

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
"КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ"

На правах рукопису

РОЗМИШЛЯЄВ
Олександр Денисович

УДК 621.791.927.5

**ФІЗИЧНІ ОСНОВИ ФОРМОУТВОРЕННЯ ВАЛИКІВ ТА
ШВІВ ПРИ ДУГОВОМУ НАПЛАВЛЕННІ Й
ЗВАРЮВАННІ З КЕРУЮЧИМИ ДІЯМИ**

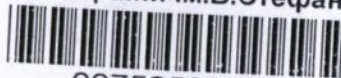
05.03.06-

технологія та обладнання для
зварювання і споріднених процесів

АВТОРЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового ступеня
доктора технічних наук

Київ 1996



Дисертацією є рукопис

Робота виконана в Приазовському державному технічному університеті

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор

КУЗНЕЦОВ В.Д.;

доктор технічних наук, професор

ПЕНТЕГОВ І.В.;

доктор технічних наук, професор

ГРИГОРЕНКО Г.М.

Провідна установа: концерн "Азовмаш", м.Маріуполь

Захист відбудеться "14" 10 1996р. о 15⁰⁰ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 01.02.10 по присудженню наукового ступеня доктора технічних наук в Національному технічному університеті України "Київський політехнічний інститут", корпус 23, аудиторія 323

З дисертацією можна ознайомитись в науково-технічній бібліотеці університету

Відгук на автореферат (1 примірник, затверджений печаткою) прохання направляти за адресою: 252056, Київ-56, проспект Перемоги, 37, КПІ-213.

Автореферат розіслано 28 08 1996р.

Вчений секретар спеціалізованої

вченої ради

Коршенко Є.О.

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність проблеми. Працездатність зварних конструкцій при поперемінних навантаженнях у більшій мірі визначається величиною концентрації напруг. У стикових з'єднаннях без дефектів швів концентрація напруг локалізується в місті сполучення наплавленого металу з основним металом і при рівній площині посилення шва визначається співвідношенням ширини шва до висоти його посилення. Співвідношенням глибини проплавлення основного металу до ширини шову визначається технологічна міцність металевих швів. Долею основного металу у наплавленому визначається ефективність процесу наплавки, особливо процесу наплавки легированих шарів металу.

Негативна роль концентраторів напруг виявляється при деяких технологічних операціях, наприклад, при вальцюванні зварних виробів, що викликає утворення тріщин у цій зоні. При нанесенні шару емалі на внутрішню поверхню реакторів хімічного виробництва, емаль відшукється в цій же зоні зварного з'єднання. Можливості відомих технологічних прийомів регулювання розмірами швів при автоматичному електродуговому зварюванні електродним дротом обмежені. Перспективним для цих цілей є використання керуючих поперечних та поздовжніх магнітних полів. Але протиріччя літературних даних, що маємо, а також недостатня вивченість процесів взаємодії керуючих магнітних полів із зварювальною дугою та рідким металом ванни не дозволяє використовувати їх з максимальною ефективністю. При цьому не розв'язано такий важливий аспект технології, як можливість визначення розрахунковим шляхом геометричних розмірів швів у перерізі при дуговому зварюванні електродним дротом під флюсом з керуючими впливами.

Перспективним засобом підвищення довговічності деталей металургійного обладнання, робочих органів будівельних, дорожніх та сільськогосподарських машин є нанесення на них шару металу із заданими фізико-механічними якостями методом автоматичної електродугової наплавки стрічковим електродом під флюсом. Але підвищена схильність до утворення дефектів формування металу, недостатня вивченість особливостей процесів плавлення електродного й основного металів та природи утворення дефектів формування не дозволяють обґрунтувати способи та засоби керування формуванням валиків та з максимальною ефективністю



використовувати спосіб наплавки стрічковим електродом під флюсом.

Недостатня вивченість причин блукання активного п'ятна дуги по виробу при механізованому зварюванні плавким електродом (ЗПЕ) із захистом зони дуги аргонном хромонікелевих типу 18-10 сталей та погіршення формування швів перешкоджає широкому використанню цього способу зварювання в промисловості.

А тому вирішувані в даному дослідженні задачі з теоретичного узагальнення й встановлення закономірностей утворення форми шва при електродуговому зварюванні плавким електродом, розробці принципів і засобів керування формуванням металу при зварюванні й наплавці є актуальним для народного господарства.

Мета роботи полягала у підвищенні ефективності процесів електродугової наплавки й зварювання плавким електродом шляхом керування формоутворенням валиків та швів.

Для досягнення поставленої мети необхідно було вирішити такі задачі:

- вивчити відомі способи керування формою та розмірами зони проплавлення основного металу та посилення валика й шва під час електродугової наплавки й зварювання плавким електродом;

- дослідити особливості розпливання струму та гідродинамічних процесів у зварювальній ванні при електродуговій наплавці;

- дослідити процеси взаємодії зварювальної дуги та рідкого металу ванни з керуваними магнітними полями під час електродугової наплавки й зварювання плавким електродом під флюсом;

- розробити засоби керування формоутворенням валиків і швів при дуговій наплавці й зварюванні плавким електродом під флюсом;

- розробити засоби розрахункового опису розмірів поперечного перерізу наплавленого валика й шва стикового з'єднання при електродуговій наплавці й зварюванні електродним дротом під флюсом з керуваними впливами та під час наплавки стрічковим електродом під флюсом.

При вирішенні поставлених задач вихідні дані й передпосилки базувалися на результатах теоретичних та експериментальних досліджень Б.Є.Патона, І.І.Фрумїна, Г.І.Лєскова, К.В.Багрянського, Л.К.Лєщинського, В.П.Черниша, В.Д.Кузнєцова, В.І.Махненко, В.І.Труфікова, А.М.Болдирєва, І.Р.Пацькевича, С.Л.Мандельберга, В.К.Лебедева, І.В.Пентєгова, Н.Н.Рикаліна, А.О.Єрохіна, Б.М.Бєрезовського, В.П.Дем'янцеви́ча, В.І.Столбова, Г.Г.Чернишова, В.І.Щетініної, С.В.Гулакова та інших авторів.

Методи дослідження. Експериментальні дослідження розподілу струму, виміру густоти струму в рідкому металі ванни виконані на фізичних моделях.

Розподілення потенціалів у виліті й магнітного поля від струму у виліті стрічкового електроду досліджено на фізичних моделях, а також методами математичного моделювання з використанням ЕОМ.

Для розрахунку розмірів і форми зони проплавлення основного металу при наплавці й зварюванні стикових з'єднань електродним дротом використано метод математичного моделювання.

Процес плавлення стрічкового електроду у відкритій дузі досліджено з використанням швидкісної кінозйомки з синхронним осцилографуванням, методу калориметрування електродних крапель. Розподіл температур у виліті електроду отримано методом термографування.

У роботі використовувались стандартні методи оцінки зносостійкості наплавленого металу міцнісних якостей зварних з'єднань, оцінки схильності їх до міжкристалічної корозії та структурного аналізу металу.

Наукова новизна. Сформульовані основні науково-теоретичні положення вирішення проблеми підвищення ефективності процесів електродугової наплавки й зварювання плавким електродом шляхом керування формоутворенням валиків та швів.

Фізичним та математичним моделюванням встановлено, що у головній частині ванни швидкість потоків рідкого металу визначається, в основному, тиском дуги, а у хвостовій частині ванни під дією електромагнітних сил індуцється рух металу, що має вихровий характер. При цьому центр вихру розташований у безпосередній близькості від електроду, а у поверховому шарі метал тече у напрямку до електроду. В діапазоні швидкостей зварювання $(1-1,5) \cdot 10^{-2}$ м/с характер руху рідини перебудовується, вихор зникає, а при швидкості зварювання вище $1,5 \cdot 10^{-2}$ м/с (54 м/г) рідкий метал рухається до хвостової частини ванни, утворюючи передумови для утворення підрізів при дуговій наплавці й зварюванні.

Встановлено, що при діянні знакоперемінних поперечних магнітних полів, поперечне переміщення рідкого металу у ванні мають місце при частоті, меншій ніж 5Гц. Цей рух металу у ванні індуцється внаслідок взаємодії магнітного поля з нормальною компонентою густоти струму в ньому. Якщо індукція поперечного

магнітного поля менша деякого рівня, що названо пороговим, то розміри наплавлених валиків у перерізі не змінюються. Це зумовлено затримкою активного п'ятна дуги на розплавленому металі та впливом шлако-газової порожнини навколо дуги на просторову стійкість дуги.

Під впливом поздовжнього магнітного поля поперечні розміри наплавленого електродним дротом під флюсом валика збільшується, а глибина та площа проплавлення основного металу зменшується практично лінійно за рахунок збільшення індукції поля. При цьому немає порогового рівня індукції. Під час використання постійного й знакоперемінного частотою 50Гц поздовжнього магнітного поля має місце однакове збільшення ширини валика, що наплавляється, а також однакове зменшення глибини проплавлення основного металу. Зміщення вісі валика впоперек під впливом постійного магнітного поля пов'язано з рухом в цьому напрямку металу у хвостовій частині ванни та розташуванням активного п'ятна дуги на рідкому металі. Інтенсивний рух рідкого металу у ванні не призводить до зміни геометричних розмірів валика (порівняно з впливом магнітного поля частотою 50Гц, коли рух металу у ванні не спостерігається). Це свідчить про те, що формування розмірів зони проплавлення здійснюється, в основному, впливом зварювальної дуги.

Встановлено, що якщо у поздовжньому магнітному полі нормальна компонента індукції збільшується у напрямку від осі електроду, то при впливові поля ширина валика, що наплавляється, не змінюється, а глибина та площа проплавлення металу незначно (не більш, ніж на 10%) збільшується.

Показано, що для збільшення продуктивності розплавлення стрічкового електроду під час дугової наплавки під флюсом необхідно зменшити питому електропровідність розплавлених флюсів та підвищувати температуру їх плавлення.

Встановлено, що причиною порушення формування валика при наплавці стрічковим електродом під флюсом є наявність власного магнітного поля зварювального контура. Це магнітне поле утворюється, здебільшого, зварювальним струмом, що протікає у виліті електрода. Встановлені розрахунковим шляхом величини компонент індукції цього поля використані при конструюванні приладів, що генерують компенсаційні магнітні поля, що забезпечують усунення дефектів формування валиків, що наплавляються стрічковим електродом.

З використанням моделі двох джерел тепла розроблено метод розрахунку розмірів зони проплавлення основного металу під час дугової наплавки й зварювання стикових з'єднань електродним дротом під флюсом з керуючими впливами, а також під час наплавки стрічковим електродом під флюсом.

Встановлено, що додаванням вуглекислого газу до аргону, можливо зменшити блукання катодного п'ятна дуги на виробі під час механізованого зварювання плавким електродом хромонікелевих типу 18-10 сталей з окисленою поверхнею та підвищити якість формування швів стикових з'єднань та кутових швів, а зварювання пульсуючою дугою дозволяє покращити формування вертикальних швів.

На захист виносяться:

-результати досліджень по вивченню взаємодії поперечних та поздовжніх магнітних полів зі зварювальною дугою та рідким металом ванної, розроблені способи та прилади для керування формоутворенням валиків та швів при електродуговій наплавці й зварюванні стикових з'єднань електродним дротом під флюсом;

-результати досліджень з установаження енергетичних особливостей плавлення стрічкових електродів відкритою дугою та під флюсом, а також керуванням продуктивністю розплавлення стрічкових електродів під флюсом;

-метод розрахунку електричного поля у виліті й індукції магнітного поля від струму наплавки у виліті стрічкового електрода, механізм порушень формування валика, способи та прилади для керування формування валика під час електродугової наплавки стрічковим електродом під флюсом;

-методи розрахунку розмірів поперечних перерізів валиків та швів стикових з'єднань під час електродугової наплавки й зварювання електродним дротом з керуючими впливами й наплавці стрічковим електродом під флюсом;

-результати досліджень з керівництва формуванням швів при механізованому зварюванні хромонікелевих типу 18-10 сталей плавким електродом шляхом додавань до захисного газу - аргону вуглекислого газу;

-можливість використання розроблених засобів для керування формоутворенням швів та валиків під час електродугового зварювання та наплавки електродним дротом і стрічковим електродом під флюсом.

Практична цінність та результати роботи. Внаслідок теоретичних та експериментальних досліджень запропоновані способи

та оригінальні прилади, що дозволяють ефективно керувати формоутворенням валиків та зварних швів.

Застосування розробок по керуванню формою посилення швів під емалювання у стикових з'єднаннях корпусів реакторів хімівиробництва при зварюванні електродним дротом під флюсом на Полтавському заводі "Хіммаш" дозволило відмовитися від зняття механічною обробкою посилення швів урівень з основним металом.

Використання поздовжніх магнітних полів під час однопрохідного зварювання стикових з'єднань тонколистового металу електродним дротом під флюсом на АТ "Пожарщита" (м.Маріуполь) усунуло пропалів металу, покращило формування шва. Застосування поздовжніх магнітних полів при наплавці електродним дротом під флюсом деталей металургійного устаткування на АТ "Енакиевский металлургический завод" дозволило зменшити працевитрати на мехобробку наплавлених деталей, використовування керуючих магнітних полів під час наплавки ножів бульдозерів стрічковим електродом під керамічним флюсом дозволило усунути дефекти формування валиків та підвищити довговічність наплавлених деталей.

Застосування механізованого зварювання у суміші газів $Ar+CO_2$ хромонікелевих типу 18-10 сталей (м.Маріуполь) дозволило підвищити продуктивність зварювальних робіт та якість формування зварних швів.

Застосування розробок на зазначених підприємствах дозволило отримати значний економічний ефект.

Апробація роботи. Основні положення, наукові та практичні результати роботи доповідались та обговорювались на конференціях та семінарах: "Прогрессивные методы сварки и наплавки в черной металлургии и машиностроении" (м.Жданов, 1972); "Пути повышения долговечности и надежности деталей металлургического оборудования" (м.Ворошиловград, 1973); "Современные методы наплавки и неплавочные материалы" (м.Київ, 1975); "Повышение качества и эффективности процессов сварки и наплавки" (м.Київ, 1984); "Математические методы в сварке" (м.Київ, 1986); "Экономия материальных, энергетических и трудовых ресурсов в сварочном производстве" (м.Челябінськ, 1986); "Применение импульсных процессов в сварке" (м.Ростов-на-Дону, 1987); "Новые процессы сварки, сварка импульсной дугой и модулированным током" (м.Київ, 1988); "Математические методы и САПР в сварочном производстве" (г.Свердловск, 1990); "I^{-я} научно-практическая

конференція сварщиків Середньої Азії і Казахстану " (м. Караганда, 1991); "Прогрессивная технология производства, структура и свойства порошковых изделий, композиционных материалов и покрытий" (м. Волгоград, 1992); "Термодинамика техпроцессов" (м. Краматорськ, 1992); "Термодинамика техсистем" (м. Краматорськ, 1993); "Численные методы в гидравлике и гидродинамике" (м. Донецьк, 1994); "Сварные конструкции" (м. Київ, 1995); на з'єднаному науковому семінарі кафедри "Обладнання та технологія зварювального виробництва" та "Металургія і технологія зварювального виробництва" Приазовського державного технічного університету (м. Маріуполь, 1996); на наукових семінарах у ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України та в Київському політехнічному інституті (1996).

Публікації. З теми дисертації опубліковано 45 праць та зареєстровано 7 авторських свідоцтв на винаходи.

Структура та обсяг роботи. Дисертація складається зі вступу, п'яти глав, загальних висновків та результатів роботи, списку літератури (334 наймування) та двох додатків. Робота викладена на машинописних сторінках, містить 152 малюнка та 13 таблиць.

У додатках наведено програми розрахунків на ЕОМ, що розроблені в процесі виконання досліджень, й довідки про економічну ефективність використання наукових розробок у промисловості.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

Ефективне використання засобів електродугового наплавлення й зварювання плавким електродом у більшій мірі визначається геометричними розмірами зони проплавлення, формою посилення валика (шва), а також співвідношення цих розмірів. Вони однозначно пов'язані з параметрами режиму наплавлення (зварювання), а відомі технологічні прийоми не дозволяють значно їх змінити. Значно розширює можливості керування геометрією валиків (швів) використання поперечних коливань електроду та магнітних полів. Але ж багато аспектів їх використання під час електродугового наплавлення й зварювання електродним дротом під флюсом недостатньо вивчені.

Зварювальна дуга й потік рідкого металу у зварювальній ванні є основними джерелами тепла, що формують розміри ванни та зони проплавлення основного металу. Ряд дослідників вважають, що

формування розмірів зварювальної ванни виникає внаслідок молекулярного теплообміну, а конвекція розплаву не відіграє важливої ролі у проплавленні. В той же час вплив потоків рідкого металу на проплавлення під час електродугового наплавлення електродним дротом експериментально підтверджено дослідженнями С.В.Гулакова, Б.І.Носовського та інших авторів.

Дискусійним є питання про те, під дією яких сил індукується рух рідкого металу у зварювальній ванні. У працях Г.Г.Чернишова, В.Ф.Кубарева виконано розрахунок течії розплаву на передній стінці кратера ванної при електродуговому зварюванні неплавким електродом в одномірному приближенні, коли розглядаються поодинокі струмені потоку. Отримані розрахункові вирази досить складні, й орієнтовані на використання чисельних методів розрахунку. У зв'язку з цим роль основних сил у формуванні гідродинамічних процесів у цій частині ванни не проаналізовано. Розрахункова оцінка щільності струму та електромагнітних сил у рідкому металі ванни, що виконана цими авторами, дозволила зробити висновок про можливість перебігу розплаву у хвостову частину ванни під дією електромагнітних сил. Водночас по розрахунковим оцінкам В.В.Степанова разом із співробітниками основний вплив на формування потоків розплаву у ванні зумовлюється зварювальною дугою, а не електромагнітними силами у розплаві. В.А.Букаров, Ю.С.Іщенко, В.Г.Лошакова на основі виміряної вертикальної складової швидкості потоку в рідині під дією сили Лоренца, у моделі, форма якої не схожа на форму зварювальної ванни, завбачили можливість вихрового руху рідини у зварювальній ванні під час електродугового зварювання. Але ці дані не мають експериментального підтвердження.

У зв'язку з труднощами експериментальних досліджень рух рідкого металу у зварювальній ванні на першому стані досліджень розглядали окремо у передній (головній) частині ванни й у хвостовій її частині.

Гідродинамічні параметри плівки рідкого металу (товщину плівки, швидкість руху металу в ній) визначено розрахунковим шляхом, маючи форму фронту плавлення у головній частині ванни з експериментальних спостережень. Передню стінку ванни апроксимували частиною кульового сегменту. Прийнято припущення, що криволінійні струмки, віділені вертикальними площинами, що проходять крізь вісь електроду та зварювальної дуги, по боковим площинам не обмінюються між собою рідиною.

Задачу вирішено з використанням рівняння Ейлера для сталого руху в потоці. При цьому враховано дію поверхневих, об'ємних сил та вектор переносу кількості руху рідини. Визначення Ейлера застосовували для елементарної цівки між будь-якими її двома горизонтальними перетинами 0-0 й 1-1 у такому записі:

$$M_0 \bar{V}_0 - M_1 \bar{V}_1 + \bar{R}_{об} + \bar{R}_{пов} = 0 \quad (1)$$

де M_0, M_1 - секундні масові витрати рідини у перетинах 0-0 й 1-1; кг/с;

$\bar{V}_0, \bar{V}_1$ - швидкість потоку відповідно у перетинах 0-0 й 1-1, м/с;

$\bar{R}_{об}, \bar{R}_{пов}$ - головні вектори об'ємних та поверхневих сил, Н;

У розрахунках враховували такі основні сили:

1. - тиск дуги (поверхневі сили) - $F_{гг}$;
2. - електромагнітні (об'ємні) сили - $F_{зм}$;
3. - гравітаційні (об'ємні, масові) сили - F_g ;
4. - сили тертя (поверхневі сили) - $F_{тр}$.

Використано проєкцію векторів на головну вісь ОХ, тобто:

$$\bar{R}_x = \bar{F}_{гг_x} + \bar{F}_{зм_x} + \bar{F}_{g_x} + \bar{F}_{тр_x} \quad (2)$$

Для визначення швидкості потоку в перерізі 1-1 (V_1) отримано розрахункове співвідношення:

$$AV_1^3 + BV_1^2 - CV - D = 0, \quad (3)$$

де A, B, C, D - коефіцієнти, що вираховуються.

Товщина плівки у цьому ж перерізі:

$$\delta_1 = h/V_1 \quad (4)$$

де h - константа, яку отримано розрахунковим шляхом.

Розрахунок величини V, δ плівки виконується пошарово, у різних за висотою кратера перерізах.

Пропонована розрахункова модель дозволила проаналізувати вплив сил в моделі, що враховуються, на гідродинамічні параметри рідкого металу в головній частині ванни.

Встановлено, що основною силою, яка визначає параметри рідкої плівки, є сила тиску дуги, вагома роль гравітаційної сили, а роль електромагнітної сили Лоренца зневажливо мала. При збільшенні швидкості наплавлення товщина плівки на передній стінці кратера вагомо зменшується, а швидкість металу в ній збільшується, що пов'язано із збільшенням крутизни нахилу

передньої стінки кратера до горизонту й ростом впливу сил тиску дуги й гравітаційних сил. Досить сильним є вплив "противотиску", що утворюється стовпом рідини у посиленні шва, або за рахунок нахилу виробу до горизонту. Протягом електродугового наплавлювання електродним дротом товщина плівки на передній стінці кратера не перебільшує $1 \cdot 10^{-3}$ м, а швидкість руху металу у плівці на 1-2 чинника більше, ніж швидкість наплавлювання.

Оцінено роль основних сил, що викликають рух розплаву у хвостовій частині зварювальної ванни. При цьому розглянути поверхневі сили, що оцінюються числом Бонда, гравітаційні сили, що оцінюються через щільність масових сил, архімедові сили, що призводять до теплової конвекції у зварювальній ванні, та електромагнітні сили, що визначаються через щільність цих сил у рідкому металі ванни. Оцінки показали, що при характерних для процесу електродугового наплавлювання електродним дротом під флюсом режимів головна роль в індукуванні руху розплаву у зварювальній ванні належить електромагнітній силі Лоренца.

Рух рідкого металу під дією сил Лоренца у хвостовій частині ванни вивчено на фізичній моделі зварювальної ванни. Рідкий метал ванни модульований сплавом Вуда (при температурі 100°C) при бездуговому вводі струму у зварювальну ванну. Величини компонент швидкості потоків у ванні вимірювали тензOMETричним методом по гідродинамічному напору потоку рідини на пластину, що має розміри $(4 \cdot 4) \cdot 10^{-3}$ м, яку розміщували у досліджувані точки ванни.

Встановлено, що рух рідкого металу носить вихровий характер у будь-якій площині, яка проходить через вісь електрода. Центр вихору розташований за електродом у безпосередній близькості від нього. Характерно, що у поверхньому шарі хвостової частини ванни метал тече у напрямку до електрода. Швидкість потоків у будь-якій точці ванни лінійно збільшується при збільшенні струму й залежить від місця струмопідводу до пластини, що пов'язано з обмеженістю розмірів пластини, що застосовується в експерименті. Встановлено, що якщо розміри пластини (в плані) складають $(0,4 \times 0,8)$ м, то швидкість руху металу в ванні не залежить від місця струмопідводу до пластини.

Дослідження швидкості потоків у хвостовій частині ванни у реальному процесі наплавлювання електродним дротом відкритою дугою за цією ж методикою, але з використанням пластини з вольфраму (яка занурюється при вимірах у зварювальну ванну), підтвердили данні, отримані фізичним моделюванням. Встановлено,

що в діапазоні швидкостей наплавлення $(1-1,5) \cdot 10^{-2}$ м/с осьовий потік металу змінює напрямок, тобто він спрямований від електрода до хвостової частини ванни. При цьому зникає S-образна форма задньої поверхні рідкого металу, яка є ніби перепоною на шляху потоку рідкого металу, що отримав значну швидкість на передній стінці кратеру ванни. Це обумовлює відтік рідкого металу з головної частини ванни, утворюючи передумови для утворення підрізів.

У зв'язку з протиріччями літературних даних про вплив величини індукції та частоти керуючих поперечних полів (ПОМП) та поздовжніх магнітних полів (ПДМП) на геометричні розміри валиків при дуговому наплавленні електродним дротом під флюсом з метою розробки теоретичних основ раціонального вибору способів і засобів керування геометрією валика виконано розрахунки та експерименти при наплавленні без керуючих впливів та з впливами магнітних полів.

При наплавленні з застосуванням полів вивчено питання про величину відхилень стовпа дуги, вісі наплавленого валика та геометричних розмірів валиків у залежності від величини індукції та частоти ПОМП.

Відомі розрахункові та експериментальні методи для визначення відхилень вісі дуги при наплавленні під флюсом під дією постійного ПОМП не могли бути використані. У зв'язку з цим розрахунки виконано за методом, пропонуваним В.С.Мечевим. За цим розрахунковим методом вісь деформованого поперечним зовнішнім магнітним полем стовпа дуги займає такі точки простору, в яких сумарна величина індукції від струму у вильоті електрода та керуючого магнітного поля дорівнюється нулю.

Розрахунки виконані для дуги постійного струму на плавких електродах діаметром $(3-5) \cdot 10^{-3}$ м та довжини дуги $5 \cdot 10^{-3}$ м. Встановлено, що перехід від циліндричної моделі стовпа дуги до конічної змінює результати не більш, ніж на 9%. Водночас урахування свого магнітного поля деформованого стовпа дуги (при циліндричній його моделі) значно впливає на відхилення вісі дуги, зменшуючи його. У зв'язку з цим розрахунки виконано з урахуванням власного магнітного поля дуги.

Стала експериментальна величина поперечного зміщення вісі велика під впливом постійного ПОМП, який спрямовано вздовж вісі наплавлення, задовільно співпадає з розрахованим відхиленням активної плями дуги на виробі тільки за малих значень індукції

магнітного поля (Фіс.1). За розрахунковими даними обрив дуги у ПОМП має проходити при індукції магнітного поля $B_x = 8 \cdot 10^{-3}$ Тл, та фактично обрив дуги трапляється при величині індукції $B_x = 26 \cdot 10^{-3}$ Тл. На відміну від розрахункових даних в експерименті спостерігається збільшення відхилення вісі валика при збільшенні зварювального струму (Фіс.1). Це пов'язано із впливом не врахованих у розрахунковій схемі сил Лоренца, що виникають у зварювальній дузі, а також з дією сил Лоренца у рідкому металі ванни під дією ПОМП.

Вимірами при фізичному моделюванні зварювальної ванни (без повного проплавлення пластини) сплавом Вуда встановлено, що нормальна складова гущини току в рідкому металі, що примикає до дуги, практично удвоє більша, ніж при зварюванні з повним проплавленням пластини. Нормальна складова гущини струму зменшується до нульових значень на відстані близько $(1/2 - 1/3)$ довжини зварювальної ванни. Взаємодією цією компоненти гущини струму у ванні з постійним ПОМП, спрямованим вздовж вектора наплавлення, утворенням постійної масової сили Лоренца й потоків у ванні в поперечному напрямку зумовлено значне зміщення вісі валика в цьому напрямку при наплавленні з впливом постійного ПОМП.

Активна пляма дуги розташована на рідкому металі ванни, що збільшує можливості її відхилення під дією ПОМП. Інтенсивний рух рідкого металу під впливом постійного ПОМП спостерігається протягом моделювання зварювальної ванни сплавом Вуда. Але рух рідкого металу у зварювальній ванні не призводить до помітного збільшення ширини наплавлених валиків та глибини зони проплавлення основного металу.

При знакоперемінному ПОМП частотою $f = 0,5$ Гц з величиною індукції $B_x = 20 \cdot 10^{-3}$ Тл вісь наплавленого електродним дротом валика зміщується відповідно з частотою магнітного поля, але зміщення вісі валика в 2-3 рази менше, ніж встановлене вже зміщення вісі його, отримане дією постійного магнітного поля. При частоті $f = 1$ Гц й такій самій величині індукції зміщення вісі валика ледь помітні, а при $f \geq 2$ Гц практично відсутні. Вимірами поперечної складової швидкості потоку в модельній ванні (сплав Вуда) під впливом знакоперемінних ПОМП встановлено, що поперечні потоки в рідині виникають при частоті ПОМП $f < 5$ Гц. При частоті $f = 1-2$ Гц величина цієї швидкості $V_y = 0,1$ м/с, (при $B_x = 20 \cdot 10^{-3}$ Тл й струмові у рідині $I = 500$ А), а при $f = 5$ Гц $V_y = 0$. Таким чином зміщення

Залежність зміщень п'ятна дуги та вісі валика на виробі від величини індукції B_x постійного ПОМП

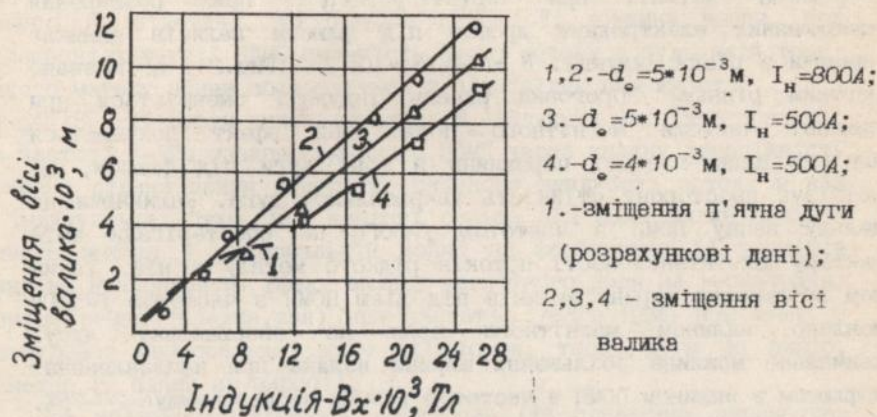


Рис. 1

Вплив індукції B_x ПОМП на розміри валика при наплавлюванні під флюсом

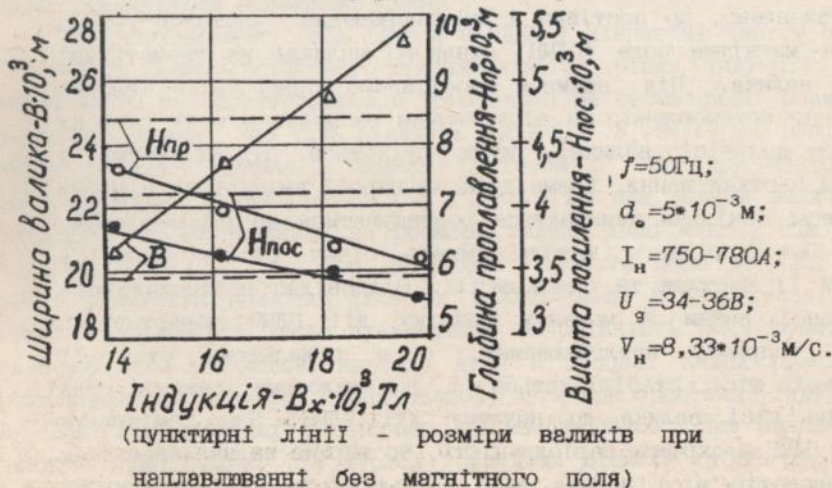


Рис. 2

вісі валика під впливом ПОМП виникає у тому разі, коли маємо перпендикулярне зміщення рідкого металу ванни, зварювальна дуга зміщується в цьому ж напрямку і її активна пляма розташовується на рідкому металі. При частоті $f=50\text{Гц}$ ПОМП розширення наплавлених електродним дротом під флюсом валиків виникає починаючи з рівня індукції $B_x=(14-15)\cdot 10^{-3}\text{Тл}$ (Рис.2), що названо пороговим рівнем. Пороговий рівень індукції зменшується при зменшенні частоти магнітного поля. Цей ефект пояснюється наявністю шлако-газової порожнини в зоні дуги під флюсом, що стабілізує просторову стійкість зварювальної дуги. Впливаючи на металеву ванну ПОМП з частотою $f=50\text{Гц}$ не спостерігали змін характеру та інтенсивності потоків рідкого металу в ній. Таким чином збільшення ширини валиків під дією ПОМП з частотою $f=50\text{Гц}$ зумовлено впливом магнітного поля на зварювальну дугу. Максимально можливе збільшення ширини валика при наплавленні під флюсом з впливом ПОМП з частотою $f=50\text{Гц}$ не перевищує 20-25%.

Експериментально встановлено, що утворенням у рідкому металі ванни постійних сил Лоренца дією постійних ПОМП, спрямованих уздовж вісі наплавлення, можливо змінити напрямок потоку рідкого металу до головної частини ванни, або до хвостової її частини. При цьому значно зміниться співвідношення геометричних розмірів валика.

Встановлено, що постійне й знакоперемінне частотою $f=50\text{Гц}$ поздовжнє магнітне поле (ПДМП) однаково впливає на геометричні розміри валика. Під впливом постійного ПДМП вісь валика зміщується. Встановлено, що вісь валика зміщується в ту сторону (виперек до вісі валика), куди рухається рідкий метал у хвостовій частині ванни. Пляма дуги на виробі зміщується в цьому ж напрямку, оскільки намагається розташуватися на розплавленому металі. Потік рідкого металу змиває бічну стінку ванни у хвостовій її частині та оплавляє її. Відповідно поздовжня вісь зварювальної ванни з моменту початку дії ПДМП повертається відносно напрямку наплавлення, а в подальшому стан її поздовжньої вісі стабілізується і в сталеному режимі стає паралельно вісі валика до початку дії ПДМП. Якщо змінювати напрямок ПДМП з окремою періодичністю, то ширина валика внаслідок таких поворотів вісі валика дещо збільшується (без урахування впливу ПДМП на форму дуги). Ці дані узгоджуються з раніше отриманими даними В.П.Чернишом, В.Д.Кузнецовим разом із

співробітниками.

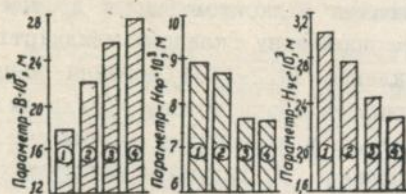
Дослідженням на фізичній моделі зварювальної ванни (сплав Буда) та в процесі наплавлювання відкритою дугою дротом СВ-СВА підтверджено, що ПДМП індукує поперечну складову швидкості потоку в ванні на відстані, що складає $(1/2-1/3)$ довжини ванни. При збільшенні індукції ПДМП швидкість цього потоку в будь-якій точці рідкого металу ванни збільшується й відповідає залежності $V_y = \sqrt{I \cdot B_z}$ (I -струм наплавлювання, B_z -індукція магнітного поля). При частоті $f=5\text{Гц}$ знакоперемінного ПДМП через значну інерційність масивної рідини ванни поперечна складова швидкості потоку в ній не індукується. Отже, при частоті більше 5Гц ПДМП вплив потоків рідкого металу у зварювальній ванні на формування її розмірів можна не враховувати. Ефект впливу магнітного поля на геометричні розміри ванни (валика, шва) при частоті $f \approx 5\text{Гц}$ ПДМП пов'язані з перебудовою зварювальної дуги (її форми, тиску дуги на виріб, діаметра її плями на виробі).

При збільшенні діаметра електрода (та однакових параметрах режиму наплавлювання) значно збільшується ефект впливу ПДМП на приращення ширини валика, що пов'язано зі зменшенням поглиблення дуги в основний метал та меншим шунтуванням магнітного поля феромагнітним виробом у зоні дуги. Ширина валика під впливом ПДМП може бути збільшена у 1,5 раза й більше, глибина проплавлення при цьому зменшується приблизно удвоє.

При наплавлюванні під флюсом в ПДМП у діапазоні частот поля $f=0,5-50\text{Гц}$ немає порогового (мінімального) рівня індукції B_z , нижче якого не спостерігався б його вплив на геометричні розміри перерізу валика. Уже при величині індукції $B_z=5 \cdot 10^{-3}\text{Тл}$ помітні зміни розмірів валика в перерізі. Разом з тим, при частотах знакоперемінного ПДМП $12,5\text{ Гц} \geq f \geq 0,5\text{ Гц}$ при рівній величині індукції B_z ПДМП впливає на розміри валика дещо менше, ніж при частоті $f=50\text{Гц}$ й $f=0$. При збільшенні частоти поля до $12,5\text{ Гц}$ ефект впливання поля на розміри валика дещо підвищується. Ці ефекти пояснюються, якщо враховувати інерційність змін розмірів газо-шлакової порожнини навколо дуги в процесі зміни розмірів розширюваної в діаметрі (обертальної) дуги при зростанні індукції B_z ПДМП від нульових її значень до максимальних. При зменшенні частоти ПДМП сталий (за період) середній діаметр стовпа дуги й активної плями дуги на виробі зменшується.

Відомі електромагнітні прилади, генеруючі ПДМП, зокрема й використовувані в наших дослідженнях, забезпечили негативний

Залежність розмірів наплавлених валиків
від частоти поздовжнього магнітного поля



1.- без дії магнітних

ПОЛІВ:

2,4.- з дією ПДМГІ

$$-4\Gamma\text{ц}, f=50\Gamma\text{ц};$$

3.- з дією постійного

LIMIT

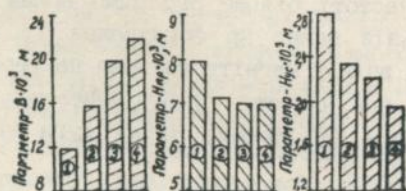
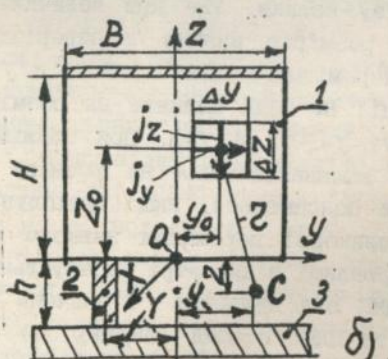
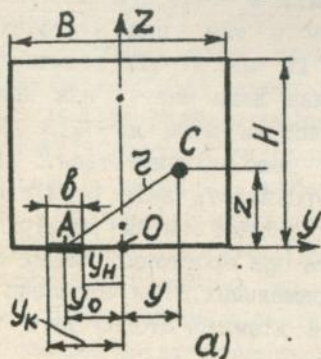

$$(B_0 = 20 \cdot 10^{-3} \text{ Тл}),$$
$$d, -d = 5 \cdot 10^{-3} \text{ м}; I_{\text{н}} = 750-780 \text{ А}, U_{\text{н}} = 34-36 \text{ В}, V_{\text{н}} = 8,33 \cdot 10^{-3} \text{ м/с};$$
$$\sigma \cdot d_e = 4 \cdot 10^{-3} \text{ M}; I_H = 550-570 \text{ A}, U_a = 34-35 \text{ B}, V_H = 1,2 \cdot 10^{-2} \text{ M/c}.$$

Рис. 3

Схеми до розрахунку електричного поля у вильоті (а)
та магнітного поля від струму у вильоті (б)
стрічкового електрода



1.-електрод; 2.-мідний стрижень; 3.-вироб

Рис. 4

градієнт нормальної компоненти індукції B_z у напрямку від вісі зварювального електрода. Пропонована конструкція електромагнітного приладу, складеного з чотирьох однакових електромагнітів, встановлених симетрично відносно вісі зварювального електрода, забезпечуючого позитивний градієнт індукції B_z у радіальному напрямку. При вмиканні такого ПДМП з індукцією $B_z = (20-70) \cdot 10^{-3} \text{ Тл}$ спостерігалось незначне (не більш, ніж на 10%) збільшення глибини й площини зони проплавлення металу та незначне (на 5-10%) зменшення ширини валика. Це пояснюється "стисканням" дуги магнітним полем, тобто дією спрямованих на вісь дуги електромагнітних сил, що виникають внаслідок взаємодії кільцевого струму в обертальній у магнітному полі дуги, з індукцією B_z цього поля. Зроблено висновок про те, що для керування геометричними розмірами валика доцільні ПДМП зі спадаючим радіальним градієнтом індукції B_z .

Значно підвищується ефективність наплавлювання при використанні стрічкового електрода. Але фізичні явища при дуговому наплавлюванні стрічковим електродом під флюсом недостатньо вивчені. Використання стрічкового електрода при наплавлюванні під флюсом зтримується підвищеним нахилом до утворення таких дефектів формування валика, як утворення западини, або опуклості в центрі нього, утворенням підрізів. Природа утворення таких дефектів недостатньо вивчена. У зв'язку з цим вивчали особливості процесу плавлення стрічкових електродів зварювальною дугою під флюсом, а також механізм утворення дефектів формування валика.

Швидкісною кінозйомкою з синхронним осцилографуванням процесу плавлення стрічкових електродів відкритою дугою зворотної полярності встановлено, що ширина активної плями дуги на плавкому торці стрічкових електродів складає приблизно $4 \cdot 10^{-3} \text{ м}$. В умовах тісного існування активної плями на торці стрічки товщиною $0,2 \cdot 10^{-3} \text{ м}$, як показала обробка даних кінозйомки й отриманих при цьому статичних характеристик дуги, анодне падіння напруги дуги (U_a) на 10% більше, ніж при плавленні електродним дротом. Розрахунком теплового балансу плавлення стрічки й дроту однакового перерізу з урахуванням даних калориметрування електродних крапель й джоульової теплоти, що виділяється у вильотах електродів, показано, що при плавленні стрічки товщиною $\delta \geq 0,5 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ значення U_a такі ж, як й при плавленні електродних дротів. Більш ефективне плавлення стрічки,

ніж дроту, пояснюється меншим теплоутриманням електродних крапель при плавленні стрічки. Фізичним моделюванням показано, що в межах локального токозйому з вильоту стрічкового електрода (дуги) має місто згущення ліній струму у вильоті. Це призводить до того, що у вильоті стрічки за однакових умов наплавлення у 1,5-2,5 рази виділяється більше джоульового тепла, ніж у дроті однакового з нею поперечного перерізу.

На відміну від процесу плавлення електродним дротом, коли при зворотній полярності дуги коефіцієнт розплавлення електрода (α_p) не залежить від складу флюсу, нами встановлено залежність (α_p) стрічки від складу флюсу. Аналіз теплового балансу плавлення стрічкових електродів під флюсом з урахуванням даних їхнього нагрівання у вильоті, отриманих експериментальними вимірами, й величини струму шунтування дуги крізь шлак, який отримано за відомими й за запропонованою нами виміривальними методиками, дозволив встановити розрахунковий вираз для (α_p) стрічкового електрода при дуговому наплавленні під флюсом:

$$\alpha_p = \frac{\alpha_{p0} (I_{св} - I_{ш}) \cdot S_k}{I_{св} \cdot (S_k - S_B)} , \text{ г/А}\cdot\text{с} \quad (5)$$

де (α_{p0}) - значення коефіцієнта розплавлення електрода струмом I_g у відкритій дузі, г/А·с;

I_g - величина току дуги ($I_g = I_{св} - I_{ш}$), А;

S_k - теплоутримання електродних крапель при плавленні стрічки відкритою дугою током I_g , Дж/г;

S_B - теплоутримання металу від нагрівання у вильоті електрода, Дж/г.

Експериментально встановлено, що при розплавленні дугою температура шлаку на 90-180 К вище, ніж температура плавлення флюса. Для підвищення α_p стрічки під флюсом необхідно зменшити значення струму $I_{ш}$ та підвищувати нагрів стрічки у вильоті.

Врахування цього співвідношення при розробці складу керамічного флюсу для зносостійкого наплавлення ножів бульдозера забезпечило підвищення α_p стрічкового електрода на 20-25% порівняно з процесом наплавлення під керамічним флюсом ЖСН-1.

Т.Г.Кравцовим показано, що при малих струмах наплавлення (тонкими стрічками) валик в центрі має западину (сідловину), а при великих струмах наплавлення має опуклу форму. Наші дослідження підтвердили ці висновки.

Пропоновані в Патентах Австрії, США, Японії способи й конструкції електромагнітних приладів з метою покращення формування валиків при наплавлення стрічковим електродом, належать до суто електрошлакового процесу наплавлення. Водночас дослідженнями Л.К.Лещинського, Н.Н.Потапова, О.С.Волобуєва, В.Ю.Мастенко, Е.Г.Старченко та інших авторів встановлено, що процес наплавлення стрічковим електродом з використанням вітчизняних флюсів (держав СНД) є переважно дуговим процесом. Процес формування валика для умов, коли при пересуванні дуги по торцеві стрічки змінюється будова магнітного поля від струму у вильоті стрічки, є більш складним, ніж при суто електрошлаковому процесі, що потребувало його дослідження.

У дослідженнях використовували тезу, проголошену В.С.Мечевим про те, що магнітне поле зваривального контура визначається, здебільшого, струмом у вильоті електроду й у зваривальній дузі, а внесок магнітного поля від току, що розтікається у виробі, зневажає майже малий.

Для розрахункового визначення електричного поля при протіканні струму у вильоті стрічки використано метод електростатичної аналогії. Зварювальну дугу моделювали плоским зарядом на торцеві стрічки (Рис.4а).

Дуга (плаский заряд) у двовірному випадку зображується лінією шириною "в", подається плоским джерелом, розподіленим на площині торця в $\times$ б (б - товщина стрічки). Плаский заряд подається як межа суми лінійних джерел.

Згідно теореми Гаусса:

$$q = \rho \cdot \epsilon_0 \cdot I_{\text{св}} \quad (6)$$

де ρ - питомий опір матеріалу стрічки;

ϵ_0 - діелектрична проникність вакуума;

$I_{\text{св}}$ - величина зваривального струму.

Межові умови:

$$1. \text{ При } Y = \pm B/2 \quad \frac{\partial U(y, z)}{\partial y} = 0, \quad (7)$$

$$2. \text{ При } Z = 0 \quad \frac{\partial U(y, z)}{\partial Z} = 0, \quad (8)$$

$$3. \text{ При } Z = H \quad U(y, z) = 0, \quad (9)$$

де $U(y, z)$ - значення потенціалу в точці (y, z) .

Потенціальне поле плоского джерела у напівнескінченній пластині має такий запис:

$$U(y, z) = -\frac{\mu \cdot I_{CB}}{\pi \delta B} \int_{y_H}^{y_K} \ln \frac{r_0}{r} \cdot dy'', \quad (10)$$

де $r = [(y'' - y)^2 + z^2]^{1/2}$; $y_H \leq y'' \leq y_K$;

$$y_H = y_0 - b/2; \quad y_K = y_0 + b/2;$$

де y_0 координати центру джерела.

Компоненти щільності току у напрямку вісей OY й OZ вираховано за формулами:

$$j_y = -\frac{1}{\rho} \cdot \frac{dU(y, z)}{dy}; \quad j_z = -\frac{1}{\rho} \cdot \frac{dU(y, z)}{dz}; \quad (11)$$

Щільність току в будь-якій точці вильоту:

$$j = \sqrt{j_y^2 + j_z^2}. \quad (12)$$

Застосовуючи метод дзеркальних відображень для врахування межових умов отримали вирази для компонент щільності струму j_y, j_z у вильоті стрічки:

$$\begin{aligned} j_y = & -\left[\frac{I_{CB}}{\pi \delta b} \right] \sum_{n=-\infty}^{n=+\infty} \sum_{m=-\infty}^{m=+\infty} \left[\left(\arctg \frac{y'_{1K} - y}{z'_1 - z} - \arctg \frac{y'_{1H} - y}{z'_1 - z} \right) + \right. \\ & + \left(\arctg \frac{y'_{2K} - y}{z'_1 - z} - \arctg \frac{y'_{2H} - y}{z'_1 - z} \right) - \left(\arctg \frac{y'_{1K} - y}{z'_2 - z} - \arctg \frac{y'_{1H} - y}{z'_2 - z} \right) - \\ & \left. - \left(\arctg \frac{y'_{2K} - y}{z'_2 - z} - \arctg \frac{y'_{2H} - y}{z'_2 - z} \right) \right] \end{aligned} \quad (13)$$

$$\begin{aligned} j_z = & -\left[\frac{I_{CB}}{2\pi \delta b} \right] \sum_{n=-\infty}^{n=+\infty} \sum_{m=-\infty}^{m=+\infty} \left[\ln \frac{(z'_1 - z)^2 + (y'_{1K} - y)^2}{(z'_1 - z)^2 + (y'_{1H} - y)^2} + \right. \\ & + \ln \frac{(z'_1 - z)^2 + (y'_{2K} - y)^2}{(z'_1 - z)^2 + (y'_{2H} - y)^2} - \ln \frac{(z'_2 - z)^2 + (y'_{1K} - y)^2}{(z'_2 - z)^2 + (y'_{1H} - y)^2} - \\ & \left. - \ln \frac{(z'_2 - z)^2 + (y'_{2K} - y)^2}{(z'_2 - z)^2 + (y'_{2H} - y)^2} \right] \end{aligned}$$

$$- \ln \frac{(Z'_2 - Z)^2 + (Y_{2\kappa}^0 - Y)^2}{(Z'_2 - Z)^2 + (Y_{2\pi} - Y)^2} \Big], \quad (14)$$

$$\text{де } Y'_{1\kappa} = Y'_1 + b/2; \quad Y'_{1\pi} = Y'_1 - b/2; \quad (15)$$

$$Y'_{2\kappa} = Y'_2 + b/2; \quad Y'_{2\pi} = Y'_2 - b/2; \quad (16)$$

$$Y'_1 = 2mB + Y_0; \quad Y'_2 = (2m-1) \cdot B - Y_0 \quad (17)$$

$$Z'_1 = 4n \cdot H; \quad Z'_2 = 2(2n+1) \cdot H, \quad (18)$$

де Y'_1, Y'_2 - координати відображених джерел у напрямку вісі OY;
 Z'_1, Z'_2 - координати відображених джерел у напрямку вісі OZ
 n, m - цільні числа.

Розрахунки дозволили встановити ефект згущення ліній струму в зоні дуги й урахувати його в тепловому балансі плавлення стрічкових електродів. Вирази (13, 14) для J_y, J_z використовували також для отримання розрахунковим шляхом значень індукції магнітного поля від струму у вильоті стрічкових електродів.

Для підрахунку компонент індукції магнітного поля використовували теорію векторного потенціалу. Відповідно цієї теорії у загальному вигляді

$$\vec{B} = \text{rot} \vec{A}, \quad (19)$$

з компоненти індукції магнітного поля:

$$B_x = (\text{rot} \vec{A})_x = \frac{dA_z}{dy} - \frac{dA_y}{dz}, \quad (20)$$

$$B_y = (\text{rot} \vec{A})_y = \frac{dA_x}{dz} - \frac{dA_z}{dx}, \quad (21)$$

$$B_z = (\text{rot} \vec{A})_z = \frac{dA_y}{dx} - \frac{dA_x}{dy}, \quad (22)$$

де A - векторний потенціал.

Векторний потенціал виражений як

$$\vec{A} = \left[\frac{\mu_0}{4\pi} \right] \cdot \int_V \frac{\vec{J}}{r} \cdot dV, \quad (23)$$

де J - щільність струму в токонесучій ділянці;

V - об'єм ділянки, у якій $J \neq 0$;

r - відстань від центру ділянки з током до досліджуваної точки (рис. 4, б).

У точці "С" простору у вильоті стрічкового електроду складова індукції від струму в елементарному прямокутнику (з векторами J_y та J_z густоти струму) розмірами y , z й товщині стрічки δ (рис.4б):

$$B_{x_i} = \left[\frac{\mu_0}{4\pi} \right] \cdot V_i \left[J_z \left(\frac{1}{r} \right)'_y - J_y \left(\frac{1}{r} \right)'_z \right] =$$

$$= \frac{\mu_0 \cdot V_i}{4\pi} \left[\frac{J_y(Z-Z_0) - J_z(Y-Y_0)}{[(Y-Y_0)^2 + (Z-Z_0)^2]^{3/2}} \right], \quad (24)$$

де $V_i = (y \cdot z) \cdot \delta$ - об'єм елементарного прямокутного елемента вильоту стрічки;

Y_0, Z_0 - координати центру елементарного прямокутника;

Y, Z - координати точки "С", в якій вираховуються компоненти індукції магнітного поля.

Повна індукція B_x отримується підсумуванням (B_{x_i}) від усіх елементарних прямокутників з током:

$$B_x = \sum_{i=1}^N (B_{x_i}) \quad (25)$$

де N - кількість елементарних прямокутників з током у вильоті стрічкового електроду.

Аналогічно підраховано індукції B_y, B_z .

Встановлено, що розрахункові дані з точністю $\pm 2\%$ співпадають з експериментальними у зоні локального токозйому. Чим даліше від торця стрічки, тим більше всі компоненти індукції зменшуються. За однакових відстаней справа й зліва від вісі дуги, наприклад, відстанях $4 \cdot 10^{-3}$ м перепад абсолютних значень індукції B_x в перерізі $Z = -2 \cdot 10^{-3}$ м для позиції дуги $Y = -B/4$ складає $|\Delta B_x| = 1,65 \cdot 10^{-3}$ Тл, для позиції дуги $Y = -0,45B$ $|\Delta B_x| = 2,8 \cdot 10^{-3}$ Тл, а для $Y = 0$ (у центрі стрічки) $|\Delta B_x| = 0$. Результатована електромагнітна сила внаслідок взаємодії B_x з током у дузі спрямована від центру стрічки на плавкому торці до її краю, досягнувши краю стрічки дуга утримується в цьому місці. Ці дані пояснюють спостережені затримки дуги біля краю стрічки й прискорені її пересування від центру до краю стрічки.

Компоненти індукції B_y і B_z за наявності виробу з феромагнітного матеріалу помітно зменшуються у ділянці токозйому

(дуги), а біля поверхні феромагнетика $B_y=0$, $B_x=0$, оскільки є тангенціальними. При зміщенні дуги до краю стрічки нормальна складова індукції B_z збільшується. Компонента B_z досягає максимуму на відстані від площини стрічки $X=(5-10)\cdot 10^{-3}\text{ м}$, убуваючи до нульових значень при $X=20\cdot 10^{-3}\text{ м}$ (рис.5). При взаємодії B_z з горизонтальними складовими щільність току в рідкому металі ванни, щільності електромагнітних сил максимальні на бічних ділянках ванни, оскільки щільність струму, як з'ясовано, тут також максимальна. Під дією цих сил розплав рухається до центру і в хвостову частину ванни, зменшуючи кількість (рівень) його біля країв ванни, утворюючи опуклість у центрі валика й підрізи на його краях.

При малих струмах наплавлювання (до 400-450А), коли конвекція розплаву у ванні слабо виявлена, магнітне поле зварювального контура обумовлює не тільки прискорені пересування дуги до країв стрічки, але і рух розплаву у цих напрямках, при кристалізації якого утворюється дефект форми валика у вигляді сідловини в його центрі.

Для знищення таких дефектів пропонується метод компенсації градієнта індукції $|\Delta B_x|$ у зоні дуги. Показано, що компенсація $|\Delta B_x|$ можлива за використання V-образного струмопідводу до вильоту стрічки. Розрахунково-експериментальним шляхом встановлено, що для стрічок шириною $B\leq 120\cdot 10^{-3}\text{ м}$ компенсація оптимальна, якщо вильот у центральній частині стрічки дорівнює її ширині ($H=B$). Й зменшується за лінійним законом до значень $h=(0,25-0,30)\cdot B$ біля її краю. У ролі критерія якості формування валика прийнято різницю значень висоти валика у центрі його $-h_1$, та біля краю $-h_2$: $h=h_1-h_2$ (таблиця 1).

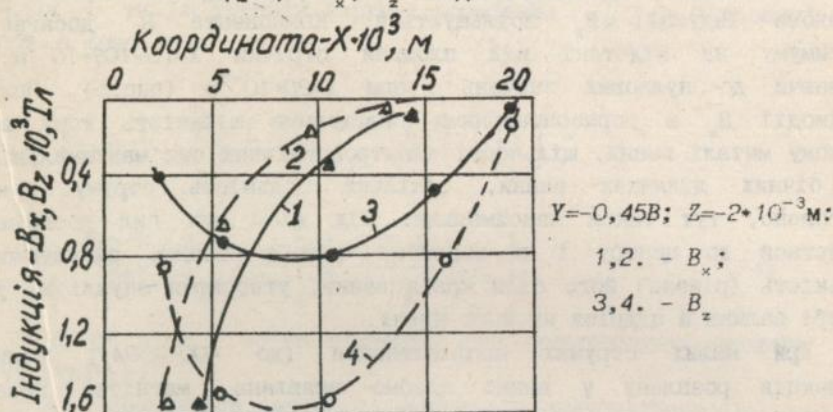
Для знищення зазначених дефектів формування валика методом компенсації градієнта індукції $|\Delta B_x|$ у зоні дуги запропоновано встановити по краям стрічки (у площині вильоту стрічки) провідники у вигляді прямокутних рамок, по яким протікає постійний струм наплавлювання.

Критерій якості формування валика $-h$ (таблиця 2) підтвердив, що при оптимальних відстанях від проводників приладу до виробу та країв стрічки, що визначаються розрахунковим шляхом, можливо підвищити якість формування наплавлюваних валиків.

Для знищення дефектів формування валика у вигляді опуклості в центральній його частині, що спостерігаються при наплавлюванні стрічковим електродом при великих струмах (порядку 700А і

Розподілення максимальних значень компонент

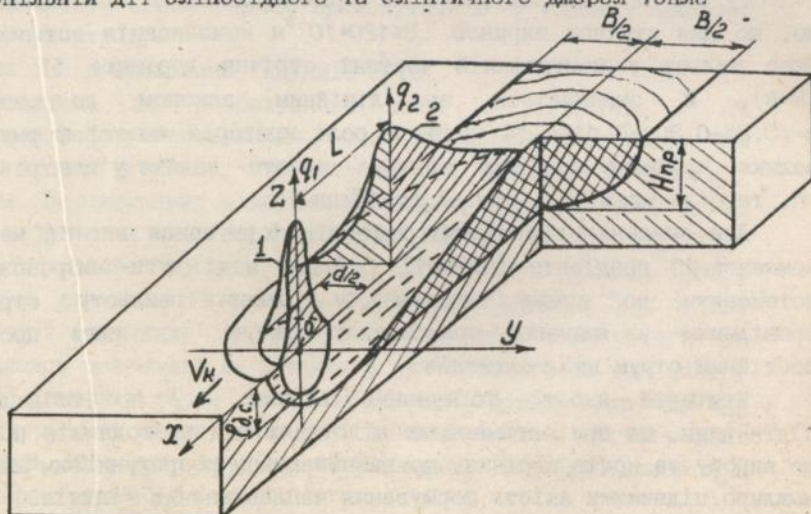
індукції B_x, B_z вздовж вісі OX



(пунктирні лінії - виріб ферромагнетик,
суцільні лінії - виріб з немагнітного матеріалу)

Рис.5

Схема до розрахунку температурного поля у виробі при
спільній дії еліпсоїдного та еліптичного джерел тепла



1. - еліпсоїдне джерело; 2. - еліптичне джерело.

Рис.6

Таблиця 1

Критерії якості формування наплавлених валиків

NN п.п.	Вильот стрічкового електрода		Величина критерія - $h \cdot 10^3$, м
	в центрі (Н/В)	біля края (h/В)	
1	1,0	0,15	$+(1,0-1,5)$
2	1,0	0,20	$+(0,5-0,6)$
3	1,0	0,25	0
4	1,0	0,30	0
5	1,0	0,35	$-(1,0-1,3)$
Примітки: 1.-стрічка ОВКп $(0,2 \cdot 40) \cdot 10^{-3}$ м, $I_H = 360-400$ А; $U_g = 31-33$ В, $V_H = 0,556 \cdot 10^{-2}$ м/с; флюс АН-348А; 2.-За рівномірного струмопідводу по ширині стрічки (Н=В): $h = -2,2 \cdot 10^{-3}$ м.			

Таблиця 2

Дані про критерії якості формування наплавлених валиків

NN п.п.	Варіант наплавлення	Ширина стрічки- $B \cdot 10^3$, м	Ток наплавлення I_H , А	Величина критерія $h \cdot 10^3$, м
1	2	3	4	5
1	Без управління	40	360-380	-2,20
2	Без управління	60	420-440	-2,00
3	Без управління	80	500-520	-2,10
4	З управлінням	40	360-380	-0,21
5	З управлінням	60	420-440	-0,03
6	З управлінням	80	500-520	+0,20
Примітка: Стрічка ОВКп $\delta = 0,2 \cdot 10^{-3}$ м, $U_g = 31-33$ В, $V_H = 0,556 \cdot 10^{-2}$ м/с, флюс АН-348А;				

більше), запропоновано метод компенсації різноспрямованих по краям ванни нормальних компонент індукції магнітного поля, що утворюються струмом, що протікає у вильоті стрічки. Для таких цілей запропоновано по бокам зварювальної ванни встановлювати провідники у вигляді прямокутних рамок, по яким протікає ток наплавлення. Для посилення нормальних компонент індукції B_z

запропоновано використовувати П-образні магнітоводи, що встановлюються на горизонтальних елементах приладу.

В працях Н.Н.Рикаліна, А.А.Єрохіна, І.Д.Кулагіна та інших авторів, висловлювалось уявлення про те, що точність розрахованих розмірів зваривальної ванни може бути підвищено, якщо врахувати, що при дуговому зварюванні нагрівання виробу здійснюється не тільки поглибленою в основний метал дугою, але й теплом, що припасено у рідкому металі та шлакові зваривальної ванни. Доцільність моделі двох джерел тепла стосовно дугового зварювання тонколистового металу показано в працях В.І.Столбова, В.П.Потехина. Враховуючи це, нами запропоновано стосовно дугового наплавлювання під флюсом перше джерело (зваривальну дугу) – в головній частині ванни – уявляти як еліпсоїдний з об'ємним розподілом теплового потоку по нормальному закону, а друге джерело – у хвостовій частині ванни – уявляти плоским у вигляді полуеліпса. Розрахунком теплового балансу процесу наплавлювання електродним дротом під плавними флюсами (АН-348А, ОСЦ-45, АН-60, АН-20, АН-26) й керамічним флюсом ЖСН-1 встановлено, що потужність першого джерела складає 70%, а другого – 16% від повної потужності, що виділяється зваривальною дугою, незалежно від параметрів режиму наплавлювання.

Досліджено принцип заміни реального джерела тепла (заглубленої дуги) моделлю еліпсоїдного джерела з нормальним законом розподілу теплового потоку по трьом координатам простору.

Закон просторового розподілення теплового потоку прийнято у вигляді

$$q_v = q_{vm} \cdot e^{-(k_x \cdot x^2 + k_y \cdot y^2 + k_z \cdot z^2)} \quad (26)$$

де q_v – об'ємна густина теплового потоку;

q_{vm} – максимальна об'ємна густина теплового потоку;

k_x, k_y, k_z – коефіцієнти зосередженості теплового потоку джерела відповідно вздовж вісі x, y, z .

Встановлено, що для еліпсоїда з розмірами полувісі

$$r_x = \frac{\beta}{\sqrt{k_x}}, \quad r_y = \frac{\beta}{\sqrt{k_y}}, \quad r_z = \frac{\beta}{\sqrt{k_z}} \quad (27)$$

можна рекомендувати значення коефіцієнта $\beta=2$.

Розглянувши дію миттєвого еліпсоїдного джерела тепла з подальшим переходом до постійно діючого й рухомого джерела тепла

отримано розрахунковий вираз для припущення температури у точці у вигляді плоского шару товщиною "б" з обома адіабатичними границями

$$T_{1(x,y,z)} = \sum_{n=-\infty}^{n=+\infty} \int_0^{t_k} \frac{2q_1 \cdot \text{EXP} \left[\frac{x+u \cdot t}{4a(t+t_{ox})} - \frac{y^2}{4a(t+t_{oy})} \right]}{c\gamma(4\pi a)^{3/2} [(t+t_{ox}) \cdot (t+t_{oy}) \cdot (t+t_{oz})]^{1/2}} \cdot \sum_{n=-\infty}^{n=+\infty} \text{EXP} \left[- \frac{(z-2n \cdot \delta)^2}{4a(t+t_{ox})} \right] \cdot dt \quad (28)$$

де u -- швидкість зварювання, або наплавлювання;

t_k -- час дії джерела;

q_1 -- ефективна теплова потужність джерела;

Коли приймемо $k_2 \rightarrow \infty$ та $t_{oz} = \frac{1}{4ak_2} = 0$ у рухомій системі координат отримано розрахунковий вираз для припущення температури в точці плоского шару товщиною "б" з адіабатичними поверхнями:

$$T_{2(x,y,z)} = \int_0^{t_k} \frac{2q_2 \cdot \text{EXP} \left[\frac{x+u \cdot t+L}{4a(t+t_{ox})} - \frac{y^2}{4a(t+t_{oy})} \right] dt}{c\gamma(4\pi a)^{3/2} [(t+t_{ox}) \cdot (t+t_{oy}) \cdot t]^{1/2}} \cdot \sum_{n=-\infty}^{n=+\infty} \text{EXP} \left[- \frac{(z-2n \cdot \delta)^2}{4at} \right] \cdot \left\{ 1 - \text{erf} \left(\frac{x+ut+t}{\sqrt{\frac{t_{ox}}{4a(t+t_{ox})}}} \right) \right\} \cdot dt, \quad (29)$$

де q_2 -- ефективна теплова потужність другого (плоского) джерела;
 L -- відстань від центру першого джерела (Рис.6), що визначається як відстань до перерізу $X=L$, у якому спостерігається максимальна ширина ізотерми $T=T_{пл}$ на поверхні виробу, що визначається за відомою методикою М.М.Рикаліна.

Припущення температури у точці тіла (виробу) від спільної дії джерел (Рис.6)

$$T_{(x,y,z)} = T_{1(x,y,z)} + T_{2(x,y,z)}. \quad (30)$$

Друге джерело тепла розподілено на відстані r_x (вздовж вісі ОХ), що дорівнюється довжині хвостової частини ванни

$$L_{\text{в. х-в}} = \frac{\eta_{\text{св}} \cdot I_{\text{св}} \cdot U_{\text{г}}}{2\pi\lambda \cdot T_{\text{пл}}}, \quad (31)$$

а вздовж вісі OY на відстані $r_y = B/2$, де B - ширина шва, що обчислюється за методикою М.М.Рикаліна, $\eta_{\text{св}} = 0,86$.

Глибина лунки під дугою (h) та діаметр п'ятна дуги на виробі ($d_{\text{т}}$) визначено експериментально за розробленими методиками з використанням тугоплавких вставок із вольфраму, або з танталу. Глибина лунки під дугою визначена також розрахунковим шляхом з використанням експериментальних даних про діаметр п'ятна дуги на виробі та про тиск (посилення) дуги на вироб. Розрахунки виконано за рівнянням для вільної поверхні розплаву при впливові на неї поверхових сил (тиску дуги), з урахуванням поверхневого натягу розплаву, що запропоновано Н.Н.Раровим, А.А.Угловим, І.В.Зуєвим. Розрахунки виконано чисельно за методом Рунге-Кутта.

Посилення дуги на основний метал визначено з виразу, що отримано при обробці експериментальних даних:

$$F_{\text{г}} = K_{\text{д}} \cdot I_{\text{св}}^2, \quad [\text{H}] \quad (32)$$

де $K_{\text{д}}$ - коефіцієнт, що залежить від діаметру електрода; для електродів діаметром 3;4;5 мм $K_{\text{д}}$ (відповідно) дорівнює $1,25 \cdot 10^{-7}$; $0,76 \cdot 10^{-7}$; $0,44 \cdot 10^{-7}$ $[\text{H}/\text{A}^2]$.

Посилення дуги на вироб при наплавленні з впливом на дугу ПРМП:

$$\left. \begin{aligned} d_{\text{г}} &= 3 \cdot 10^{-3} \text{ м: } F'_{\text{г}} = F_{\text{г}} - 3 \cdot 10^{-4} \cdot I_{\text{н}} \cdot B_z \quad [\text{H}]; \\ d_{\text{г}} &= 4 \cdot 10^{-3} \text{ м: } F'_{\text{г}} = F_{\text{г}} - 2 \cdot 10^{-4} \cdot I_{\text{н}} \cdot B_z \quad [\text{H}]; \\ d_{\text{г}} &= 5 \cdot 10^{-3} \text{ м: } F'_{\text{г}} = F_{\text{г}} - 1,2 \cdot 10^{-4} \cdot I_{\text{н}} \cdot B_z \quad [\text{H}]; \end{aligned} \right\} \quad (33)$$

де $F_{\text{г}}$ - посилення дуги на основний метал при зварюванні без керуючих впливів;

B_z - величина поздовжньої компоненти індукції ПДМП, Тл.

Обробкою експериментальних даних отримано формули для величини $d_{\text{т}}$ при наплавленні електродним дротом під флюсом без керуючих впливів, а також при впливанні на дугу ПДМП і ПОМП.

Розрахунково-експериментальним шляхом показано, що глибина лунки під дугою при впливанні на дугу ПДМП значно зменшується, що складає $(1+2) \cdot 10^{-3}$ м.

Окреслення форми зони проплавлення основного металу, що

отримано розрахунковим шляхом за розробленою програмою на ЕОМ з використанням моделі двох джерел тепла, задовільно співпали з експериментальними даними при наплавлюванні електродним дротом під флюсом без керуючих впливів, при наплавлюванні з поперечними коливаннями електрода й наплавлюванні з впливами керуючих магнітних полів. Показано також задовільну східність з дослідними даними контурів посилення валиків, отриманих розрахунковим шляхом на ЕОМ за розробленою програмою з використанням рівнянь Б.М.Березовського та розрахункових даних про ширину зони проплавлення (B) й площини наплавленого металу (P_n) при наплавлюванні без керуючих впливів і з керуючими впливами.

В.І.Махненко, Т.Г.Кравцов запропонували формули для розрахункового визначення розмірів зварювальної ванни при наплавлюванні стрічковим електродом. Але І.І.Фрумін показав значну невідповідність розрахункових та експериментальних даних про глибину проплавлення металу при наплавлюванні стрічковим електродом. Виконаними дослідженнями було показано, що розрахункові та експериментальні данні відрізняються на порядок.

Калориметричними дослідженнями встановлено, що значення ефективного к.п.д. нагріву виробу дугою (η_u) при наплавлюванні стрічкою не менші, ніж при наплавлюванні дротом (відповідно $\eta_u = 0.89-0.92$ та $\eta_u = 0.88-0.89$). Аналізом фізичних процесів у зварювальній ванні показано, що при наплавлюванні стрічковим електродом джерелом тепла є весь об'єм зварювальної ванни. Задовільну східність з експериментальними даними про глибину проплавлення металу мають розрахункові дані, отримані з використанням рівнянь для температурного поля від рухомого плоского напівеліптичного джерела тепла та значень $\eta_u = 0.9$. Необхідні для розрахунків $H_{пр}$ розміри зварювальної ванни у плані отримували за відомими рівняннями В.І.Махненка, Т.Г.Кравцова.

Розроблені технологічні процеси наплавлювання й зварювання з керуючими впливами отримали застосування у промисловості.

На Полтавському заводі "Хімвеш" при зварюванні корпусів реакторів хімічного виробництва електродним дротом під флюсом швів стикових з'єднань під емалювання з листової сталі 08кп товщиною $(10-20) \cdot 10^{-3}$ м використані поперечні коливання електрода, а також поперечні й поздовжні магнітні поля з частотою $f = 50$ Гц. Розрахунково-експериментальним шляхом визначено оптимальні параметри режиму зварювання з керуючими впливами при змініх звору в стикові у межах $v = (0-4) \cdot 10^{-3}$ м. Отримано шви, що придатні

під емалювання після зварювання, що дозволило відмовитися від застосованого раніше зняття посилення швів урівень механічним шляхом.

На ОАТ "Єнакієвський металургійний завод" при наплавленням електродним дротом під флюсом зношених деталей металургійного устаткування, що мали форму тіл обертання, застосовували постійне ПДМП, що утворено соленоїдом, по обмотці якого протікав струм наплавлення. Розрахунково-експериментальним шляхом встановлені оптимальні розміри соленоїда, за якими забезпечується максимально ефективний вплив ПДМП на розміри наплавлених валків.

На АТ "Пожзахисту" (м. Маріуполь) при однопрохідному зварюванні стикових з'єднань (на мідній підкладці) корпусів вогнегасників з маловуглецевої сталі товщиною $(1,4-2,0) \cdot 10^{-3}$ м електродним дротом діаметром $2,0 \cdot 10^{-3}$ м під флюсом застосовано постійне ПДМП, що генерувалося соленоїдом, по обмотці якого протікав струм зварювання. Це дозволило покращити формування швів, знижити пропалювання металу, зменшити трудомісткість робіт з ліквідації дефектів у зварювальних з'єднаннях.

Застосування розробленої конструкції електромагнітного приладу з провідників, по яким протікає струм наплавлення, при зносостійкому наплавленні стрічковим електродом під керамічним флюсом ножів бульдозерів на РМЗ (м. Маріуполь) дозволило ліквідувати підрізи, на 20-25% підвищити довговічність наплавлених деталей.

На концерні "Азовмаш" (м. Маріуполь) при механізованому зварюванні плавким електродом валика хромопівнелевих типу 18-10 сталей для припинення блукань катодного п'ятна дуги окисленою поверхнею виробу, запропоновано здійснити домішки в аргон до 10% вуглекислого газу. При цьому не порушується струмковий характер переносу електродного металу, забезпечуються міцнісні характеристики зварювальних з'єднань (у тому числі й стійкість швів проти МКК) та покращується формування швів. Зварювання вертикальних швів таких сталей пропонується виконувати напівавтоматом пульсуючою дугою. Розроблено апаратуру для механізованого зварювання й визначено оптимальні параметри режимів зварювання вертикальних швів стикових, таврових та з'єднань внапусток металу товщиною $(3-10) \cdot 10^{-3}$ м пульсуючою дугою у суміші газів: 90% Ar + 10% Co₂.

Упровадження розробок на підприємствах дозволило отримати значний економічний ефект.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ ТА РЕЗУЛЬТАТИ РОБОТИ

1. Застосування магнітних полів для керування геометричними розмірами перетину валика та шову затримувалось недостатньою вивченістю процесів взаємодії магнітних полів зі зваривальною дугою та рідким металом ванни. Для ефективного використання при наплавлюванні під флюсом стрічкового електроду знадобилося вивчення процесу плавлення електродного та основного металу, а також природи утворення дефектів формування наплавленого валика.

2. Математичним та фізичним моделюванням процесів установлено, що на передній стінці кратера гідродинамічні параметри плівки рідкого металу зумовлюються, здебільшого, тиском зваривальної дуги, а у хвостовій частині ванни під дією сил Лоренца течія рідкого металу є вихровою. При збільшенні швидкості дугового зварювання підрізи утворюються через перебудову режиму течії розплаву та відтоком його до хвостової частини зваривальної ванни.

3. Збільшення ширини валика при наплавлюванні під флюсом із діями знакоперемінного поперечного магнітного поля починається з якогось мінімального рівня індукції магнітного поля, що має назву порогового рівня. Значення порогового рівня індукції збільшуються при збільшенні частоти магнітного поля. Це пов'язано зі стабілізуючим впливом на просторову стійкість дуги шлако-газової порожнечі навколо неї.

При наплавлюванні під флюсом ширина валика збільшується, а глибина проплавлення металу зменшується в однаковому ступені при збільшенні індукції постійного й знакоперемінного частотою 50Гц поздовжнього магнітного поля. Змінення розмірів зони проплавлення пов'язані зі збільшенням діаметра плями дуги на виробі та зменшенням тиску дуги при впливанні поздовжнього магнітного поля.

Встановлена залежність ефективності проплавлення основного металу при наплавленні з дією поздовжніх магнітних полів від знаку градієнту нормальної компоненти індукції вздовж радіуса від вісі електроду є основною для конструювання приладів, що генерують керуючі поздовжені магнітні поля.

4. Встановлено, що процес наплавлювання стрічковим електродом під флюсом є, здебільшого, дуговим процесом, а доля струму, що шунтує дугу крізь шлак, не перевищує 50% струму наплавлення.

Для підвищення коефіцієнта розплавлення стрічкового електрода під флюсом необхідно зменшувати електропровідність шлака та підвищувати температуру його плавлення.

5. Розрахунковим шляхом встановлено, що топологія магнітного поля від струму у вильоті у зв'язку з пересуваннями активної плями дуги на плавкому торці стрічки, а також обмеженістю розмірів її на цьому торцеві значно складніша, ніж при електрошлаковому процесі наплавляння, коли токозйом здійснюється по всій ширині стрічки. Компоненти індукції магнітного поля від струму у вильоті значно більше, ніж від струму у виробі. Електромагнітні сили, що діють на зваривальну дугу, або рідкий метал зваривальної ванни, утворені взаємодією струму в них з компонентами індукції від току наплавлення у вильоті стрічкового електрода. Встановлена електромагнітна природа утворення дефектів форми наплавленого валика й утворення підрізів.

Пропоновані прилади, що компенсують власне поле зваривального контура, дозволили прибрати дефекти формування валиків, наплавлених стрічковими електродами під флюсом.

6. Використання схеми нагрівання виробу загрубленим в основний метал трьохмірним еліпсоїдним джерелом тепла, що моделює зваривальну дугу, й плоского напівеліптичного джерела тепла у хвостовій частині ванни, що враховує тепло перегріву рідкого металу й шлаку зваривальної ванни, дозволяє отримати достовірні розрахункові данні про розміри зони проплавлення основного металу при наплавляванні й зварюванні стикових з'єднань електродним дротом з керуючими діями. Методика дозволяє розраховувати розміри зони проплавлення при наплавляванні стрічковим електродом під флюсом.

Використання розрахункових даних про ширину зони проплавлення основного металу й коефіцієнта розплавлення електрода при наплавленні з керуючими магнітними полями дозволяє визначити форму посилення валика розрахунковим шляхом.

7. Використання магнітних полів при наплавляванні електродним дротом під флюсом деталей металургійного обладнання, стрічковим електродом під керамічним флюсом ножів бульдозерів, при зварюванні під флюсом швів під емалювання й зварювання тонколистового металу дозволило покращити формування металу, підвищити службові характеристики наплавлених деталей й зварних конструкцій, зменшити працевитрати на їх виготовлення, та собівартість продукції. Знищення облучання катодної плями дуги на

виробі при механізованому зварюванні плавким електродом сталі ІХХІВНІОТ домішкою до аргону до 10% вуглекислого газу дозволило покращити формування швів при зварюванні у нижньому положенні та вертикальних швів.

Упровадження розробок на підприємствах дозволило отримати значний економічний ефект.

Основний зміст дисертації опубліковано у таких працях:

1. Размышляев А.Д. Исследование скорости движения жидкого металла в сварочной ванне при дуговой наплавке под флюсом // Сварочное производство. -1979.- N 9. -с.3-5.
2. Размышляев А.Д. Гидродинамические параметры пленки жидкого металла на передней стенке кратера ванны при дуговой сварке // Автоматическая сварка. -1982. -N 1.-с.20-25.
3. Размышляев А.Д. Управление геометрическими размерами шва при дуговой сварке и наплавке воздействием магнитных полей // Сварочное производство. -1994. -N 9. -с.28-31.
4. Багрянский К.В., Размышляев А.Д., Нестеренко К.А. К вопросу о производительности расплавления ленты при электродуговой наплавке под флюсом // Сварочное производство.-1975.-N 3. -с.42-44.
5. Размышляев А.Д., Нестеренко К.А. Особенности плавления ленточных электродов под флюсом // Пути повышения долговечности и надежности деталей металлургического оборудования. -Ворошиловград. -1973.-с.7.
6. Багрянский К.В., Размышляев А.Д. К расчету тепла, выделяющегося в вылете ленточных электродов // Сварочное производство. -1973. -N 4. -с.5-6.
7. Багрянский К.В., Размышляев А.Д. Расчет джоулевого тепла, выделяющегося в вылете ленточных электродов // Прогрессивные методы сварки и наплавки в черной металлургии и машиностроении. -Жданов. -1972. -с.7-8.
8. Размышляев А.Д., Багрянский К.В., Нестеренко К.А. Особенности процесса плавления электродной ленты при дуговой наплавке // Современные методы наплавки и наплавочные материалы. -Киев: -1975. -с.178.
9. Размышляев А.Д., Багрянский К.В., Нестеренко К.А. Теплосодержание капель при дуговой наплавке // Сварочное производство. -1972. -N 5. -с.15-16.
10. Размышляев А.Д., Нестеренко К.А., Сологуб Б.Б. Энергетические параметры дуги и тепловой баланс при плавлении ленты открытой дугой // Автоматическая сварка. -1984. -N 10. -с.72-74.

11. Размышляев А.Д. Исследование тока, шунтирующего дугу через шлак при наплавке под флюсом // Сварочное производство. -1982. -N 5. -с.38-39.
12. Щетинина В.И., Носовский Б.И. и Размышляев А.Д. Энергетические характеристики дуги, горящей на ленточном электроде // Сварочное производство. -1975. -N 9. -с.3-4.
13. Размышляев А.Д. Перемещение дуги при плавлении ленты под флюсом // Автоматическая сварка. -1983. -N 6. -с.70-71.
14. Размышляев А.Д., Маевский В.Р. Электротехнологические особенности процесса дуговой наплавки ленточным электродом // Тезисы докладов первой научно-практической конференции сварщиков Средней Азии и Казахстана. -Караганда: КПИ, 1991. -с.23-24.
15. Размышляев А.Д. Исследование потоков жидкого металла в ванне при дуговой сварке // Сварочное производство. -1985. -N 10. -с.31-32.
16. Размышляев А.Д., Панкратов Н.А. Скорость движения металла в сварочной ванне при наплавке под флюсом // Прогрессивные методы сварки в тяжелом машиностроении и наплавки в черной металлургии. -Жданов: 1977. -с.42-44.
17. Размышляев А.Д. Уточненное определение толщины жидкой прослойки под дугой // Автоматическая сварка. -1980. -N 7. -с.74-75.
18. Размышляев А.Д. О движении жидкого металла в ванне при дуговой сварке // Повышение качества и эффективности процессов сварки и наплавки. -Киев: Наукова думка, 1984. -с.24.
19. Особенности нагрева и проплавления основного металла при дуговой наплавке лентой под флюсом / А.Д.Размышляев, К.В.Багрянский, В.Я.Урюмов и А.С.Акритов // Сварочное производство. -1975. -N 12.-с.3-5.
20. Маевский В.Р., Размышляев А.Д. Моделирование пространственного распределения теплового потока сварочной дуги // Деп.в УКРНИИТИ N 1571 -УК-90 от 7.09.90. -12с.
21. Размышляев А.Д., Маевский В.Р. Моделирование температурного поля пространственно-распределенного источника // Деп.УКРНИИТИ N 1570-УК90 от 7.09.90. -10с.
22. Размышляев А.Д. Методика для определения толщины жидкой прослойки под дугой при сварке // Деп.в УкрНИИТИ N 621-УК90 от 09.04.90. -10с.
23. Размышляев А.Д., Маевский В.Р. Методика расчета размеров сварочной ванны при дуговой наплавке под флюсом // Сварочное

производство. -1994. -N 7. -с.20-23.

24. Размышляев А.Д., Темиров О.Д., Маевский В.Р. Расчет контура сварочной ванны при наплавке колеблющимся электродом // Математические методы и САПР в сварочном производстве. -Свердловск: 1990. - с.37.

25. Размышляев А.Д., Сологуб Б.Б. Глубина проплавления основного металла при наплавке ленточным электродом // Автоматическая сварка. -1976. -N 7.-с.

26. Размышляев А.Д., Багрянский К.В., Нестеренко К.А. Исследование давления дуги при наплавке электродной лентой // Современные методы наплавки и наплавочные материалы. -Киев: Наукова думка, 1975. -с.31.

27. Размышляев А.Д., Лещинский Л.К., Нестеренко К.А. Распределение толщины прослойки жидкого металла по длине кратера сварочной ванны // Автоматическая сварка. -1975. -N 12. -с.62-63.

28. Размышляев А.Д. Расчет термических циклов точек при наплавке ленточным электродом // Прогрессивные методы сварки в тяжелом машиностроении и наплавки в черной металлургии. -Жданов: -1977. -с.38-39.

29. Маевский В.Р., Темиров О.Д., Размышляев А.Д. Расчет размеров сварочной ванны при дуговой наплавке под флюсом при заданной схеме движения электрода // Сварочное производство. -1995. -N 11. -с.21-24.

30. Размышляев А.Д., Маевский В.Р. Электромагнитная природа образования дефектов при наплавке ленточным электродом //Термодинамика технологических систем. -Краматорск: 1993. -с. 128.

31. Размышляев А.Д. Использование магнитных полей для управления формой шва при дуговой сварке под флюсом // Сварные конструкции. Тезисы международной конференции. -Киев: ИЭС им.Е.О.Патона, 1995. -с.61.

32. Размышляев А.Д., Маевский В.Р., Рогачевский А.Х. Совершенствование технологии автоматической сварки швов стыковых соединений под эмалирование // Термодинамика технологических процессов. -Краматорск: КИИ, 1992. -с.47-48.

33. Размышляев А.Д., Маевский В.Р. Технология автоматической сварки под флюсом швов под эмалирование // Тезисы докладов региональной научно-технической конференции. Т.2. Машиностроение. -Мариуполь: ММИ, 1992. -с.68.

34. Размышляев А.Д., Маевский В.Р., Акритов А.С. Моделирование

процесса теплопереноса для определения размеров ванны при дуговой сварке под флюсом // Численные методы в гидравлике и гидродинамике. -Донецк: ДонГУ, 1994. -с.69.

35. Маевский В.Р., Размышляев А.Д. Сварка швов под эмалирование с поперечными колебаниями электрода // Термодинамика технологических систем. -Краматорск: КИИ, 1993. -с.129.

36. Размышляев А.Д., Маевский В.Р. Математическое моделирование электрического поля в вылете и магнитного поля в зоне дуги при наплавке ленточным электродом // Прогрессивная технология производства, структура и свойства порошковых изделий, композиционных материалов и покрытий. -Волгоград: 1992. -с.48.

37. Количественная оценка склонности наплавочных материалов к образованию отколов /А.Н.Серенко, В.А.Муратов, А.В.Почепцов, А.Д.Размышляев // Сварочное производство. -1970. -N 6. -с.3-5.

38. Размышляев А.Д. Легирование металла при наплавке ленточным электродом под керамическим флюсом // Сварочное производство. -1972. -N 7. -с.27-29.

39. Багрянский К.В., Размышляев А.Д. Особенности плавления флюсов и легирования металла при наплавке ленточным электродом под керамическим флюсом // Автоматическая сварка. -1972. -N 3. -Доп. N 3212-71. -с.41.

40. Размышляев А.Д., Нестеренко К.А. Электродуговая наплавка ножей бульдозеров ленточным электродом под керамическим флюсом // Реферативная информация о законченных НИР в ВУЗах УССР. -Киев; 1976. -Вып.17. -с.25-26.

41. Размышляев А.Д. Электродуговая сварка модулированным током вертикальных швов хромоникелевого сплава типа 18-10 // Новые процессы сварки, сварка импульсной дугой и модулированным током. -Киев: ИЭС им. Е.О.Патона, 1988. с.27.

42. Размышляев А.Д. Электродуговая сварка модулированным током вертикальных швов хромоникелевых сталей типа 18-8 // Импульсные процессы сварки. -Киев: ИЭС им.Е.О.Патона, 1988. -с.62-66.

43. Размышляев А.Д. и Псарас Г.Г. О рациональной конструкции проточной части горелки для механизированной сварки плавящимся электродом // Сварочное производство. -1987. -N 6. -с.8-9.

44. Размышляев А.Д., Маевский В.Р. Строение магнитного поля в межэлектродном промежутке при дуговой наплавке ленточным электродом // Сварочное производство. -1995. -N 2. -с.15-18.

45. Размышляев А.Д., Маевский В.Р. Расчет температурного поля от подвижных пространственно распределенных источников //

Вестник ПТУ. - Мариуполь: ПТУ, 1996. - с.185-188.

46. А.с.837657 СССР. Устройство для измерения шлаковой проводимости при дуговой сварке под флюсом // Размышляев А.Д. -Опубл. в Б.И. 1981, N 22.

47. А.с.1703320 СССР. Способ наплавки ленточным электродом / А.Д.Размышляев и В.Р.Маевский. -Опубл. в Б.И. 1992. -N 1.

48. А.с.1704973 СССР. Устройство токоподвода к электроду для сварки и наплавки магнитоуправляемой дугой / А.Д.Размышляев и В.Р.Маевский. - Опубл. в Б.И. 1992. - N 2.

49. А.с.1815058 СССР. Устройство для сварки магнитоуправляемой дугой /А.Д.Размышляев, В.Р.Маевский, С.А.Волков и В.Ю.Коваленко. -Опубл. в Б.И. 1993. -N 18.

50. А.с 1726177 СССР. Способ дуговой сварки / А.Д.Размышляев, В.Р.Маевский. -Опуб. в Б.И. -1992. -N 14.

51. А.с 1808560 СССР. Способ автоматической электродуговой сварки / А.Д.Размышляев и В.Р.Маевский. -Опуб. в Б.И. 1993. -N 14.

52. А.с.407696 СССР. Керамический флюс / А.Д.Размышляев, Л.К.Лещинский, В.В.Тарасов и др. -Опуб. в Б.И. 1973. -N 47.



438890

АННОТАЦИЯ

Размышляев А.Д. Физические основы формообразования валиков и швов при дуговой наплавке и сварке с управляющими воздействиями, рукопись, диссертация на соискание учёной степени доктора технических наук по специальности 05.03.06 "Технология и оборудование для сварки и родственных процессов", Приазовский государственный технический университет, Мариуполь, 1996г.

Установлены физические закономерности формообразования валиков и швов стыковых соединений при электродуговой наплавке и сварке электродной проволокой под флюсом с воздействием поперечных, продольных магнитных полей, поперечных колебаний электрода и при наплавке ленточным электродом. Изучена топология магнитных полей сварочного контура, установлена электромагнитная природа нарушений формирования наплавленного валика. Предложены способы и устройства для устранения дефектов формирования валиков и швов при дуговой наплавке и сварке. Предложены методы расчётного определения формы и размеров зоны проплавления и усиления валиков и швов при дуговой наплавке и сварке с управляющими воздействиями.

Ключевые слова: зварювання, формоутворення швів, магнітне поле, індукція магнітного поля, зварювальна ванна, стрічковий електрод, джерело тепла.

ABSTRACT

Pazmyshljaev A. D. Physical Fundamentals of Bead and Weld Formation in Submerged Arc Welding and Arc Weld Surfacing with Controlling Effects, a manuscript, dissertation submitted for a D.Sc degree in Welding Technology and Equipment and Allied processes (05-03. 0.6 speciality), Azov Sea Region State Technical Univessity. (ASTU).

The physics of bead and weld formation for butt joint designs has been established for electric arc surfacing and submerged arc welding with the effects of applied transverse and longitudinal magnetic filds and with the transverse movements of the electrode.

The patterus of the magnetic fields of the arc welding circuit have been studied and the electromagnetic nature of the poor surface bead formation has been found out. Some techniques and devices have been suggested to remove the defects in the bead and weld formation for arc welding and surfacing. Methods of calculation for determinning the shape and size of the fusion zone have been presented and bead and weld meinfacement by using controlling effects have been suggested.