

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

ІВАНОВ ВІТАЛІЙ ПЕТРОВИЧ



УДК 621.791.92

ТЕОРЕТИЧНІ І ТЕХНОЛОГІЧНІ ОСНОВИ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ  
ПРОЦЕСУ ЕЛЕКТРОДУГОВОГО НАПЛАВЛЕННЯ НА ОСНОВІ  
МОДЕЛЮВАННЯ ФОРМОУТВОРЕННЯ ЗВАРЮВАЛЬНОЇ ВАННИ

05.03.06 – «Зварювання та споріднені процеси і технології»

АВТОРЕФЕРАТ  
дисертації на здобуття наукового ступеня  
доктора технічних наук

Маріуполь – 2019

На правах рукопису.

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

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

**Офіційні опоненти:** доктор технічних наук, професор  
**Сидорець Володимир Миколайович,**  
Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона  
НАН України, провідний науковий співробітник  
відділу фізики газового розряду та техніки плазми

доктор технічних наук, професор  
**Дмитрик Віталій Володимирович,**  
Національний технічний університет  
«Харківський політехнічний інститут»,  
завідувач кафедри зварювання

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

Захист відбудеться «06» грудня 2019 р. в 12<sup>00</sup> год. на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 12.052.01 при Державному вищому навчальному закладі «Приазовський державний технічний університет» за адресою: 87500, м. Маріуполь, вул. Університетська, 7.

З дисертацією можна ознайомитися в бібліотеці ДВНЗ «ПДТУ» за адресою: 87500, м. Маріуполь, вул. Італійська, 115.

Автореферат розісланий «31» жовтня 2019 р.

Вчений секретар  
спеціалізованої вченої ради Д 12.052.01  
доктор технічних наук, професор

В.М. Матвієнко

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** Процеси електродугового наплавлення, володіючи рядом технологічних переваг перед іншими видами відновлення і створення робочих шарів виробів, широко використовуються в ряді галузей промисловості.

У той же час досягнутий на сьогоднішній день рівень знань про ці технологічні процеси явно недостатній для подальшого розширення їх сфери застосування та підвищення якості наплавлених виробів. Умови, які диктуються сучасним етапом розвитку виробництва, настійно вимагають розвитку теоретичних основ процесів, що відбуваються в зварювальній ванні, удосконалення фізичного і математичного моделювання її формоутворення, створення сучасних засобів автоматизованого проектування та керування технологічними процесами і обладнанням для наплавлення.

Побудова таких основ, моделей і засобів можливо на базі глибокого і всебічного теоретичного аналізу фізичних процесів при взаємодії рідкого електродного металу з основним металом. Оскільки фізична природа і математичний опис таких процесів ідентичні для багатьох технологій, доцільна розробка моделей формоутворення зварювальної ванни і наплавленого шару дротяними і стрічковими електродами з урахуванням теорії руху рідких середовищ.

Тому в представленій роботі основна увага приділяється розробці адекватних і придатних до використання в технологічних цілях за критеріями швидкодії і необхідного апаратного забезпечення, математичних моделей процесів електродугового наплавлення, використання яких дозволить забезпечити гарантовану якість та прогнозування властивостей наплавленого шару, розширити технологічні можливості обладнання, значно підвищити рівень автоматизації як самого технологічного процесу наплавлення, так і етапів його розробки, підготовки та контролю. У зв'язку з цим робота є актуальною.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Дисертація виконана відповідно тематиці науково-дослідних робіт кафедри «Автоматизація та механізація зварювального виробництва» ДВНЗ «ПДТУ». Автор дисертації був виконавцем НДР (номери державної реєстрації робіт: 01880083224, 0103U001483, 0106U001396, 0109U001372, 0100Y002583, 01910029523), результати яких відображені у дисертаційній роботі. НДР здійснювалися на базі галузевої науково-дослідної лабораторії (ГНДЛ) наплавлення ДВНЗ «ПДТУ». Автор брав безпосередню участь у розробці методики досліджень, математичному моделюванні, плануванні та проведенні експериментів, виготовленні дослідно-експериментального обладнання, аналізуванні та обробці результатів експериментів, узагальненні отриманих даних, їх промислового впровадженню. Результати наукових досліджень отримані автором при виконанні наступних держбюджетних науково-дослідних робіт: № 0113U006280 «Управління процесами плавлення металу при зварюванні та споріднених процесах (наплавлення, газотермічне напилення)»; № 0114U004908 «Дослідження процесів плавлення при зварюванні та наплавленні з метою підвищення якості зварних з'єднань та покриттів»; № 0115U004948 «Дослідження та розробка обладнання та матеріалів для зварювання та споріднених технологій», № 0116U008769

«Дослідження процесів плавлення металевих складових при зварюванні та споріднених технологіях»; № 0117U007314 «Дослідження процесів взаємодії газових та шлакових складових з металевою фазою при зварюванні та споріднених технологіях».

**Мета і завдання дослідження.** Основною метою роботи є підвищення ефективності процесу електродугового наплавлення на основі математичного моделювання формоутворення зварювальної ванни, а також створення технології та обладнання для реалізації технологічного процесу електродугового наплавлення з керуванням складом та властивостями наплавленого шару.

Для досягнення поставленої мети були поставлені і вирішені такі основні задачі:

- провести аналіз і класифікацію фізичних і математичних моделей формоутворення зварювальної ванни та визначити основні їх особливості та напрямки розвитку математичного моделювання процесу електродугового наплавлення;

- теоретично дослідити основні фізичні процеси, що визначають формоутворення зварювальної ванни при електродуговому наплавленні, розвинути основи теорії еволюції зони проплавлення з урахуванням її залежності від часу формування;

- розробити та верифікувати динамічні математичні моделі формування зони проплавлення для дротяного і стрічкового електродів, визначити способи керування формою і розмірами зони проплавлення, що дозволяють прогнозувати якісні і кількісні параметри наплавленого шару;

- обґрунтувати і експериментально підтвердити можливість використання для моделювання формоутворення наплавленого шару параметрів швидкостей подачі і переміщення електрода в якості керуючих сигналів;

- розробити на основі проведених досліджень технологію керування хімічним складом наплавленого валика при постійному та змінному об'ємі зварювальної ванни при наплавленні двома електродами;

- розробити і впровадити технології, устаткування та програмне забезпечення для електродугового наплавлення з керуванням складом та властивостями наплавленого шару в промислове виробництво.

**Об'єкт дослідження** - процес формоутворення зварювальної ванни при електродуговому наплавленні.

**Предмет дослідження** – функціональні залежності еволюції зони проплавлення основного металу та способи регулювання її основних параметрів при електродуговому наплавленні.

**Методи дослідження.** При виконанні дисертаційної роботи і вирішення поставлених завдань використовувалися методи математичного дослідження і моделювання формоутворення зварювальної ванни, на підставі яких були створені розрахункові методики для визначення параметрів процесу еволюції зони проплавлення при електродуговому наплавленні дротяним і стрічковим електродами. Для верифікації розроблених моделей застосовували експериментальні наплавлення дротяними та стрічковими електродами під шаром флюсу, та дротяним електродом в середовищі захисних газів. При дослідженні зразків

наплавленого шару використовувалися такі методи: хімічний та спектральний аналіз, механічні випробування для визначення складу і властивостей наплавленого металу; оптична мікроскопія для дослідження структури наплавленого металу і пришовної зони; дослідження процесу наплавлення за допомогою автоматизованого науково-дослідного комплексу на основі плати збору даних.

### **Наукова новизна отриманих результатів.**

В дисертації *вперше*:

- встановлено на основі проведених досліджень, що в діапазоні широко використовуваних параметрів режиму наплавлення дротяними електродами діаметром  $3\div 5$  мм і стрічками товщиною  $0,5\div 1,0$  мм та шириною  $30\div 60$  мм під шаром флюсу та дротяними електродами діаметром  $1\div 1,2$  мм в середовищі вуглекислого газу та суміші 80 % аргону та 20 % вуглекислого газу дифузійний теплоперенос визначає розміри зони проплавлення тільки на поверхні основного матеріалу, незалежно від теплофізичних властивостей основних та електродних матеріалів;

- встановлено на основі теоретичних розрахунків та експериментальних даних, що при електродуговому наплавленні під шаром флюсу та в середовищі захисних газів зростання глибини зони проплавлення основного металу завершується в період часу  $4\div 10$  с, причому збільшення швидкості наплавлення в інтервалі  $v_n = 10\div 40$  м/год. зменшує цей період на  $12\div 35$  %; в перші дві секунди формування зони проплавлення її розміри досягають величин, не менш ніж 60 % від граничних, а максимальні значення швидкості зростання зони проплавлення відповідають значенню 0,5 від швидкості подачі електроду;

- з використанням умови рівності металостатичного тиску рідкого металу під зварювальною дугою і тиску дуги отримано узагальнену математичну модель розвитку в часі форми зони проплавлення при електродуговому наплавленні для нерухомого і для рухомого джерела нагріву, яка дозволяє прогнозувати положення і розміри фронту плавлення в залежності від часу дії джерела нагріву, а також визначати момент припинення зростання глибини проплавлення;

- з урахуванням явища переміщення дуги по торцю електрода зі швидкістю  $0,9\div 1$  м/с розроблено адекватну математичну модель плавлення основного та електродного металу при дуговому наплавленні електродною стрічкою під флюсом, яка забезпечує підвищення точності розрахункових даних глибини проплавлення при відхиленні від експериментальних значень не більше 10%;

*отримали подальший розвиток:*

- уявлення щодо закономірностей формування зони проплавлення при електродуговому наплавленні дротяними та стрічковими електродами, що дозволило використати єдиний підхід при розрахунку фінальних форми і розмірів зони проплавлення за умов рівності силового балансу в кратері зварювальної ванни при стаціонарному джерелі нагріву та при його руху зі швидкістю до 40 м/год.;

- теоретичні основи формування зварювальної ванни при електродуговому наплавленні. Проведенням в результаті розрахункових і експериментальних досліджень встановлено, що основною вимогою для побудови нестационарної математичної моделі формування зони проплавлення є використання

тривалості її зростання в якості основної змінної. При цьому зі збільшенням швидкості наплавлення з 5 м/год. до 40 м/год. тривалість зростання зони проплавлення зменшується з 10 с до 6 с;

– математичне моделювання процесу наплавлення шару змінного хімічного складу, що дозволило визначити технологічні параметри, за яких забезпечується симетричність зміни концентрації по довжині шва при використанні трапецеїдальних імпульсів об'ємної швидкості подачі легуючого електроду. Встановлено, що необхідне співвідношення градієнтів швидкості подачі електроду на ділянках збільшення та зниження концентрації легуючого елементу має відповідати умові  $k_1:k_2:k_3 = 1:0,3:1,4$ , що забезпечує максимальну однорідність зносостійкості по довжині шва.

**Практичне значення отриманих результатів.** На основі отриманих наукових результатів представленої дисертаційної роботи:

– розроблено методику розрахунку розмірів зони проплавлення основного металу при нерухомому джерелі нагріву, яка дозволяє на основі параметрів режиму наплавлення визначати координати фронту плавлення в кожний момент часу;

– розроблено методику розрахунку розмірів зони проплавлення основного металу при електродуговому наплавленні одним і двома стрічковими електродами під шаром флюсу, що дозволяє здійснювати вибір оптимальних параметрів режиму;

– розроблено обладнання та системи керування процесом наплавлення з управлінням формоутворенням зварювальної ванни, що дозволяє забезпечити оптимальне тепловкладення в основний метал, стабільне проплавлення і відсутність дефектів формування валика;

– вдосконалено автоматизоване проектування технології наплавлення дротними і стрічковими електродами з урахуванням змінення об'єму зварювальної ванни у часі, що дозволило створити алгоритми керування процесом проплавлення основного металу. Використання розроблених алгоритмів керування привело до розширення сфери застосування сучасного автоматизованого зварювального обладнання, підвищенню ефективності електродугового наплавлення та значної економії матеріальних ресурсів.

– вдосконалено наступні технології електродугового наплавлення: нанесення композиційних шарів на деталі металургійного обладнання; наплавлення робочого шару з різноорієнтованою структурою для підвищення опору зародженню та розвитку тріщин; нанесення захисних шарів на деталі зі змінним кутом нахилу поверхні к горизонту, наплавлення тіл обертання малого діаметру з імпульсними параметрами режиму. Розроблені технологічні варіанти процесу електродугового наплавлення введені в наступні технологічні інструкції: ТІ 227-П-11-2009 «Наплавлення прокатних валків стану слябінг-1 150 стрічковим електродом»; ТІ 227-П-62-2004 «Наплавлення сталевих прокатних валків безперервного ширококутового стану 1700 гарячої прокатки», ТІ Г-12-2010 «Антикорозійне наплавлення деталей хімічного машинобудування».

Результати представленої дисертаційної роботи апробовано на ряді підприємств регіону при відновленні виробів металургійного виробництва та енер-

гетичного машинобудування. Зокрема, в умовах науково-виробничого об'єднання «Укрспецзварювання» (м. Маріуполь) проведено промислове відновлення робочих валків обтискної кліті безперервно-заготовочного стану шаром змінного хімічного складу з економічним ефектом 1,5 млн. грн., в умовах ТОВ «Бастіон» (м. Маріуполь) впроваджено технологію наплавлення листів броньових багатшаровими композиціями підвищеної тріщиностійкості, що дозволило отримати економічний ефект в розмірі 416 тис. грн. В умовах ЗАТ «Гідромаш» (м. Маріуполь) та ТОВ «Укрспецмаш» (м. Бердянськ) здійснене промислове наплавлення партії трубних решіток та отримано сумарний економічний ефект 649 тис. грн. В умовах НПП «КАМІТ» (м. Маріуполь) були проведені промислове випробування та впровадження у виробництво вдосконаленої технології електродугового наплавлення коліс і гальмівних барабанів з ефектом в розмірі 267 тис. грн. Загальний економічний ефект від впровадження результатів дисертаційної роботи склав близько 2 млн. 800 тис. грн.

Результати дисертаційної роботи впроваджено в навчальний процес в рамках навчальних дисциплін «Моделювання технологічних процесів зварювального виробництва» і використовується в науково-дослідній роботі студентів, магістрантів і аспірантів кафедри «Автоматизація та механізація зварювального виробництва» ДВНЗ «ПДТУ».

**Особистий внесок здобувача.** Основні наукові положення, представлені в роботі, є самостійно отриманими і сформульованими результатами теоретичних і експериментальних досліджень, виконаних особисто автором, або з його безпосередньою участю. На основі створених автором математичних моделей розроблені методики розрахунку параметрів зони проплавлення для нерухомого і рухомого джерела нагріву в залежності від часу його дії, розроблені алгоритми керування процесом електродугового наплавлення зі змінним складом та властивостями наплавленого шару та обладнання, що забезпечує реалізацію запропонованих технологічних рішень щодо підвищення якості наплавленого металу і ефективності процесу електродугового наплавлення. Освоєння, впровадження у виробництво розробленої технічної документації, запропонованих технологічних рішень та авторський супровід під час експлуатації наплавлених виробів здійснювалися за активної участі автора разом з працівниками відповідних підприємств, в тому числі, при виконанні госпдоговірних і держбюджетних НДР.

**Апробація результатів досліджень.** Матеріали роботи були представлені на конференціях: Міжнародних науково-технічних конференціях «Університетська наука» (Маріуполь, 2004, 2007, 2009-2011, 2013-2019); IX Міжнародній науково-практичній конференції «Инновационные технологии в машиностроении» (Томськ, 2018); Всеукраїнських науково-технічних конференціях «Сучасні проблеми зварювання та споріднених технологій, удосконалювання підготовки кадрів» (Маріуполь, 2011, 2016); IV Міжнародній науково-технічній конференції «Зварювання та споріднені технології: перспективи розвитку» (Краматорськ, 2016); International Scientific and Methodological conference «Today Material Engineering for realization of the «MMATENG» project objectives» (Маріуполь, 2016); V Міжнародній науково-практичній конференції «Инновационные технологии и экономика в машиностроении» (Томськ, 2014); VI Міжнародній конференції

«Математичне моделювання та інформаційні технології в зварюванні та споріднених процесах» (пмт. Кацивелі, Крим, 2012); Всеукраїнській науково-технічній конференції «Зварювання та споріднені технології» (Запоріжжя, 2007); Республіканській науково-методичній конференції «Сучасні проблеми зварювання, наплавлення і матеріалознавства» (Маріуполь, 2005); IV Всеросійській науково-технічній конференції «Компьютерные технологии в соединении материалов» (Тула, 2003); науковому семінарі ННІ Металів ДВНЗ "ПДТУ" (Маріуполь, 2019).

**Публікації.** За матеріалами дисертації здобувачем опубліковано 65 робіт, з них: 5 статей в зарубіжних виданнях та 2 – в виданнях України, включених до НБД Scopus, 22 статті у спеціалізованих фахових виданнях, 8 патентів, 28 тез доповідей на конференціях.

**Структура і обсяг роботи.** Дисертація складається зі вступу, п'яти розділів, загальних висновків, переліку посилань (найменувань) і додатків. Дисертаційна робота включає в себе 360 сторінок, в тому числі 104 рисунка, 14 таблиць, і перелік використаних джерел з 319 найменувань.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

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

**У першому розділі** проведено аналіз шляхів підвищення ефективності процесу електродугового наплавлення за рахунок керування зміненням параметрів режиму безпосередньо в процесі наплавлення для створення робочих шарів зі змінним складом та властивостями. Зроблено аналітичний огляд стану досліджень причин, рушійних силових факторів, і результатів взаємодії потоків рідкого металу в зварювальній ванні, стану справ в області моделювання зон проплавлення і наплавлення металу шва та досліджень способів керування процесом формоутворення зварювальної ванни.

Основні теоретичні аспекти формоутворення зварювальної ванни були сформульовані такими вченими, як Б.Є. Патон, М.М. Рикалін, R. L. Appa, V.J. Bradstreet, K. Ishizaki, D. R. Milner, D. Rosenthal. Дослідженням впливу гідродинамічних процесів на параметри зони проплавлення присвятили свої роботи М.В. Авдєєв, А.І. Акулов, В.А. Биржев, А.М. Болдирєв, В.А. Букаров, В.П. Демянцевич, А.А. Ерохін, В.І. Коваль, І.М. Ковальов, В.Ф. Кубарев, В.Я. Кубланов, В.К. Лебедев, Г.І. Лесков, С.Л. Мандельберг, В. І. Махненко, В.І. Оботуров, В.І. Столбов, Г.Г. Чернишов, С.Р. Heiple, S. Kou, G.M. Oreper і багато інших вчених. Б.М. Березовський, В.Ф. Демченко, В.В. Дмитрик, І.В. Кривцун, О.Д. Размишляєв, В.М. Сідорець, В.А. Судник, Г.А. Туричин, T. Debroy, W.U. Dilthey, A. Matsunawa, K.C. Tsao, G.G. Roy, S. Yokooya, T. Zacharia, та інші внесли значний вклад в розвиток математичного моделювання гідродинамічних процесів при зварюванні та наплавленні.



Сучасний стан теоретичних і експериментальних досліджень в області моделювання процесу формоутворення зварювальної ванни дозволяє стверджувати, що, як відмічають В.Ф. Демченко та І.В. Кривцун: «...конвекційний перенос енергії в дуговій плазмі і рідкому металі є фактором, що визначає тепловий стан цих середовищ». Однак, сформовані на сьогоднішній день уявлення про те, які фактори, що впливають на конвекційні потоки рідкого металу в зварювальній ванні, вважати основними, не збігаються. До того ж, більшість досліджень гідродинамічних процесів в зварювальній ванні присвячені зварюванню з використанням неплавкого електроду, переважно в середовищі аргону, в той час як дослідження процесу електродугового наплавлення плавким електродом під шаром флюсу практично відсутні.

Аналіз розглянутих математичних моделей дозволив здійснити їх класифікацію в залежності від діючих силових факторів і типу прийнятої розрахункової схеми, виявити основні переваги і недоліки. Були виділені особливості гідродинамічних явищ в зварювальній ванні. З основних відзначено: вплив потоків рідкого металу на передачу тепла від плями дуги до фронту плавлення, великий градієнт швидкості потоків внаслідок температурної залежності в'язкості рідкого металу, а також ту обставину, що характер руху потоків рідкого металу в передній і хвостовій частинах ванни суттєво відрізняється.

Узагальнення експериментальних і теоретичних даних формоутворення зварювальної ванни показало, що напрямлення і параметри потоків рідкого металу визначають форму і розміри зони проплавлення в її головній частині. Попередніми дослідженнями встановлено, що ширина зони плавлення формується безпосередньо в межах кратера, глибина досягає максимуму дещо пізніше, на деякому віддаленні про поточного становища електрода, що залежить від швидкості зварювання. Крім того, багатьма авторами відмічається, що занурення дуги збільшує її проплавлювальну здатність до 20% завдяки посиленню конвекції в аксіальному напрямку.

Одним із шляхів удосконалення математичного моделювання формоутворення зварювальної ванни є виділення в її об'ємі зон в залежності від домінуючих для кожної зони силових факторів, з відповідною зміною математичної моделі для кожної із зон. Варто відзначити, що багато авторів вказують на змінення силового балансу в залежності від зони зварювальної ванни, яка досліджується в конкретному випадку. Оскільки зростання зони проплавлення відбувається в головній частині ванни, зроблено висновок, що нестационарна модель повинна бути розроблена для нерухомого джерела нагріву. Для даного випадку замість швидкості наплавлення формотворчим фактором виступає час горіння дуги, від якого залежать геометричні параметри зварювальної ванни. При цьому існує такий момент часу  $t'$ , в який розмір зони проплавлення досягає свого максимального значення, надалі розплавлений електродний метал витрачається на збільшення розмірів зони наплавлення. Даному значенню  $t'$  відповідає значення швидкості переміщення електрода  $v'_t$ , при якому проплавлення буде максимальним для заданих параметрів тепловкладання. Це обумовлює

необхідність визначення головного фактору припинення у часі зростання зони проплавлення, а також розробки методики розрахунку фінального значення глибини проплавлення основного металу, що безпосередньо пов'язано з показниками якості наплавленого шару.

На основі проведеного аналізу стану теорії та практики моделювання формоутворення зварювальної ванни сформульовані основні завдання дисертаційної роботи.

**Другий розділ** містить результати проведених досліджень з метою розробки математичної моделі формування зони проплавлення зварювальної ванни в нестационарних умовах при нерухомому та рухомому джерелі нагріву з різними параметрами розподіленості для схеми напівнескінченного тіла.

На основі теорії дифузійного теплопереносу форму і розміри зварювальної ванни можливо визначити тільки на поверхні основного металу, тоді як форму зони проплавлення без проведення експериментальних досліджень – лише приблизно. В зв'язку з цим розрахунки геометричних параметрів зварювальної ванни в залежності від параметрів режиму наплавлення в даній роботі були проведені для наплавлення плавким електродом при різних варіантах захисного середовища: під флюсом і в захисних газах.

Використовували функціональні залежності для миттєвого точкового джерела та швидкорухомого точкового джерела на поверхні напівнескінченного тіла. Результати розрахунку порівнювали з даними, отриманими при експериментальному наплавленні електродним дротом Св-08А діаметром  $d_e = 5$  мм під шаром флюсу АН-60 з наступними параметрами режиму: сила струму  $I_n = 800$  А; напруга на дузі  $U_d = 31 \div 32$  В, виліт електроду  $h_e = 40$  мм.

В результаті аналізу отриманих даних встановлено, що при розрахунках контури ванн значно відрізняються від експериментальних, причому, при швидкості наплавлення 5 м/год., розрахункові значення глибини проплавлення  $z_{max}$ , мм, що отримані за допомогою відомих формул, в два рази відрізняються від значень, виміряних на реальних зварювальних ваннах. При швидкості 40 м/год. збіжність розрахункових значень з експериментальними даними дещо покращується, однак форми ізотерми плавлення значно відрізняються від реальних контурів зони проплавлення. Крім того, результати показали, що при наплавленні під шаром флюсу збільшення швидкості наплавлення  $v_n$  в інтервалі 5÷40 м/год. на значення глибини проплавлення практично не впливає. В той же час розрахункові значення глибини проплавлення при  $v_n = 5$  м/год. практично в 2 рази більші, ніж при  $v_n = 40$  м/год.

Аналогічне співвідношення спостерігалось при зіставленні розрахункових та експериментальних даних для випадку електродугового наплавлення в середовищі захисних газів дротом Св-12Х18Н10Т діаметром 1,2 мм у середовищі  $CO_2$  та діаметром 1,0 мм у середовищі 80% Ar+20%  $CO_2$  на пластини з аустенітної сталі товщиною 10÷12 мм на режимах:  $I_n = 200$  А;  $U_d = 30$  В;  $v_n = 18$  м/год. для  $CO_2$  та  $I_n = 250$  А,  $U_d = 35$  В;  $v_n = 18$  м/год. для суміші аргону і вуглекислого газу. В розрахунку брали наступне значення ККД для процесу наплавлення  $\eta_u = 0,8$  та

відповідні значення для теплофізичних коефіцієнтів:  $T_{nl} = 1723$  К;  $\lambda = 25$  Вт/м·К;  $a = 0,053 \cdot 10^{-4}$  м<sup>2</sup>/с. Розрахункові значення  $z_{max}$  спостерігаються на відстані  $x = 15 \div 20$  мм від осі дуги, в той час як за експериментальними даними, максимальне проплавлення  $h_{np} = z_{max}$  спостерігається на відстані  $x = 0 \div 5$  мм. Розрахункові значення  $z_{max}$  на 50 % більше, ніж експериментальні значення.

З метою вдосконалення математичного моделювання формування зони проплавлення при електродуговому наплавленні розробляли методики розрахунку розмірів зони проплавлення в залежності від часу дії джерела нагріву при його постійних параметрах і в залежності від закону зміни цих параметрів. Були виконані розрахунки для випадку наплавлення дротом Св-08А діаметром електрода 4 мм під шаром флюсу АН-60 з наступними параметрами режиму:  $I_n = 650$  А;  $U_d = 32$  В;  $v_n = 0$  м/с. Значення констант і теплофізичних коефіцієнтів:  $\eta_u = 0,9$ ;  $\lambda = 40$  Вт/м·К;  $a = 0,08 \cdot 10^{-4}$  м<sup>2</sup>/с. За цією ж методикою були розраховані значення радіуса ізотерми плавлення при наплавленні аустенітної хромонікелевої сталі в середовищі аргону і вуглецевого газу для нерухокої дуги. При наплавленні в суміші аргону і вуглецевого газу розрахункові параметри режиму були наступні:  $I_n = 255$  А;  $U_d = 35$  В;  $d_e = 1,0$  мм. У разі використання CO<sub>2</sub> –  $I_n = 200$  А;  $U_d = 30$  В;  $d_e = 1,2$  мм, відповідно. Значення констант і теплофізичних коефіцієнтів:  $\eta_u = 0,8$ ;  $\lambda = 25$  Вт/м·К;  $a = 0,053 \cdot 10^{-4}$  м<sup>2</sup>/с.

Проведені дослідження в порівнянні різних розрахункових моделей, що використовуються для визначення поздовжніх профілів зони проплавлення (глибини проплавлення  $h_{np}$ ) при електродуговому наплавленні стрічковим електродом. Вирішували завдання про нагрівання напівнескінченного тіла безперервно діючими лінійним та розподіленим по площі рухомими джерелами. Застосування прямокутного джерела дозволяє змінювати характер розподіленості джерела нагріву по площині основного металу. При визначенні функціональних співвідношень параметрів розподілу джерела нагріву в залежності від технологічного варіанту наплавлення, потрібно було отримати розрахункові розміри зони проплавлення, які є близькими до експериментальних значень в умовах стаціонарної зварювальної ванни.

Дані розрахунків показали суттєву залежність розрахункової глибини проплавлення основного металу  $h_{np}$  вздовж вісі  $z$  від параметрів розподілу потужності джерела по площі прямокутника при наплавленні стрічковим електродом. Збіжність розрахункових даних з експериментальними, враховуючи вплив зварювального струму на розподіленість джерела нагріву, на поверхні основного металу ( $z = 0$ ) цілком задовільна, і менш задовільна в площині  $xOz$  (рис. 1). Значна розбіжність розрахункових і експериментальних значень  $h_{np}$  при нерухомому джерелі нагріву і малих швидкостях наплавлення, пов'язана зі зростанням товщини шару рідкого металу на передній стінці кратера ( $\delta_p$ ). Особливості плавлення стрічкового електрода призводять до того, що тиск дуги на основний метал при наплавленні стрічкою за рівних умов менше, ніж при наплавленні електродним дротом.

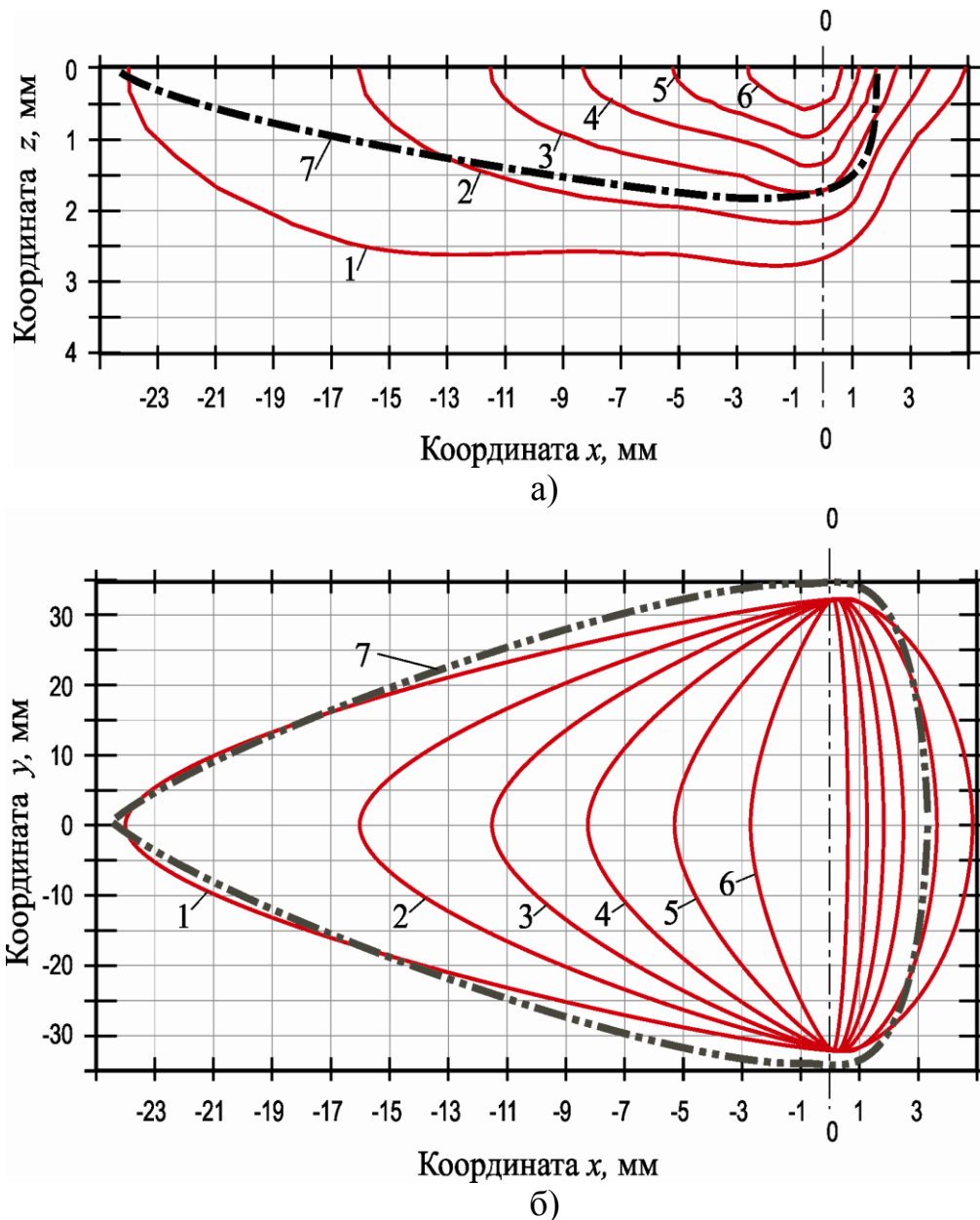


Рис. 1. Розрахункові контури ізотерм при наплавленні електродною стрічкою 08кп перерізом  $60 \times 0,5$  мм в площині  $xOz$  (а) і площині  $xOy$  (б) (флюс АН-60,  $\eta_u = 0,9$ ;  $I_n = 500$  А;  $U_o = 32-35$  В;  $v_n = 10$  м/год.): 1 –  $T = 1770$  К; 2 –  $T = 2500$  К; 3 –  $T = 3300$  К; 4 –  $T = 4100$  К; 5 –  $T = 4900$  К; 6 –  $T = 5700$  К; 7 – експериментальні контури  $T = T_{nl} = 1770$  К.

Дуга у вигляді імпульсів нагріває об'єм рідкого металу під електродом. В цьому випадку ефективність передачі тепла від дуги до основного металу визначається конвекцією рідкого металу в активній (головній) частині ванни, яка зменшується при малих швидкостях наплавлення. При збільшенні струму наплавлення, потоки, що розвиваються в рідкому металі під дією сил Лоренца, сприяють відтоку його з головної частини, збільшують конвекційні потоки в рідкій прошарок під дугою (електродом) і підвищують ефективність проплавлення основного металу –  $h_{np}$ .

Врахування впливу руху рідкого металу зварювальної ванни значно змінює форму зони проплавлення з півсфери, яка характерна для розрахунку на

основі теорії теплопровідності, до більш характерного для реальної ванни виду. Варто зауважити, що певну роль у цьому відіграє також прийнятий розподіл теплового потоку дуги. Розрахункова картина розподілу швидкостей потоків всередині ванни і форма її бічної поверхні свідчить про значний ступінь ідеалізації моделі і необхідності її доопрацювання.

У загальному вигляді рівняння процесу нестационарного теплопереносу виражається в коефіцієнтній формі рівнянням:

$$c_a \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} + d_a \frac{\partial u}{\partial t} + \nabla \cdot (-c \nabla u - \alpha u + \gamma) + \beta \cdot \nabla u + \alpha u = f, \quad (1)$$

де  $u$  – поле швидкостей рідкого металу;  $\nabla$  – набла оператор;  $c_a, d_a, c, \alpha, \beta, \alpha$  – коефіцієнти відповідних видів переносу;  $f$  – функція джерела.

З урахуванням конвекції в (1) додається коефіцієнт  $\alpha = \rho C_p u$  (де  $u$  – поле швидкостей) і маємо:

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} - \nabla \cdot (-\lambda \nabla T + \rho C_p T u) = Q, \quad (2)$$

де  $C_p$  – питома теплоємність при постійному тиску, Дж/кг·К;  $Q$  – питомий тепловий потік, Вт/м<sup>3</sup>.

Прихована теплота плавлення/кристалізації включено в змінну  $C_p$ , перенос тепла рідким шлаком не враховано, прийнято загальний ефективний ККД процесу 0,9. Для теплового потоку дуги прийнято нормальний розподіл.

Тепловий вклад переносу електродного металу в формування зони проплавлення ( $q_d$ ) в залежності від швидкості подачі електродного дроту враховано по наступному рівнянню:

$$q_d = r_w^2 v_w \pi \rho [C_s (T_s - T_0) + C_l (T_d - T_s) + h_{sl}], \quad (3)$$

де  $r_w$  – радіус електроду, м;  $v_w$  – швидкість подавання електроду у зварювальну ванну, м/с;  $C_s, C_l$  – теплоємність при постійному тиску твердого та рідкого електродного металу, відповідно, Дж/м<sup>3</sup>·К;  $T_s, T_d, T_0$  – значення температури для нерозплавленого електроду, електродних крапель та навколишнього середовища, відповідно, К;  $h_{sl}$  – прихована теплота плавлення/кристалізації, Дж/м<sup>3</sup>.

Розглянуто вплив електромагнітних сил при наплавленні дротяним електродом для випадку нерухомого джерела нагріву. Радіальна та аксіальна компоненти сил Лоренца визначалися векторними множеннями:

$$\begin{cases} f_L^r = J_z \times B_\theta \\ f_L^z = J_r \times B_\theta \end{cases}, \quad (4)$$

де  $B_\theta$  – окружна компонента індукції, Тл.

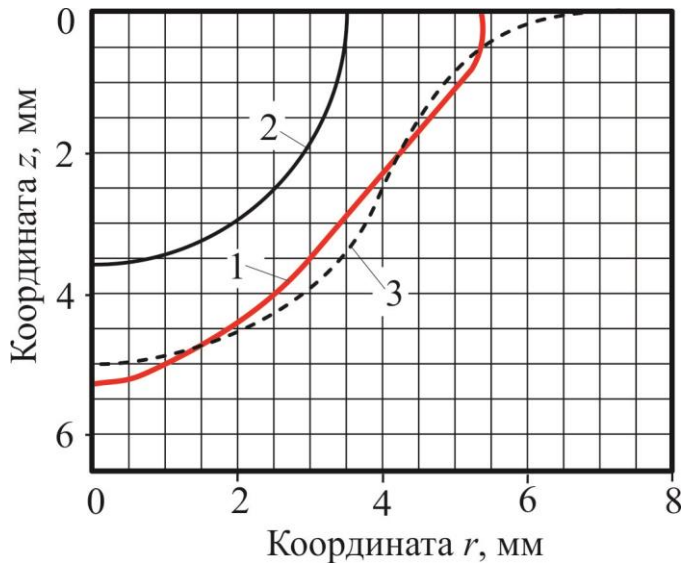


Рис. 2. Вид зони проплавлення з урахуванням конвекційної складової: 1 – розрахункові дані, 2 – розрахункові дані по моделі дифузійного теплопереносу, 3 – експериментальні дані (дріт  $d_e = 4$  мм;  $I_n = 650$  А;  $U_d = 28-30$  В;  $t = 2$  с).

ці рішення диференціальних рівнянь з частинними похідними. В роботі використано метод контрольного об'єму, що містить додаткове адвекційне співвідношення, яке виражає збереження об'ємної частки в потоці рідини на межі поділу вільної поверхні та отримано з консервативної форми закону збереження маси з використанням співвідношень густини та об'ємної частки рідини. Дані свідчать, що форма зони проплавлення значно відрізняються від форм, які отримані за відомими формулами дифузійного теплопереносу. Таким чином, на еволюцію форми зони проплавлення в значній мірі впливають перенесення електродного металу і об'ємні електромагнітні сили в рідкому металі ванни.

За допомогою розробленої моделі були проведені розрахунки розмірів зони проплавлення при електродуговому наплавленні під шаром флюсу низьковуглецевих сталей дротяними електродами діаметром  $2 \div 5$  мм на режимах:  $I_n = 400 \div 1000$  А, швидкість наплавлення  $5 \div 40$  м/год. і наплавленні аустенітних сталей дротяними електродами діаметром  $1 \div 1,2$  мм в середовищі вуглекислого газу та суміші 80 % аргону та 20 % вуглекислого газу. Встановлено добрий збіг результатів розрахунку з даними, отриманими в результаті експерименту, у всьому досліджуваному діапазоні вихідних даних (рис. 3).

В даній роботі запропонована методика розрахунку геометричних параметрів зварювальної ванни, яка заснована на поданні області рішення, що сформована із зон, форма і розміри яких визначаються в рамках спрощених математичних моделей, орієнтованих на переважаючі в цих зонах силові фактори. В даному випадку використання тіл обертання в якості області рішення кожної із зон допустимо, оскільки прийняті спрощення дійсні лише в межах даної зони.

На рис. 2 представлені результати розрахунку впливу конвекційної складової на формування зони проплавлення. Проведені дослідження впливу і других факторів на розподіл швидкостей рідкого металу в зварювальній ванні і її розмірів у часі ( $v_n = 0$ ). Зроблено висновок, що основний вплив на формування зони проплавлення при наплавленні під шаром флюсу надають об'ємні електромагнітні сили і перенесення крапель електродного металу в ванну. Вказані силові фактори були враховані при розрахунку формування нестационарної моделі зони проплавлення. Розрахунок вели за допомогою методу скінчених елементів в пов'язаній постановці

Загальна форма поверхні розділу фаз в даному випадку визначається як розмірами окремих зон, так і значеннями зміщень  $\Delta_i$  між зонами. Для визначення  $\Delta_i$  використовували емпіричні залежності виду  $\Delta_i = \{\Phi_i^n\}$ , згруповані за варіантами технології. Це дозволило зменшити обсяг обчислень і забезпечити необхідну точність при використанні наближених аналітичних розв'язків диференціальних рівнянь, що входять в детерміновані моделі.

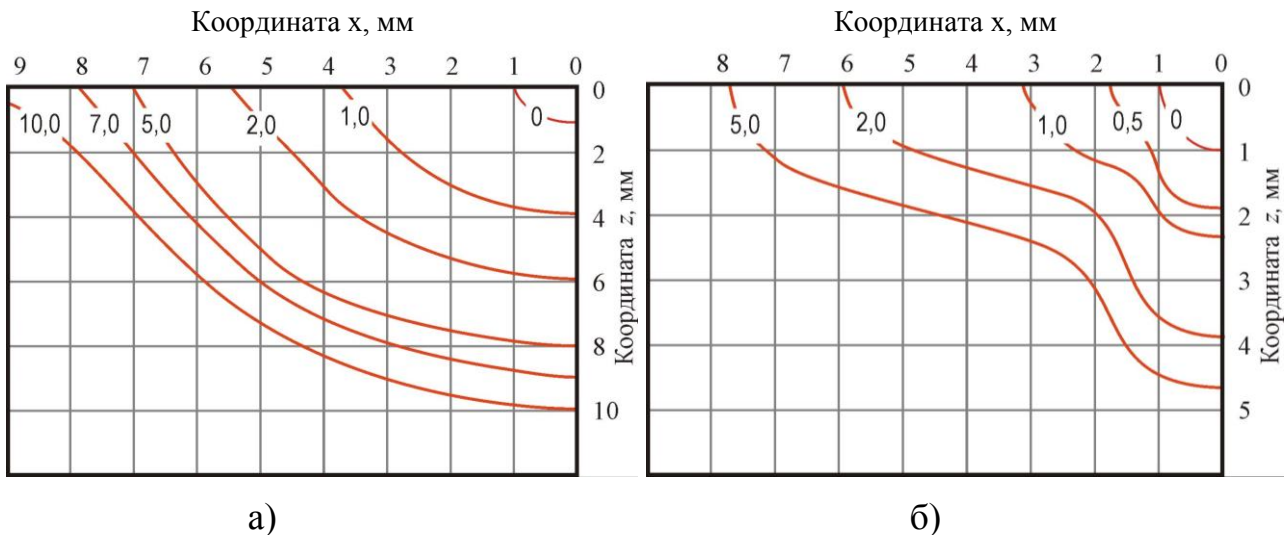


Рис. 3. Еволюція зони проплавлення при наплавленні під шаром флюсу (а) з параметрами режиму: Св-08А; АН-60;  $d_e = 4$  мм;  $I_n = 650$  А;  $U_d = 30 \div 32$  В; і в суміші 80% Ar+20% CO<sub>2</sub> (б) з параметрами режиму:  $d_e = 1,0$  мм;  $I_n = 250$  А;  $U_d = 35$  В; (цифри на лініях позначають час дії джерела нагріву в секундах).

Для верифікації запропонованої методики проведені розрахунки для позовжніх і поперечних контурів ізотерм проплавлення для випадку наплавлення низьковуглецевих сталей електродним дротом діаметром 4÷5 мм в діапазоні режимів:  $I_n = 750 \div 850$  А;  $U = 29 \div 34$  В;  $v_n = 0,03 \div 0,07$  м/с. В ході розрахунку були визначені розміри зон 2, 3 і 4 (рис. 4), причому вважалося, що границі всіх зон сходяться у передньої кромки фронту плавлення. Параметри зони 2 визначалися відповідно до розробленої моделі без урахування в'язкості, для 3 зони була використана стандартна модель на основі дифузійного теплопереносу для нерухомого джерела. Розміри 4 зони, аналітично пов'язані зі значеннями швидкості наплавлення, також обчислювалися відповідно до дифузійної моделі, оскільки є коректними до даних експерименту, як було вказано вище.

Отримані дані були використані для побудови контурів зварювальної ванни для випадку наплавлення дровим електродом з параметрами режиму:  $d_3 = 5$  мм;  $I_n = 800$  А;  $U_d = 32$  В;  $v_n = 0,033$  м/с. Порівняльна оцінка отриманих контурів показала, що величина їх розбіжності з контурами, побудованих на основі чисельних рішень, не перевищує 7,5%.



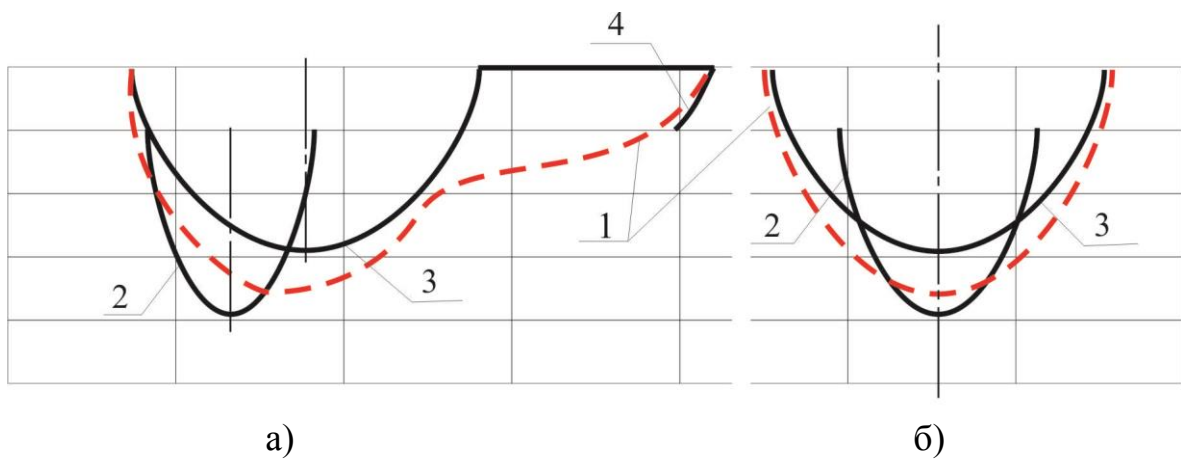


Рис. 4. Вид розрахункових контурів зварювальної ванни в поздовжньому (а) і поперечному (б) перерізі ( $A$  – експериментальні дані).

Але при цьому слід зазначити загальний недолік розробленої нестационарної математичної моделі і методик розрахунку формування зони проплавлення при електродуговому наплавленні. Використання часу в якості незалежної змінної зростання глибини зони проплавлення обумовлює необхідність визначення її фінальних розмірів.

**Третій розділ** присвячений розробленню удосконаленої нестационарної математичної моделі формоутворення зварювальної ванни при використанні електродного дроту і стрічки. Постановка задачі побудови нестационарної математичної моделі формоутворення зварювальної ванни передбачала визначення вирішального фактору припинення зростання глибини зони проплавлення. В якості такого критерію прийнято баланс тиску дуги  $p_d$  і металостатичного тиску  $p_m$  в зварювальній ванні під дугою  $p_d = p_m$ .

Для аналізу балансу тисків в кратері зварювальної ванни здійснювали зондування вільної поверхні рідкого металу зварювальної ванни в хвостовій її частині. Визначали форму вільної поверхні рідкого металу зварювальної ванни при дуговому наплавленні дротом Св-08А діаметром 5 мм під флюсом АН-60 на пластину з низьковуглецевої сталі Ст3сп товщиною 20 мм. Результати проведених досліджень показали, що при збільшенні швидкості наплавлення, металостатичний тиск рідкого металу, знижується одночасно зі зменшенням рівня вільної поверхні рідкого металу. Це призводить до перерозподілу балансу тисків під дугою, яка заглиблюється у зварювальну ванну, що компенсує зниження тепловкладення в основний метал. Фінальне значення глибини зварювальної ванни визначає максимальний надлишковий тиск по осі дуги:  $p_{d \max}$  (Па):

$$p_{d \max} = \frac{\mu_0 I^2}{4\pi^2 R_d^2}, \quad (5)$$

де  $\mu_0$  – магнітна стала, Н/А<sup>2</sup>;  $R_d$  – радіус дуги, м.

Для нерухомого джерела нагріву була побудована розрахункова схема, що представлена на рис. 5.



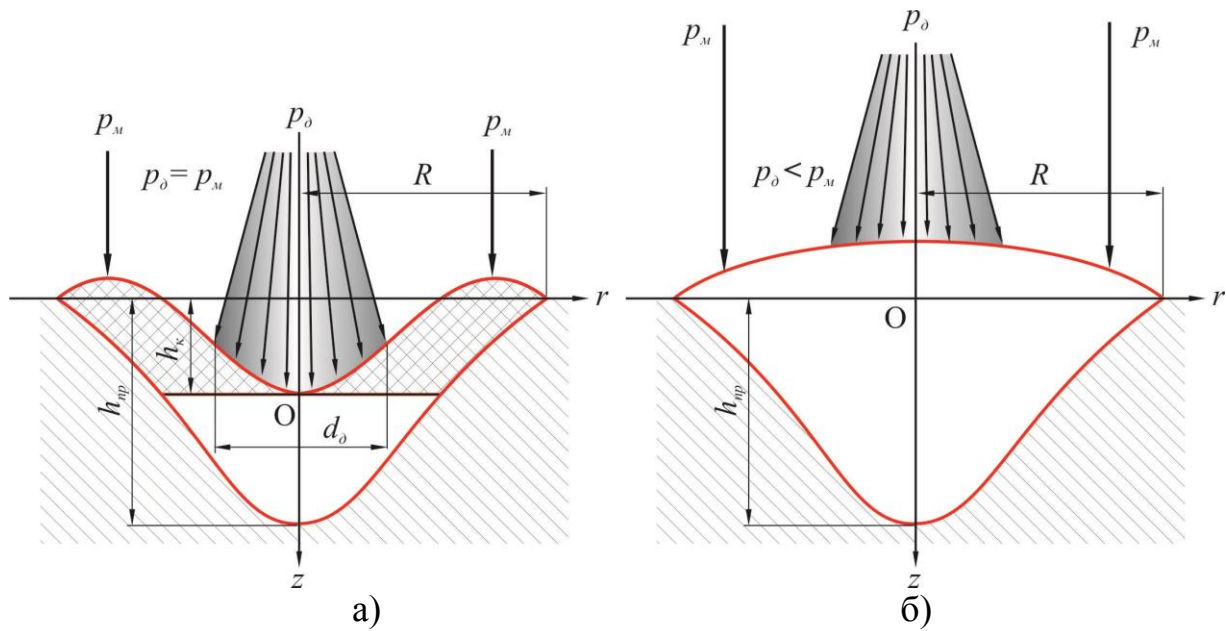


Рис. 5. Схема балансу тиску дуги ( $p_d$ , Па) і металостатичного тиску ( $p_m$ , Па) в зварювальній ванні при нерухомому джерелі нагріву для різних моментів часу і співвідношення тисків в зварювальній ванні: а)  $p_m = p_d$ ; б)  $p_m > p_d$ .

Оскільки енергетичні характеристики дуги не змінюються при постійних параметрах режиму наплавлення, зростання зони проплавлення відбуватиметься до моменту, при якому тиск дуги буде врівноважений металостатичним тиском рідкого металу (рис. 6). Після цього моменту дуга буде витіснятися вгору і метал рідкого прошарку, заповнюючи кратер, буде збільшувати виключно зону наплавлення.

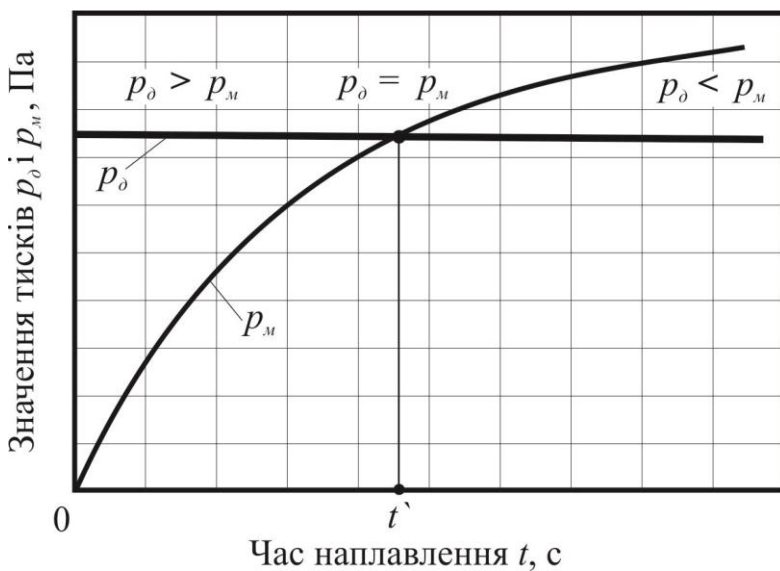


Рис. 6. Схема динаміки балансу тисків в зварювальній ванні при нерухомому джерелі нагріву.

Оскільки металостатичний тиск рідкого металу визначається геометричними параметрами зварювальної ванни, а зростання об'єму наплавленого металу при постійній швидкості подачі електроду є пропорційним, рівняння балансу тисків було перетворено в його геометричний аналог, в якому фінальне значення глибини зони проплавлення, при якій припиняється зростання зони проплавлення виражено наступним рівнянням:

Результат розрахунку за розробленою методикою дозволяє, таким чином, отримати в якості вихідного параметра значення моменту часу  $t'$ , при досягненні якого зварювальна дуга буде витіснена на поверхню основного металу і зростання глибини проплавлення припиниться. Оскільки металостатичний тиск рідкого металу визначається геометричними параметрами зварювальної ванни, а зростання об'єму наплавленого металу при постійній швидкості подачі електроду є пропорційним, рівняння балансу тисків було перетворено в його геометричний аналог, в якому фінальне значення глибини зони проплавлення, при якій припиняється зростання зони проплавлення виражено наступним рівнянням:

$$h_{i\delta} = \frac{j_{\dot{a}} \cdot I_i \cdot 10^{-7}}{\rho g} - h_{i\hat{n}} + \delta_{\delta}, \quad (6)$$

$j_{\dot{a}}$  – середня густина струму в дузі, А/м<sup>2</sup>;  $\rho$  – густина рідкого металу, кг/м<sup>3</sup>;  $h_{noc}$  – висота посилення наплавленого валика, м;  $\delta_p$  – товщина прошарку рідкого металу під дугою, м. В розрахунках приймали значення  $j_{\dot{a}} = 20 \cdot 10^6$  А/м<sup>2</sup>.

При вирішенні рівняння балансу зварювальної ванни під дією сил поверхневого (міжфазного) натягу і сил тяжіння, яке має вигляд диференціального рівняння другого ступеня, використовували варіаційно-енергетичний метод по моделі формування зони наплавлення Б.М. Березовського:

$$\sigma \left( \frac{d^2 z}{dx^2} \right) \pm g(\rho_1 - \rho_2)z + C_0 = 0, \quad (7)$$

де  $\sigma$  – міжфазний (поверхневий) натяг, Н/м;  $\rho_1$  – густина рідкого металу, кг/м<sup>3</sup>;  $\rho_2$  – густина газової (шлакової) фази, кг/м<sup>3</sup>;  $C_0$  – постійна, що залежить від вибору початку координат.

Вирішення рівняння (7) виконували за допомогою прикладного програмного пакету MathCAD в параметричній формі з використанням безрозмірних змінних, не вдаючись до перетворення в еліптичні інтеграли. Далі визначали безрозмірний аналог висоти наплавленої точки  $c$ . Розрахунок зупиняли при виконанні рівності  $c = h_{noc}$ .

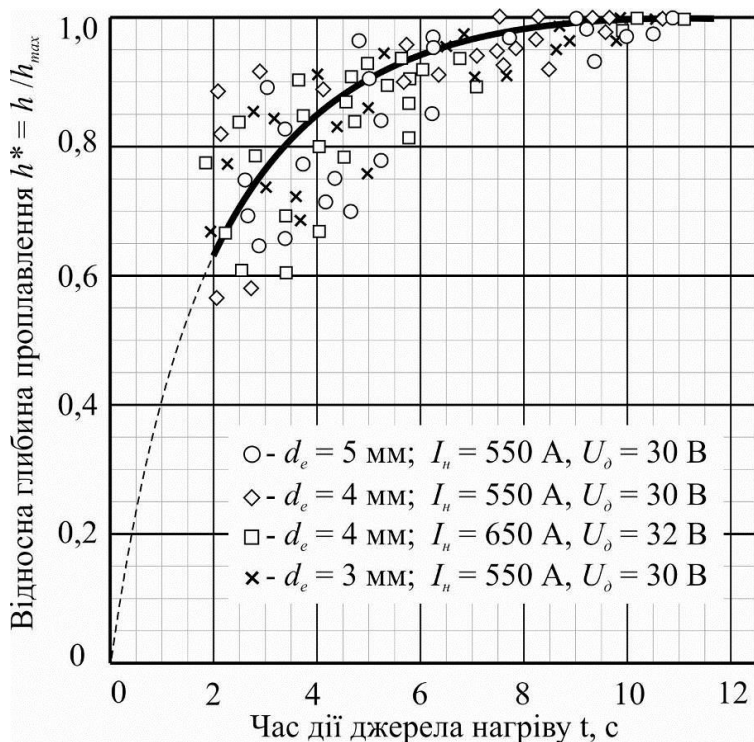


Рис 7. Залежність відносної глибини проплавлення від часу дії джерела нагріву.

Результати розрахунку по розробленій методиці показали, що формування зони проплавлення в широкому діапазоні параметрів режиму для випадку наплавлення дротяним електродом під шаром флюсу практично збігається. Для підтвердження цього висновку провели зіставлення розрахункових і експериментальних даних. На рис. 7 наведена узагальнена залежність відносної глибини проплавлення  $h^*$  від часу дії джерела нагріву для наплавлення дротяними електродами під шаром флюсу в порівнянні з експериментальними даними.

Аналіз даних показав, що при електродуговому наплавленні під шаром флюсу дротя-

ними електродами зростання глибини зони проплавлення основного металу завершується в період часу 10÷12 с, причому в перші дві секунди формування зони проплавлення її розміри досягають величин, не менш ніж 60 % від граничних для всіх варіантів наплавлення.

Отриману залежність відносної глибини проплавлення від часу дії джерела нагріву використовували в розрахунковій нестационарній моделі зростання зони проплавлення, яка була розроблена на підставі моделі, використовуваної в гідродинаміці і, зокрема, в теорії струменів в'язкої рідини. Внаслідок в'язкості потік рідкого металу втягує в рух розплавлений основний метал, надаючи йому частину початкового імпульсу і, знижуючи тим самим, значення швидкості на осі і в поперечних перерізах. Таким чином, процес розвитку зони проплавлення зводиться до вирівнювання початкового профілю швидкості рідкого електродного металу з різким градієнтом зниження її абсолютних значень за рахунок підвищення в'язкості. Для розглянутого випадку проплавлення напівнескінченного тіла крапельним струменем рідкого електродного металу при нерухомому джерелі нагріву розрахунок еволюції зони проплавлення виконувався шляхом обробки експериментальних даних поширення зони проплавлення в залежності від параметрів режиму наплавлення і виду захисного середовища.

Обробка експериментальних даних розмірів зони проплавлення при електродуговому наплавленні під флюсом та в середовищі захисних газів здійснювалася методом множинного регресійного аналізу з відсіювання змінних на рівні значущості  $\alpha = 0,03$  при значенні коефіцієнта кореляції  $R = 0,96 \div 0,97$ . За результатами значень величини середнього відхилення були обрані поліноми третього ступеня, що показали досить хорошу збіжність з результатами досліджень. Диференціюванням залежностей за часом отримано моделі зростання зони проплавлення до її кристалізації в межах використовуваного масиву вихідних даних. Дослідження моделей зростання зони проплавлення в кожному досліджуваному інтервалі часу показало, що вони можуть бути узагальнені нелінійною функцією виду:

$$v_i(r) = \left[ \varepsilon_1 (r)^2 + \varepsilon_2 \exp(r) + \frac{\varepsilon_3}{\exp(r)} + \varepsilon_4 r + \varepsilon_5 \right]^{-1}, \quad (8)$$

де  $v_i(r)$  – відносна швидкість для  $i$ -го інтервалу;  $r$  – відносна координата точки фронту плавлення;  $\varepsilon_i$  – коефіцієнти, що є функціональними залежностями від швидкості подачі електроду та його характерних розмірів.

Функціональні залежності, що входять в (8), визначалися статистичною обробкою результатів вимірювання параметрів зон проплавлення макрошліфів, отриманих дуговим точковим наплавленням під флюсом для різних перерізів дротяного і стрічкового електродів і вживаних діапазонів швидкостей подачі (сили струму) в залежності від часу горіння дуги. На рис. 8 представлений графік залежності руху фронту проплавлення в циклі його формування, розбитого на 10 рівних інтервалів часу.

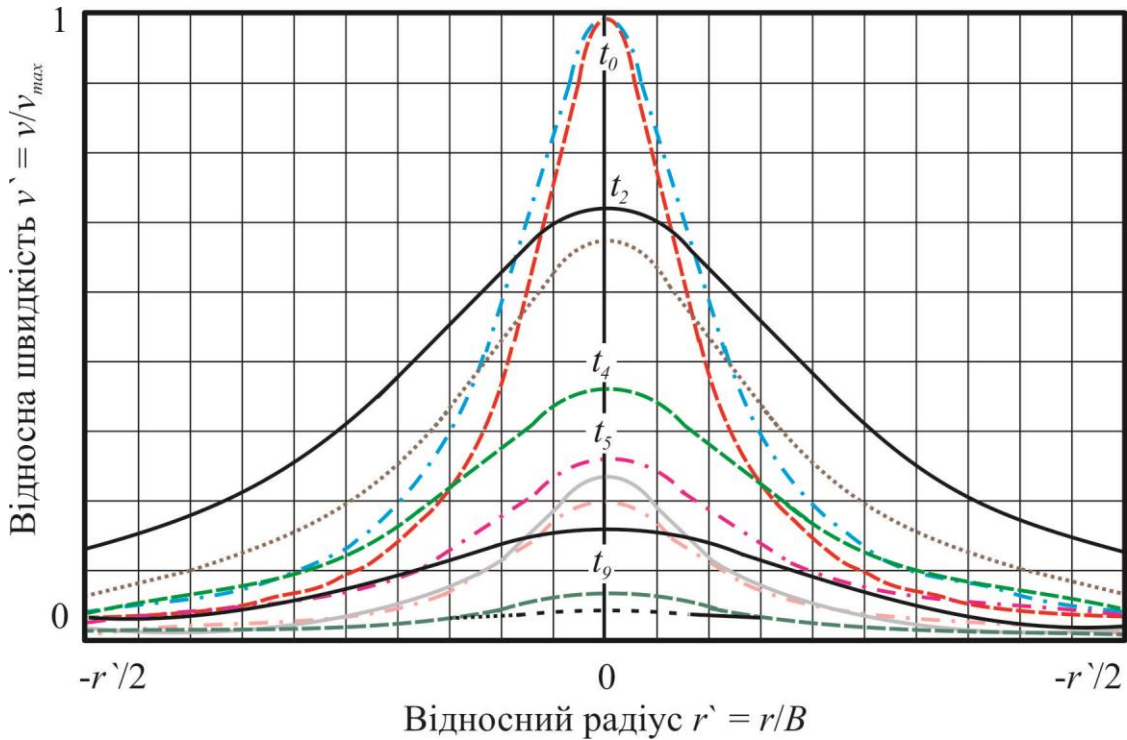


Рис. 8. Залежність зміни відносної швидкості руху фронту плавлення основного металу:  $t_i$  – інтервал часу формування зони проплавлення,  $i$  – номер інтервалу циклу формування.

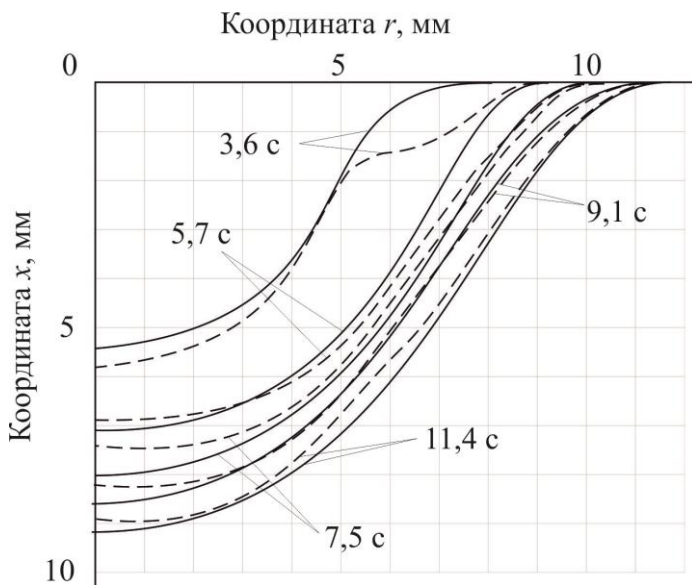


Рис. 9. Розрахункові і експериментальні (пунктир) контури зварювальної ванни: Св-08А;  $d_e = 4$  мм;  $I_n = 650$  А;  $U_o = 30-32$  В.

Результати розрахунку значень відносної швидкості руху фронту плавлення показали, що після закінчення приблизно 10 с, профіль швидкостей по перерізу ванни вирівнюється і межі зони проплавлення збільшуються у всіх напрямках більш рівномірно, в той час як абсолютне значення швидкості зменшується до 0. Цей факт підтверджує і зменшення величини розбіжності між розрахунковими і експериментальними даними в цьому інтервалі часу (рис. 9).

Аналіз отриманих даних показав, що в перші секунди формування зони проплавлення її різке зростання не дозволяє забезпечити задовільний збіг результатів розрахунку з даними замірів експериментальних точок, оскільки час формування було розбито на рівні інтервали.

Надалі зміна швидкості стає більш рівномірною. Це підтверджується і зменшенням величини розбіжності між розрахунковими і експериментальними даними в цьому інтервалі. Порівняння профілів зони проплавлення показало до-

сильно хорошую согласованность расчетных и экспериментальных данных, за исключением случая сплавления, что связано с отсутствием учета влияния наплавленного металла на зону проплавления.

Разработана методика позволяет определить распределение скоростей потоков жидкого металла при изменении скорости подачи электрода по определенному закону. В этом случае текущие значения функции изменения скорости  $\varphi(V_0)$  используются в качестве аргументов уравнения (8) для каждого расчетного интервала времени. В случае возрастания градиентов изменения скорости количество расчетных интервалов должно быть соответственно увеличено.

Расширение результатов расчета для неподвижного источника на случаи, когда скорость наплавления не равна нулю, предполагает использование данных, полученных для неподвижной дуги. Это связано с тем, что размеры зоны проплавления уже сформированы в головной части ванны.

В случае перемещения электрода, максимум проплавления находится на определенном расстоянии от оси электрода, поэтому максимальная глубина проплавления не совпадает с максимальной высотой шва  $h$  после его

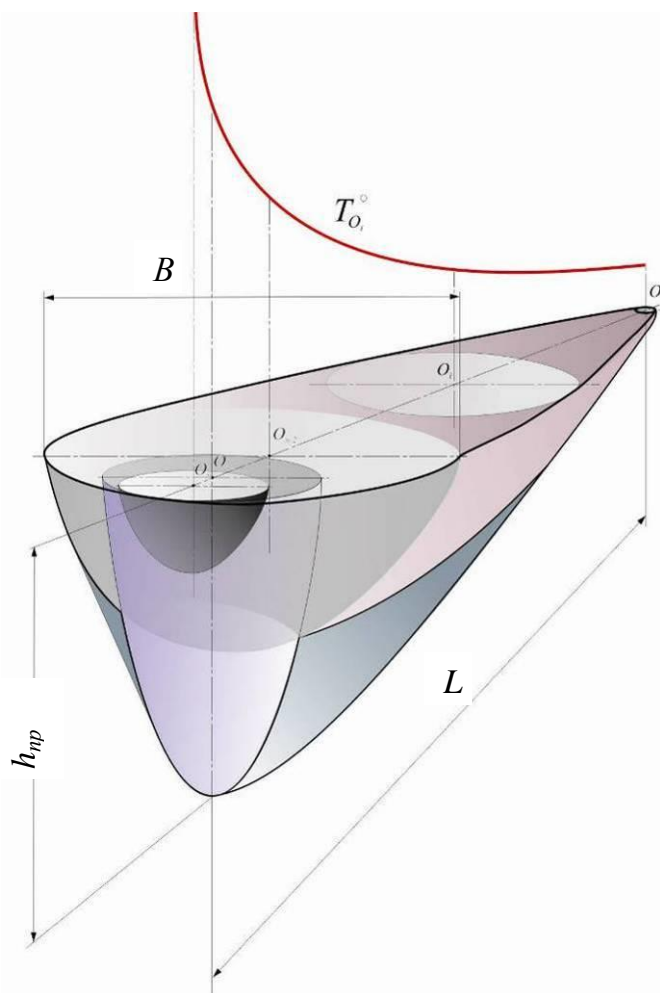


Рис. 10. Расчетная схема для определения размеров свариваемой ванны в случае перемещения источника нагрева со скоростью наплавления.

кристаллизации. В качестве расчетной схемы для подвижного источника нагрева (рис. 10) использовалась схема перемещения нестационарной зоны проплавления, которая движется со скоростью  $v_n$  и фиксируется в момент времени  $t_i$  (с шагом  $\Delta$ ). Текущее положение определяется точкой  $O'$ , в которой формируется нестационарная зона проплавления с радиусом  $r_i$ . Шаг  $\Delta_i$  определяет время  $t'$ , за которое фронт плавления достигает области, ограниченной диаметром  $B$  и длиной  $L$ .

После завершения шага по времени  $t'$  начинается кристаллизация свариваемой ванны данной конфигурации, ограниченной изотермой  $T_{пл}$ , и источник перемещается на шаг  $\Delta$ . Как условие оптимизации процесса использовалась равенство  $\Delta' = \Delta$ , то есть в данном случае обеспечивается условие максимальной зоны проплавления при данной мощности источника тепла. В этом случае обеспечивается минимальная потеря энергии при заданных параметрах шва, то есть, для уменьшения размеров глубины проплавления и доли участия основного металла оптимизационное условие выглядит



наступним чином:  $\Delta' = \beta \Delta$ , де  $\beta$  – коефіцієнт, що залежить від параметрів наплавлення: розміру електрода, швидкості його подачі і швидкості переміщення джерела нагріву.

Для підтвердження цього висновку проводили дослідження формування зони проплавлення при електродуговому наплавленні хромонікелевих аустенітних сталей дротяним електродами в середовищі захисних газів. Використовували автоматичне наплавлення в вуглекислому газі і в суміші 80 % Ar + 20 % CO<sub>2</sub>. В якості основного металу використовували пластини зі сталі 12X18H10T 300×150 мм завтовшки 10 і 15 мм. Для наплавлення в середовищі вуглекислого газу використовували дрiт Св–08Х20Н9Г7Т діаметрів 1,2 мм і 2 мм, в суміші 80 % Ar + 20 % CO<sub>2</sub> – дрiт 12Х18Н10Т діаметрів 1,0 мм і 1,6 мм. На рис. 11 представлені макрошліфи наплавлених валиків в різних газових середовищах.

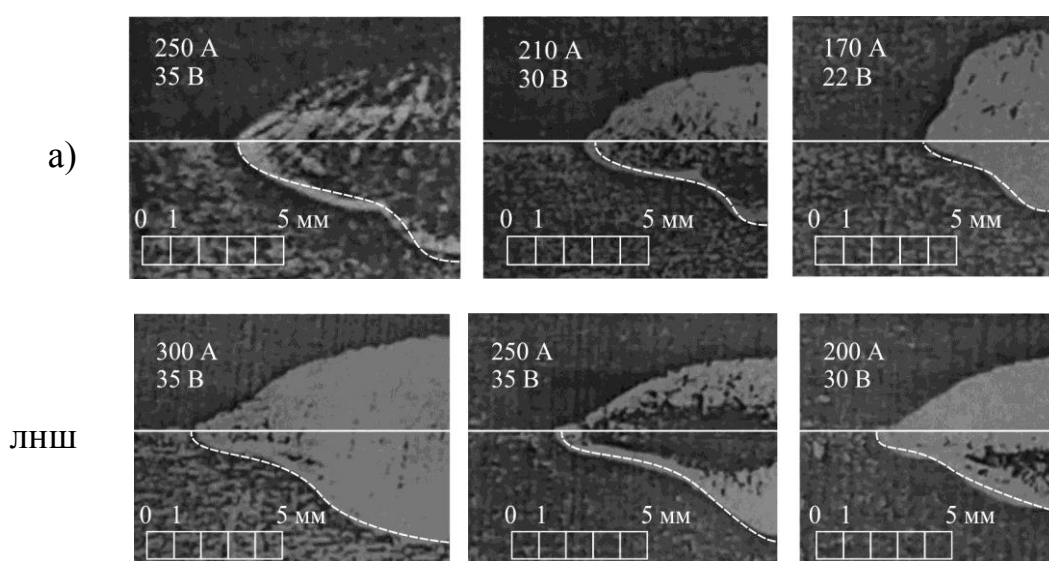


Рис. 11. Розрахункові (пунктир) і експериментальні контури зварювальних ванн при зварюванні плавленням в середовищі вуглекислого газу (а) і суміші 80% Ar+20% CO<sub>2</sub> (б): а)  $d_e = 1,2$  мм;  $v_n = 20$  м/год.; б)  $d_e = 1$  мм;  $v_n = 20$  м/год.

Досліджували також процес формування зони проплавлення при електродуговому наплавленні під флюсом з метою верифікації розробленої моделі. На рис. 12 представлена залежність глибини зони проплавлення від струму наплавлення (швидкості подачі електрода) при автоматичному електродуговому наплавленні дротяним електроном діаметром 4 мм ( $v_n = 15$  м/год.). Для порівняння наведені макрошліфи для значень сили струму 550 А, 680 А і 750 А при наплавленні дротом під шаром флюсу (зона проплавлення виділена пунктирною лінією).

Порівняння розрахункових показників з результатами експериментальних досліджень параметрів зварювальної ванни при наплавленні під шаром флюсу низьковуглецевих і нержавіючих сталей показало добру їх збіжність, середня помилка склала 3,3 %.

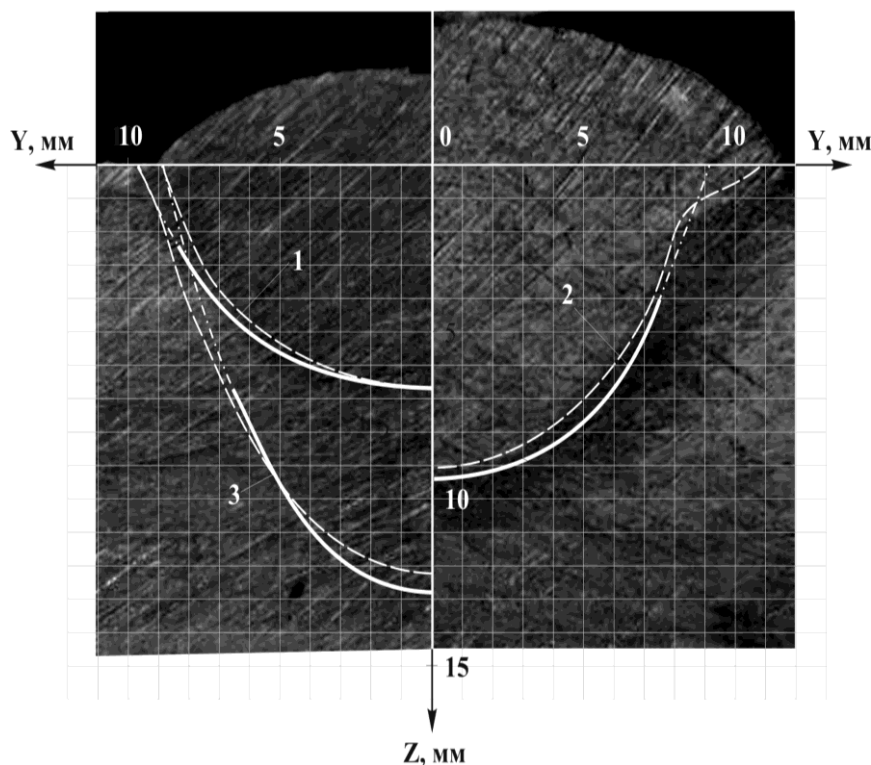


Рис. 12. Розрахункові (суцільні лінії) і експериментальні (пунктир) контури зварювальних ванн при електродуговому наплавленні під шаром флюсу електродом  $\varnothing 4$  мм з швидкістю подачі електроду: 1 – 0,025 м/с (550 А); 2 – 0,033 м/с (680 А); 3 – 0,044 м/с (750 А).

валика основний метал проплавляється на більшу глибину, відповідно, у крайніх електродів плавиться більша кількість флюсу, що значно впливає на формування та якісні показники наплавленого шару. При використанні суцільного стрічкового електроду нерівномірність проплавлення також зв'язана з переміщення дуги по торцю стрічки, хоча ця залежність проявляється в меншій мірі. Урахування цього явища для моделі проплавлення основного металу та розплавлення стрічкового електроду потребувало розроблення нової розрахункової методики.

В новій методиці прийнято, що протікання струму через переріз локальної ділянки без урахування розтікання струму по площі стрічкового електроду здійснюється у вигляді періодичних імпульсів. Якщо перенесення краплі здійснюється без короткого замикання, дуга, вичерпавши запас еластичності, виникає (зміщується) на сусідній ділянці, тим самим забезпечуючи сумарну швидкість плавлення стрічкового електроду, рівну швидкості подачі. Переходячи послідовно від ділянки до ділянки, отримуємо процес послідовного розплавлення стрічкового електроду та проплавлення основного металу по ширині ванни (рис. 13). В реальних умовах таке можливо в початковий момент наплавлення при навскіс обрізаному торці електроду. Надалі, порядок слідування ділянок збудження дуги буде носити хаотичний характер, але, для прийнятої в моделі швидкості її переміщення в межах  $0,9 \div 1,0$  м/с, це не впливає на результати розрахунку.

Формоутворення зварювальної ванни при використанні стрічкового електроду розглянуто на прикладі зіставлення з випадком багатоелектродного наплавлення розташованими в ряд електродними дротами із загальним струмопідводом. В обох випадках зварювальна дуга утворюється на ділянках торця стрічки або дротяних електродів поперемінно, що призводить до нерівномірного розподілу тепловкладення і глибини проплавлення по ширині ванни в кожен окремих момент часу. Це також пояснює нерівномірність проплавлення по ширині валика тим, що параметри горіння дуги розрізняються залежно від її розташування по ширині ванни. В більшості випадків, на краях

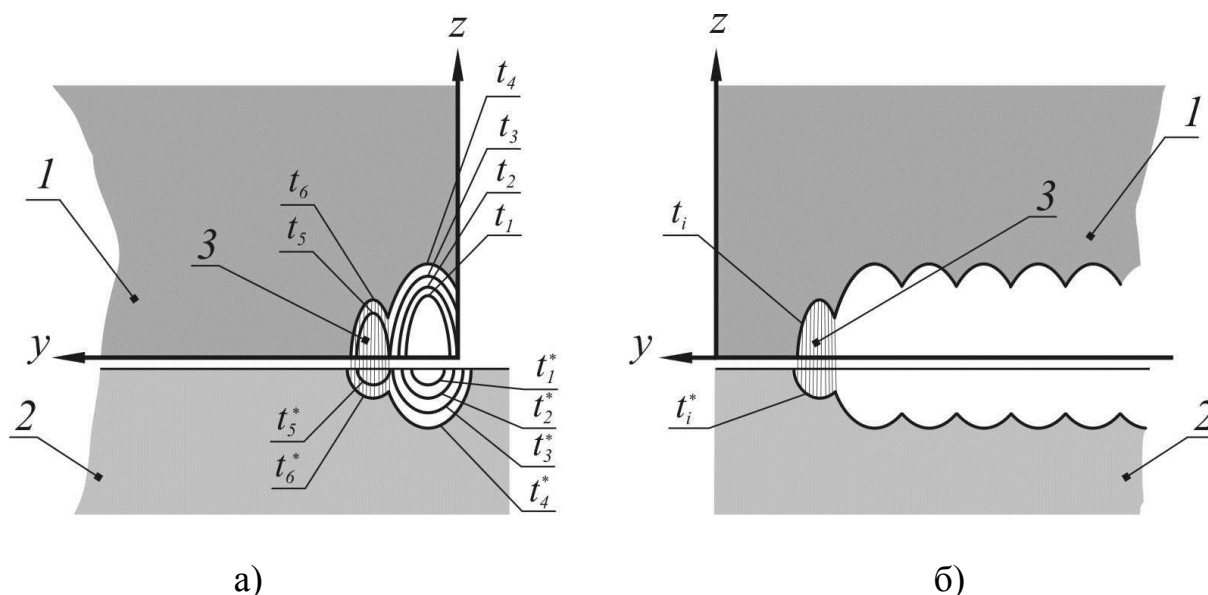


Рис. 13. Модель формування зони проплавлення при наплавленні стрічковим електродом:  $t_i, t_i^*$  – послідовні положення ізотерм плавлення, відповідно, для електроду і основного металу на початку циклу переміщення дуги по торцю стрічки (а) та наприкінці циклу (б); 1 – стрічковий електрод; 2 – основний метал; 3 – зварювальна дуга.

Оскільки рівняння балансу не може бути застосовано значення  $t'$  потрібно коректувати відповідно наступної залежності

$$t_c' = t' \cdot n, \quad (9)$$

де  $n$  – співвідношення тривалості імпульсу к тривалості паузи.

Залежність (9) була використана для розрахунку зони проплавлення під локальною ділянкою стрічкового електрода. Розрахунок проводили за методикою розділу 2 в площині  $xOr$  з урахуванням поправки за часом на сумарну тривалість пауз за розрахунковий інтервал дії джерела нагрівання. Тривалість інтервалу горіння дуги визначали виходячи з прийнятої швидкості переміщення дуги по торця стрічкового електрода (1,0 м/с) і кількості локальних ділянок по ширині стрічкового електрода (10 ділянок).

Розрахункові профілі зони проплавлення при наплавленні стрічковими електродом верифікували шляхом зіставлення з макрошліфами при нерухомому джерелу нагріву. Використовували стрічки ЛН-08кп та 12Х18Н10Т. На рис. 14 показані дані розрахунку розмірів зони проплавлення стрічковим електродом після 2 с та 5 с горіння дуги при нерухомому джерелі нагріву (суцільні лінії) експериментальні дані для стрічки 12Х18Н10Т перерізом 0,5×60 мм (пунктирна лінія).

Вплив ширині стрічкового електрода не було враховано при моделюванні зони проплавлення, оскільки його розміри адекватно відображаються за відомими моделями формування наплавленого валика при використанні електродної стрічки.



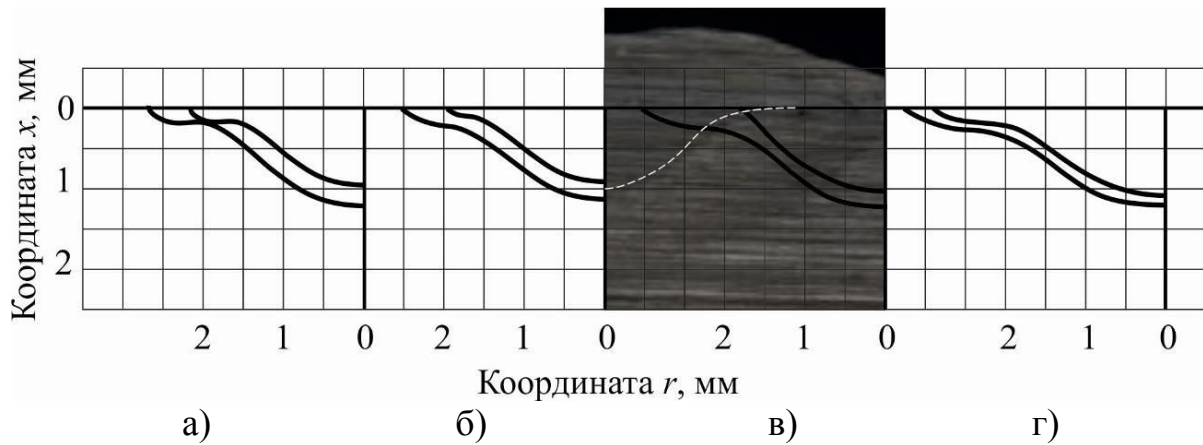


Рис. 14. Розрахункові профілі проплавлення в площині  $r\theta x$  і зіставлення розрахункового профілю з експериментальними даними (в) для випадку наплавлення стрічковим електродом з перерізами: а –  $0,2 \times 35$  мм; б –  $0,5 \times 60$  мм; в –  $0,8 \times 30$  мм; г –  $1,0 \times 40$  мм.

Результати використання розробленої розрахункової методики для визначення глибини зони проплавлення при електродуговому наплавленні одним та двома стрічковими електродом показали кращий збіг з експериментальними даними ніж отримані в розділі 2 за раніше відомими методиками розрахунків.

**В четвертому розділі** розглянуто технологічні варіанти реалізації наплавлених шарів зі змінним складом та властивостями, що дозволяють забезпечити оптимальне тепловкладення в основний метал, стабільне формування зони проплавлення і відсутність дефектів формування наплавленого валика.

Встановлено в результаті математичного моделювання, що використання закону керування швидкістю подачі електроду у вигляді трапецеїдальних імпульсів з співвідношенням градієнтів швидкості подачі легуючого електроду виду  $k_1:k_2:k_3 = 1:0,3:1,4$  на ділянках збільшення та зниження концентрації легуючих елементів забезпечує симетричність зміни концентрації легуючих елементів по довжині шва при наплавленні шару змінного хімічного складу. Результати моделювання були підтверджені при експериментальному наплавленні обтискного валка під плавленням флюсом АН-60 електродними дротами Нп-20ХЗГС і Нп-30Х13 діаметром 4 мм (загальним перерізом  $25 \text{ мм}^2$ ). Режим наплавлення: постійний струм зворотної полярності,  $I_n = 620 \div 650 \text{ А}$ ,  $U = 30 \div 32 \text{ В}$ ,  $v_n = 12 \text{ м/год}$ . Сумарна об'ємна швидкість подачі двох електродних дротів становила  $0,42 \text{ см}^3/\text{с}$ . При цьому кількість ділянок переходу по довжині кола бочки була непарною ( $2n - 1$ ), а залежна від швидкості обертання валка довжина ділянки переходу забезпечувала умову кратності з довжиною кола витка. Швидкість подачі легуючого електрода (дроту Нп-30Х13, що містить 13% хрому) змінювали по циклу загальною тривалістю 30 сек (рис. 15). Тривалість кожної стадії циклу визначалася згідно з вказаним співвідношенням градієнтів зниження і збільшення об'ємної швидкості:  $0,09 \text{ см}^3/\text{с}^2 : 0,028 \text{ см}^3/\text{с}^2 : 0,124 \text{ см}^3/\text{с}^2$ .

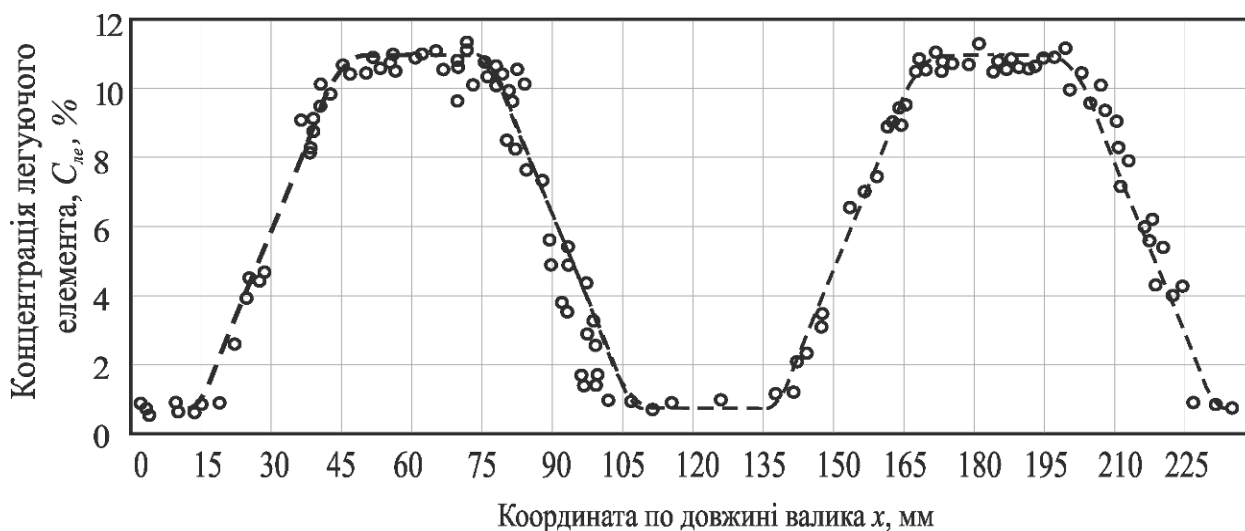


Рис. 15. Експериментальні дані про зміну концентрації хрому по довжині валика при змінній об'ємній швидкості подачі легуючого електрода по закону у вигляді імпульсів трапецеїдальної форми.

Синусоїдальний вид імпульсів подачі легуючого електрода дозволяє отримати аналогічний характер змінення твердості по довжині валика – від мінімальної величини на краях до максимальної величини в середній частині бочки, що значно знижує нерівномірність зносу деталей та інструменту, що експлуатується в умовах теплозмін – роликів та робочих валків безперервно-заготівельного стану. На основі отриманих результатів розроблено технологію зміцнення прокатних валків з формуванням наплавленого шару з розташованих вздовж бочки швів змінного по довжині складу і твердості. Розподіл твердості поверхні для таких умов представлений на рис. 16.

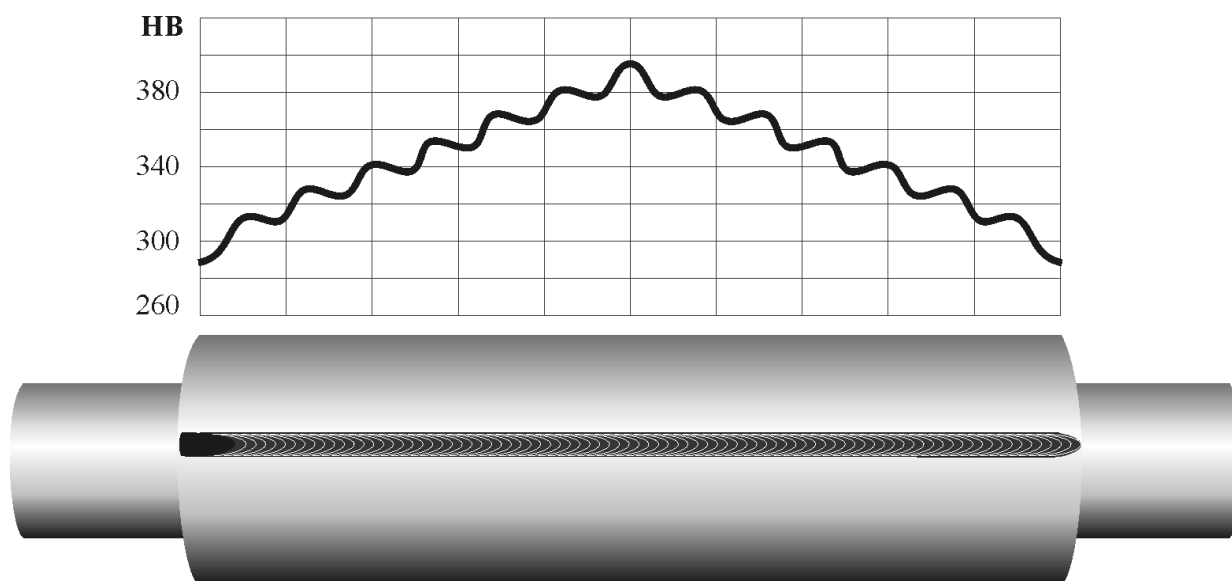


Рис. 16. Схема розподілу твердості вздовж бочки прокатного валка при формуванні наплавленого шару з поздовжніх валиків.

В разі наплавлення циліндричних виробів одним стрічковим електродом з додатковими переміщеннями по другій координаті, вектор швидкості наплавлення  $v_n$  розташований під певним кутом  $\varphi$  до твірної, який може змінюватися від  $90^\circ$  до  $0^\circ$  (від поперечного до поздовжнього розташування стрічки) в залежності від співвідношення швидкості обертання виробу  $v_y$  і швидкості переміщення електрода  $v_x$ . Оскільки процес наплавлення стрічковим електродом під кутом до твірної може бути здійснений при різному розташуванні стрічки щодо вектора швидкості наплавлення, значення кута повороту стрічкового електрода є важливим технологічним параметром, що визначає і якість формування, і робочі характеристики наплавленого шару.

Характерною особливістю такого варіанту наплавлення є наявність на поверхні основного металу великої кількості перетинів валиків, в яких існує висока вірогідність появлення дефектів формування шва. Доцільно в місцях перетину вводити в параметри режиму відповідні поправки, які враховують змінення зовнішніх умов.

З метою визначення величини поправок параметрів режиму наплавлення, проводили дослідження впливу кута нахилу поверхні наплавлення на параметри зони проплавлення, зокрема, розміри рідкого прошарку  $\delta_p$  і змінення його розподілу по довжині кратера: зменшення при наплавленні на підйом і зростання при наплавленні на спуск.

Для визначення  $\delta_p$  було застосовано методику з використанням тугоплавких вставок. Процес наплавлення починали на відстані 50 мм від вставки з розмірами  $0,2 \times 25 \times 30$  мм для установаження квазістаціонарного термічного режиму в зразку. Процес наплавлення припиняли, коли вісь електрода проходила приблизно через середину вставки. З валика вирізали поперечний темплет, проводили послідовне (по довжині шва) шліфування через  $1 \div 2,0$  мм та вивчали розподіл рідкого прошарку. Одночасно визначали глибину  $H_{np}$ , ширину  $B_{np}$  і площу проплавлення  $F_{np}$ . Використовували наступні параметри режиму: флюс АН-60;  $I_n = 760 \div 810$  А,  $U_\delta = 28 \div 30$  В,  $v_n = 10$  м/год.

Отримані дані були використані для визначення величини зміни тиску дуги з урахуванням зміни товщини прошарку рідкого металу під дугою при коригуванні силового балансу в кратері. В результаті розрахунку запропоновано виконувати наплавлення перетинів валиків за варіантами змінення параметрів режиму, які призводять до вирівнювання висоти та глибини наплавленого шару.

Розрахунок конструктивних параметрів наплавленого шару проведено за допомогою розробленого спеціалізованого програмного забезпечення, що дозволяє моделювати наплавлений шар на розгортці виробу при наплавленні під кутом до твірної. При моделюванні послідовного переміщення електрода вздовж твірної, геометричні параметри місць перетину валиків пошарово записуються в базу даних. При переміщенні електрода в місце перетину валиків, режим наплавлення коригується з урахуванням зміни профілю наплавленої поверхні по схемі, що приведена на рис. 17.

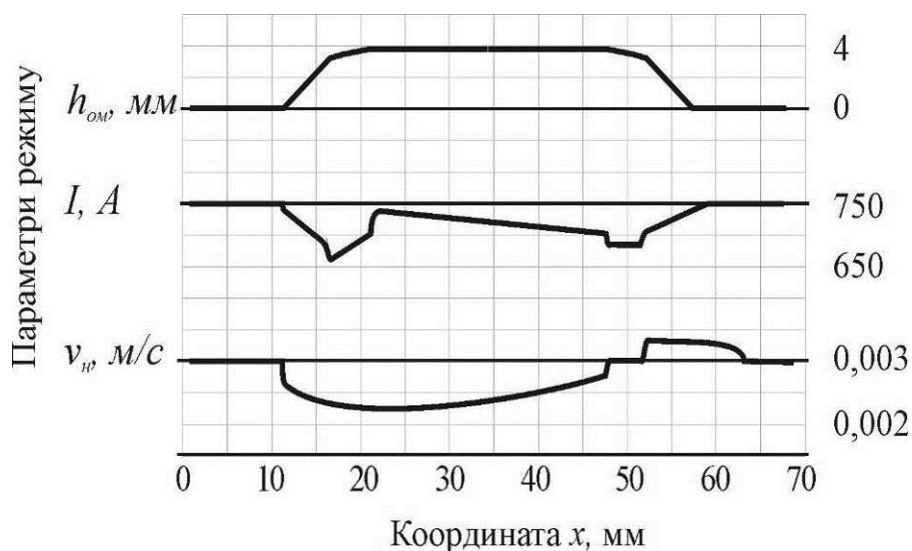


Рис. 17. Схема корегування параметрів режиму наплавлення в місцях перетину валиків

У разі зміни куту нахилу наплавленої поверхні до горизонту або наявності радіусу кривизни, а також при наплавленні тіл обертання малого діаметра, використання форсованих режимів може призвести до погіршення якості наплавленого металу і появи таких дефектів, як напливи і патьоки. Це пов'язано з впливом на формування наплавленого слою сил тяжіння. Оскільки довжина зварювальної ванни залежить від тепловкладення, при обертанні виробу рідкі металева і шлакова ванни можуть опинитися в умовах, коли сили тяжіння не компенсуються реакцією твердої поверхні виробу.

Проведені дослідження впливу сил тяжіння на формування наплавленого валика дозволили визначити залежності зміни параметрів режиму і розроблені технологічні рекомендації на їх основі для нанесення якісного наплавленого шару на похилі і криволінійні поверхні.

**В п'ятому розділі** представлені розроблене програмне забезпечення, апаратні засоби, обладнання та автоматизована система керування процесом наплавлення робочих шарів зі змінним складом та властивостями. Наведені відомості щодо опробування і впровадження результатів проведених досліджень в промислових умовах.

Для розрахунку параметрів формування зони проплавлення в залежності від часу при електродуговому наплавленні дротовим та стрічковим електродами на основі моделі формоутворення зварювальної ванни в нестационарному режимі розроблено програмний комплекс (ПК) «Моделювання зони проплавлення». Програмна реалізація виконана із застосуванням засобів об'єктно-орієнтованого програмування в середовищі Borland C++ Builder. Інтерфейс містить головне меню, набір функціональних клавіш і два вікна візуалізації (рис. 18). Головне меню програми дозволяє вводити вхідні дані моделювання (варіант наплавлення, розмір електрода, швидкість подачі, швидкість наплавлення, початкові умови). У вікнах візуалізації відображаються розміри, характерний вид зони

проплавлення у відносних координатах і положення перерізу фронту проплавлення в кожному інтервалі часу.

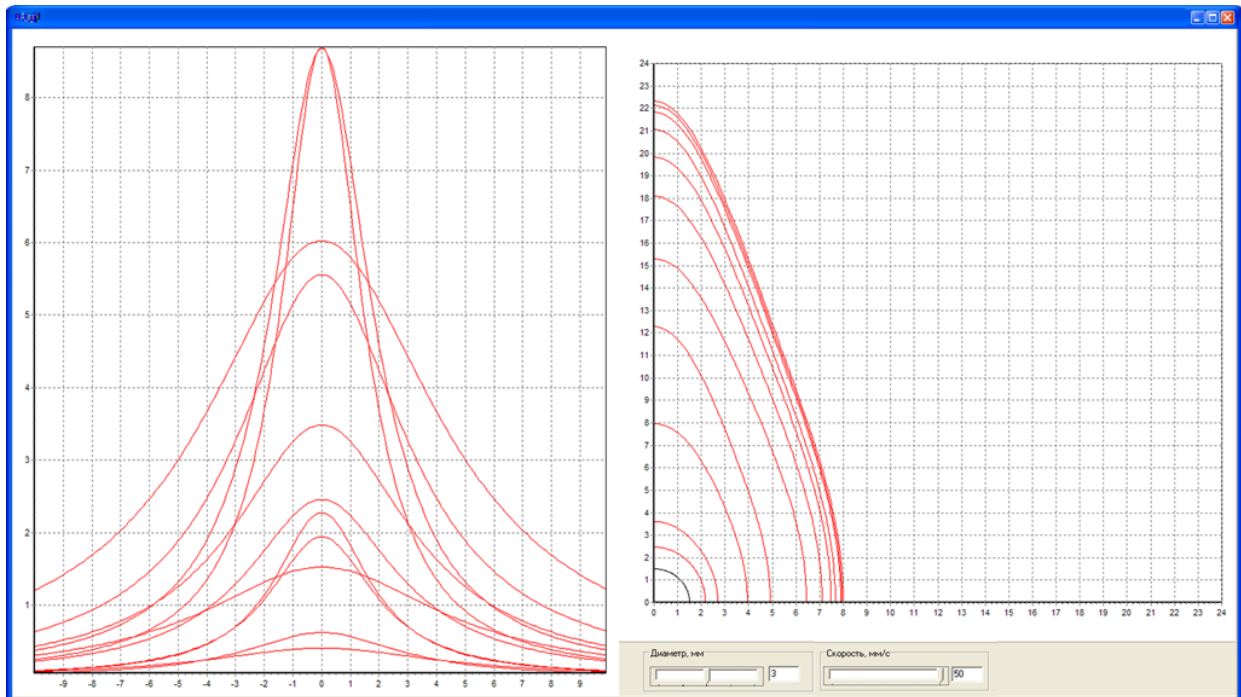


Рис. 18. Візуалізація результатів розрахунку в ПК «Моделювання зони проплавлення»: а – розподіл швидкостей зростання зони проплавлення для фіксованих інтервалів часу; б – еволюція зони проплавлення в залежності від часу дії джерела нагріву.

В якості основних незалежних вхідних параметрів використовуються діаметр електрода, швидкість подачі і швидкість зварювання. Залежно від технологічних параметрів формується набір коефіцієнтів рівняння (8) для покрокового розрахунку переміщення межі зони проплавлення в відносних координатах. Результати розрахунку і підсумкова форма зони проплавлення відображаються на екрані в окремих вікнах.

В режимі стаціонарної дуги через відповідні пункти меню зазначаються вхідні дані: діаметр електрода та швидкість його подачі. Після вибору технологічного варіанту є можливість коригувати значення опорних коефіцієнтів в залежності від особливостей розв'язуваної задачі. Відповідні пункти меню дозволяють здійснити виведення результатів на друк та експорт даних моделювання в текстовий файл для подальшої обробки.

В режимі рухомого джерела нагріву в залежності від значення швидкості наплавлення відбувається виведення на екран поточних положень фронтів плавлення та кристалізації в певні інтервали формування зони проплавлення, крок між якими залежить від розрахункової довжини ванни. Загальні ділянки фронтів плавлення сусідніх зон видаляються і ділянки, що залишилися, утворюють зону проплавлення в поздовжньому напрямку. Результати розрахунку дозволяють кількісно визначити вплив зміни швидкості подачі електрода за певним законом

на розміри зони проплавлення.

Програмний модуль «Розрахунок формування зони проплавлення» використаний в якості складової частини системи автоматизованого проектування композиційних наплавлених шарів. До складу системи входить блок розрахунку параметрів наплавленого шару змінного хімічного складу при розплавленні в загальній ванні двох електродів різного хімічного складу. При цьому проводиться розрахунок швидкостей подачі електродів, виходячи із заданого закону зміни концентрації легуючих елементів на ділянці переходу в разі квазістаціонарного стану ванни. На основі розрахунку параметрів режиму, а також даних щодо хімічного складу наплавних і основного матеріалів, здійснюється пошаровий розрахунок параметрів механічних властивостей наплавленого шару.

Оскільки вхідними параметрами розрахунку зони проплавлення є значення швидкості подачі електроду і швидкості наплавлення, розроблені алгоритми і автоматизована система керування процесом наплавлення робочих шарів зі змінним складом та властивостями, в яких ці параметри використовуються в якості керуючих сигналів. Розроблена система керування приводами обладнання представляє собою схему фазоімпульсного управління тиристорами, яка реалізована програмно (рис. 19).

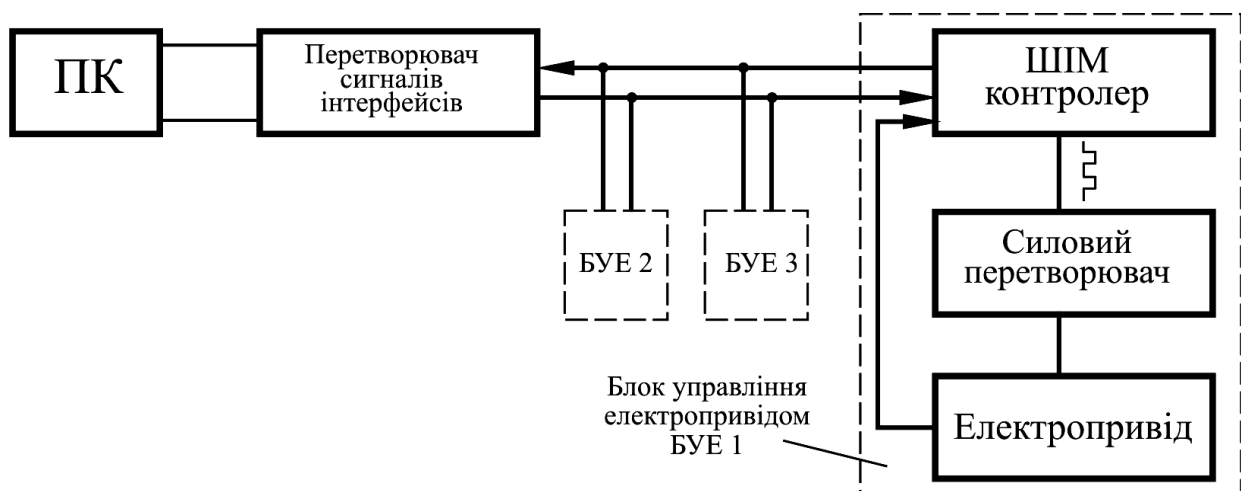


Рис. 19. Функціональна схема системи керування приводами обладнання наплавлення робочого шару зі змінним складом та властивостями.

Система керування входить до складу спеціалізованого обладнання, яке містить стенд блочно-модульної конструкції для наплавного обладнання, маніпулятор виробу і блок керування процесом наплавлення.

Розроблені технологія і обладнання впроваджені на ряді підприємств регіону. В умовах НВО «Укрспецзварювання», ТОВ «Бастіон», ЗАТ «Гідромаш», НВП «Каміт» (м. Маріуполь) та ТОВ «Укрспецмаш» (м. Бердянськ) освоєно ряд комплексів спеціалізованого обладнання на основі результатів дисертаційної роботи для відновлення і зміцнення виробів металургійного, прокатного виробництва та енергетичного машинобудування. Сумарний економічний ефект від впровадження склав близько 2 800 тис. грн.

## ВИСНОВКИ

В дисертації наведено теоретичне узагальнення і нове рішення актуальної проблеми підвищення ефективності процесу електродугового наплавлення під шаром флюсу та в середовищі захисних газів дротяними і стрічковими електродами за рахунок керування складом та властивостями наплавленого шару на основі розроблених математичних моделей формоутворення нестационарної зварювальної ванни, що забезпечило підвищення експлуатаційної стійкості наплавлених виробів металургійного, прокатного виробництва та енергетичного машинобудування.

1. На основі виконаних досліджень процесу формоутворення зварювальної ванни, теплових і гідродинамічних процесів в ній розроблено математичну модель формування зони проплавлення у часі при нерухомому джерелі нагріву. Визначено, що формування зони проплавлення завершується в період часу до 10 с, причому збільшення швидкості наплавлення в інтервалі  $10 \div 40$  м/год. зменшує цей період на  $12 \div 35$  %, в перші 2 с формування зони проплавлення в усіх досліджуваних випадках її розміри досягають величин, не менш ніж 60 % від максимальних.

2. На основі розроблених нестационарних моделей формування зони проплавлення при нерухомій дузі та при її руху зі швидкістю наплавлення в межах  $5 \div 40$  м/год. створено і апробовано методики керування параметрами та формою зони проплавлення основного металу і наплавленого валика при електродуговому наплавленні під шаром флюсу та в середовищі захисних газів.

3. На базі проведених досліджень встановлено вплив параметрів режиму наплавлення під шаром флюсу і в середовищі захисних газів на розвиток зони проплавлення. Встановлено, що форма кривої фронту плавлення в досліджуваному інтервалі вхідних даних може бути виражена у вигляді нелінійної функції, в якій параметри руху фронту залежать від швидкості подачі і діаметра електрода.

4. Запропоновано новий підхід для розрахунків глибини зони проплавлення при наплавленні електродною стрічкою (стрічками) під шаром флюсу, який враховує явище переміщення зварювальної дуги по торцю стрічкового електроду. Використанням експериментальних даних щодо швидкості руху зварювальної дуги в межах  $0,9 \div 1$  м/с по торцю стрічки розроблено нову методику розрахунку розмірів зони проплавлення основного металу при електродуговому наплавленні одним і двома стрічковими електродами під шаром флюсу, що забезпечує добрий збіг з експериментальними даними.

5. Встановлено в результаті математичного моделювання та підтверджено експериментом необхідне співвідношення градієнтів швидкості подачі легуючого електроду виду  $k_1:k_2:k_3 = 1:0,3:1,4$ , яке забезпечує симетричність зміни концентрації легуючих елементів по довжині шва при наплавленні шару змінного хімічного складу. Використання закону керування швидкістю подачі електроду у вигляді трапецеїдальних імпульсів з вказаним співвідношенням

на ділянках збільшення та зниження концентрації легуючих елементів дозволило розробити технологію зміцнення прокатних валків з формуванням наплавленого шару з розташованих вздовж бочки швів змінного по довжині складу і твердості. Це забезпечило зростання терміну служби валків обтискного стану на  $8\div 10$  %, зниження нерівномірності зносу, підвищення напрацювання на 1 мм зносу в 1,7 разу.

6. Розроблено технологічні засади промислового використання наступних варіантів нанесення робочих шарів зі змінним складом та властивостями:

- наплавлення робочого шару з керуванням процесу легування наплавленого металу;
- електродугового наплавлення зі стабілізацією геометричних параметрів по довжині валика;
- електродугового наплавлення з розташуванням валиків під кутом до твірної з коригуванням параметрів режиму в місцях перетину валиків;
- електродугового наплавлення аустенітного захисного антикорозійного шару зі зниженою часткою участі основного металу в наплавленому;
- електродугового наплавлення тіл обертання малого діаметру з імпульсним режимом подачі електродів.

В результаті впровадження розроблених технологічних варіантів усунуто появу шлакових включень; знижено витрати на наплавлення і механічну обробку на  $15\div 20$ %; підвищено експлуатаційну стійкість наплавлених виробів на  $12\div 22$ %.

7. Вдосконалено автоматизоване проектування технології наплавлення дротяними і стрічковими електродами з урахуванням змінення об'єму зварювальної ванни у часі, що дозволило створити алгоритми керування процесом проплавлення основного металу. Використання розроблених алгоритмів керування забезпечило розширення сфери застосування сучасного автоматизованого зварювального обладнання, підвищення ефективності електродугового наплавлення та отримання значної економії матеріальних ресурсів.

8. Використання результатів математичного моделювання формоутворення зварювальної ванни при електродуговому наплавленні дозволило застосувати розроблені моделі для створення алгоритмів автоматизованого керування приводами обладнання для електродугового наплавлення на основі широтно-імпульсної модуляції. Алгоритми керування верифіковані на імітаційній моделі та в промислових умовах, що дозволило реалізувати розроблені варіанти технології наплавлення робочих шарів зі змінним складом та властивостями як у разі застосування нового, так і в разі модернізації існуючого обладнання. Випробовування та впровадження у виробництво розроблених технологій, обладнання та автоматизованої системи керування для наплавлення шару зі змінним складом та властивостями дозволило отримати реальний економічний ефект у розмірі 2 млн. 800 тис. грн.



## СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ РОБІТ

*Публікації, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації*

1. Lavrova E. Improving a resource-saving surfacing technology using two ribbon electrodes with a controlled transfer of electrode's metal / E. Lavrova, V. Ivanov, V. Roynanov and oth. // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2019. – № 1/12 (97). – P.28-34. (Scopus).
2. Ivanov V.P. Development of the device for two-strip cladding with controlled mechanical transfer / V.P. Ivanov, E.V. Lavrova // IOP Conf. Series: Journal of Physics: 1059. – 2018. – 012020.– P. 1-6. (Scopus).
3. Lavrova E. Controlling the depth of penetration in the case of surfacing with a strip electrode at an angle to the generatrix / E. Lavrova, V. Ivanov // Materials and Technologies in Mechanical Engineering. – 2018. – P. 27-32. (Scopus).
4. Иванов В. П. Разработка технологии наплавки ленточным электродом цилиндрических изделий под углом к образующей / В.П. Иванов, В.П. Лаврик, Е. В. Лаврова // Вісник Приазовського державного технічного університету: зб. наук. пр. Серія технічні науки. – 2017.– №. 34.– С. 86-93.
5. Иванов В. П. Повышение работоспособности наплавленных крановых колес / В.П. Иванов, Ю.В. Сергиенко, Е.Н. Сорочан // Наука та виробництво: міжвуз. тем. зб. наук. пр. – № 1. – 2017. – С.49-53.
6. Иванов В.П. Управление формированием зоны проплавления при электродуговой наплавке / В.П. Иванов, Е.В. Лаврова // Автоматическая сварка: международн. научн. – техн. журнал. – 2016. – № 8(755). – С. 6-11.
7. Иванов В. П. Управление формированием зоны проплавления при сварке плавящимся электродом в среде защитных газов/ В.П. Иванов, А.Д. Размышляев, Е.В. Лаврова // Вісник Приазовського державного технічного університету: зб. наук. пр. Серія технічні науки. – 2016. – №. 32 – С. 118-125.
8. Иванов В.П. Совершенствование технологии наплавки двумя ленточными электродами / В.П. Иванов, Е.В. Лаврова // Вісник Донбаської державної машинобудівної академії: зб. наук. пр. – Краматорськ: ДВНЗ «Донбаська державна машинобудівна академія», 2016. – №2(38) – С. 121 - 124.
9. Иванов В.П. Исследование процесса электродуговой наплавки коррозионностойкого слоя ленточным электродом с управляемым механическим переносом / В.П. Иванов, Е.В. Лаврова, Н.А. Солидор, Ф.В. Моргай // Технічні науки та технології: наук. журнал – Чернігів: Черніг. нац. технол. ун-т, 2015. – № 1(1) – С. 53-60.
10. Иванов В. П. Исследование процесса управляемого механического переноса при наплавке двумя ленточными электродами / В.П. Иванов, Е.В. Лаврова, Ю.А. Степнова // Научный вестник ДГМА.– 2015.– № 3 (18Е). – С. 117-121.
11. Иванов В.П. Совершенствование технологии наплавки габаритных валков горячей прокатки гетерогенным рабочим слоем/ В.П. Иванов, Ю.А. Степнова // Вісник Приазовського державного технічного університету: зб. наук. пр. Серія технічні науки. – 2015. – № 31 – С. 98-105.

12. Ivanov V.P. Improving the efficiency of strip cladding by the control of electrode metal transfer / V.P. Ivanov, E.V. Lavrova // *Applied Mechanics and Materials*. – Trans Tech Publications, Switzerland – 2014. – Vol. 682. – P. 266-269. (Scopus).
13. Иванов В. П. Повышение эффективности процесса электродуговой наплавки управлением гидродинамикой сварочной ванны / В.П. Иванов // *Вісник Приазовського державного технічного університету: зб. наук. пр. Серія технічні науки*. – Маріуполь: ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», 2013. – № 26. – С. 150 - 160.
14. Серенко А. Н. Разработка кинематической схемы и исследование процесса управляемого механического переноса при наплавке ленточным электродом / А.Н. Серенко, Е.В. Лаврова, В.П. Иванов, В.А. Серенко // *Вісник Приазовського державного технічного університету: зб. наук. пр. Серія технічні науки*. – Маріуполь: ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», 2012. – №. 25 – С. 124-131.
15. Лаврова Е. В. Математическая модель управляемого переноса электродного металла при наплавке под флюсом ленточным электродом / Е.В. Лаврова, В.П. Иванов, Б.И. Носовский // *Вісник Приазовського державного технічного університету: зб. наук. пр. Серія технічні науки*. – Маріуполь: ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», 2011. – № 2 (23). – С. 175-180.
16. Иванов В. П. Влияние технологии наплавки и термообработки на структуру и свойства металла, наплавленного лентой ЛН-02Х25Н22АГ4М2 на сталь 20 / В.П. Иванов, В.Ю. Иващенко // *Автоматическая сварка: международн. научн. – техн. журнал.*–2011.– № 8(700).– С. 9-11.
17. Гулаков С.В. Совершенствование технологии наплавки деталей металлургического оборудования / С.В. Гулаков, В.В. Чигарев, В.П. Иванов и др. // *Автоматическая сварка: международн. научн. – техн. журнал.* – 2004. – № 10. – С.55-57. (Scopus).
18. Иванов В.П. Совершенствование математической модели формообразования сварочной ванны / В. П. Иванов // *Вісник Приазовського державного технічного університету: зб. наук. пр.* – Маріуполь: ДВНЗ «ПДТУ», 2003. – № 13. – С. 214-217.
19. Чигарев В.В. Повышение работоспособности деталей и инструмента наплавкой гетерогенного слоя / В.В. Чигарев, В.П. Иванов, И.С. Псарева // *Захист металургійних машин від поломок: зб. наук, праць*. – 2003. – № 7. – С. 234-237.
20. Иванов В.П. Разработка системы проектирования технологии сварки и наплавки с применением управляющих магнитных полей / В.П. Иванов, А.Д. Размышляев // *Вісник Приазовського державного технічного університету: зб. наук. пр.* – Маріуполь: ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», 2002. – № 12 – С. 169-171.
21. Матвиенко В.Н. Освоение технологии изготовления холоднокатаной ленты в ОАО "ММК им. Ильича" / В.Н. Матвиенко, К.К. Степнов, В.П. Иванов [и др.] // *Автоматическая сварка*. – 2001. – № 11(584). – С. 51-52. (Scopus).

22. Псарева И.С. Совершенствование технологии наплавки конусов и чаш засыпных аппаратов доменных печей / И.С. Псарева, В.П. Иванов // Вісник Приазовського державного технічного університету: зб. наук. пр. – Маріуполь: ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», 2000. – № 10. – С.213-216.
23. Гулаков С.В. Управление траекторией перемещения электрода при дуговой наплавке прокатных валков / С.В. Гулаков, В.П. Иванов, И.С. Псарёва // Вестник Донбасской государственной машиностроительной академии: сб. научн. трудов. – Краматорск: ДГМА, 2000. - С.322-324.
24. Иванов В.П. Проектирование технологии электродуговой наплавки на основе математического моделирования / В.П. Иванов, В.Н. Матвиенко // Вісник Приазовського державного технічного університету: зб. наук. пр. – Маріуполь: ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», 2000. – № 9. – С. 164-166.
25. Optimization of plasma treatment conditions of tools / S.S. Samotugin, O.Yu. Nesterov, A.G. Yarmitskii, V.P. Ivanov // Welding al. - 1999. - 13(I). - P. 67-70. (Scopus).
26. Матвиенко В.Н. Получение многослойного композиционного покрытия наплавкой ленточными электродами / В.Н. Матвиенко, В.П. Иванов, К.К. Степнов // Вестник Приазовского государственного технического университета: сб. научн. тр. – Мариуполь: Приазовский государственный технический университет, 1998.– № 6.– С.201-204.

***Публікації, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації***

27. Моделирование зоны проплавления при электродуговой сварке / В.П. Иванов, В.А. Серенко, С.А. Буриков // Університетська наука – 2019: міжнар. наук.-техн. конф., 16-17 травня 2019 р. ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет». – Маріуполь: ДВНЗ «ПДТУ», 2019. – Т. 2. – С. 132.
28. Рабочий слой переменного химического состава / Л.К. Лещинский, В.П. Иванов // Университетская наука – 2018: Международная научно-техн. конф., 23-24 мая 2018 г. ГВУЗ «Приазовский государственный технический университет». – Мариуполь: ГВУЗ «ПГТУ», 2018.– Т. 2.–С. 140-141.
29. Разработка устройства для наплавки двумя ленточными электродами с управляемым механическим переносом / В.П. Иванов, Е.В. Лаврова // Инновационные технологии в машиностроении: IX междунар. научно-техн. конф., 24-26 мая 2018 г., Томский политехнический университет. – Томск: ТПИ, 2018. – С. 39-41.
30. Разработка уточненной модели формообразования сварочной ванны при электродуговой наплавке / В.П. Иванов, Е.В. Лаврова // Университетская наука-2017: междунар. науч.-техн. конф., 18-19 мая 2017 г. ГВУЗ «Приазовский государственный технический университет». – Мариуполь: ГВУЗ «ПГТУ», 2017. – Т. II. – С. 93-94.
31. Исследование процесса наплавки двумя ленточными электродами с прину-

- дительным переносом электродного металла/ В.П. Иванов, Е.В. Лаврова, В.П. Лаврик // Университетская наука–2016: Международная научно-техн. конф., ГВУЗ «Приазовский государственный технический университет», г. Мариуполь, 19-20 мая 2016 г.– Мариуполь: ГВУЗ «ПГТУ», 2016.- Т. II.– С. 101-102.
32. Дослідження впливу режимів термообробки на структуру і корозійну стійкість аустенітних неіржавіючих сталей / Н.А. Солідор, В.П. Иванов // Today Material Engineering for realization of the «MMATENG» project objectives: International Scientific and Methodological conference, Priazovskyi State Technical University, Mariupol, 19-20 May 2016. – Mariupol: PSTU, 2016 – P. 138-142.
  33. Исследование процесса наплавки ленточным электродом цилиндрических изделий с ориентацией валиков под углом к образующей / В.П. Иванов, В.П. Лаврик // Современные проблемы сварки и родственных технологий, совершенствование подготовки кадров: Всеукраинская науч.-техн. конф., 15-16 сентября 2016 г. ГВУЗ «Приазовский государственный технический университет». – Мариуполь: ГВУЗ «ПГТУ», 2016. – С. 70-71.
  34. Создание однослойной композиционной структуры наплавленного металла / В.П. Иванов, Ю.А. Степнова // Университетская наука-2015: Международная научно-техн. конф., ГВУЗ «Приазовский государственный технический университет», г. Мариуполь, 19-20 мая 2015 г. – Мариуполь: ГВУЗ «ПГТУ», 2015. - Т. III. – С. 116-117.
  35. Методы многослойной наплавки прокатных валков / В.П. Иванов, Ю.А. Степнова // Университетская наука-2014: междунар. науч.-техн. конф., 20-21 мая 2014 г. ГВУЗ «Приазовский государственный технический университет». – Мариуполь: ГВУЗ «ПГТУ», 2014.– Т. III.– С. 136-137.
  36. Повышение эффективности наплавки ленточным электродом управлением процесса переноса электродного металла /В.П. Иванов, Е.В. Лаврова// V Международная научно-практ. конф., Томский политехнический университет, г. Юрга, 22-23 мая 2014 г. – Томск: ТПИ, 2014. – Т. I. – С. 35-38.
  37. Проблемы повышения служебных характеристик наплавленного слоя / В.П. Иванов // Университетская наука-2013: междунар. науч.-техн. конф., 14-17 мая 2013 г. ГВУЗ «Приазовский государственный технический университет». – Мариуполь: ГВУЗ «ПГТУ», 2013. – Т. II. – С. 162-164.
  38. Математическое моделирование процесса импульсного переноса металла при наплавке ленточным электродом / А.Н. Серенко, Е.В. Лаврова, В.П. Иванов, В.А. Серенко // Тезисы докладов VI международной конференции «Математическое моделирование и информационные технологии в сварке и родственных процессах». – Киев: ИЭС им. Е.О. Патона НАН Украины, 2012. – С. 63.
  39. Моделирование динамики проплавления при сварке под флюсом для стационарной дуги / В.П. Иванов // Современные проблемы сварки и родственных технологий, совершенствование подготовки кадров: III междунар. науч.-техн. конф., 6-8 сентября 2011 г. ГВУЗ «Приазовский государственный технический университет». – Мариуполь: ГВУЗ «ПГТУ», 2011. – С.13-15.
  40. Исследование гидродинамики каплеобразования при сварке / ВП Иванов //

Университетская наука – 2011: Международная научно – техн. конф., ГВУЗ «Приазовский государственный технический университет», г. Мариуполь, 17-19 мая 2011 г. – Мариуполь: ГВУЗ «ПГТУ», 2011. - Т. I. – С. 227.

41. Совершенствование технологии наплавки коррозионностойкого слоя ленточным электродом / В.П. Иванов // Университетская наука – 2010: Международная научно – техн. конф., ГВУЗ «Приазовский государственный технический университет», г. Мариуполь, 18-20 мая 2010 г. – Мариуполь: ГВУЗ «ПГТУ», 2010. - Т. II. – С.148-149.
42. Исследование гидродинамических процессов при электродуговой наплавке / В.П. Иванов // Университетская наука – 2009: Международная научно – техн. конф., ГВУЗ «Приазовский государственный технический университет», г. Мариуполь, 19-21 мая 2009 г. – Мариуполь: ГВУЗ «ПГТУ», 2009. - Т. II. – С.155-156.
43. Особенности математического моделирования формообразования сварочной ванны / В.П. Иванов // Инновационные промышленные технологии: II Международная научно – практ. конф., г. Запорожье, 29-31 мая 2007 г. – Киев: ФТИМС НАН Украины, 2007. – С.48.
44. Совершенствование технологии электродуговой наплавки с учетом гидродинамических параметров / В.П. Иванов // Университетская наука-2007: междунар. науч.-техн. конф., 23-26 апреля 2007 г. ГВУЗ «Приазовский государственный технический университет». – Мариуполь: ГВУЗ «ПГТУ», 2007. – Т. II. – С. 127-128.
45. Моделирование процесса формообразования сварочной ванны на базе осесимметричной модели / В.П. Иванов // Сб. научн, тр. республиканской научно-методической конференции «Современные проблемы сварки, наплавки и материаловедения», 19-22 апреля 2005 г. Приазовский государственный технический университет. – Мариуполь: ПГТУ, 2005. – С. 30-32.
46. Влияние переноса электродного металла на форму сварочной ванны / В.П. Иванов, А.К. Куркчи // XI региональная научно-техн. конференция: Сб. тезисов докладов в 2 т. Том I. – Мариуполь: ПГТУ, 2004. – С. 52.
47. Моделирование параметров конвективного движения жидкого металла сварочной ванны / В.П. Иванов // Компьютерные технологии в соединении материалов // 4 Всерос. научно-техн. конф. (с междунар. участием): Сб. тез. докл. – Тула: ТулГУ, 2003. – С.57-58.

***Публікації, які додатково відображають наукові результати дисертації***

48. Совершенствование схемы устройства для наплавки двумя ленточными электродами / Е.В. Лаврова, В.П. Иванов, В.С. Кибиш // Університетська наука – 2019: Міжнародна науково-техн. конф., Приазовський державний технічний університет, м. Маріуполь, 16-17 травня 2019 р. - Маріуполь: ДВНЗ «ПДТУ», 2019. - Т. 2. – С. 128-129.
49. Управление переносом электродного металла при наплавке ленточным электродом малой толщины / В.П. Иванов, Е.В. Лаврова // Университетская наука – 2018: Международная научно-техн. конф., ГВУЗ «Приазовский

- государственный технический университет», г. Мариуполь, 23-24 мая 2018 г. – Мариуполь: ГВУЗ «ПГТУ», 2018. – Т. 2. – С.139-140.
50. Система проектирования композиционного слоя с применением управляющих воздействий / В.П. Иванов, Ю.В. Сергиенко // Университетская наука – 2017: Международная научно-техн. конф., ГВУЗ «Приазовский государственный технический университет», г. Мариуполь, 18-19 мая 2017 г. – Мариуполь: ГВУЗ «ПГТУ», 2017. – Т. II. – С. 95.
51. Исследование процесса наплавки двумя ленточными электродами с принудительным переносом электродного металла / В.П. Иванов, Е.В. Лаврова, В.П. Лаврик // Университетская наука – 2016: Международная научно-техн. конф., ГВУЗ «Приазовский государственный технический университет», г. Мариуполь, 19-20 мая 2016 г. – Мариуполь: ГВУЗ «ПГТУ», 2016. – Т. II. – С. 101-102.
52. Проблемы нанесения слоистых композиций на валки горячей прокатки / В.П. Иванов, Ю.А. Степнова // Университетская наука – 2013: Международная научно-техн. конф., ГВУЗ «Приазовский государственный технический университет», г. Мариуполь, 14-17 мая 2013 г. – Мариуполь: ГВУЗ «ПГТУ», 2013. – Т. II. – С. 164-165.
53. Исследований влияния гравитационных сил на качество наплавленного слоя / В.П. Иванов, Ю.В. Сергиенко // Современные проблемы сварки и родственных технологий, совершенствование подготовки кадров: III междунар. науч.-техн. конф., ГВУЗ «Приазовский государственный технический университет», г. Мариуполь, 6-8 сентября 2011 г. – Мариуполь: ГВУЗ «ПГТУ», 2011. – С.104-105.
54. Совершенствование технологии электродуговой наплавки тел вращения малого диаметра / В.Л. Гриненко, В.П. Иванов, Е.И. Корягин // Современные проблемы сварки, наплавки и материаловедения: Республиканская научно-метод. конф., ГВУЗ «Приазовский государственный технический университет», г. Мариуполь, 19-22 апреля 2005 г. – Мариуполь: ПГТУ, 2005.–С. 26-27.
55. Псарева И.С. Пути совершенствования технологии и оборудования для наплавки рабочих поверхностей с регламентированным распределением свойств /И.С. Псарева, В.В. Чигарев, В.П. Иванов// Вісник Приазовського державного технічного університету: зб. наук. пр. – Маріуполь: ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», 2003. – № 13. – С. 185-189.
56. Влияние продольного магнитного поля на структуру и свойства наплавленного металла / А.Д. Размышляев, В.Н. Матвиенко, В.П. Иванов, С.М. Сидоренко // Вісник Приазовського державного технічного університету: зб. наук. пр. – Маріуполь: ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», 2002. – №. 12. – С.165-168.
57. Размышляев А.Д. Использование магнитных полей при дуговой наплавке / А.Д. Размышляев, В.Р. Маевский, В.П. Иванов // Вісник Приазовського державного технічного університету: зб. наук. пр. – Маріуполь: ДВНЗ «Приа-

- зовський державний технічний університет», 2000. – № 9. – С. 208-212.
58. Патент на корисну модель № 132126, МПК: В23К 9/04 , В21В 27/02. Спосіб виготовлення прокатного валка / Л.К. Лещинський, В.П. Іванов (Україна). – № u201809375; Заявл. 14.09.2018; Опубл. 11.02.2019, Бюл. № 3/2019.
  59. Патент на корисну модель № 124035, МПК: В23К 9/04. Спосіб наплавлення шару змінного хімічного складу / Л.К. Лещинський, В.П. Іванов (Україна). – № u201711596; Заявл. 27.11.2017; Опубл. 12.03.2018, Бюл. № 5/2018.
  60. Патент України № 115483, МПК: В21В 27/02. Прокатний валок / В.П. Іванов, О.В. Лаврова, Ю.О. Степнова (Україна). – № а201512994. – Заявл. 29.12.2015. Опубл. 10.11.2017. Бюл. № 21/2017.
  61. Патент України № 113454, МПК: В23К 9/133, В23К 9/022 . Пристрій для наплавлення двома стрічковими електродами / В.П. Іванов, О.В. Лаврова (Україна). – № а201504899. – Заявл. 19.05.2015. Опубл. 25.01.2017. Бюл. № 2/2017.
  62. Патент України № 101288, МПК: В23К 9/12. Пристрій для наплавлення стрічковим електродом під флюсом / А.Н. Серенко, О.В. Лаврова, В.П. Іванов, В.О. Серенко (Україна). – № а201205838. – Заявл. 14.05.13. Опубл. 11.03.13. Бюл. № 5.
  63. Деклараційний патент на винахід № 62591 А, МПК: В23К 35/00. Електродна стрічка для наплавлення / В.С. Бойко, К.К. Степнов, Е.М. Шебаніц та ін. (Україна). – № 2003043311. – Заявл. 14.04.2003. Опубл. 15.12.2003. Бюл. № 12/2003.
  64. Патент України № 12454А, МПК: В23К 35/30. Состав сплаву для наплавлення / Л.К. Лещинський, В.П. Іванов (Україна). – № 95052454. – Заявл. 22.05.1995. Опубл. 28.02.1997. Бюл. № 1/1997.
  65. А.С. № 1660890, МПК: В23К 9/12. Устройство для подачи ленточных электродов / Л.К.Лещинский, В.П. Ермолов, В.П. Лаврик и др. – № 4731917/27. – Заявл. 29.05.1989. Опубл. 07.07.1991. Бюл. № 25/1991.

***Особистий внесок автора в роботах, опублікованих у співавторстві:***

Особистий внесок автора в роботах, опублікованих у співавторстві: [1-3], [5-11], [16], [20], [24], [27], [29-31], [34-36], [46], [49-54], [60], [61] – основні ідеї та їх опис і реалізація; [4], [28], [33] – проведення досліджень формування наплавленого шару, математична обробка результатів досліджень; [12], [14], [38], [62] – постановка задачі, проведення досліджень коефіцієнту розплавлення; [15] – формулювання мети і завдання роботи, розробка математичної моделі; [25], [58], [59] – розробка алгоритму, проведення розрахунків; [17], [19], [22], [23], [55] – розробка структури системи керування, моделювання конструкції наплавленого шару; [21], [26] – участь в проведенні промислових експериментів і впровадження результатів роботи; [32], [48] – постановка задачі, плану досліджень, розробка конструкцій обладнання, участь в дослідно-промисловому випробуванні; [56], [57], [63], [64] – проведення досліджень складу та властивостей наплавленого металу, [65] – розробка конструкцій обладнання.

## АНОТАЦІЯ

*Іванов В.П.* Теоретичні і технологічні основи підвищення ефективності процесу електродугового наплавлення на основі моделювання формоутворення зварювальної ванни. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.03.06 – «Зварювання та споріднені процеси і технології» (132 – «Матеріалознавство») – ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет» МОН України, Маріуполь, 2019.

У дисертації вирішена актуальна науково-технічна проблема підвищення ефективності електродугового наплавлення дротяними і стрічковими електродами на основі удосконалених математичних моделей формоутворення зони проплавлення та розробленню технології, обладнання та автоматизованих систем систем проектування і керування для наплавлення робочих шарів зі змінним складом та властивостями.

Проведений аналіз існуючих моделей зварювальної ванни, створена їх класифікація, сформульовані основні вимоги для розроблених моделей формування зони проплавлення. Дослідження існуючих моделей дозволило зробити висновки щодо закономірностей формоутворення зварювальної ванни і вплив гідродинамічних параметрів на формування зони проплавлення. Встановлено, що основною вимогою для забезпечення адекватності моделювання формування зони проплавлення є використання параметра часу в якості основної змінної, тобто, така модель повинна бути нестационарною.

Розроблена математична модель динаміки формування зони проплавлення при електродуговому точковому наплавленні, яка описує процес зміни розмірів цієї зони в залежності від часу, що дозволяє встановити параметри проплавлення для випадків, коли зварювальна ванна не перебуває в квазістационарному стані. В результаті обчислювального експерименту на моделі встановлено, що основним визначальним фактором для еволюції ізотерми плавлення у часі є швидкість перенесення електродного металу в ванну і розповсюдження струму наплавлення по зоні проплавлення.

Розроблені математичні моделі динаміки формування зони проплавлення при наплавленні в середовищі захисних газів та під шаром флюсу. Встановлено, що для підвищення точності моделювання необхідно враховувати вплив швидкості зварювання на розміри і форму зони проплавлення.

Розроблено математичну модель динаміки формування зони проплавлення з урахуванням переміщення дуги зі швидкістю зварювання і створені розрахункові методики для формалізації процесів керування формоутворенням наплавлених валиків з метою оптимізації технології та створення систем управління зварювальним устаткуванням.

Розроблено програмне забезпечення для моделювання формоутворення зварювальної ванни при використанні різних типів електродних матеріалів для побудови систем автоматизованого проектування і керування технологіями відновлення.

Розроблена принципова технологія наплавлення з керуванням розмірами



зони проплавлення, що забезпечує стабільне і надійне з'єднання наплавленого шару з основним металом, а також необхідне змінення властивостей по глибині і площі робочої поверхні. Ефективність розробленої технології апробована на ряді підприємств при відновленні виробів металургійного виробництва та енергетичного машинобудування.

Ключові слова: зварювальна ванна, формоутворення, зона проплавлення, математичне моделювання, гідродинаміка зварювальної ванни.

## SUMMARY

*Ivanov V.P.* Theoretical and technological fundamentals for increasing the efficiency of the electric arc overlaying process on the basis of modeling of the weld pool formation. – Qualifying scientific work on the rights of the manuscript.

Dissertation for the degree of Doctor of Technical Sciences, specialty 05.03.06 – "Welding and Related Processes and Technologies" (132 – "Material Science") - State Enterprise "Pryazovskyi State Technical University", Ministry of Education and Science of Ukraine, Mariupol, 2019.

The dissertation is devoted to studying the regularities of the formation of the penetration zone during electric arc welding with wire and tape electrodes taking into account hydrodynamic processes in the weld pool and the development of mathematical models of this process for constructing design systems and controlling welding and surfacing technologies.

The analysis of the existing hydrodynamic models of the weld pool, their classification is created; the basic requirements for the developed models of the formation of the penetration zone are formulated. The study of existing models has allowed drawing conclusions about the laws of development of hydrodynamics in weld pools and the influence of hydrodynamic parameters on the formation of the melting zone.

It is established that the main requirement for ensuring the adequacy of the modelling of the formation of the penetration zone is to use the time parameter as the main variable, that is, such a model should be unsteady.

A mathematical model of the dynamics of the formation of the penetration zone during electric arc spot welding is developed, which describes the process of changing the size of this zone depending on time, which allows you to set the penetration parameters for cases when the weld pool is not in a quasi-stationary state. As a result of a computational experiment on the model, it was found that the main determining factor for the evolution of the melting isotherm over time is the rate of transfer of the electrode metal into the bath and the propagation of the melting current through the penetration zone.

Mathematical models of the dynamics of a penetration zone formation during surfacing in a protective gas environment and under a flux layer were developed. It was found that to increase the accuracy of modelling, it is necessary to take into account the influence of the welding speed on the size and shape of the penetration zone.

A mathematical model of the dynamics of the formation of the penetration zone

is developed taking into account the movement of the arc with the welding speed.

Calculation methods for formalizing control processes for the formation of weld beads in order to optimize technology and the creation of control systems for welding equipment were developed.

Software was developed for modelling the formation of the weld pool using various types of electrode materials to build computer-aided design systems and control recovery technologies.

The principal technology of surfacing was developed with control of the size of the penetration zone, which provides a stable and reliable connection of the deposited layer with the base metal, and it is also necessary to change the properties along the depth and area of the working surface. The effectiveness of the developed technology has been tested at a number of enterprises in the restoration of metallurgical products and power engineering.

Key words: weld pool, shaping, penetration zone, mathematical modelling, weld pool hydrodynamics.

**ТЕОРЕТИЧНІ І ТЕХНОЛОГІЧНІ ОСНОВИ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ  
ПРОЦЕСУ ЕЛЕКТРОДУГОВОГО НАПЛАВЛЕННЯ НА ОСНОВІ  
МОДЕЛЮВАННЯ ФОРМОУТВОРЕННЯ ЗВАРЮВАЛЬНОЇ ВАННИ**

05.03.06 – «Зварювання та споріднені процеси і технології»

**Автореферат**

дисертації на здобуття наукового ступеня  
доктора технічних наук

**ІВАНОВ** Віталій Петрович

Підписано до друку 28.10.2019 р. Формат 60x84/16.  
Ум. друк. арк. 2,25. Тираж 100 прим. Зам. № 123.

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