц (рис.11). Макроструктурний аналіз, проведений для пояснення зазначеного ефекту, показав, що на режимах ЕМД, близьких до оптимальних, подрібнення кристалітів відбувалося у всьому перерізі швів. У решті випадків у центральній області швів зміни структури були менш помітними, ніж поблизу лінії сплавлення. На цій основі зроблено висновок, що існує залежність між частотою імпульсів КМП і відстанню, на яку розповсюджуються у напрямі фронту кристалізації створювані з його допомогою вертикальні коливання розплаву. Наявність у залежності на рис.11 екстремуму пояснюється виникненням при оптимальних  $f_{imn}$  у об'ємі ванни резонансних явищ.

Узагальнені у даному розділі результати експериментальних досліджень свідчать про підвищені можливості ЕМД на основі комбінованих аксіальних і центрально-носиметричних, аксіальних і поперечних та аксіальних низько- і високочастотних магнітних полів щодо комплексного керування процесами кристалізації і формування швів, масопереносом електродного дроту.

**Четвертий розділ** роботи присвячено розробці розрахункових схем і визначенню умов оптимальності параметрів досліджуваних комбінованих ЕМД. Через роздільність у часі різних фаз комбінованих ЕМД або відмінність на два порядки частоти застосованих при їх реалізації КМП, для досягнення максимального загального технологічного ефекту достатньо визначити принципи оптимізації параметрів кожного із них.

При створенні розрахункової схеми для оптимізації параметрів низькочастотних аксіальних КМП було зроблено такі припущення: під час зварювання має місце плоский процес плавлення і кристалізації; форма фронту плавлення описується рівнянням окружності, а фронту кристалізації - еліпсу (рис.12); основна частина зварювального струму в розплаві рівномірно розтікається через сектор головної частини ванни, обмежений кутом.

Під дією аксіального КМП у зварювальній ванні формуються потоки розплаву, переміщення яких із головної у хвостову її частину відбувається по черзі вздовж кожного із бічних фронтів кристалізації з частотою зміни полярності магнітного поля. Для забезпечення максимально ефективного керування кристалізацією швів час  $\tau_e$  переміщення потоку розплаву на відстань, яка дорівнює довжині бічної поверхні хвостової частини ванни  $L_{кр}$ , повинен відповідати часу  $\tau_k$  проростання фронтом кристалізації нерівноважної переохолодженої зони:.

У найбільш віддаленій від дуги точці хвостової частини ванни, де  $ДХ$  - ширина двофазної області,  $V_{зв}$  - швидкість зварювання. Для того, щоб потік досяг цієї точки, він повинен переміститись на відстань, де  $p$  і  $l$  - відповідно половина ширини і довжина хвостової області ванни. Щоб у зазначеній точці гарантовано відбулася задана



зміна градієнту температур, через переріз необхідно перемістити об'єм розплаву:, де  $r_d$  - радіус відхилення дуги поперечною складовою КМП,  $\delta$  - товщина з'єднання, що зварюється. Даний параметр оцінювали за допомогою розмірного комплексу, отриманого на основі формули Пуазейля:, де  $I_{зв}$  - зварювальний струм;  $B_z$  - аксіальна складова індукції КМП;  $\beta$  - динамічна в'язкість розплаву,. З урахуванням того, що  $\tau_e$  дорівнює часу  $t_{pz}$  між двома послідовними змінами полярності КМП, де - узагальнений показник ЕМД. Необхідні для визначення  $A_z$  геометричні параметри ванни розраховували за теорією теплових процесів при зварюванні.

Проведені з використанням наведених залежностей дослідження оптимальних величин  $A_z$  для різних класів матеріалів показали, що їх значення відрізняються від визначених експериментально не більше ніж на 10ч15%, що свідчить про достатню точність розробленої розрахункової схеми.

При виборі розрахункової схеми ванни для умов зварювання з ЕМД на основі центральносиметричних радіальних КМП враховували, що у головній її частині формуються вертикально спрямовані потоки розплаву. При належній полярності магнітного поля вони переміщуються вздовж донної поверхні ванни у напрямку фронту кристалізації. При цьому у наслідок зменшення товщини рідкого прошарку під дугою і розмивання донної поверхні ванни відбувається збільшення глибини проплавлення швів.

Верхня поверхня розплаву ванни має складну геометричну форму, яка залежить від параметрів режиму зварювання і теплофізичних властивостей матеріалів. При створенні розрахункової схеми були зроблені такі спрощення. Під тиском дуги у її передній частині утворюється кратер сферичної форми радіусом  $R_k$ . Витіснений із під дуги розплав переміщується у хвостову частину ванни і під дією сили поверхневого натягу набуває найбільш компактної форми. У наслідок цього у поздовжньому її перерізі (рис.13) поверхня розплаву має вид двох спряжених у точці А дуг, радіуси яких дорівнюють:, де  $b_{шв}$  - ширина шву,  $h_A$  - відстань від поверхні зварного з'єднання до точки спряження дуг;- глибина кратеру;  $h_{np}$  - глибина проплавлення;  $\delta$  - висота рідкого прошарку під дугою;  $r_A$  - радіус провідності дуги;  $l_{кр}$  - довжина хвостової частини ванни. У точці F на дні кратеру силова дія дуги на зварювальну ванну урівноважується різницею сил гідростатичного і гідродинамічного тиску розплаву:, де :  $V_n$  - швидкість потоку розплаву із щільністю  $\rho$ ;  $\mu_0$  - магнітна стала;  $h_D$  - максимальна висота розплаву у хвостовій частині ванни відносно поверхні з'єднання;  $F_F$  - його площа на глибині  $h_k$ .

Швидкість потоку розплаву  $V_n$  оцінювали за залежністю:, де  $\beta$  - динамічна в'язкість розплаву;  $B_y$  - радіальна складова індукції КМП (змінюючи її величину задавали інтенсивність ЕМД).

Необхідні для розрахунку глибини кратеру  $h_k$  величини  $h_A$  і  $h_D$  також визначали із рівнянь балансу сил поверхневого натягу з різницею сил гідростатичного і гідродинамічного тиску розплаву у точках А і В:

; , де:  $u_{p-z}$  і  $u_{p-m}$  – коефіцієнти поверхневого натягу відповідно між розплавом і захисним газом і розплавом і твердим металом;  $i_3$  – кут змочування;  $l_e$  – поверхневий периметр ванни;  $F_A$  і  $F_B$  – площі розплаву на рівнях зазначених точок.

При генеруванні радіальних центральносиметричних КМП дуга як джерело нагріву не змінює своєї сконцентрованості і, відповідно, здатності проплавляти. Потoki розплаву, переміщуючись із головної частини ванни вздовж її донної поверхні зменшують  $\delta$ , що спричинює збільшення  $h_{np}$ . Одночасно з цим збільшується  $h_D$ , зменшуються  $R_1$  і  $R_3$  і, як наслідок, зростає крутизна задньої поверхні кратеру. До того, зменшення  $\Sigma_3$  спричинює винос розплаву за межі фронту кристалізації ванни і утворення підсилення на верхній поверхні швів. Зазначені зміни відбуваються до тих пір, поки  $R_1 > r_A$ . Порушення даної умови при надмірному збільшенні індукції КМП призводить до переміщення розплаву із хвостової частини ванни під дугу, збільшуючи  $\delta$ .

Таким чином, оптимальною для збільшення глибини проплавлення швів є індукція центральносиметричного магнітного поля, при якій у наслідок збільшення швидкості потоків розплаву вздовж донної поверхні ванни зменшується об'єм її головної частини до рівня, при якому радіус кратеру є більшим за радіус провідності дуги.

У випадку застосування ЕМД з мультивекторними ортогональними КМП максимально можливого зменшення  $\delta$  необхідно досягати за час  $t_{pY}$ , який визначає тривалість періодів генерування  $V_Y$ . У даному випадку задачу вибору оптимальних параметрів центральносиметричного радіального КМП також вирішували за допомогою розмірного комплексу, отриманого на основі формули Пуазейля. У цій залежності;  $V_3$  – об'єм розплаву, який за час  $t_{pY}$  необхідно перемістити із під дуги у хвостову частину ванни. У періоди генерування аксіального КМП дуга набуває форми конусу, у наслідок чого істотно зменшується її силовий тиск на розплав ванни. За цих обставин вважали, що у ці часові інтервали  $h_k = 0$ . До того, у періоди генерування  $V_Y$  при оптимальних  $\delta$  кратер за формою не значно відрізняється від сегменту сфери радіусом  $b_{шв}/2$  і висотою  $h_k$ . Зазначені припущення дозволили спростити розрахунок  $V_3$ .

При зварюванні з ЕМД на основі імпульсних КМП електромагнітна сила, що діє на краплі розплавленого металу на торці плавкого електроду у напрямку від індуктора дорівнює:, де  $W_M$  - електромагнітна енергія системи. Для випадку двох взаємозв'язаних контурів, де:  $L_1$  і  $i_1$  – індуктивність і струм розрядного кола;  $L_2$  і  $i_2$  – те ж краплі;  $M_{12}$  – їх взаємна індуктивність. У цій залежності добуток  $M_{12} \cdot i_1$  дорівнює потоку індукції магнітного поля через переріз краплі:, де:  $B_Z$  – аксіальна складова індукції імпульсного КМП.

Приймали, що краплі являють собою виток циліндричної форми радіусом  $r_k$  і висотою. Це дозволило використати класичне рішення для обчислення індуктивності краплі:, де:  $\mu_0$  - магнітна проникність вакууму,  $F_1$  – параметр, величина якого залежить від співвідношення розмірів контуру. Величину індукованого у об'ємі кра-

пель вихрового струму знаходили із співвідношення:, де:  $\omega$  - частота імпульсного КМП;  $c_o$  – питомий електричний опір розплаву крапель.

З урахуванням наведених залежностей електромагнітна сила дорівнює:, де:  $h$  – відстань, на яку необхідно перемістити краплю для її відділення із торця електроду (рис.14);  $r_{el}$  – радіус електродного дроту;  $i$  - аксіальна складова індукції імпульсного КМП відповідно на торці електроду і на відстані  $h$  від нього.

Вважали, що при зварюванні у нижньому положенні: з використанням зазначених ЕМД баланс основних сил, що діють на краплі, має вигляд:, де:  $P_{ED}$ ,  $P_T$  і  $P_y$  – відповідно електродинамічна сила, сила тяжіння і сила поверхневого натягу. Їх величини знаходили із залежностей, де:  $g=9,81\text{м/с}^2$ ;  $\sigma_{M-T}$  - коефіцієнт поверхневого натягу на границі метал краплі - захисний газ;  $\mu$  і  $\rho$ - відповідно магнітна проникність і густина розплаву краплі;  $V_k$  – її об'єм. Користуючись наведеними вище формулами отримано залежність для розрахунку оптимального діапазону індукції КМП в області торцю електроду:.

Таким чином, оптимальною є індукція імпульсного КМП, яка створює у об'ємі крапель заданого розміру електромагнітну силу у напрямі від індуктору, величина якої достатня для їх відриву з торця електродного дроту. Частоту повторення імпульсів слід узгоджувати з часом утворення крапель, який є залежним від параметрів режиму зварювання і теплофізичних властивостей дроту.

При реалізації технологій широкошарового наплавлення з ЕМД одним із найважливіших показників, за яким оцінюють якість формування наплавлених шарів, є стабільність у всьому їх перерізі глибини проплавлення матеріалу основи. У даному випадку для забезпечення якості формування з'єднань необхідне визначення закону зміни за допомогою ЕМД швидкості руху дуги при її переміщенні від одного до другого краю робочої зони. Дану задачу вирішували шляхом моделювання процесу розповсюдження тепла у матеріалі виробу. Для урахування характеру руху дуги найбільш раціональним рішенням є розташування з однаковим кроком на поверхні робочої зони миттєвих джерел тепла (МДТ) (рис.15). Інтенсивність ЕМД на кожній елементарній ділянці задавали швидкістю переміщення дуги, яку розраховували за залежністю, де  $e$ ,  $m$  – відповідно заряд і маса електрону;  $l$  – середня довжина його вільного пробігу;  $E$  – напруженість електричного поля у стовпі дуги;  $B_{Xj}$  – поперечна по відношенню до напрямку її переміщення складова КМП у місці розташування  $j$ -го МДТ.

Точка  $O$ , у якій розраховували зміни температур, мала координати  $x_o$ ,  $y_o$  і  $z_o$ . При цьому дві перші із них були кратні відповідно  $l_x$  і  $l_y$ . Через те, що дуга здійснює зворотно-поступальні рухи, при моделюванні окремо враховували вплив на загальний розподіл температур МДТ, розташованих на траєкторії руху дуги праворуч і ліворуч. Із урахуванням зазначеного вище зміни температури у точці  $O$ , де:  $Q$  – потужність джерела тепла;  $U_o$  і  $I_n$  – відповідно напруга на дузі і струм наплавлення;  $\eta$  - коефіцієнт корисної дії джерела тепла;  $l$  і  $c\sigma$  - відповідно коефіцієнт теплопровідності і питома теплоємність;  $R_{n_{ij}}$  і  $R_{l_{ij}}$  - відстані від точки  $O$  до  $ij$ -х миттєвих джерел

тепла, розташованих на траєкторії руху дуги при її переміщенні відповідно праворуч і ліворуч.

Перевірка адекватності розробленої математичної моделі показала, що розрахункові дані відрізняються від експериментальних не більше ніж на 12%, що свідчить про її достатню точність. Збільшення глибини проплавлення на краях робочої зони пояснюється тим, що при зворотно-поступальному русі дуги із віддаленням від центру шару, що наплавляється, зменшуються часові інтервали між двома поспіль енерговнесеннями у виріб. Для стабілізації даного параметру формування швидкість переміщення дуги у центрі шару повинна бути мінімальною і збільшуватись за експоненціальним законом при наближенні до його країв.

Наведені у даному розділі розрахункові схеми дозволяють з достатньою точністю здійснювати оптимізацію індукції і частоти аксіальних низько- та високочастотних і поперечних КМП. Визначення параметрів комбінованих КМП потребує їх сумісного використання.

**П'ятий розділ** присвячено питанням технічного забезпечення процесів дугового зварювання з комбінованими ЕМД і перспективним напрямом їх подальшого удосконалення і використання. На основі проведених досліджень сформульовано вимоги і викладено принципи створення спеціалізованого обладнання. Показано, що електромагнітні системи слід створювати не у вигляді автономних пристроїв, а вузлів і доповнювати ними конструктивні схеми найкращих зразків серійного технологічного обладнання. Загальними ознаками розробленого інструменту є розміщення електромагнітів всередині корпусних елементів, віддалення котушок намагнічування полюсів на достатню відстань від робочої зони і використання у якості магнітопроводів нижніх частин осердь. Це дозволило досягти компактності соплової частини пальників. При цьому забезпечувались нормальні теплові умови експлуатації електромагнітів при відсутності у їх складі вузлів примусового водяного охолодження.

В останній час існує тенденція найбільш динамічного розвитку роботизованих способів зварювання і наплавлення у середовищі захисних газів. Для забезпечення можливості застосування ЕМД у даних технологічних процесах, враховуючи практично безперервний режим роботи зварювального обладнання, всі розроблені спеціалізовані пальники і головки оснащено системами примусового водяного охолодження елементів струмопідводу. Для реалізації найбільш ефективних ЕМД з комбінованими КМП, у яких векторні характеристики відповідають просторовому розташуванню зварювальної ванни, вузли генерування магнітного поля у цьому технологічному устаткуванні являють собою багатополюсні ЕМС.

Узагальнено результати робіт, спрямованих на створення пристроїв автоматичного керування ЕМД, що відповідають сучасному рівню розвитку зварювального устаткування. Функціональні схеми, часові діаграми роботи і принципи функціонування розроблено з урахуванням можливості їх реалізації за допомогою однокристальних ЕОМ або спеціалізованих контролерів. Це забезпечує підвищену надійність апаратних засобів і простоту підстроювання параметрів КМП під специфічні умови зварювання з'єднань або наплавлення поверхонь будь якої просторової форми шляхом коректування програмного забезпечення.

З метою подальшого удосконалення способів магнітного керування процесами дугового зварювання і розширення області їх застосування сумісно із співробітниками ІЕЗ ім. Є.О.Патона проведено комплекс досліджень, спрямованих на перевірку ефективності застосування ЕМД на основі аксіальних низькочастотних КМП в умовах мокрого підводного зварювання конструкційної сталі 17Г1С порошковим дротом ППС-АН2. Виявлено, що при оптимальних параметрах КМП сумарний вміст водню у швах зменшується у 2,5 рази. Головним чином це відбувається через зменшення його дифузійної складової. Зменшенням завдяки ЕМД насиченості швів воднем пояснюється зафіксоване у процесі макроструктурного аналізу зменшення більш ніж у 8 разів сумарного об'єму пор. Головним чином це відбувається у наслідок зниження кількості пор великого розміру (більшого за 16мкм). До того, на відміну від швів, одержаних зварюванням за штатною технологією, пори дрібних розмірів були рівномірно розташовані по всьому перерізу швів, а не тільки поблизу лінії сплавлення.

Зазначені обставини спричинили збільшення завдяки ЕМД пластичності і механічних властивостей швів. Границі міцності і текучості підвищились відповідно на 8,5% і на 10% , а відносно подовження і звуження ділянки руйнування – на 66% і 33%. Показано, що застосування ЕМД з оптимальними параметрами КМП дозволяє на 13% знизити мікротвердість швів і на 15% - зони термічного впливу. Зазначені показники поліпшувались і у наслідок позитивних змін у мікроструктурах швів. При зварюванні за штатною технологією вони складаються переважно із перліту з дуже тонкими феритними прошарками по границях кристалів. У мікроструктурах швів, отриманих зварюванням з ЕМД, поряд зі збільшенням товщини феритних прошарків проглядаються ділянки структурно вільного фериту, що може бути наслідком підвищення дифузійної рухливості вуглецю через зменшення кількості недосконалостей кристалічної ґратки.

Порівняльний аналіз результатів зварювання з ЕМД матеріалів одного класу в звичайних умовах і під водою показав подібність залежностей показників якості швів від параметрів КМП. Це дозволяє стверджувати, що для подальшого удосконалення технологій підводного мокрого зварювання з ЕМД необхідне застосування модульованих аксіальних КМП, які є одним із видів комбінованих магнітних полів.

### **Висновки по роботі**

Основні наукові положення роботи, виявлені закономірності, запропоновані принципи, розроблені способи і засоби для їх реалізації полягають у наступному:

1. Виникнення побічних негативних ефектів при зварюванні з використанням розроблених у минулі роки способів ЕМД тільки на основі аксіальних і радіальних магнітних полів пов'язано з різною їх дією на дугу як джерело нагріву і краплі на торці електродного дроту з одного боку, і розплав ванни з другого. Комплексне поліпшення процесів формування та кристалізації швів можливе при одночасному або почерговому генеруванні у зоні зварювання магнітних полів з різними амплітудними, частотними і векторними характеристиками, що є ознакою комбінованих КМП.

2. Комбінування магнітних полів шестиполюсних циліндричних і багатополюсних лінійних електромагнітних систем дозволяє генерувати у зоні зварювання всі їх

необхідні конфігурації для керування переміщеннями розплаву і геометричним розташуванням дуги. Так при паралельному ввімкненні усіх полюсів створюються аксіальні КМП з індукціями до 20мТ, а при послідовному - центральносиметричні радіальні, які характеризуються відсутністю індукції на поздовжній осі дуги і її максимальними значеннями до 10мТ у головній і хвостовій частині ванни. Почергове генерування аксіальних і центральносиметричних радіальних КМП створює у зоні зварювання мультивекторні магнітні поля. Узгоджене ввімкнення пар протилежно розташованих електромагнітів дозволяє створювати радіальні магнітні поля з індукціями до 8мТ, а їх послідовне підключення – обертальні магнітні поля.

ЕМД на основі аксіальних і обертальних магнітних полів доцільно застосовувати для поліпшення кристалізації швів, а радіальних і центральносиметричних – для змін їх геометричних параметрів.

3. Встановлено, що в умовах зварювання неплавким електродом для збільшення до 65% глибини проплавлення швів у наслідок зменшення висоти екрануючого рідкого прошарку під дугою найбільш ефективними є ЕМД, що спричинюють створення у головній частині ванни вертикальної, спрямованої до її дна об'ємної силової дії на розплав. Це досягається генеруванням у зоні зварювання радіальних центральносиметричних КМП, у яких в головній частині ванни у секторі, обмеженому центральним кутом  $\beta_n=60^\circ \div 120^\circ$ , генерується поперечне магнітне поле з індукцією  $6 \div 10$ мТ.

Дещо менше (до 40%) збільшення глибини проплавлення досягається поздовжніми відхиленнями дуги радіальним КМП, у якого через проміжки часу 0,03ч0,05с, достатньою для формування відцентрових потоків розплаву, змінюється на протилежний напрямів потоку індукції, величиною 8ч10мТ.

4. Встановлено, що при зварюванні неплавким електродом подрібнення структури швів у наслідок повторної кристалізації, скорочення на 30% температурного інтервалу крихкості забезпечуються як почерговими переміщеннями перегрітого розплаву із головної і центральної частин ванни вбік фронту кристалізації, так і інтенсивними коливаннями всього її об'єму. Це досягається генеруванням у зоні зварювання:

- аксіальних низькочастотних КМП з індукцією 12мТ і частотою 25Гц;
- обертальних з частотою 20÷35Гц КМП з індукцією 8ч10мТл;
- аксіальними модульованими КМП (для сплаву АМг6 з частотою 215Гц і індукцією 100мТ).

5. При дуговому зварюванні неплавким електродом одночасне подрібнення структури швів і збільшення до 40ч45% глибини їх проплавлення досягається при об'ємному керуванні гідродинамікою розплаву ванни шляхом почергового переміщення розплаву із головної частини ванни у хвостову як вздовж її бічних, так і донної поверхні комбінованими ЕМД, які ґрунтуються на почерговому генеруванні у робочій зоні аксіальних знакозмінних і центральносиметричних радіальних КМП. При цьому за однакової їх індукції 15мТ тривалість часових інтервалів, у продовж яких діє аксіальне по відношенню до електроду магнітне поле, має бути не меншим за 0,04с і більшим у 2ч2,5 рази за тривалість часових інтервалів дії поперечного по відношенню до осі швів магнітного поля, яке забезпечує створення силової дії на розплав, спрямованої до дна ванни.

6. Встановлено, що при MIG-зварюванні створення у об'ємах крапель модульованими аксіальними магнітними полями (індукція 0,2ч0,8Тл; тривалість одного імпульсу – 0,15мс; їх частота – 30Гц) об'ємної імпульсної сили, спрямованої до зварювальної ванни зменшує на 20% втрати електродного металу на розбризкування та більше ніж у 2 рази діаметр крапель, відповідно збільшує частоту їх переносу. Вибір оптимальних параметрів даних електромагнітних дій забезпечується використанням розробленої розрахункової схеми, що враховує теплофізичні властивості електродного дроту та умови зварювання.

7. Виявлено, що при широкошаровому наплавленні неплавким електродом періодичне генерування багатополусною лінійною ЕМС радіального магнітного поля з індукцією у дуговому проміжку 7ч10мТл створює електромагнітну силу, що діє на дугу перпендикулярно напрямку наплавлення, спричинює покрокове її переміщення зі швидкістю до 1,4м/с, у наслідок чого забезпечується однакова глибина проплавлення по всій ширині шару.

8. Для визначення у інженерній практиці оптимальних параметрів аксіальних, поперечних і імпульсних магнітних полів з точністю, більшою за 90% розроблено розрахункові схеми, які ураховують специфіку різних способів зварювання, параметри їх режимів і особливості енерговнесення у шви, геометричні характеристики ванни і теплофізичні властивості зварюваних матеріалів.

9. На основі проведених досліджень сформульовано основні принципи створення спеціалізованого обладнання для зварювання і наплавлення з комбінованими ЕМД, які полягають у тому, що ЕМС слід створювати у вигляді вузлів і доповнювати ними конструктивні схеми найкращих зразків серійного технологічного обладнання. Функціональні схеми повинні забезпечувати можливість їх реалізації за допомогою однокристальних ЕОМ або спеціалізованих контролерів, що надає підвищену надійність апаратним засобам і простоту підстроювання параметрів КМП під специфічні умови зварювання з'єднань або наплавлення поверхонь будь якої просторової форми шляхом коректування програмного забезпечення.

10. Визначені перспективні напрямки застосування комбінованих ЕМД, зокрема, для умов мокрого підводного зварювання. Показано, що і у даних умовах застосування ЕМД з аксіальними КМП супроводжується позитивними змінами у гідродинаміці розплаву ванни, які проявляються у зниженні у 2,2ч2,5 рази вмісту водню у металі швів, подрібненні їх мікроструктурних складових, збільшенні коефіцієнту переходу легуючих елементів із дроту. Подальше удосконалення зазначеного способу зварювання потребує використання модульованих аксіальних магнітних полів, які додатково забезпечують інтенсивне керування процесами масопереносу електродного металу індукційним способом, що особливо актуально при орбітальному зварюванні кільцевих стиків.

### **Основні результати і положення дисертації опубліковані у таких роботах:**

1. *Рижов Р.М., Скачков І.О., Черниш В.П.* Повышение сопротивляемости сварных швов образованию горячих трещин при ручной дуговой сварке неплавящимся электродом // Автоматическая сварка. – 1997. - №4. – С. 25 – 29.

*Здобувачем узагальнено результати експериментальних досліджень, запропоновано спосіб комплексної оцінки впливу параметрів керуючих магнітних полів на процеси кристалізації швів.*

2. Черниш В.П., Рижов Р.М. Зависимость параметров управляющего магнитного воздействия от энерговложения в стык при дуговой сварке // Автоматическая сварка. – 1998. - №5. - С. 49 – 51.  
*Здобувачем досліджено вплив енергетичних параметрів режимів зварювання на оптимальні параметри зовнішніх електромагнітних дій.*
3. Рижов Р.М., Скачков І.О. Измерение внешних управляющих магнитных полей при дуговой сварке // Автоматическая сварка. – 1998. - №6. - С. 6 – 7.  
*Здобувачем розроблено функціональну схему приладу і перевірено її працездатність в реальних умовах.*
4. Максимов С.Ю., Пріліпко О.О., Рижов Р.М., Кожухар В.А. Влияние внешнего электромагнитного воздействия на содержание водорода в металле швов при мокрой подводной сварке // Автоматическая сварка. – 2003. – №6. – С. 55-56.
5. Рижов Р.М., Кожухар В.А., Максимов С.Ю., Пріліпко О.О. Применение внешних электромагнитных воздействий для улучшения механических свойств при подводной мокрой сварке // Автоматическая сварка. – 2004. – №11. – С. 53-54.  
*В роботах 4 і 5 здобувачем узагальнено результати експериментальних досліджень і зроблено їх порівняльний аналіз з даними інших авторів, отриманими в умовах зварювання під шаром флюсу.*
6. Рижов Р.М., Кузнецов В.Д., Малишев О.В.. Применение шестиполусной электромагнитной системы для управления параметрами формирования швов при сварке неплавящимся электродом // Автоматическая сварка. – 2004. – №2. – С. 45-49.  
*Здобувачем розроблено палних з електромагнітною системою, визначені найбільш доцільні схеми комутації її полюсів і узагальнено результати експериментальних досліджень.*
7. Рижов Р.М., Семенюк В.С., Тітов А.О. Особенности формирования и кристаллизации швов при TIG-сварке с отклонениями дуги магнитным полем // Автоматическая сварка. – 2004. – №4. – С. 17-20.  
*Здобувачем розроблені принципи створення різних типів обертальних магнітних полів і узагальнено результати експериментальних досліджень.*
8. Рижов Р.М., Сидоренко П.Ю., Золотовський А.О. Зависимость параметров внешних электромагнитных воздействий от технологических особенностей дуговых способов сварки // Вестник НТУУ "КПИ". – 2005. - №46. – С. 114 – 116.  
*Здобувачем узагальнено результати математичного моделювання і визначено вплив типових збурень на розподіл індукції у зоні зварювання.*
9. Рижов Р.М., Применение комбинированных электромагнитных воздействий для улучшения качества швов при сварке неплавящимся электродом // Автоматическая сварка. – 2005. – №7. – С. 59-61.
10. Рижов Р.М. Принципи об'ємного керування гідродинамікою розчину зварювальної ванни // Наукові вісті НТУУ „КПІ”. – 2005. - №4. – С.83 – 87.
11. Рижов Р.М., Кожухар В.А., Максимов С.Ю., Пріліпко О.О. Влияние внешних электромагнитных воздействий на микроструктуру и химический состав швов при подводной мокрой сварке. // Автоматическая сварка. - 2005. – №10. – С. 41-42.



*Здобувачем на основі аналізу мікроструктур зварних з'єднань і хімічного складу швів визначено оптимальні параметри керуючих магнітних полів.*

12. Рижов Р.М, Кузнєцов В.Д. Выбор оптимальных параметров внешнего электромагнитного воздействия при дуговых способах сварки // Автоматическая сварка. – 2005. – №6. – С. 59-61.

*Здобувачем розроблено розрахункову схему, що дозволяє вибрати оптимальні параметри керуючих магнітних полів, доведено її адекватність реальним умовам зварювання.*

13. Р.М. Рижов, В.Д. Кузнєцов, Е.А. Пріліпко. Методика расчета параметров управляющего электромагнитного воздействия при дуговой сварке конструкционных сталей // Вестник НТУУ "КПИ". – 2005. – №45. – С. 176 – 177.

*Здобувачем удосконалено розрахункову схему вибору оптимальних параметрів електромагнітних дій для умов зварювання як на повітрі, так і під водою.*

14. Рижов Р.М., Кузнєцов В.Д. Электромагнитные воздействия в процессах дуговой сварки и наплавки // Автоматическая сварка. – 2006. – №10. – С. 36-44.

*Здобувачем розроблено класифікацію керуючих магнітних полів, систематизовано і узагальнено дані відносно ефективності застосування різних електромагнітних дій в процесах дугового зварювання. Визначено найбільш перспективні шляхи удосконалення даних технологій.*

15. Рижов Р.М., Сидоренко П.Ю., Золотовський А.О. Принципы конструирования специализированных пальников для дугового зварювання з електромагнітними діями // Наукові вісті НТУУ "КПІ". – 2006.- №1.- С. 54 – 59.

*Здобувачем визначено методику розрахунку індукції магнітного поля і узагальнено результати моделювання.*

16. Рижов Р.М., Сидоренко П.Ю. Принципы выбора структуры многополюсных электромагнитных систем для керування процесами дугового зварювання // Наукові вісті НТУУ "КПІ". – 2006.- №3.- С. 76 – 82.

*Здобувачем розроблені принципи вибору структур і геометричних параметрів багатополюсних електромагнітних систем.*

17. Рижов Р.М., Максимов С.Ю., Пріліпко О.О. Влияние внешних электромагнитных воздействий на пористость швов при подводной мокрой сварке // Вестник НТУУ"КПИ". – 2006. - №48. - С. 226 – 229.

*Здобувачем узагальнено результати експериментальних досліджень.*

18. Рижов Р.М., Сидоренко П.Ю., Зімовченко О.Л. Принципы керування процесами широкошарового наплавлення з зовнішніми електромагнітними діями і конструювання головок для їх реалізації // Наукові вісті НТУУ "КПІ". – 2007.- №1.- С. 62 – 70.

*Здобувачем узагальнено результати математичного моделювання і розроблено принципи керування процесами широкошарового наплавлення з зовнішніми електромагнітними діями*

19. Рижов Р.М. Влияние импульсных электромагнитных воздействий на процессы формирования и кристаллизации швов // Автоматическая сварка. – 2007. – №2. – С. 56-58.

- 20 *W. Czernysz, R. Ryzhov, E. Tyrec.* Influence of electromagnetic effect in welding on the increase in resistance to hot cracking // *Welding international.* - 2004. – vol. 18. – p. 257 – 262.  
*Здобувачем узагальнено експериментальні дані впливу електромагнітних дій на параметри температурного інтервалу крихкості складнолегованих сталей і сплавів.*
- 21 *Малишев О.В., Рижов Р.М.* Пальник для зварювання з зовнішніми електромагнітними діями // Деклараційний патент на винахід №42252А В23К9/08. - 15.10.2001. - Бюл.№9.  
*Здобувачем розроблено електромагнітну систему, що входить до складу пальника.*
- 22 *Тітов А.А, Малишев О.В., Рижов Р.М.* Спосіб зварювання неплавким електродом з використанням зовнішніх комбінованих керуючих магнітних полів і пристрій для його реалізації // Патент на винахід №50430 У23Д09/08 15.10.2002. - Бюл. №10.  
*Здобувачем розроблено спосіб зварювання і функціональна схема пристрою для його реалізації.*
- 23 *Рижов Р.М., Кожухар В.А., Пріліпко Є.О., Максимов С.Ю.* Спосіб підводного мокрого зварювання з використанням електромагнітних полів // Патент на винахід №67511А В23К9/08 від 15.06.2004. - Бюл. №6.  
*Здобувачем розроблено спосіб зварювання.*
- 24 *Рижов Р.М., Зімовченко О.Л.* Спосіб дугового широкошарового наплавлення // Деклараційний патент на корисну модель №9158 В23К9/08. - 15.09.2004. - Бюл.№9.  
*Здобувачем розроблено спосіб широкошарового наплавлення неплавким електродом.*
- 25 *Рижов Р.М., Зімовченко О.Л.* Головка для широкошарового наплавлення з використанням поперечних магнітних полів // Деклараційний патент на корисну модель №9160 В23К9/08. - 15.09.2004. - Бюл.№9.
- 26 *Рижов Р.М., Зімовченко О.Л.* Головка для дугового широкошарового наплавлення // Деклараційний патент на корисну модель №15855 В23К9/08. - 17.07.2006. - Бюл.№7.  
*В роботах 25 і 26 Здобувачем розроблено конструктивні схеми головок.*
- 27 *Рижов Р.М.* Система стабилизации индукции магнитного поля при ручной аргонодуговой сварке с электромагнитными воздействиями // Тези доповіді на міжнародній науково-технічній конференції “Сварка и родственные технологии в XXI век”. Київ 1999 р.
- 28 *Рижов Р.М. Малишев О.В.* Особливості формування швів при TIG - зварюванні з шестипольною електромагнітною системою // Тези доповіді на міжнародному симпозиумі українських інженерів-механіків у Львові. Львів 2001р.  
*Здобувачем сформульовано механізм впливу центральносиметричних магнітних полів на процес формування швів.*
- 29 *Максимов С.Ю., Приліпко Є.О., Рижов Р.М., Кожухар В.А.* Применение внешних электромагнитных воздействий для улучшения качества швов при дуговой подводной сварке // Тези доповіді на міжнародній конференції “Со-

временные проблемы сварки и ресурса конструкций”, Київ, ІЕЗ ім. Є.О. Патона, 2003 г.

- 30 *Рижов Р.М., Кожухар В.А., Прилипко Є.О.* Применение внешних электромагнитных воздействий для улучшения механических свойств соединений при подводной мокрой сварке // Тези доповіді на II всеукраїнській науково-технічній конференції молодих учених та спеціалістів “Зварювання та суміжні технології”, Київ, 2003р.  
*В роботах 29 і 30 Здобувачем узагальнено результати досліджень.*
- 31 *Рижов Р.М., Ярошенко В.М.* Применение комбинированных электромагнитных воздействий для комплексного улучшения параметров качества швов при сварке неплавящимся электродом // Тези доповіді на III всеукраїнській науково-технічній конференції молодих учених і спеціалістів „Зварювання та суміжні технології”, Київ, 2005р.  
*Здобувачем сформульовано принципи об’ємного керування параметрами якості швів.*
- 32 *Рижов Р.М., Зімовченко О.Л.* Применение электромагнитных воздействий для управления параметрами перемещения дуги при широкослойной TIG-наплавке // Тези доповіді на III всеукраїнській науково-технічній конференції молодих учених і спеціалістів „Зварювання та суміжні технології”, Київ, 2005р.  
*Здобувачем розроблено принципи керування зворотно-поступальними рухами дуги при зварюванні неплавким електродом.*
- 33 *Рижов Р.М., Зімовченко О.Л.* Применение широкослойной импульсно-дуговой наплавки с электромагнитными воздействиями для управления параметрами формирования наплавляемого слоя // Тези доповіді на республіканській науково-методичній конференції "Современные проблемы сварки, наплавки и материаловедения", Маріуполь, ПГТУ, 2005р.  
*Здобувачем сформульовано особливості процесу формування наплавленого шару при імпульсному горінні дуги.*
- 34 *Зімовченко О.Л., Рижов Р.М.* Моделювання теплових процесів у виробі при дуговому широкошаровому наплавленні // Тези доповіді на IV всеукраїнській науково-технічній конференції молодих учених і спеціалістів „Зварювання та суміжні технології”, Київ, 2005р.  
*Здобувачем розроблено принципи побудови математичної моделі.*
- 35 *Сидоренко П.Ю., Рижов Р.М., Бережний Д.В.* Экспериментальная оценка силового влияния внешних импульсных электромагнитных полей на процессы массопереносу электродного дрота // Тези доповіді на IV всеукраїнській науково-технічній конференції молодих учених і спеціалістів „Зварювання та суміжні технології”, Київ, 2005р.  
*Здобувачем узагальнено результати досліджень.*

#### АНОТАЦІЯ

Рижов Р.М. Дугове зварювання з комбінованими електромагнітними діями. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.03.06 – зварювання та споріднені процеси і технології. Національний технічний університет України “Київський політехнічний інститут”, Київ, 2008 р.

Дисертація присвячена розробці наукових основ дугового зварювання з комбінованими електромагнітними діями, які забезпечують комплексне поліпшення показників якості з'єднань.

На основі аналізу технологічних можливостей ЕМД показано, що для комплексного поліпшення показників якості швів їх слід реалізовувати з використанням комбінованих магнітних полів, що генеруються у робочій зоні багатополісними електромагнітними системами. Визначення їх структур як для умов зварювання плавким і неплавким електродом, так і для широкошарового наплавлення неплавким електродом здійснено за допомогою розроблених розрахункових схем і математичних моделей.

Виявлені закономірності, що пов'язують позитивні зміни показників якості швів з амплітудними, векторними і частотними характеристиками зовнішніх КМП. На їх основі розвинуті уявлення про механізми впливу ЕМД на процеси формування і кристалізації швів і наплавлених шарів, масоперенос електродного дроту. На основі сформульованих умов оптимізації розроблені розрахункові схеми для аналітичного визначення параметрів ЕМД з урахуванням специфіки режимів зварювання, наплавлення і теплофізичних властивостей матеріалів.

На основі проведених науково-дослідних робіт сформульовані основні вимоги і принципи створення комплексу спеціалізованого обладнання для зварювання і наплавлення з ЕМД. Розроблені конструктивні схеми пальників, насадок і головок, функціональні схеми і алгоритми роботи апаратів автоматичного керування ЕМД.

*Ключові слова:* дугове зварювання і наплавлення, електромагнітні дії, магнітні поля, параметри формування і кристалізації швів, гарячі тріщини, масоперенос, математичні моделі.

## АННОТАЦІЯ

Рыжов Р.Н. Дуговая сварка с комбинированными электромагнитными воздействиями. – Рукопись.

Диссертация на соискание научной степени доктора технических наук по специальности 05.03.06 – сварка и родственные процессы и технологии. Национальный технический университет Украины “Киевский политехнический институт”, Киев 2008 г.

Диссертация посвящена разработке научных основ дуговой сварки с комбинированными электромагнитными воздействиями, которые обеспечивают комплексное повышение показателей качества соединений.

На основе анализа технологических возможностей электромагнитных воздействий показано, что для комплексного улучшения показателей качества швов их следует реализовывать с помощью комбинированных магнитных полей, генерируемых в рабочей зоне многополюсными электромагнитными системами. Определение их структур как для условий сварки плавящимся и неплавящимся электродом, так и для широкослойной наплавки неплавящимся электродом осуществлено с помощью разработанных расчетных схем и математических моделей.

Определены закономерности, связывающие положительные изменения показателей качества швов с амплитудными, векторными и частотными характеристика-

ми внешних управляющих магнитных полей. На их основе развиты представления о механизмах влияния электромагнитных воздействий на процессы формирования и кристаллизации швов, массоперенос металла электродной проволоки. На основе сформулированных условий оптимизации разработаны расчетные схемы для определения параметров электромагнитных воздействий, учитывающие специфику режимов сварки, наплавки и теплофизические свойства материалов.

Сформулированы основные требования и принципы создания комплекта специализированного оборудования для сварки и наплавки с электромагнитными воздействиями. Разработаны конструктивные схемы горелок, насадок и головок, функциональные схемы и алгоритмы работы аппаратов автоматического управления данными импульсными воздействиями.

*Ключевые слова:* дуговая сварка и наплавка, электромагнитные воздействия, магнитные поля, параметры формирования и кристаллизации швов, горячие трещины, массоперенос, математические модели.

### **ABSTRACT**

Ryzhov R. M. Arc welding with combined electro-magnetic affect.

Thesis for the degree of Doctor's degree on speciality 05.03.06 – welding and related processes and technologies. National technical university of Ukraine “Kyiv Politechnical Institute”, Kyiv, 2008.

Qualification work is devoted to development of scientific bases of arc welding and surfacing with combined electro-magnetic affect used to improve the quality characteristics of joints.

The analysis of technological abilities of traditional magnetic affect has shown that combined magnetic fields may improve quality characteristics of joints. Magnetic systems' structure for MAG, MIG and TIG welding conditions and for wide-bead surfacing was done using mathematic simulation.

Relationship between increasing of quality characteristics of joints and different types of characteristics of magnetic fields was determined. They allowed to determine how the magnetic affect influences the formation processes and crystallization of welds and beads. Methods of determination of parameters of magnetic affect basing on welding conditions and material characteristics were developed.

Basic characteristics and principles of design of special welding equipment complexes were determined. Schemes of welding torches and nozzles, functional schemes and working algorithms of monitoring and control systems were developed.

*Key words:* arc welding and surfacing, electro-magnetic affect, magnetic fields, formation and crystallization parameters of joints, hot cracks, metal transporting, mathematical models.