

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

ЛАВРОВА ОЛЕНА ВОЛОДИМИРІВНА



УДК 621.791.92

**РОЗВИТОК ТЕОРЕТИЧНИХ ТА ТЕХНОЛОГІЧНИХ ОСНОВ
УПРАВЛІННЯ ТЕПЛОМАСОПЕРЕНОСОМ ПРИ
ЕЛЕКТРОДУГОВОМУ НАПЛАВЛЕННІ ЗАСТОСУВАННЯМ
МЕХАНІЧНОГО КЕРУЮЧОГО ВПЛИВУ НА ЕЛЕКТРОД**

05.03.06 – «Зварювання та споріднені процеси і технології»

АВТОРЕФЕРАТ
на здобуття наукового ступеня
доктора технічних наук

Маріуполь, 2020 р.

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, старший науковий
співробітник
Максимов Сергій Юрійович
Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона,
завідувач відділу, м. Київ;

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

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

Захист відбудеться 20 листопада 2020 р. о 12⁰⁰ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 12.052.01 при Державному вищому навчальному закладі «Приазовський державний технічний університет» за адресою: 87555, м. Маріуполь, вул. Університетська, 7.

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

Автореферат розісланий 12 жовтня 2020 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради Д 12.052.01
кандидат технічних наук, доцент



І.Ю. Малишева

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Дисертація присвячена вирішенню актуальної проблеми – підвищенню ефективності електродугового наплавлення шляхом оптимізації процесу тепломасопереносу в зварювальну ванну за рахунок механічного керуючого впливу на електрод, що сприяє поліпшенню термічного циклу нагріву основного металу та мінімізації термодформаційних змін в зоні наплавленого валика та навколошовній зоні (НШЗ).

На якість наплавленого покриття суттєво впливає поведінка дуги на торці електроду, процеси плавлення і перенесення крапель електродного металу, рух рідкого металу і шлаку в ванні, умови тепловкладення в основний метал. Отже, найважливішим завданням при електродуговому наплавленні є усунення причин появи непроварів, шлакових включень, підрізів та інших дефектів формування валика шляхом управління тепловим впливом дуги на основний метал, а також тепломасопереносом з торця електроду в зварювальну ванну.

Не дивлячись на те, що існують різні способи механічного керування, досі не враховувались важковизначувані параметри оцінки впливу керуючих дій, а саме розмір, маса та температура крапель електродного металу.

В роботі основна увага приділяється визначенню основних закономірностей впливу механічних дій на параметри краплеперенесення електродного металу та властивості і працездатність наплавленого шару. Крім того, запропоновані дослідження дозволять підтвердити гіпотезу про спільний механізм впливу механічних дій на електрод при використанні як дротяних, так і стрічкових електродів. Це дасть змогу створити єдину математичну модель краплеперенесення електродного металу при застосуванні механічного керуючого впливу для обох типів електродів, чого досі зроблено не було. Також є необхідність встановити оптимальні діапазони використання механічних керуючих дій на електрод, що сприятиме підвищенню ефективності розплавлення електродного металу з забезпеченням дрібнокрапельного перенесення без коротких замикань дугового проміжку. Це дозволить встановити основні закономірності процесу плавлення електродного металу та його вплив на теплоперенос в зварювальну ванну, процеси плавлення основного металу і формування навколошовної зони.

В зв'язку з вищесказаним актуальними є дослідження впливу параметрів механічних керуючих дій при наплавленні електродами, виконаних з нелегованих, середньовуглецевих середньолегованих та високолегованих аустенітних сталей на формування зони проплавлення і структуру наплавленого шару. Аналіз макро-, мікроструктури може показати доцільність застосування механічного керуючого впливу на електрод.

Мета і завдання дослідження. Метою дисертаційної роботи є встановлення впливу параметрів механічного керуючого впливу на електрод для підвищення ефективності процесу електродугового наплавлення, а також створення технології та обладнання для реалізації розробок у виробничих умовах.

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

1. Встановити основні закономірності перенесення електродного металу із застосуванням механічного керуючого впливу на електрод при використанні плавких електродів, виконаних з нелегованих, середньовуглецевих середньолегованих та високолегованих аустенітних сталей.

2. Розробити математичну модель краплеперенесення електродного металу при застосуванні механічного керуючого впливу для визначення оптимального діапазону параметрів механічних керуючих дій для кожного типу використовуваного плавкого електроду з метою підвищення ефективності розплавлення електродного металу.

3. Розробити методику розрахунку параметрів механічного керуючого впливу на електрод, яка дозволить визначити оптимальні параметри процесу і забезпечити зниження енергоспоживання при електродуговому наплавленні.

4. Дослідити вплив краплеперенесення електродного металу на формування зони проплавлення, властивості наплавленого валику і навколошовної зони та визначити оптимальні параметри механічних дій на електрод, що призводять до підвищення працездатності наплавленого шару.

5. Створити на основі результатів виконаних досліджень технологічні основи електродугового наплавлення із застосуванням механічних керуючих дій.

6. Розробити обладнання для реалізації створеної нової технології електродугового наплавлення.

7. Впровадити у виробництво розроблені технології та обладнання електродугового наплавлення з механічним керуючим впливом на електрод з метою підвищення працездатності прокатного та металургійного обладнання.

Об'єкт дослідження – процес електродугового наплавлення із застосуванням механічного керуючого впливу на електрод.

Предмет дослідження – тепломасоперенос електродного металу при електродуговому наплавленні під впливом механічних управляючих дій.

Методи дослідження. При вирішенні поставлених у роботі задач для проведення досліджень використані наступні методи та апаратура: мікроструктурні методи дослідження, рентгеноспектральний мікроаналіз; вимірювання мікротвердості; цифрове осцилографування процесу наплавлення; математичне моделювання; розрахункові і експериментальні дослідження за допомогою програмних засобів обробки даних.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертація виконана відповідно тематиці науково-дослідницьких робіт ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет» та є складовою НДР № ДР 0117U003995 «Розробка імпульсних перетворювачів з функціями підвищення енергоефективності розподільчих електричних мереж», де здобувач був виконавцем. 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».

Наукова новизна отриманих результатів.

1. Вперше встановлено, що застосування механічних управляючих дій на електрод дозволяє стабілізувати краплеперенесення електродного металу як через дугу, так і поза нею, знизити масу крапель, забезпечити дрібнокрапельне перенесення без коротких замикань дугового проміжку, при цьому форма та розмір електроду визначають оптимальний діапазон параметрів керуючого впливу, який становить: 20÷70 Гц – для дротяного електроду діаметром 1,2 мм; 40÷80 Гц – для стрічкового електроду; 40÷100 Гц – для двохстрічкових електродів.

2. Розроблено математичну модель тепломасопереносу електродного металу при застосуванні механічного керуючого впливу, що дозволило вперше визначати розмір та масу крапель електродного металу при дії механічного керуючого впливу на електрод.

3. Вперше розроблена математична модель кондуктивного нагріву основного металу, яка враховує механічний вплив на електрод для випадку напівнескінченного тілу та плоского шару. Використання результатів моделювання при розробці оптимізованої технології наплавлення дозволяють збільшити ефективність розплавлення електродного металу при зменшенні тепловкладання в основний метал, за рахунок чого зменшуються площі ізотерм плавлення на рівні поверхні основного металу до 12% при незмінному значенні продуктивності.

4. Доведено, що підвищення ефективності розплавлення електродного металу за рахунок використання механічного впливу дозволяє знизити тепловкладання в зварювальну ванну та основний метал, причому ця залежність має екстремальний характер, що забезпечує зниження коефіцієнту варіації глибини проплавлення в середньому на 10%, поліпшення структури НШЗ та підвищення працездатність наплавленого шару.

5. Вперше запропоновано застосування механічного впливу на електрод при багатоелектродному наплавленні, що дозволяє підвищити ефективність процесу наплавлення та зменшити споживання енергії на 14,5 %.

6. Вперше експериментально встановлено та підтверджено розрахунком збільшення коефіцієнту розплавлення електродного металу на 15÷25 % при застосуванні механічного керуючого впливу на процес наплавлення двома стрічковими електродами зі сталі 08кп та 12Х18Н10Т.

7. Встановлено, що при використанні механічного керуючого впливу складові системи «електрод–дуга–зварювальна ванна» знаходяться в синергетичній взаємодії, визначаючи оптимальні значення управляючих параметрів для кожного розглянутого варіанту використання механічних керуючих дій на електрод.

8. Отримали подальшого розвитку теоретичні і технологічні основи тепломасопереносу при електродуговому наплавленні шляхом встановлення закономірностей плавлення електродного та основного металу при використанні механічних управляючих дій на електрод(и). Узагальнено вплив параметрів управління на формування зони проплавлення, наплавленого валика

і властивостей НШЗ для різних типів електродів, що дає змогу впроваджувати енергозберігаючі технології відновлення металургійного та прокатного обладнання.

Практичне значення отриманих результатів. На основі отриманих наукових результатів представленої дисертаційної роботи отримано наступні практичні добутки:

1. В результаті математичного моделювання розроблена методика розрахунку параметрів краплеперенесення з використанням механічного керуючого впливу на електрод, яка була використана при розробці обладнання електродугового наплавлення в промислових умовах.

2. Вперше розроблено та впроваджено в виробництво обладнання з механічним керованим тепломасопереносом електродного металу при використанні двох стрічкових електродів.

3. На основі досліджень впливу механічних керуючих дій на тепловкладення в зварювальну ванну та основний метал розроблена методика розрахунку розподілу температури в навколошовній зоні, на базі якої створено технологію електродугового наплавлення в промислових умовах.

4. Удосконалено технологію електродугового наплавлення за рахунок використання оптимізованих параметрів механічного керуючого впливу на електрод.

5. Удосконалено обладнання для забезпечення механічних керуючих дій при використанні крихких і тонких (товщиною $<0,5$ мм) стрічкових електродів у тому числі з використанням синусоїдальних імпульсів струму в котушці соленоїда.

Результати представленої дисертаційної роботи використано при відновленні виробів металургійного та прокатного виробництва. В умовах науково-виробничого об'єднання «Укрспецзварювання» (м. Маріуполь) впроваджено технологію електродугового наплавлення із застосуванням механічного керуючого впливу на електрод для відновлення опори підшипникового вузла прокатного валка з економічним ефектом 1 288 700 грн. та промислове впровадження відновлення сфер клапана доменної печі з економічним ефектом в розмірі 237 800 грн. В умовах ТОВ «Маріупольтехнострой» (м. Маріуполь) здійснено промислове впровадження наплавлення станових роликів з економічним ефектом в розмірі 782 600 грн. Загальний економічний ефект від впроваджень склав 2,3084 млн. грн.

Ряд розробок впроваджено в навчальний процес в рамках викладання навчальних дисциплін «Інноваційні технології в наукових дослідженнях та організація експерименту», «Фізико-хімічні процеси при наплавленні та напиленні» 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. 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 держбюджетних НДР.

Апробація результатів дисертації. Матеріали роботи були представлені на наступних наукових та науково-практичних конференціях: Tendenze attuali della moderna ricerca scientific (Stuttgart, 2020), Инженерия поверхности и реновация изделий (Київ, 2020), Integracion de las ciencias fundamentales y aplicadas en el paradigma de la sociedad post-industrial (Barcelona, 2020); Наукове забезпечення технологічного прогресу ХХІ сторіччя (Чернівці, 2020), Problèmes et perspectives d'introduction de la recherche scientifique innovante : sur les matériaux de la conférence scientifique et pratique internationale (Belgique, 2019); Technology transfer : Fundamental principles and innovative technical solutions : proceedings of the 3rd annual conference (Tallinn, 2019); Всеукраїнська науково-техн. конф., Інституту чорної металургії ім. З.І. Некрасова Національної академії наук України (Дніпро, 2019); Міжнародна науково – технічна конференція молодих учених та студентів (Тернопіль, 2019); Всеукраїнські науково-практичні конференції молодих учених, спеціалістів, аспірантів, ДВНЗ «ПДТУ» (Маріуполь, 2017-2019); Міжнародних науково-технічних конференціях «Університетська наука» (Маріуполь, 2013-2020); ІХ Міжнародній науково-практичній конференції «Иновационные технологии в машиностроении» (Томськ, 2018); ІV Міжнародній науково-технічній конференції «Зварювання та споріднені технології: перспективи розвитку» (Краматорськ, 2016); V Міжнародній науково-практичній конференції «Иновационные технологии и экономика в машиностроении» (Томськ, 2014).

Публікації. За матеріалами дисертації здобувачем опубліковано 63 робіт, з них: 14 статей у спеціалізованих фахових виданнях, 13 статей, що входять до НБД Scopus та Web of Science, з яких 10 статей Q3; 2 статті у зарубіжних виданнях; 4 патенти, 34 тези доповідей на конференціях та 4 сертифікати учасника Міжнародних конференцій.

Структура і обсяг роботи. Дисертація складається зі вступу, п'яти розділів, загальних висновків, списку використаних джерел з 280 найменувань і 3 додатки. Дисертаційна робота включає в себе 340 сторінок, в тому числі 126 рисунків, 12 таблиць.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовано актуальність розв'язуваної в дисертації проблеми, її наукове і практичне 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.

В першому розділі проведено аналіз існуючих видів керування тепломасопереносом при електродуговому наплавленні і застосовуваних способів керуючого впливу на електрод. Проаналізовано літературні джерела, в яких висловлені уявлення про причини, що визначають підвищення продуктивності розплавлення електроду при дії різних способів управління перенесенням і оптимізації процесів плавлення електродного і основного металу при електродуговому наплавленні.

Розвиток теорії процесів переносу при зварюванні здійснювався такими вченими, як Б.Є. Патон, А.А. Єрохін, В.В. Фролов, У. Ейгорн, та ін. Дослідженню процесу наплавлення, у тому числі з керуючим перенесенням, присвятили свої роботи: Фрумін І.І., В.І. Дятлов, А.Г. Потапьевський, Н.М. Воропай, К.В. Багрянський, В.О. Лебедєв, В.О. Роянов, О.Д. Размишляєв, Л.К. Лещінський, С.В. Гулаков, Б.І. Носовський, В.А. Ленівкін, Н.Г. Дюргеров, V. Kumar, C. Lee, G. Verhaeghe, S. Raghunathan, N. Suketu, D. Dave, B. Narkhede.

Сучасний стан теоретичних і експериментальних досліджень в досліджуваній області дозволяє стверджувати, що при електродуговому наплавленні якість формування наплавленого шару пов'язана, в основному, з особливостями процесів плавлення електродного та основного металу, що визначаються розосередженням теплового потоку по ширині фронту плавлення, періодичним впливом дуги на окремі ділянки ванни, збільшеним тепловідводом по її краях. Недостатньо стабільне протікання цих процесів може призводити до нерівномірного і недостатньо надійного проплавлення основного металу і надавати негативного впливу на якість формування (включаючи стабільність) наплавленого шару, зони сплавлення і особливо ділянку перекриття суміжних валиків.

Показана суперечливість і недостатня вивченість процесів, що визначають вказані ефекти при наплавленні з застосуванням механічного керуючого впливу на електрод. Виявлено, що в порівнянні з іншими технологічними методами, які дозволяють підвищити ефективність процесу наплавлення під флюсом, спосіб наплавлення з застосуванням механічних дій на електрод має ряд переваг.

Аналіз розглянутих способів управління перенесенням електродного металу за рахунок механічного впливу було проведено в залежності від діючих факторів впливу і типу прийнятої розрахункової схеми, виявлено основні закономірності впливу на перенесення, переваги і недоліки. На базі наведених літературних джерел проведено удосконалення класифікації способів та методів управління процесами переносу при електродуговому наплавленні. Однак виявлено, що в порівнянні з іншими технологічними методами, які дозволяють підвищити ефективність процесу електродугового наплавлення, спосіб наплавлення з застосуванням механічного керуючого впливу на електрод має ряд переваг, а саме управління тепломасопереносом з торця електроду до зварювальної ванни призводить до рівномірного розподілу теплової енергії по ширині наплавленого шару, що призведе до ресурсоефективності процесу наплавлення та зниженню ймовірності отримання дефектів, а енегозбереження досягається зменшенням перегріву електродного металу.

На основі проведеного аналізу стану теорії та практики керованого тепломасоперенесення сформульовані основні завдання дисертаційної роботи.

Другий розділ містить результати проведених досліджень, які лягли в основу розробки математичної моделі плавлення електродного металу із застосуванням механічного керуючого впливу на електрод. З цією метою були проведені експериментальні і розрахункові дослідження впливу

параметрів механічних дій на показники температури і маси крапель електродного металу при електродуговому наплавленні електродними матеріалами різного типу і хімічного складу.

Відомо, що при плавленні електродного матеріалу утворюються краплі розплавленого металу, які мають випадкові розміри і хаотичне розташування на торці, отже електродний метал нерівномірно розподіляється в зварювальній ванні, що може призвести до утворення хімічної неоднорідності в наплавленому шарі, несплавлення та ін. дефектів.

Дослідження процесів плавлення електроду не розділюють процес формування краплі на дві фази та перенесення її через дуговий проміжок. Однак, для кінетичного розрахунку крапель електродного металу та металу шва при різноманітних умовах зварювання важливі відомості про характеристики перенесення металу.

В представленій дисертаційній роботі запропоновано математичну модель перенесення електродного металу, яка кількісно визначає сумарну масу електродного металу. При математичному моделюванні тепломасоперенесення електродного металу із застосуванням механічного керуючого впливу необхідно враховувати тепломасоперенесення електродного металу до зварювальної ванни не тільки в дузі $m_{e\delta}$, а й поза нею $m_{кз}$, тому:

$$\frac{dm}{dt} = \frac{dm_{кз}}{dt} + \frac{dm_{e\delta}}{dt}. \quad (1)$$

Особливості управління перенесенням крапель електродного металу в зварювальну ванну із застосуванням механічних дій вивчені досить епізодично. Для оцінки застосування таких засобів управління були проведені дослідження впливу параметрів механічних керуючих дій на процес перенесення електродного металу при електродуговому наплавленні.

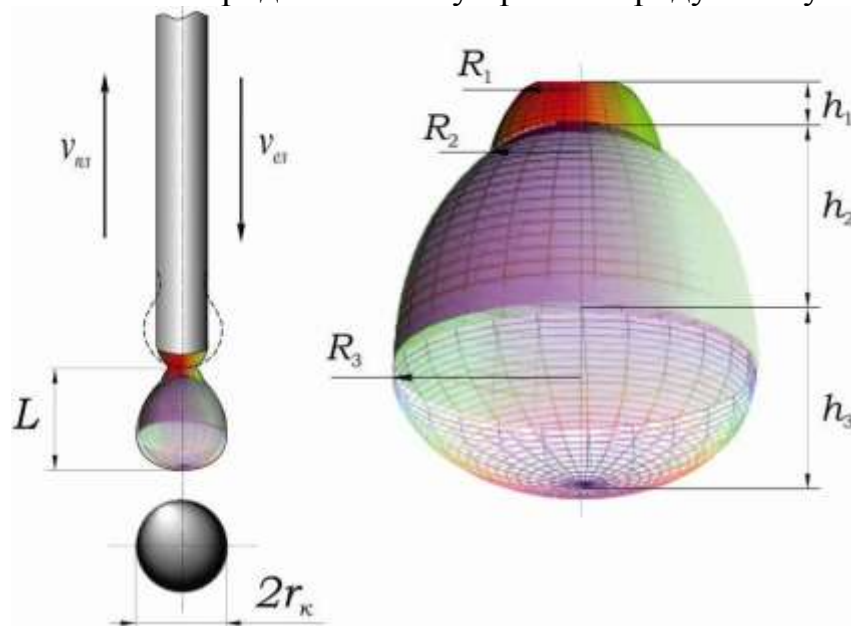


Рис. 1. Схема до моделювання формування краплеутворення на торці електроду: h_1 – висота початкової складової електродної краплі, м; $R_{ув}$, R_2 , h_2 та R_3 , h_3 – радіальні розміри від центру другої та третьої складової частини, відповідно, м.

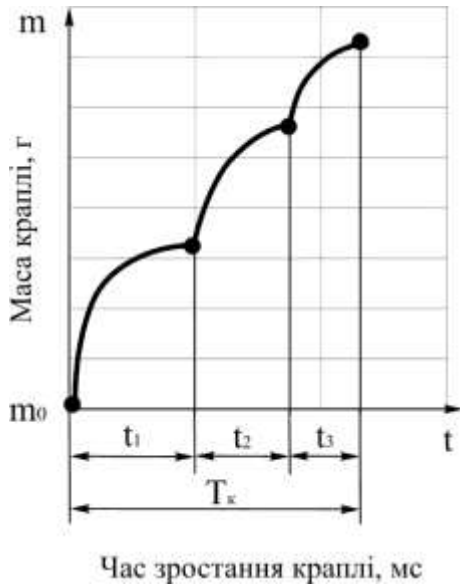


Рис. 2. Формування краплі електродного металу із застосуванням механічного керуючого впливу: t_1, t_2, t_3 – час формування електродної краплі на кожній ділянці, год; T_k – загальний час формування краплі до моменту відриву, год.

Для математичного моделювання масоперенесення електродного металу автором запропонована розрахункова схема (рис. 1), яка складається з трьох частин, результуючими розмірами в яких виступають h_1, R_2, R_3 . Згідно рис. 2, в момент зародження електродної краплі t_1 відбувається швидке зростання об'єму рідкого металу до h_1 (рис. 1), під час стабілізації якого виникає друга складова загального об'єму з радіальними розмірами від центру R_2, R_w, h_2 (рис. 1) формування якої відбувається швидше за першу частину, що призводить до миттєвого радіального зростання її розміру t_2 . За аналогічним принципом відбувається формування третьої складової загального об'єму краплі рідкого металу, але зі зменшеною динамікою росту радіальних параметрів цієї частини t_3 . Графічне рішення отриманої залежності зростання маси краплі електродного металу наведено на рис. 2.

Математична модель масоперенесення електродного металу з торця електроду із застосуванням механічного керуючого впливу має вигляд:

$$\left\{ \begin{array}{l} \int_{t_1}^{T_{k3}} f V_1 dt = H_1^3 K_1 \left(\frac{T_{k3}^3 - t_1^3}{4} \right) \\ \int_{t_2}^{T_{k3}} f V_2 dt = \frac{4\pi K_2 H_2 R_w^2 t_2^3 - 3R_w^3 t_2^3 - H_2^3 T_{k3}^3 + 3H_2^2 R_w T_{k3}^3}{9}, \\ \int_{t_3}^{T_{k3}} f V_3 dt = \frac{\pi K_3 H_3^3 T_{k3}^3 - 4R_3^3 T_{k3}^3 - H_3^2 R_3 t_3^3 + 4R_3^2 H_3 t_3^3}{12} \end{array} \right. \quad (2)$$

Результати розрахунку за наведеними залежностями (2) визначають кінетику зростання складових частин краплі до моменту її відриву.

Розроблена методика розрахунку кінетичних та температурних параметрів крапель електродного металу, що проходять через дуговий проміжок із застосуванням механічного впливу на електрод, дозволяє спрогнозувати кінетику металургійних процесів на стадії нагрівання та плавлення електродів.

Проводили дослідження процесу краплеперенесення з торця електрода в залежності від частоти механічних впливів (рис. 3) з метою розробки методики

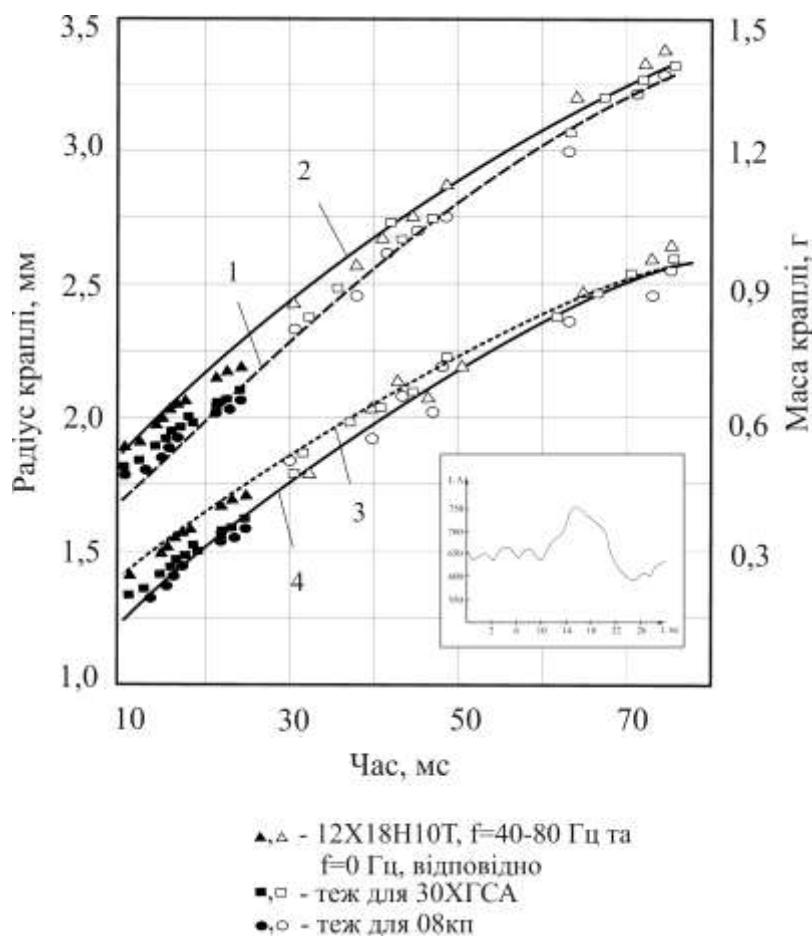


Рис. 3. Вплив механічних керуючих дій на розмір та масу електродних крапель: дані розрахунку та експерименту для маси (1,2) і радіусу (3,4).

запобігання приварюванню крапель до лотка. Для дослідження використовували електродні стрічки з вуглецевих сталей марок 08кп, 30ХГСА і аустенітну стрічку марки 12X18H10T. Стрічкові електроди попередньо були обрізані до отримання однакового перерізу – $30 \times 0,5$ мм для запобігання впливу розмірів стрічок на процес їх розплавлення.

Для визначення часу формування краплі (знаходження дуги на локальній ділянці торця стрічкового електрода) використовували осцилографування процесу наплавлення за допомогою портативного аналогово-цифрового перетворювача. Запис осцилограм проводився за допомогою експериментального комплексу, що складається з ПК, портативного аналогово-цифрового перетворювача і сполучних кабелів. Для надійної роботи АЦП, в умовах наявності перешкод від протікання струму в зварювальному контурі, була зібрана захисна плата, яка містить набір диференціальних підсилювачів і фільтрів захисту по кожному каналу. З поверхні стрічкового електрода показання напруги знімалися за допомогою датчиків, розташованих на текстолітовій пластині. Потім через захисну плату

кількісної оцінки характеристик тепломасоперенесення електродного металу і його енергетичного впливу на формування зварювальної ванни. Краплі електродного металу отримували при наплавленні на графітовий циліндр, що обертається з постійною швидкістю зі змінним струмопідведенням. Швидкість обертання циліндра встановлювали таким чином, щоб лінійна швидкість точок його поверхні перебувала в межах рекомендованого діапазону швидкості наплавлення – $10 \div 18$ м/год. Під циліндром був розташований приймальний лоток, дно якого було вкрите шаром глинозему для

сигнал надходив на АЦП і оброблявся за допомогою спеціального прикладного програмного забезпечення.

Експериментальні дані показали, що залежність параметрів краплеперенесення має екстремальний характер від параметрів режиму наплавлення, причому матеріал стрічкового електроду впливає на розміри і масу крапель. Також встановлено, що зміна швидкості переміщення дуги щодо циліндра для краплеутворення у всьому досліджуваному діапазоні не впливає на параметри розплавлення стрічкових електродів.

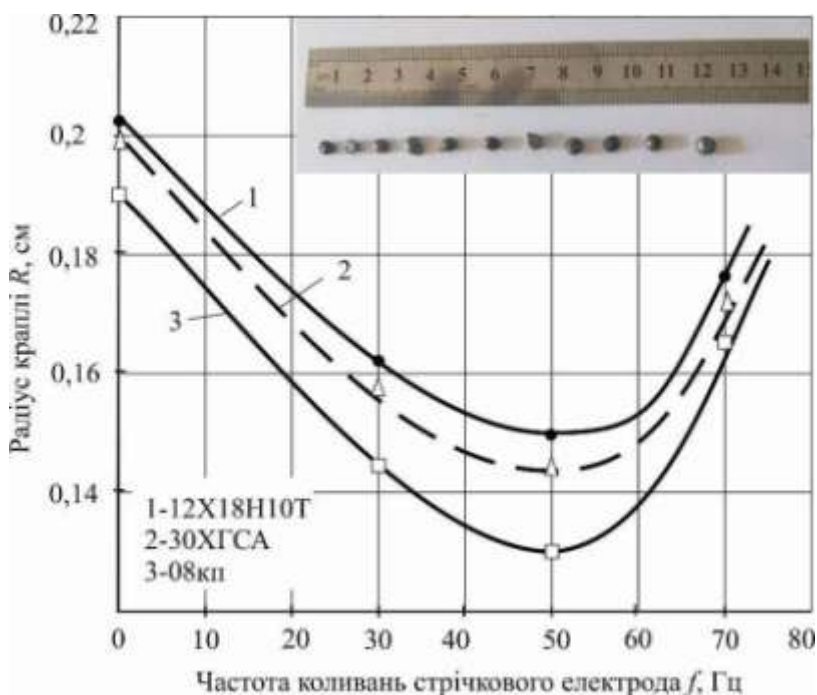


Рис. 4. Залежність зміни розміру електродних крапель від частоти коливань електроду

крапель були використані для розробки розрахункової методики параметрів краплеперенесення при електродуговому наплавленні.

При розрахунку було прийнято, що розплавлена крапля на торці електроду має форму кульового сегмента з основою. Розрахунок тепломісткості крапель електродного металу підтвердив висновок про сприятливий вплив механічних керуючих дій на ефективність його розплавлення. Так, зниження середньої розрахункової температури перегріву крапель електродного металу при використанні механічних впливів склало від 10% до 20%.

Проведені дослідження дозволили встановити, що при електродуговому наплавленні із застосуванням механічного керуючого впливу можна регулювати не тільки частоту скидання крапель рідкого металу, а й зменшити їх розмір. Дрібнокрапельне перенесення електродного металу приведе до зниження температури крапель, які переносяться з торця стрічкового електроду в зварювальну ванну, що підтверджує твердження про енерго- та ресурсозбереження описуваної в дисертаційній роботі технології наплавлення.

Аналіз даних проведених досліджень дозволив встановити, що використання механічних керуючих дій дозволяє зменшити розміри і об'єм крапель електродного металу на 9÷37% в залежності від використовуваного електродного матеріалу (рис. 4). Це забезпечує більш стабільне і дрібнокрапельне перенесення в зварювальну ванну, особливо при використанні електродів з високолегованих аустенітних сталей. Дані розмірів і маси

Застосування механічних дій при електродуговому наплавленні в порівнянні з наплавленням без їх використання забезпечує підвищення стабільності процесу наплавлення і ефективності тепломасопереносу, в тому числі:

- зменшення об'єму крапель, які переносяться в зварювальну ванну в середньому на 15%, що підвищує ефективність переходу хімічних елементів з електроду в метал шва;

- зменшення середньої тривалості горіння дуги на інтервалах плавлення електроду і періоду формування крапель електродного металу в середньому на 26%, що сприяє зниженню перегріву зварюваного матеріалу та енергоефективності процесу наплавлення.

Також в результаті проведених досліджень, було встановлено, що використання механічного впливу на електрод дозволяє зменшити об'єм однієї краплі електродного металу від 9% до 37%, що забезпечує більш стабільне дрібнокрапельне перенесення, особливо при використанні електродів з високолегованих сталей.

За допомогою методики розрахунку тепловкладання в краплю електродного металу, і з огляду на параметри перенесення крапель електродного металу з оптимальною частотою механічних дій, яка залежить від виду використовуваних матеріалів, оцінена температура перегріву електродних крапель. Розрахунки, виконані аналітичним методом, показують, що при наплавленні із застосуванням механічного керуючого впливу, енергія, яка витрачається на плавлення електродного металу протягом 1 секунди, в середньому становить: $Q_k = 1,13 \cdot 10^7$ Дж ($Q_k = 0,13 \cdot 10^7$ Дж на краплю), а при наплавленні без механічного управління тепломасопереносом – $Q_k = 1,25 \cdot 10^7$ Дж ($Q_k = 0,156 \cdot 10^7$ Дж на краплю).

Використання механічного керуючого впливу на електрод при електродуговому наплавленні дозволяє підвищити коефіцієнт розплавлення електроду (рис. 5) як для дрютяного, так і для стрічкового електродів.

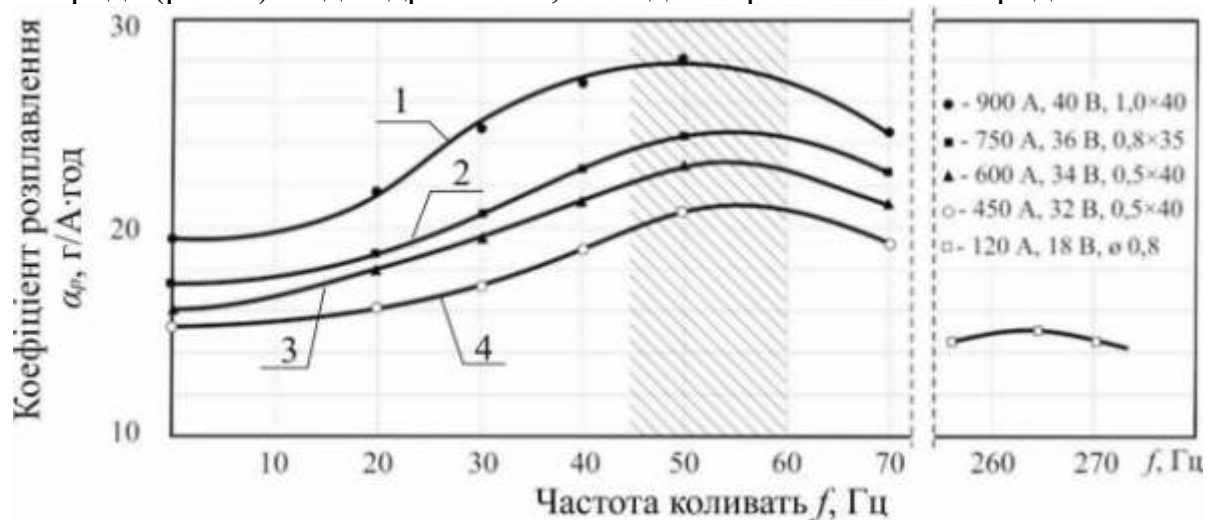


Рис. 5. Вплив параметрів режиму наплавлення із застосуванням механічних дій на коефіцієнт розплавлення електроду: 1-4 – стрічковий електрод 08 кп перерізом 0,5×40 мм (флюс АН-60), 0,8×35 мм, 1,0×40 мм;

діапазон струму 450÷900 А, напруга на дузі 32÷40 В, $v_n=10\div15$ м/год; 5 – електродний дріт Св-08Г2С $\varnothing 0,8$ мм (CO_2); $I=120$ А, $U_d=12$ В, $v_n=20$ м/год.

За допомогою розробленої методики розрахунку тепловкладання в краплю електродного металу і з урахуванням параметрів механічних дій з частотою впливу на електрод 40÷80 Гц, оцінена температура перегріву електродних крапель при електродуговому наплавленні. Розрахункові дані представлені на рис. 6.

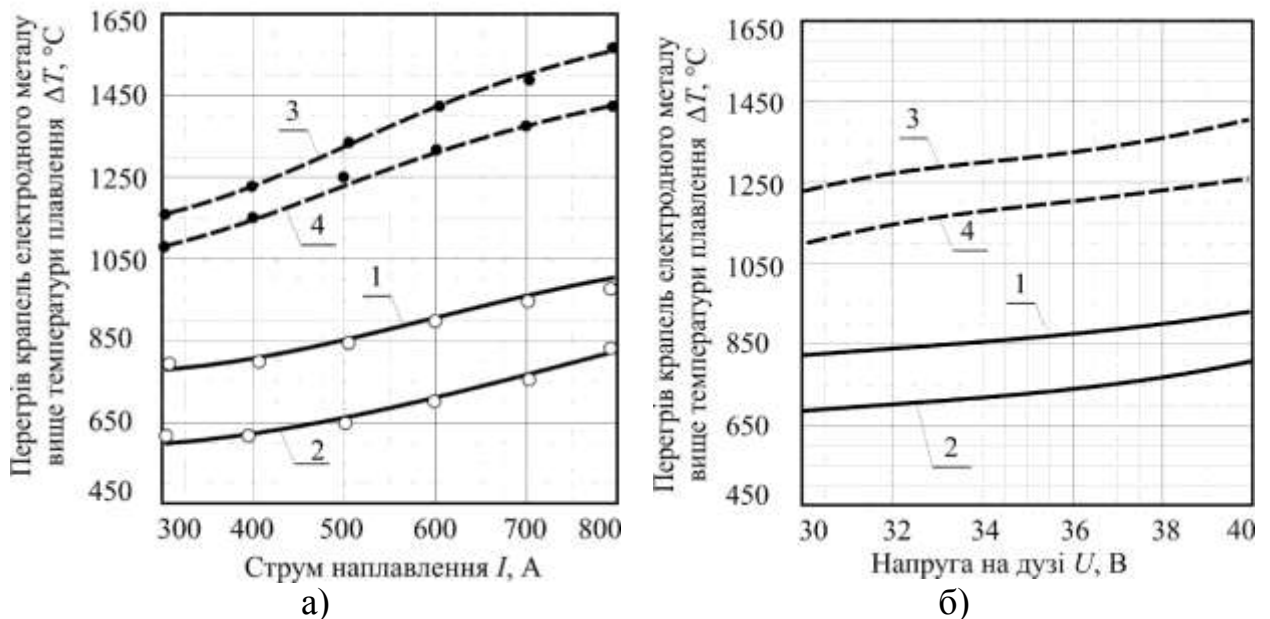


Рис. 6. Перегрів електродного металу вище температури плавлення в залежності від струму наплавлення та напруги на дузі: а) $U_d = 32$ В; б) $I_n = 500$ А, 1 – стрічковий електрод $45 \times 0,5$ мм; 2 – стрічковий електрод $40 \times 1,0$ мм; 3 – дріт $d_e = 3$ мм; 4 – дріт $d_e = 4$ мм

Різна теплоємність крапель електродного металу і час перебування краплі на торці електроду тягне за собою зміну в розмірах крапель. Краплі різного розміру мають різну активну поверхню взаємодії зі шлаком і атмосферою, а, отже, і повноту протікання металургійних реакцій. Отримані результати підтверджують позитивний вплив зменшення розміру крапель, що переносяться на зниження тепловкладання в зварювальну ванну.

В третьому розділі досліджено властивості металу шва та навколошовної зони при наплавленні з механічним впливом на електрод, а також встановлено, як прогнозовані сприятливі зміни в складі і структурі наплавленого валику впливають на працездатність наплавленого шару.

Для визначення змінення розподілу температури в основному металі при дії механічного впливу на електрод, вирішували задачу нагріву напівнескінченного теплоізолизованого тіла точковим та лінійним джерелами змінної потужності, що рівномірно рухаються по його поверхні. Для розподілу температурного поля при дії безперервного джерела використано залежність:

$$T(x, y, z, \Delta t) = \frac{q'}{2\pi\lambda R} \exp\left(-\frac{\nu(x+R)}{2a}\right) f(R, \Delta t), \quad (3)$$

де x, y, z – координати точки, м; R – радіус-вектор, м; Δt – час дії джерела, с; q' – постійна складова потужності джерела тепла, Вт; λ – коефіцієнт теплопровідності, Вт/м·К; ν – швидкість джерела, м/с; a – коефіцієнт температуропровідності, м²/с; $f(R, \Delta t)$ – інкрементна функція впливу пульсацій джерела на температурне поле.

Вид інкрементної функції $f(R, \Delta t)$ залежить від характеру пульсації джерела, відстані між досліджуваною точкою і джерелом R та моментів часу t . Досліджувалися функції зміни потужності у вигляді прямокутних імпульсів для точкового джерела тепла та у вигляді синусоїдальної функції для лінійного джерела. В кожному разі змінна складова потужності перетворювалася в послідовність Фур'є з коефіцієнтами:

$$a_i, b_i = \frac{2}{\tau} \int_0^{\tau} q(t) \varphi_{a,b}(i\omega t) dt \quad (i = 0, 1, 2, \dots), \quad (4)$$

де τ – період функції $q(t)$, с; φ – відповідна коефіцієнту тригонометрична функція; ω – кругова частота $2\pi/\tau$.

Рішення рівняння (3) знаходили як суму температурних інкрементів для кожного i -го джерела з постійною складовою $T_0(x, y, z, t)$. Для знаходження постійної складової у разі використання лінійного джерела в умовах обмеження по товщині було використано перетворення Гріна:

$$T_0(x_0, y_0, z_0, t) = \sum_{n_1, n_2, n_3 = -\infty}^{\infty} \frac{q/l_0}{c\rho 4\pi a^2} \int_{\omega - \frac{l_0}{2}}^{\omega + \frac{l_0}{2}} d\eta \int_0^t \frac{dt'}{(t-t')^{3/2}} \times$$

$$\times \left\{ \exp\left[-\frac{x_0 - \nu t' - 2n_1 l_1^2}{4a^2(t-t')}\right] + \exp\left[-\frac{x_0 + \nu t' - 2n_1 l_1^2}{4a^2(t-t')}\right] \right\} \times \quad (5)$$

$$\times \left\{ \exp\left[-\frac{y_0 - \eta - 2n_2 l_2^2}{4a^2(t-t')}\right] + \exp\left[-\frac{y_0 + \eta - 2n_2 l_2^2}{4a^2(t-t')}\right] \right\} \times \left\{ \exp\left[-\frac{-2n_3 l_3^2}{4a^2(t-t')}\right] \right\}.$$

Для розрахунків було використано прикладний програмний пакет для математичних обчислень MathCAD. Результати обчислень були зіставлені з результатами розрахунку за спрощеними формулами для постійного джерела з приведеними значеннями потужності та експериментальними даними. Досліджено також вплив величини тепловкладання змінної потужності на термічний цикл нагріву (ТЦН) навколошовної зони для наплавного матеріалу з різними теплофізичними властивостями.

Проведено порівняльний розрахунок термічних циклів нагріву точок по глибині навколошовної зони 1,5÷6 мм з використанням механічного керуючого впливу на електрод і без нього (рис. 7). При цьому умовна

теплова потужність джерела змінної потужності з синусоїдальними переміщеннями торця електроду може бути прийнята вище на 15÷20% при рівній фактичній потужності з постійним тепловим джерелом.

При розрахунку параметрів температурного поля використовували відому схему періодичного рухомого точкового джерела на поверхні напівнескінченного тіла з тривалістю прямокутного імпульсу t_p , періодом t_c і потужністю імпульсу q_p (усередненої потужністю $q_0=q_p t_p/t_c$). Для порівняння розрахункових даних з результатами експерименту проведено дослідне наплавлення зразків з нелегованої сталі стрічками 08кп та 12Х18Н10Т, шириною 45 мм на режимах: сила зварювального струму – 650÷850 А, напруга на дузі – 28÷42 В, швидкість наплавлення – 10 м/год, крок наплавлення – 30÷34 мм.

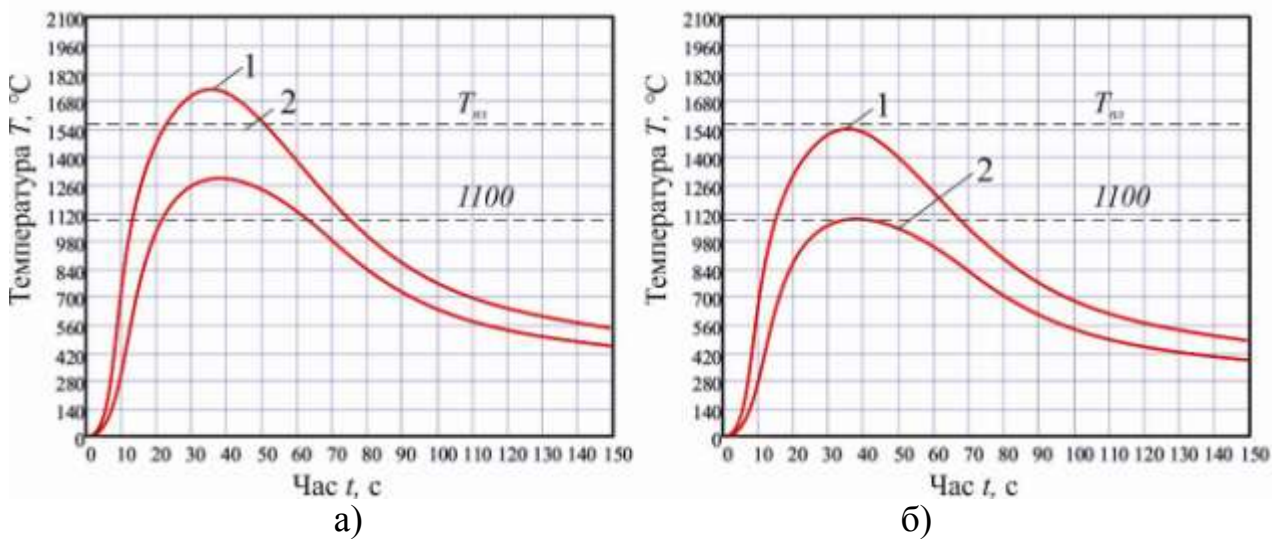


Рис. 7. Термічний цикл нагріву для локальної ділянки НШЗ: а – при $z = 1,5$ мм; б – при $z = 3,0$ мм; 1, $f = 0$ Гц; 2 – $f = 60$ Гц

Проведені дослідження показали, що використання механічного впливу на електрод дозволяє знизити рівень тепловкладання в навколошовну зону за рахунок підвищення ефективності розплавлення основного металу. При досліджуваній частоті 40÷80 Гц тривалість перебування точок на лінії сплавлення і нижче її в інтервалі 900÷1100 °С менше, ніж при наплавленні без механічного впливу на електрод. Зниження тепловкладання в НШЗ в інтервалі температур 900÷1100 °С сприяє зменшенню градієнта швидкості кристалізації при незмінному часу охолодження НШЗ та забезпечує більш дрібнозернисту структуру.

Розрахунковий аналіз розподілу температурного поля при наплавленні шаром аустенітного матеріалу показав, що, при віддаленні вглиб, температура різко знижується і при віддаленні до 35 мм від центру джерела не перевищує 400°С. Практично аналогічний характер зміни температури спостерігається і по глибині основного металу. Згідно з представленими даними, глибина проплавлення основного металу при використанні механічних керуючих дій на електрод не досягає 1,5 мм, так як розрахункова температура на цій глибині поблизу лінійного джерела не перевищує 1500 °С. Розрахунки також показують зниження розмірів області

основного металу, яка піддається нагріву до 1100 °С і вище при використанні механічного впливу. Крім того, за рахунок зменшення часу перебування на торці електрода і тепломісткості крапель розплавленого металу при наплавленні з механічним впливом спостерігається помітне зменшення довжини ізотерм температурного поля. Для стрічкового електрода цей ефект проявляється більшою мірою при збереженні практично незмінної ширини ізотерми плавлення, пов'язаної з шириною стрічкового електрода (рис. 8).

Таким чином, зменшення довжини відповідних ізотерм температурного поля для випадку застосування механічного керуючого впливу (в середньому на 12,5%) приводить до зниження впливу термічного циклу наплавлення на термомодеформаційні зміни в зоні шва і НШЗ.

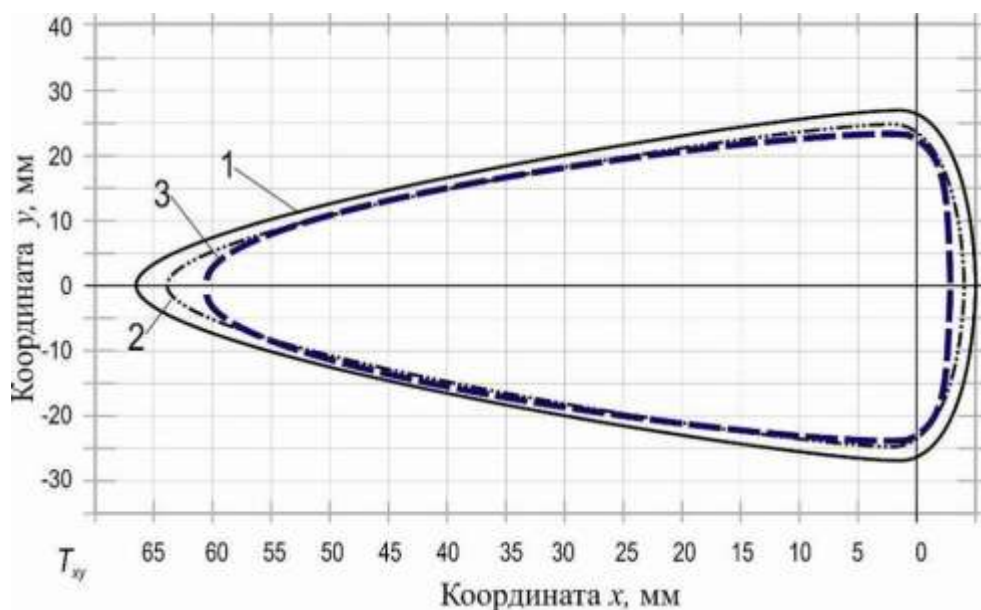


Рис. 8. Види ізотерм плавлення основного металу стрічкою 45×0,5 мм: ($z = 0$, $\eta = 0,9$, $U_d = 28\div 30$ В, $V_n = 12$ м/год): $I_{зв} = 800$ А; 1- $f = 0$ Гц, 2- $f = 70$ Гц; (розрахункові дані); 3 - експериментальні дані

Якість формування швів оцінювалося, відповідно до ДСТУ 25616-83, шляхом зовнішнього огляду. Металографічні дослідження проводилися на мікроскопах МИМ-8, Neophot-21 при збільшеннях від $\times 100$ до $\times 1000$. Визначення мікротвердості (рис. 9) визначалося згідно ДСТУ 9450-76 на приладі ПТМ-3.

За характером лінії сплавлення з основним металом зроблено висновки про рівномірний розподіл теплової енергії по ширині наплавленого валика, рівномірному сплаві з основним металом, зниження ймовірності появи дефектів в наплавленому шарі. Встановлено, що при використанні механічних дій на стрічковий електрод, середні значення висоти посилення валика знаходяться на тому ж рівні, що і без їх використання при тому, що середні значення струму в середньому на 50÷70 А нижче. У той же час відносні показники мали тенденцію до зниження на 10÷15% при використанні механічного впливу.

Структура всіх зразків характеризується рівномірним проплавленням,

симетричною ЗТВ і відсутністю несучільностей, а основа має гомогенну дріб-нозернисту макроструктуру. Найбільш рівномірну ферито-перлітну структуру, має зразок наплавлений з частотою механічних дій на електрод 40÷80 Гц. Враховуючи неоднорідність наплавленого металу в інтервалі частот 0÷20 Гц і 100÷120 Гц діапазон 40÷80 Гц обрано як оптимальний. Це підтверджено даними мікротвердості (рис. 9).

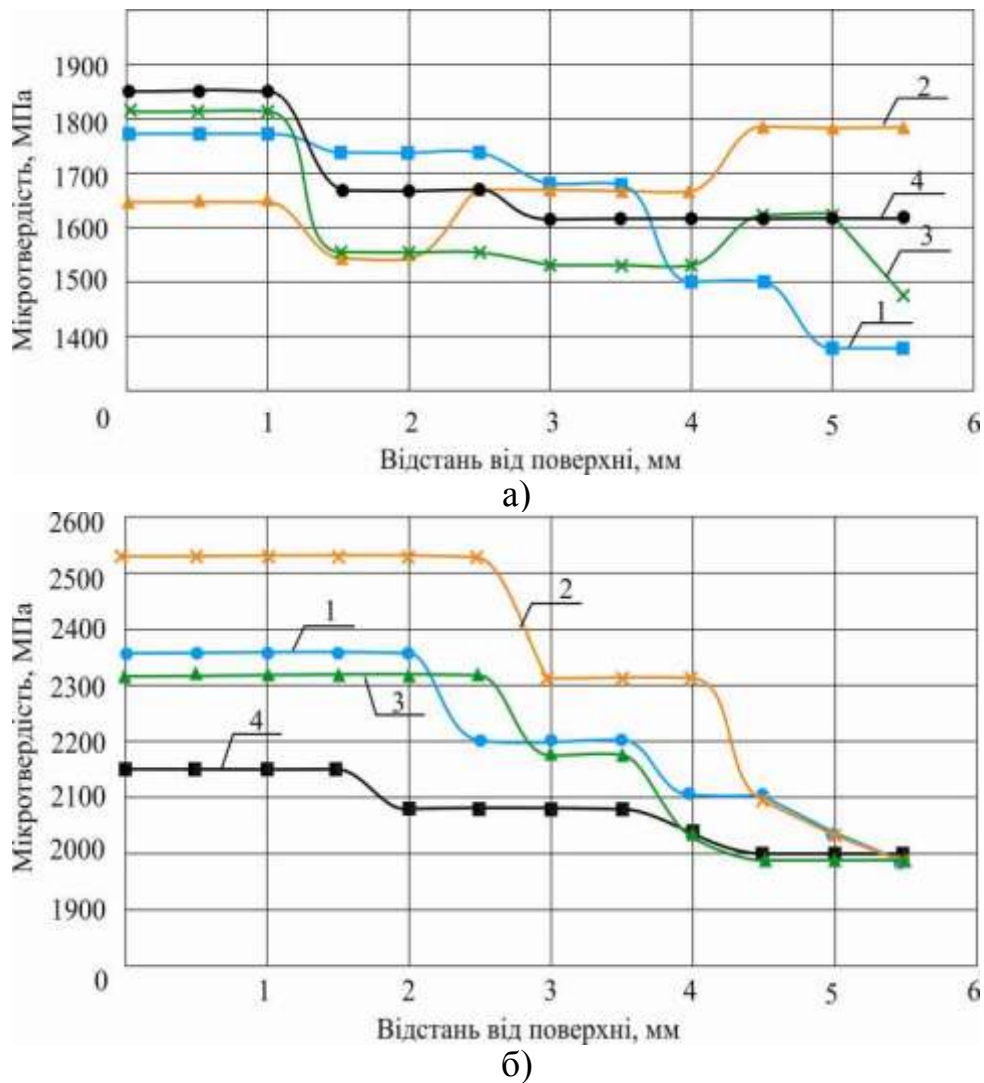


Рис. 9. Розподіл мікротвердості по глибині наплавленого металу: а – ЛН-08кп на VСт3сп, б – ЛН-12Х18Н10Т на VСт3сп: 1 – $f=0$ Гц; 2 – $f=20$ Гц; 3 – $f=100$ Гц; 4 – $f=70$ Гц

Макроструктура зразків дозволяє зробити висновок про зниження нерівномірності лінії проплавлення при збільшенні частоти з 40 Гц до 80 Гц. При подальшому збільшенні частоти розкид значень глибини проплавлення вздовж лінії сплаву мав повторну тенденцію до збільшення.

Були проведені дослідження впливу параметрів керуючих механічних дій на властивості металу шва і навколошовної зони, а також встановлено, як прогнозовані сприятливі зміни в розмірах і структурі наплавленого шару, який кристалізується, що відбуваються в умовах, характерних для процесу з управляючим впливом, можуть забезпечити високі значення експлуатаційної стійкості і працездатності відновлених виробів.

Наплавлений метал без механічного впливу має в поверхневому шарі сорбітну структуру з грубими кристалітами фериту, крім того, спостерігається крупногочаста феритна структура в зоні сплавлення, що може привести до зниження міцності і пластичних властивостей напавленого металу. У зоні ЗТВ бал зерна відповідає № 5-6 (рис. 10, а), в основному металі – № 7-8. Встановлено, що структура напавленого металу з застосуванням механічного керуючого впливу на електрод з $f = 40\div 80$ Гц рівномірна та більш дисперсна: в зоні ЗТВ бал зерна відповідає №7 (рис. 10, б), в основному – № 8-9. Також встановлено зниження глибини ЗТВ в середньому на 10-15%.

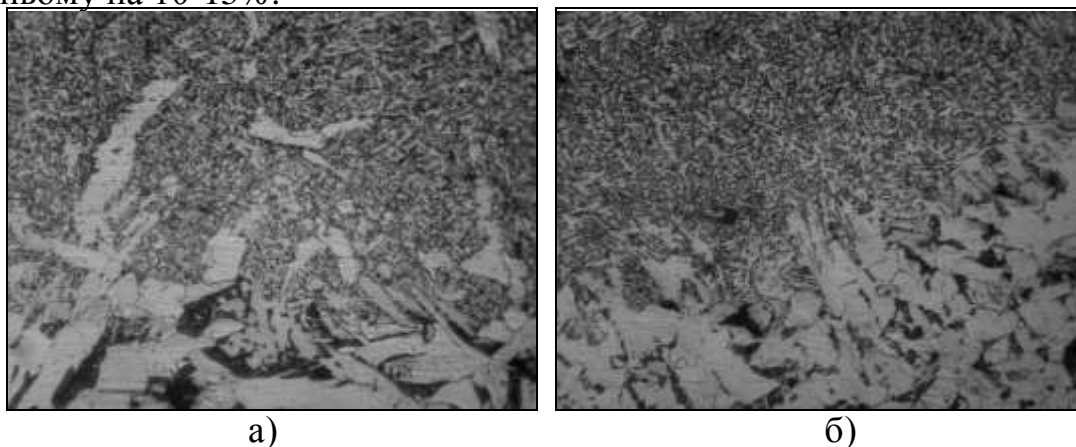


Рис. 10. Мікроструктура зразків НШЗ сталі ВСт3пс з наплавленим металом ЛН-30ХГСА: а – без механічного впливу; б – $f = 60$ Гц ($\times 140$)

При напавленні аустенітного шару на ферито-перлітні сталі, властивості навколошовної зони, поряд зі стійкістю поверхневого шару чинити опір корозії, багато в чому визначають працездатність і довговічність напавленого виробу. Проведені дослідження структури напавленого шару ЛН-12Х18Н10Т на сталь ВСт3пс підтвердило позитивний вплив механічних керуючих дій на мікроструктуру аустенітного шару (рис. 11).

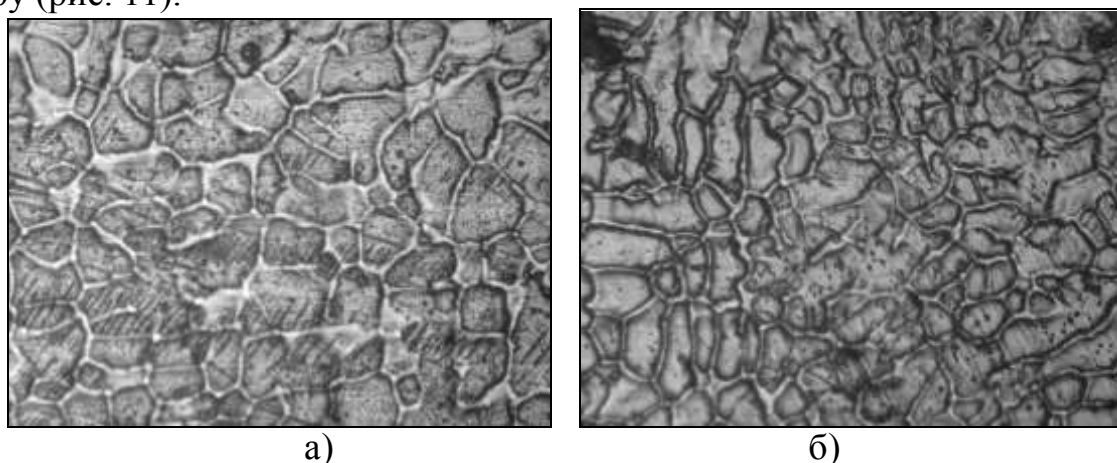


Рис. 11. Мікроструктура зразків напавленого шару ЛН-12Х18Н10Т на сталь ВСт3пс: а – без механічного впливу; б – $f = 60$ Гц ($\times 140$)

Дослідження механічних властивостей НШЗ виконували після одно- і двошарового напавлення для різних ділянок, що дозволило порівняти ударну в'язкість, міцність і пластичні характеристики металу цих ділянок.

Зразки вирізали після травлення, що дозволило з'ясувати положення лінії сплавлення. Ударну в'язкість визначали на зразках Шарпі по ГОСТ 9454-78. Для виготовлення зразків наплавлений шар нарощували електродним дротом 12X18Н10Т діаметром 2 мм для обмеження впливу тепловкладання на метал НШЗ. Надріз робили зі сторони основного металу.

Діаметр робочої частини зразків для розтягування становив 3 мм, при цьому вісь зразка у своєму розпорядженні в $2,0 \div 2,5$ мм від лінії сплавлення основного металу з наплавом, що дозволило отримати зразки з найменшими значеннями пластичності.

Результати випробувань зразків одношарового наплавлення аустенітним шаром на сталь 09Г2С показали, що пластичні властивості НШЗ досягають найбільшого значення в діапазоні частот механічного впливу $40 \div 80$ Гц, який характеризується низьким рівнем тепловкладання в основний метал. При цьому міцнісні характеристики незначно знижуються в порівнянні з рештою зразків. Ударна в'язкість металу НШЗ змінюється незначно з підвищенням частоти механічних дій. Одношарове наплавлення стрічковим електродом при 60 Гц забезпечує відносно найкраще поєднання

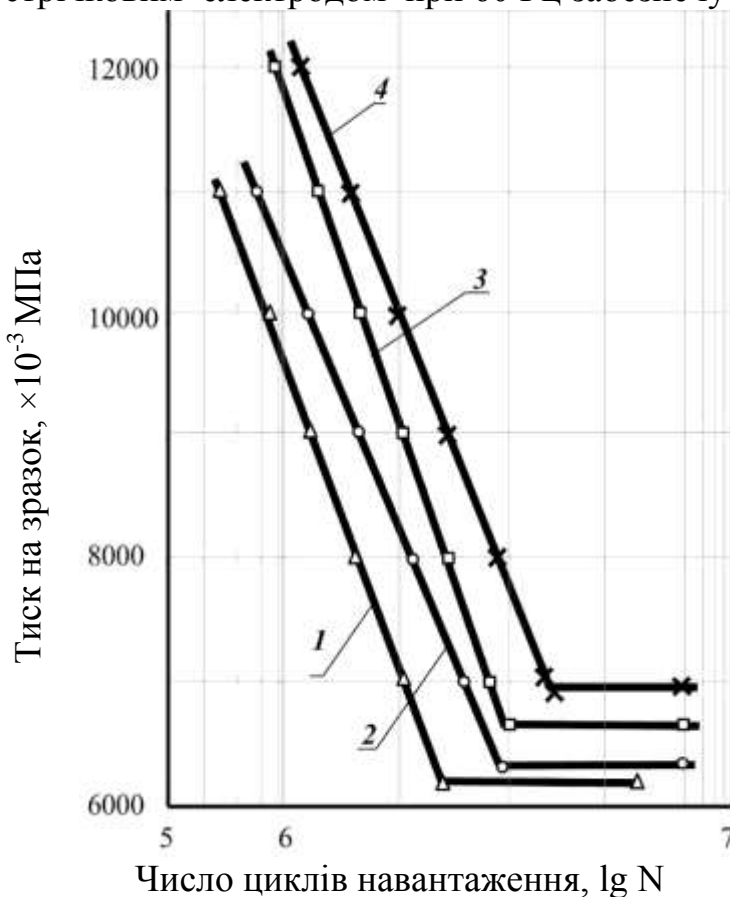


Рис. 12. Результати випробувань на контактну витривалість: 1, 2 - дротяний електрод, \varnothing 2 мм та стрічковий, $40 \times 1,0$ мм електроди $f=0$ Гц; 3, 4 - те ж, $f=20,70$ Гц

до появи дефектів поверхні.

міцності і пластичних властивостей металу НШЗ при досить високих значеннях ударної в'язкості. Механічні властивості НШЗ при двошаровому напавленні стали трохи нижче, проте характер їх зміни в залежності від частоти механічних керуючих дій однаковий.

На рис. 12 наведені результати випробувань на контактну втому робочого шару при використанні дротяного і стрічкового електродів без та з використанням механічного керуючого впливу на електрод.

Встановлено, що використання механічних дій для управління перенесенням електродного металу призводять до збільшення кількості циклів випробувань

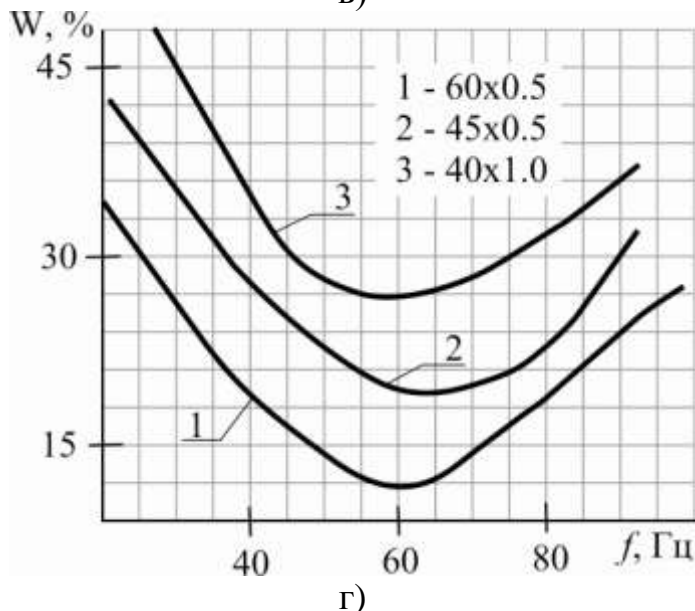
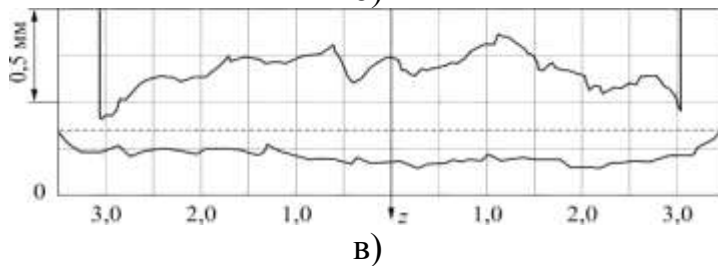
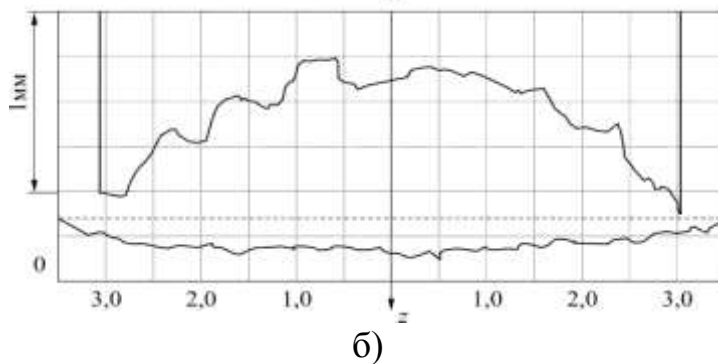
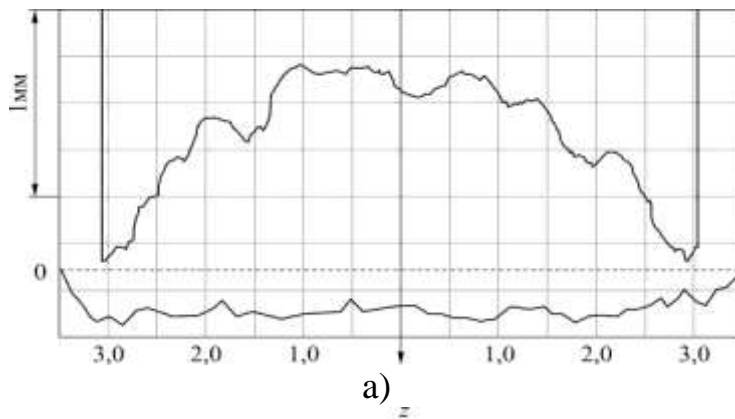


Рис. 13. Профілограми стрічок та лінії сплавлення в залежності від частоти коливань стрічкового електрода: а) 0 Гц, б) 20 Гц, в) 70 Гц; г) залежність коефіцієнта варіації W від частоти коливань стрічкового електрода.

Використання стрічкового електрода в цьому випадку дозволяє отримати більший ефект контактної витривалості завдяки мінімальній зоні термічного впливу і мінімальним напруженням в поверхневому шарі. Зразки для випробувань на контактну втому були наплавлені дровим і стрічковим електродами зі сталі 24Х3ГСМФ з метою отримання хімічного складу робочого шару, відповідного матеріалу, що наплавляється на валки та ролики прокатних станів. Таким чином, встановлено, що при використанні механічного керуючого впливу на електрод за рахунок керування тепломасопереносом в зварювальну ванну здійснюється стабілізація процесу розплавлення стрічки і основного металу, що забезпечує підвищення стабільності глибини проплавлення по ширині наплавленого валика, забезпечує енергозбереження за рахунок наплавлення на знижених режимах і зниження витрат на механічну обробку наплавленої поверхні.

В четвертому розділі представлено вдосконалення технологічних основ електродугового наплавлення із застосуванням механічного керуючого впливу на електрод.

Дослідження проводилися для визначення умов якісного формування наплавленого шару та зони проплавлення при використанні механічних дій на електрод (рис. 13). Наплавлення проводилася на пластинах зі сталі Ст3 зі стрічковими електродами зі сталі 08кп з поперечним перерізом $40 \times 1,0$ мм під флюсом АН-60. У режимі наплавлення, струм $I = 650 \div 750$ А, напруга $U = 30 \div 32$ В, швидкість наплавлення $V = 2,8 \cdot 10^{-3}$ м/с, на зворотній полярності. Перехідна зона і стабільність глибини проплавлення були досліджені на макроструктурах, було оцінено якість зовнішнього формування валика наплавленого шару при різних параметрах механічних керуючих дій.

При наплавленні стрічковим металокерамічним електродом особливі вимоги пред'являються до обладнання, що забезпечує стабільний процес наплавлення. Це пов'язано з обмеженням діапазону допустимих режимів механічного впливу на металокерамічний стрічковий електрод. Застосування запропонованого обладнання дозволить розширити можливості забезпечення механічних дій на електрод, використовуючи стрічкові електроди товщиною до 0,5 мм, а також крихкі металокерамічні стрічки.

В залежності від конструкції пристрою подачі, механічні імпульси можуть передаватися на електрод різними способами. При використанні стрічкових електродів, на відміну від дротяного електроду, імпульсна подача стрічки здійснюється виключно шляхом вигину стрічки і впливу на неї механічних дій. В цьому випадку стрічковий електрод повинен володіти певними механічними властивостями: пружністю і жорсткістю. Жорсткість не повинна перешкоджати необхідному вигину стрічки і дозволяти подавати електрод через напрямні до зварювальної ванни без додаткових пристроїв, при цьому його пружні властивості повинні забезпечувати повернення в початкове положення.

Різні комбінації ширини і товщини стрічки, зміни профілю, а також комбінації декількох електродів, можуть істотно вплинути на можливості відомих пристроїв для механічного впливу на електрод. Ті ж проблеми виникають при використанні тонких і металокерамічних стрічок: перші легко деформуються, а другі дуже крихкі. Тому необхідною є розробка обладнання, що забезпечує механічні дії при електродуговому наплавленні в умовах використання стрічкових електродів зі зниженими пружними властивостями.

Експериментальні дослідження проводилися з допомогою розробленого пристрою приставкою для наплавлення під флюсом двома стрічковими електродами із застосуванням механічного керуючого впливу на електрод. Частота механічних впливів на електрод f змінювалася за рахунок управління приводом обертання механізму керуючих дій. Як джерело зварювального струму використовували випрямляч ВДУ-1600. Виліт стрічкових електродів склав 60 мм.

На рис. 14. показано вплив частоти механічних дій на зміну глибини проплавлення h_{np} , товщини g наплавленого шару та долю участі основного

металу в наплавленому γ . При постійних значеннях зварювального струму, напруги на дузі та ширини стрічки, з застосуванням оптимального діапазону механічних дій на електрод $f=40\div 80$ Гц, зменшується глибина проплавлення h_{np} основного металу та доля участі основного металу в наплавленому, а висота наплавленого шару залишається незмінною.

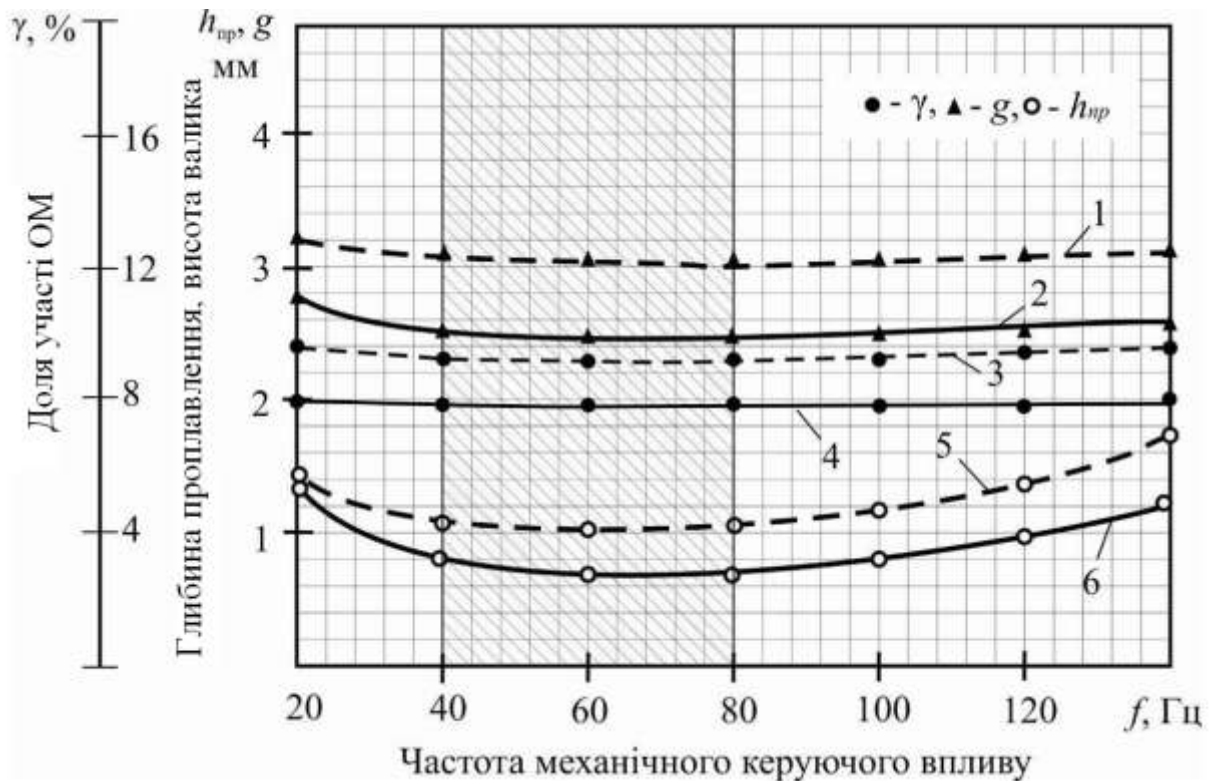


Рис. 14. Залежність геометричних характеристик наплавленого шару від частоти механічних дій на електрод перерізом $40 \times 1,0$ мм, $I=720\div 870$ А, $U=36\div 40$ В, $V_n=10\div 15$ м/год: 2, 4, 6 – ЛН-12Х18Н10Т; 1, 3, 5 – ЛН-08кп; 1, 2 – висота наплавленого шару; 3, 4 – доля участі основного металу в наплавленому; 5, 6 – глибина проплавлення

При обмеженій потужності джерела найбільша продуктивність процесу наплавлення досягається при наплавленні із застосуванням частот механічного впливу $f=40\div 80$ Гц.

Розроблене обладнання для наплавлення двома стрічковими електродами дозволяє збільшити діапазон регулювання параметрів механічних керуючих дій на електрод і запобігти деформуванню стрічкових електродів.

Дослідження запропонованого обладнання показали, що з його допомогою можна істотно обмежити кут нахилу стрічкового електрода при використанні механічного керуючого впливу в широкому діапазоні частот механічних дій на електрод.

На рис. 15 показана зміна коефіцієнту наплавлення α_n та номінальної продуктивності процесу наплавлення q_n від частоти механічного впливу на електрод.

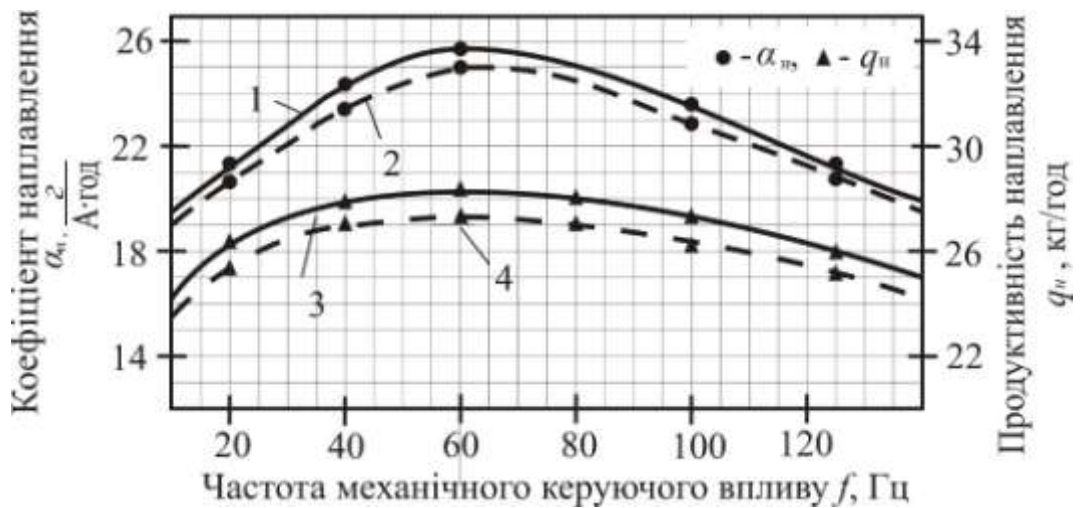


Рис. 15. Зміна коефіцієнту α_n та продуктивності q_n наплавлення: 2, 4 – ЛН-08кп; 1, 3 – ЛН-12Х18Н10Т.

При розрахунку параметрів обладнання, що забезпечує механічний вплив на електрод враховувалася умова обмеження прогинів стрічкових електродів під впливом механічних дій для запобігання деформування стрічок.

Залежність переміщення торця для другого стрічкового електрода $A'(t)$ описується синусоїдальною залежністю, але початковий момент часу зрушить на половину періоду (рис. 16).

В разі несиметричного розташування стрічкових електродів щодо центру валу, графіки переміщення будуть відрізнятися і за амплітудою. Оскільки зворотно-поступовий рух торців накладається на рівномірний рух подачі електродів у ванну, це дозволяє зберегти технологічні параметри процесу

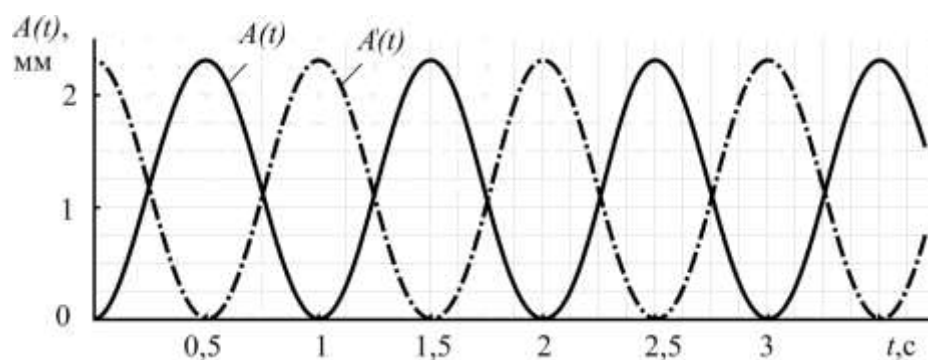


Рис. 16. Залежність переміщення торців стрічкових електродів

наплавлення і розміри наплавленого шару при можливості зменшення витрат електродного металу на втрати і перегрів, та, відповідно, енергії, що витрачається на плавлення (рис. 17). Це пояснюється тим, що в процесі плавлення електродного металу при накладенні механічних дій відбувається рівномірне оплавлення торців стрічкових електродів за рахунок забезпечення

рівномірного розподілу теплової енергії по ширині стрічок і контрольований скид крапель рідкого металу.

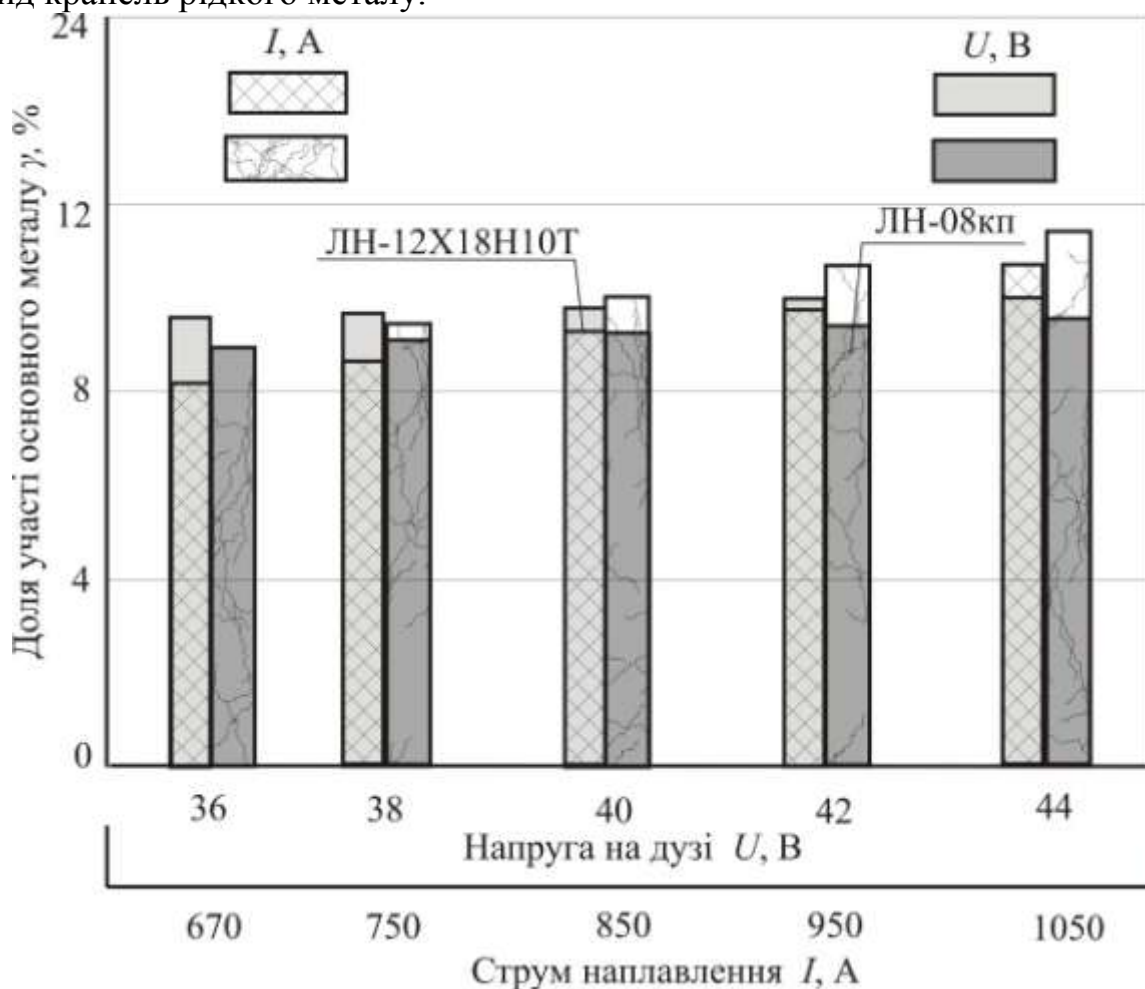


Рис. 17. Залежність долі участі основного металу в наплавленому від напруги на дузі та струму наплавлення при частоті механічних впливів 70 Гц

Використання даної технології дозволяє підвищити якість наплавленого шару. Додаткові можливості з управління глибиною проплавлення створює використання механічного управління перенесенням електродного металу. Застосування механічних керуючих дій для скидання крапель в зварювальну ванну зменшує їх перегрів. При цьому величина інерційної сили залежить від декількох параметрів. Амплітуда коливань торців стрічкових електродів пов'язана з величиною параметрів механічних дій на електрод і відстанню між стрічковими електродами, а також масою крапель електродного металу, величина яких визначається частотою обертання ексцентрика. Дослідження проводилися в діапазоні частот коливань стрічок $f = 40 \div 100$ Гц, визначених раніше як значущих для управління перенесенням електродного металу. Це забезпечує оптимальні розміри наплавленого шару при можливості зменшення витрат електродного металу на втрати і перегрів, відповідно, енергії, що витрачається на плавлення, і забезпечити ресурсозбережну технологію наплавлення.

Представлене обладнання дозволяє оптимізувати параметри механічного керуючого впливу на електрод і запобігти деформуванню

стрічкових електродів, забезпечити почерговий зворотно-поступальний рух торців стрічкових електродів з оптимальними частотою і амплітудою.

Досліджено процес нанесення антикорозійного аустенітного шару двома стрічковими електродами. Встановлено, що електродугове наплавлення з використанням двох стрічкових електродів дозволяє забезпечити високоякісний наплавлений шар за меншу кількість проходів і витрат енергії на кілограм наплавленого металу.

В процесі наплавлення двома стрічковими електродами, навіть при використанні флюсів, рекомендованих для зварювання, частково протікає струм електрошлаковий, і певна частка струму шунтується розплавленим шлаком.

Це сприяє зниженню глибини проплавлення і зменшення частки участі основного металу в наплавленому, що дозволяє отримати наплавлений метал необхідного хімічного складу вже в 1-му або 2-му шарі, на відміну від одноелектродного наплавлення, де необхідно наносити від 3-х до 5-и шарів. Результати досліджень впливу частоти коливань стрічкових електродів показали, що максимальне збільшення коефіцієнта розплавлення (рис. 18) відбувається при використанні частоти коливань в інтервалі $40 \div 100$ Гц незалежно від інших параметрів режиму (I_n , U_d , V_n).

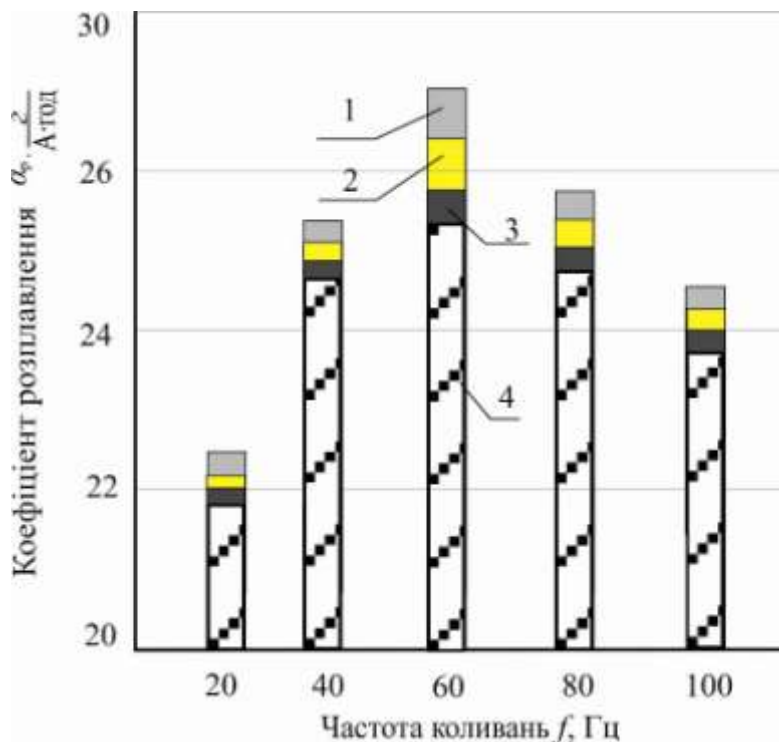


Рис. 18. Вплив частоти коливань на коефіцієнт розплавлення стрічкових електродів: 1 – $I=1300$ А, $U=34$ В; 2 – $I=1200$ А, $U=32$ В; 3 – $I=1000$ А, $U=30$ В; 4 – $I=900$ А, $U=28$ В, перерізом $45 \times 1,0$ мм.

Додаткові можливості для зменшення ймовірності утворення дефектів забезпечуються за рахунок використання керуючого механічного впливу при наплавленні стрічковими електродами за рахунок зменшення тепла, що підводиться до зварювальних та шлакових ванн і зменшення їх текучості.

При використанні керуючих механічних дій на електрод з однократним впливом на кожен стрічку при подачі двох стрічкових електродів, перший і другий електроди відчують різні

значення навантаження через особливості механізму подачі. У разі запропонованого обладнання для тонких і крихких смуг можлива деформація і змінання електродів при наплавленні.

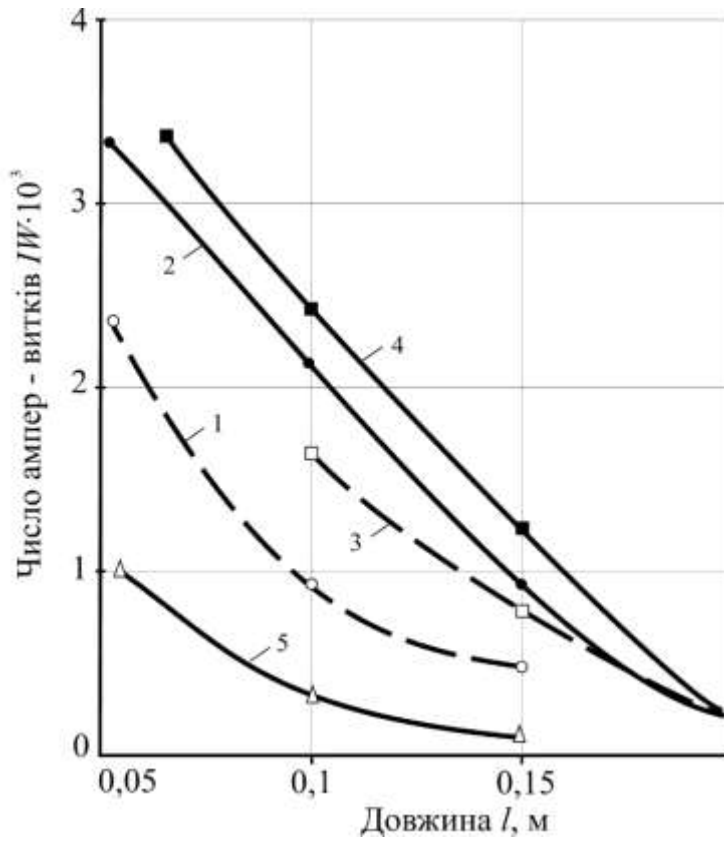


Рис. 19. Залежність числа ампер – витків від довжини $l(8 \cdot 10^{-4}) \text{ м}^2$: 1, 2, 5 – стрічка $40 \times 0,5$ мм; 3, 4 – стрічка $40 \times 1,0$ мм; 1, 3 – $f=3$ мм; 2, 4 – $f=6$ мм; 5 – $f=1,0$ мм

зони проплавлення.

Розроблено спосіб управління краплеперенесенням при дуговому наплавленні стрічковим електродом з використанням синусоїдальних імпульсів струму в котушці соленоїда частотою 70 Гц. За наявності фероосердя в котушці значення індукції B_z збільшується приблизно в n раз.

Якщо врахувати, що в конструкції прис-трою значення $l=0,05 \div 0,1$ м, то для стрічки $40 \times 0,5$ мм реальне значення $IW \approx (1,1 \div 0,5) \cdot 10^3$, якщо прогин стрічки $f=1,0$ мм. Якщо прогин стрічки $f=(1 \div 3) \cdot 10^{-3}$ м, то $IW \approx (1,1 \div 3,0) \cdot 10^3$. Тобто, для стрічки $40 \times 0,5$ мм можна прийняти за можливе значення $IW=3000$ (рис. 19). Для стрічки $40 \times 0,5$ мм підходить значення $IW=4000$, якщо довжина ділянки $l \leq 0,1$ м (рис. 19). В даному дослідженні прийнято значення $IW=3000$, $l=(0,05 \div 0,1)$ м, $f=(1 \div 3) \cdot 10^{-3}$ м. Запропонований спосіб вигину стрічки за допомогою електромагніту забезпечив синусоїдальне переміщення торця стрічки з частотою механічних керуючих дій 70 Гц. Визначено, що при вигині на довжині стрічки $5 \div 15$ мм та прогинах, необхідна кількість ампервитків в котушці соленоїду складає $W=3000$ для забезпечення заданої

Для зменшення згинального моменту і тертя в струмопідводі рекомендується модернізувати обладнання для подачі стрічкового електроду. Тому розроблене обладнання для подачі при наплавленні двома стрічковими електродами із застосуванням механічних керуючих дій, що дозволило змінювати співвідношення швидкостей подачі першої і другої стрічок завдяки наявності набору змінних зубчастих колі з різними передавальними числами. Це дало можливість контролювати гідродинамічну ситуацію в зварювальній ванні і змінювати параметри

амплітуди переміщення стрічки. Проведено дослідження впливу величини амплітуди переміщення електроду на параметри перенесення.

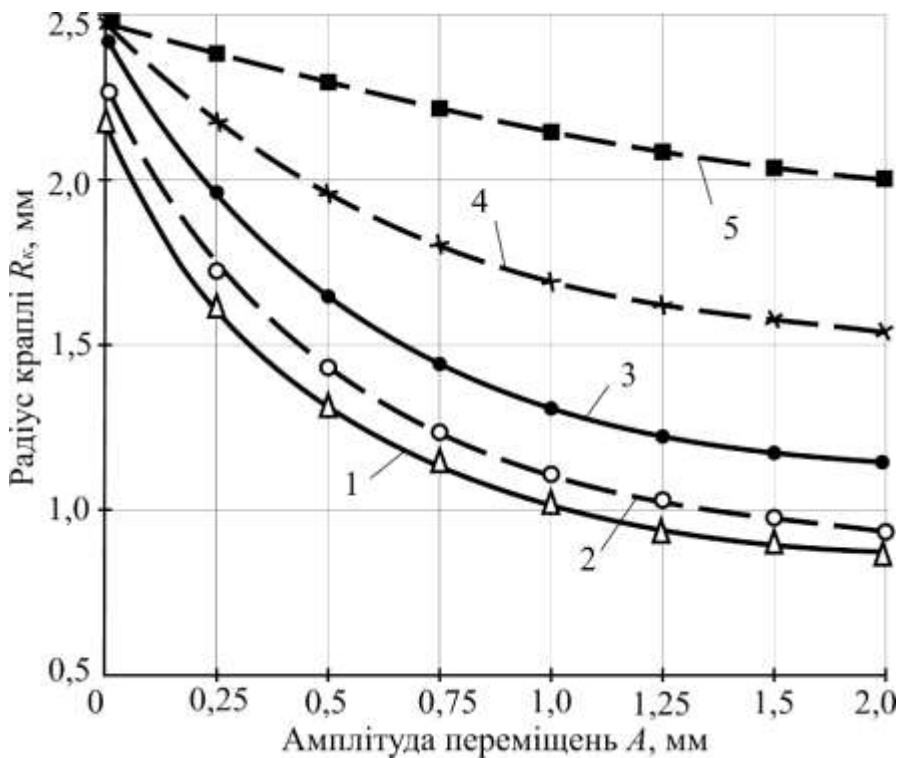


Рис. 20. Залежність радіусу краплі від амплітуди переміщення електродної стрічки: 1 – 80 Гц; 2 – 70 Гц; 3 – 55 Гц; 4 – 40 Гц; 5 – 10 Гц

Отримані дані на (рис. 20) показали, що при зміні параметра A в досліджуваній області значень при частоті дій на електрод 10 Гц, радіус краплі практично не змінюється. При частоті механічних впливів 40÷80 Гц досягається максимальне зменшення радіусу електродних крапель від $2,5 \cdot 10^{-3}$ м до $0,8 \cdot 10^{-3}$ м (при $A=2,0 \cdot 10^{-3}$ м). Таким чином для ефективного зменшення розмірів крапель електродного металу при наплавленні з застосуванням механічного керуючого впливу, оптимальними параметри є частота механічних дій на електрод 40÷80 Гц з амплітудою переміщення торця електроду $(1,0 \div 2,0) \cdot 10^{-3}$ м.

В п'ятому розділі представлено дослідно-промислове впровадження результатів проведених досліджень. Були апробовані при відновленні металургійного та прокатного обладнання, зокрема для відновлення станових роликів стрічковим електродом під шаром флюсу, опори підшипникових вузлів стрічковим електродом під шаром флюсу та сфер клапану доменної печі дротяним електродом в середовищі інертного газу. При мікродослідженні наплавленого металу було встановлено, що до травлення в основному металі проби відзначаються неметалеві включення типу сульфідів 2,5 бали по ДСТУ 8966. Після травлення (рис. 21, а,б) мікроструктура: основного металу – аустеніт та δ -ферит (кількість якого збільшується до лінії сплавлення), наплавленого шару – лита, стовбчата. Лінія сплавлення – бездефектна.

Здійснено розрахунок значень радіусу електродних крапель R_k з урахуванням діючих сил поверхневого натягіння, сили тяжіння та інерційної сили, що виникає при механічному впливі, від амплітуди переміщення торця електроду A в межах $A=0,25 \div 2,0$ мм, для значень механічних дій на електрод 10÷80

Для проведення металографічного дослідження і розподілу хімічних елементів по висоті наплавленого шару проведено дослідне наплавлення



Рис. 21. Мікроструктура зразків з наплавленим металом: а – наплавлений шар; б – зона сплавлення ($\times 100$)

дротом X39CrMo17-1-Nr1.4122 на сталь 12X18H19T. Для хімічного аналізу наплавленого металу використовували спектрографічний метод, результати якого наведені в таблиці.

Таблиця

Результати хімічного аналізу наплавленого шару

Найменування матеріалу	Масова частка елементів, %								
	<i>C</i>	<i>Mn</i>	<i>Si</i>	<i>S</i>	<i>P</i>	<i>Cr</i>	<i>Ni</i>	<i>Cu</i>	<i>Mo</i>
Наплавлений метал	0,36	0,74	0,44	0,002	0,023	16,1	0,38	0,08	0,92

Твердість проби заміряли на мікротвердомірі «AFFRI» при навантаженні 500 г (з перекладом в HRC по ASTM E140). Результати виміру твердості наступні: основний метал – 199-209 HV; ЗТВ – 348,6-424,9 HV (35,4-43,1 HRC); наплавлений шар – 514,1-526,3 HV (50-50,8 HRC).

За допомогою обладнання, розробленого і сконструйованого в ході виконання даної дисертаційної роботи, були проведені дослідження способу наплавлення під флюсом стрічковим електродом із застосуванням механічного керуючого впливу на електрод. В якості приводу механізму накладання імпульсів використовувався двигун з частотою обертання вала двигуна до 5000 об/хв. Механізм накладання імпульсів забезпечує частоту проходження імпульсів 10÷90 Гц з можливістю регулювання амплітуди коливань торця стрічкового електрода до 3,2 мм.

За об'єкт впровадження розробленої технології та обладнання був обраний становий ролик. Наплавлення роликів проводилося в умовах ТОВ «Маріупольтехнострой» (м. Маріуполь). За рахунок використання запропонованої технології наплавлення стрічковим електродом із

застосуванням механічних дій на електрод, знизилася питома витрата енергії на розплавлення стрічкового електроду на 18% і підвищилася продуктивність наплавлення на 15% в порівнянні з наплавленням без використання механічного управління тепломасопереносом. Результати виконаних робіт і отримані на їх основі рекомендації щодо технологічних заходів підтверджені актом впровадження ТОВ «Маріупольтехнострой» з економічним ефектом в розмірі 782,6 тис. грн.

В умовах ТОВ НВО «Укрспецзварювання» (м. Маріуполь) в якості об'єкта впровадження розробленої технології та обладнання була обрана опора підшипникового вузла прокатного валка. При цьому було досягнуто добре формування наплавлених валиків, стабільність процесу, забезпечено відсутність появи дефектів наплавленого шару, продуктивність процесу наплавлення збільшилася на 20%, собівартість продукції знизилася на 20÷25% за рахунок зменшення робіт механічної обробки після наплавлення ресурсозберігаючою технологією із застосуванням механічного впливу на електрод. Результати виконаних робіт і отримані на їх основі рекомендації підтверджені актом впровадження ТОВ НВО «Укрспецзварювання» з економічним ефектом за підсумками впровадження протягом двох років в розмірі 1,288 млн. грн.

Також з використанням розробленої технології електродугового наплавлення із застосуванням керуючих механічних впливів проведено відновлення партії сфер клапана доменної печі. Для наплавлення сфери клапана використовувався дріт MIG 4122 по DIN EN 14700: T Fe 7-50-CT діаметром 1,2 мм в середовищі суміші захисних газів 90% Ar + 10% CO₂ з застосуванням механічного впливу на електрод. В процесі наплавлення використовували накладення синусоїдальних коливань на подачу електродного дроту з частотою 60÷70 Гц. При використанні було встановлено, що наплавлений робочий шар характеризується стабільним формуванням та зниженням кількості дефектів формування наплавлених валиків. Дефекти, пов'язані з міжваликовими зонами, такі, як пори та шлакові включення, також не виявлені. Металографічні дослідження мікроструктури та вимір твердості отриманих зразків виконувались в умовах ПАТ «МК «Азовсталь» твердоміром універсальним NOVOTEST T-УДЗ, виробництва HARDNESS TESTER. Твердість наплавленого шару становить 46 ÷ 50 HRC.

Результати виконаних робіт і отримані на їх основі рекомендації відновлення сфер клапана доменної печі підтверджені актом впровадження ТОВ НВО «Укрспецзварювання» з економічним ефектом за підсумками впровадження протягом одного року в розмірі 237,8 тис. грн.

Загальний економічний ефект від впроваджень склав 2,3084 млн. грн.

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі наведено теоретичне узагальнення і нове вирішення актуальної науково-технічної проблеми підвищення ефективності електродугового наплавлення за рахунок застосування механічного керуючого впливу на тепломасоперенос, що дозволить знизити ресурсоемність технології, підвищити якість наплавленого шару металургійного та прокатного обладнання.

За результатами роботи зроблено наступні висновки:

1. Вперше проведено узагальнення особливостей впливу механічних керуючих дій при використанні різних типів електродних матеріалів на характеристики процесу наплавлення та властивості наплавленого шару та отримали подальший розвиток основи тепломасопереносу електродного металу для випадку застосування механічного керуючого впливу.

2. Вперше встановлено на основі виконаних досліджень основні закономірності процесу розплавлення стрічкового електрода з використанням керуючих механічних дій. Визначено вплив кінематичних параметрів розроблених пристроїв на характеристики процесу плавлення основного і електродного металу, що дозволило підвищити продуктивність процесу і досягти ресурсо- та енергозберігаючої технології наплавлення за рахунок використання керуючих механічних дій.

3. Встановлено оптимальний діапазон частоти коливань торця стрічкового електрода $40 \div 80$ Гц, в якому середній діаметр крапель зменшується до $1,3 \div 1,5$ мм, а маса до $0,08 \div 0,1$ г. Розроблена математична модель осциляції крапель електродного металу на торці стрічкового електрода на основі удосконаленої методики осцилографування процесу наплавлення при наплавленні з управлінням тепломасопереносом, яке враховує зміну силового балансу на торці стрічкового електрода, що дозволяє розрахунковим методом визначати параметри режиму, які забезпечують дрібнокрапельне перенесення крапель електродного металу як через дугу, так і поза неї без коротких замикань дугового проміжку.

4. На основі математичного моделювання тепломасоперенесення електродного металу розроблена методика розрахунку параметрів керованого перенесення при наплавленні стрічковим електродом, що дозволило визначити оптимальні параметри процесу наплавлення і забезпечити зниження енергоспоживання до $10 \div 15\%$ для однієї стрічки і $15 \div 18\%$ для двох стрічок і якісне формування наплавленого шару.

5. Запропоновано новий підхід для підвищення властивостей навколошовної зони при наплавленні стрічковими електродами, який відрізняється застосуванням механічного управління скиданням крапель електродного металу і зменшенням перегріву кратерної частини зварювальної ванни без зниження продуктивності процесу, на основі досліджень впливу параметрів перенесення при наплавленні стрічками з низьким вмістом вуглецю, середньовуглецевими, середньолегованими та

стрічками з аустенітною структурою на формування зони проплавлення і структуру наплавленого шару.

6. Накладення поздовжніх синусоїдальних коливань на торець стрічкового електроду дозволяє знизити рівень тепловкладання в навколошовну зону за рахунок підвищення ефективності розплавлення основного металу. При досліджуваній частоті 40÷80 Гц тривалість перебування точкового джерела на границі лінії сплавляння і нижче її в інтервалі 900÷1100 °С менше, ніж при наплавленні без контрольованого механічного перенесення. Зниження тепловкладання в навколошовну зону в інтервалі температур 900÷1100 °С забезпечує подрібнення зерна структури НШЗ.

7. Вперше встановлено, що при наплавленні з застосуванням механічних керуючих дій форма та розмір електроду визначають оптимальний діапазон параметрів керуючого впливу. Встановлено, що: для дротяного електроду діаметром 1,2 мм він складає 20÷70 Гц в залежності від матеріалу, для стрічкового електроду – 40÷80 Гц; для двох стрічкових електродів – 40 ÷100 Гц, відповідно; при частоті коливань 40÷65 Гц в діапазоні розмірів стрічок шириною 30÷60 мм і товщиною 0,5÷1,0 мм забезпечується дрібнокрапельне перенесення; при частоті для дротяного електроду діаметром 2 мм 50 Гц середній розмір крапель становить $R = 1,4$ мм при коефіцієнті варіації $W=18÷22$ %; забезпечується рівномірне формування наплавленого валика, стабільне проплавлення основного металу. На основі аналізу макро- та мікроструктури встановлено сприятливий вплив механічних керуючих дій на подрібнення балу зерна до № 7-8 і зниження інтервалу розподілу мікротвердості по глибині наплавленого металу на 40 % при використанні стрічкових електродів ЛН-08кп і ЛН-12Х18Н10Т до 20%.

8. Розроблено технологію й устаткування для електродугового наплавлення з розширеним набором керуючих параметрів і забезпечена можливість реалізації технологічного процесу наплавлення стрічковими електродами, що володіє перевагами електрошлакового способу при веденні електродугового процесу на основі використання результатів математичного моделювання тепло- і масоперенесення при наплавленні стрічковими електродами.

9. Результати досліджень використані при розробці технології й устаткування для наплавлення двома стрічковими електродами з розширеним набором керуючих механічних дій на стрічки, за рахунок чого досягнуто підвищення на 30÷35% продуктивності процесу, а також розширена номенклатура використовуваних матеріалів при наплавленні з керованим тепломасоперенесенням.

10. Вперше встановлено, що на відміну від використання керуючих впливів за рахунок зміни енергетичних параметрів дуги, в яких необхідний ефект досягається за допомогою закону зміни потужності основного та (чи) додаткового джерела, складні частки системи «торець електроду – дуга – зварювальна ванна» знаходяться в синергетичній взаємодії, визначаючи екстремальний характер впливу керуючих параметрів на характер

перенесення. Для кожного варіанту використання механічних коливань для управління процесом наплавлення існує оптимальна область, що дозволяє забезпечити максимальне зниження матеріальних та енерго- витрат на одиницю довжини наплавленого валику при збереженні необхідних технологічних параметрів.

11. Розроблені технології та обладнання успішно апробовані та впроваджені у виробництво при наплавленні металургійного та прокатного обладнання, зокрема при наплавленні станових роликів в умовах ТОВ «Маріупольтехнострой», при наплавленні опор підшипникових вузлів прокатних валків та сфер клапанів доменної печі в умовах ТОВ НВО «Укрспецзварювання», що дозволило отримати загальний економічний ефект в розмірі 2,3084 млн. грн.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ РОБІТ

Публікації, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації

1. Razmyshlyayev A.D. About Rational Using of the Controlling Longitudinal and Transverse Magnetic Fields at arc Welding and Surfacing / A. D. Razmyshlyayev, M.V. Ahieieva, E. V. Lavrova // IOP Conference Series : Materials Science and Engineering. – 2019. – Vol. 582, N 1. – 012054.– P. [1–6]. doi:10.1088/1757-899X/582/1/012054 (**Scopus**).
2. Ivanov V. Electric Arc Deposition of an Anticorrosive Layer with Two Strip Electrodes / V. Ivanov, N. Makarenko, E. Lavrova, M. Ahieieva // Trans Tech Publications Ltd. – 2020. – Vol. 303. – P. [39-46]. doi:10.4028/www.scientific.net/SSP.303.39 (**Scopus Q3**).
3. Piyaschenko D.P. Stability of MMA welding with protective coatings / D.P. Piyaschenko, D.A. Chinakhov, E.V. Verkhoturova, E. V. Lavrova // Structural integrity and life. – 2020, Switzerland. – Vol. 20, N 1. – P. [33-36]. (**Web of Science**).
4. Ivanov V. Calculation of the penetration zone geometric parameters at surfacing with a strip electrode / E. Lavrova, V. Burlaka // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2019. – N 6/5 (102). – С. 57–62. (**Scopus Q3**).
5. Burlaka, V. Improving energy characteristics of the welding power sources for TIG-AC welding / V. Burlaka, E. Lavrova // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2019. – N 5/5 (101). – С. 38–43. (**Scopus Q3**).
6. 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. Royanov and oth. // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2019. – № 1/12 (97). – P.28-34. (**Scopus Q3**).

- 7.Размышляев А. Д. Измельчение структуры металла при дуговой наплавке под воздействием продольного магнитного поля / А. Д. Размышляев, М. В. Агеева, Е. В. Лаврова // Автоматическая сварка. – 2019. – № 2. – С.25-
- 8.Lavrova E. Research of properties of the metal of the heat-affected zone for surfacing by stape electrode with the controlled transfer of the electrode metal / Elena Lavrova // Technology transfer. Fundamental principles and innovative technical solutions. Physical Sciences and Engineering, Tallinn, Estonia, 23 November. – 2019. – № 3. – P.80-82.
- 9.Лаврова О.В. Дослідження ресурсозберігаючої технології наплавлення двома срічковими електродами з керованим перенесенням електродного металу / О.В. Лаврова, В.П. Иванов, М.В. Кончаківський та ін. // Наука та виробництво: міжвуз. тем. зб. наук. пр. – № 21. – 2019. – С.44-50.
- 10.Размышляев А.Д. Оценка геометрических параметров зоны проплавления при электродуговой наплавке на основе кондуктивного теплопереноса / А.Д. Размышляев, В.П. Иванов, Е.В. Лаврова. // Наука та виробництво: міжвуз. тем. зб. наук. пр. – № 21. – 2019. – С.88-95.
- 11.Лаврова Е. В. Моделирование тепловых процессов при сварке и наплавке с управляемым переносом электродного металла / Е. В. Лаврова // Вісник державної Донбаської машинобудівної академії. – 2018. –№2(44). – С.59-63.
- 12.Razmyshlyayev A.D. TMF Influence on Weld Structure at the Welding of 12X18H9T / A. D. Razmyshlyayev, M.V. Ahieieva, E. V. Lavrova // Materials Science Forum. – 2018. –Vol. 927, – pp. 1-5. (**Scopus Q3**).
- 13.Razmyshlyayev A.D. Magnetic Properties of Materials Used in Electric Arc Welding and Surfacing / A. D. Razmyshlyayev, M.V. Ahieieva, E. V. Lavrova // Materials Science Forum. – 2018. – Vol. 938. – P. 33–40. (**Scopus Q3**).
- 14.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**).
- 15.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 Science Forum. – 2018. – P. 27-32. (**Scopus Q3**).
- 16.Burlaka V. Development of single-phase high power factor inverter power supplies for welding / V.Burlaka, E. Lavrova, S. Podnebennaya and oth. // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2017. – № 4/1 (88) 2017. – P.18-24. (**Scopus Q3**).
- 17.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.
- 18.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.
- 19.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.
- 20.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.
- 21.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 Q3**).
- 22.Лаврова Е.В. Разработка универсальной кинематической схемы устройства для наплавки под флюсом ленточным электродом с управляемым переносом электродного металла / Е.В. Лаврова // Вісник Чернігівського державного технологічного університету. – 2015. – № 1 (77). – С. 71-75
- 23.Лаврова Е.В. Исследование процесса расплавления ленточного электрода с принудительным переносом электродного металла / Е.В. Лаврова // Вісник Чернігівського державного технологічного університету. – 2015. – № 2(2). – С. 62-67.
- 24.Лаврова Е.В. Анализ сил, действующих на каплю электродного металла при наплавке под флюсом ленточным электродом с управляемым переносом электродного металла / Е.В. Лаврова // Вісник Донбаської державної машинобудівної академії. - 2014. - № 1. - С. 204-209.
- 25.Лаврова Е.В. Разработка устройства для наплавки под флюсом ленточным электродом с управляемым переносом электродного металла / Е.В. Лаврова // Вісник Чернігівського державного технологічного університету. – 2014. – № 1 (71), 2014. – С. 164-167
- 26.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. Серія: Технічні науки: зб. наук. пр. – Маріуполь: ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», 2012. – №. 25 – С. 124-131.
- 27.Ivanov V.P. Modeling of the weld pool formation during surfacing with strip electrode / V.P. Ivanov, E.V. Lavrova // Problemes et perspectives d'introduction de la recherche scientifique innovante. Sciences techniques et ti. – 2019, Bruxelles, Belgique – V.2. – P. 80-82. DOI 10.36074/29.11.2019.v2.09

- 28.Lavrova E.V. Development of a Device for Arc welding with Controlled Mechanical Transfer Using a Metal-Ceramic Strip Electrode / E.V. Lavrova, V.P. Ivanov // Integracion de las ciencias fundamentales y aplicadas en el paradigma de la sociedad post-industrial . – 2020, Barcelona, Espana – V.2. – P. 19-21. DOI 10.36074/24.04.2020.v2.06
- 29.Ivanov V.P. Peculiarities of electrode droplet transfer control during overlaying welding with a strip electrode / V.P. Ivanov, E.V. Lavrova // Tendenze attuali della moderna ricerca scientifica. – 2020, Stuttgart, Deutschland – b.3 – P.86-88. DOI 10.36074/05.06.2020.v3.35

Публікації, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації

30. 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.
- 31.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
- 32.Серенко В.А. Кинетика порообразования в сварном шве / В.А. Серенко, Е.В. Лаврова, В.П. Иванов // Научный вестник ДГМА.– 2015.– № 2. – С. 89-94.
- 33.Ivanov V. Investigation of the influence of the parameters of the mechanical vibrations of the strip electrode on the transfer process of the electrode metal during electric arc surfacing / V.P. Ivanov, E.V. Lavrova // Инженерия поверхности и реновация изделий: Материалы 20-й Международной научно-технической конференции, 01-05 июня 2020 г. – г.Киев: Ассоциация технологов-машиностроителей Украины, 2020. – С.35-37.
34. Lavrova E.V. Study of the influence of controlled electrode metal transfer during electric arc surfacing on the contact fatigue of the deposited layer / E.V. Lavrova, V.P. Ivanov // Наукове забезпечення технологічного прогресу ХХІ сторіччя. – 2020, м.Чернівці. – том 2. – Р. 34-36.
- 35.Determination of controlled transmission parameters by simulation of temperature distribution at the end of the tape electrode / Lavrova O.V. // Наука і металургія – 2019: Всеукраїнська науково-техн. конф., Інституту чорної металургії ім. З.І. Некрасова Національної академії наук України, м. Дніпро, 9-10 жовтня 2019 р. – м. Дніпро: ІЧМ ім. З.І. Некрасова Національної академії наук України, 2019. – Р.15-16.
- 36.Исследование производительности процесса наплавки двумя ленточными электродами с управляемым переносом электродного металла / Е.В. Лаврова, В.С. Кибиш // Всеукраїнська науково-практична конференція молодих учених, спеціалістів, аспірантів «Проблеми

- енергозбереження в промисловому регіоні. Наука і практика»: Зб. тез доповідей. Маріуполь, 19-21 листопада 2019 р., ДВНЗ «ПДТУ», 2019. – С.100-101.
37. Дослідження наплавлення двома стрічковими електродами зкерованим перенесенням електродного металу / О.В. Лаврова, В.С. Кібіш // Всеукраїнська науково-практична конференція молодих учених, спеціалістів, аспірантів «Проблеми енергозбереження в промисловому регіоні. Наука і практика»: Зб. тез доповідей. Маріуполь, 19-21 листопада 2019 р., ДВНЗ «ПДТУ», 2019. – С.107.
38. Вимоги до механічних властивостей з'єднань корпусних конструкцій / О.В. Лаврова, М.В. Комарова // Всеукраїнська науково-практична конференція молодих учених, спеціалістів, аспірантів «Проблеми енергозбереження в промисловому регіоні. Наука і практика»: Зб. тез доповідей. Маріуполь, 19-21 листопада 2019 р., ДВНЗ «ПДТУ», 2019. – С.101-102.
39. Розробка методів мінімізації дефектів при багато прохідному дводуговому зварюванні по вузькому зазору / О.В. Лаврова, О.Ю. Бобровський // Всеукраїнська науково-практична конференція молодих учених, спеціалістів, аспірантів «Проблеми енергозбереження в промисловому регіоні. Наука і практика»: Зб. тез доповідей. Маріуполь, 19-21 листопада 2019 р., ДВНЗ «ПДТУ», 2019. – С.103-104.
40. Совершенствование устройства для наплавки спеченой электродной лентой / Е.В. Лаврова, В.П. Иванов // 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.130-131.
41. Исследование влияния основных параметров режима наплавки на формирование шва при наплавке двумя ленточными электродами с контролируемым тепло-массопереносом / В.П. Иванов, Е.В. Лаврова, 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.129-130
42. Совершенствование схемы устройства для наплавки двумя ленточными электродами / В.П. Иванов, Е.В. Лаврова, 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
43. 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.

44. 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.
45. 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.
46. 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.
47. 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 63-64.
48. Лаврова Е.В. Розробка методів мінімізації дефектів при багато прохідному дводуговому зварюванні по вузькому зазору / Е.В. Лаврова, О.Ю. Бобровский // Проблеми енергозбереження в промисловому регіоні. Наука і практика: Всеукраїнська науково-практична конференція молодих учених, спеціалістів, аспірантів, ДВНЗ «ПДТУ», м.Маріуполь, 19-21 листопада 2019 р.- Маріуполь: ДВНЗ «ПДТУ», 2019. – С.103–104.
49. Лаврова Е.В. Дослідження впливу контрольованого перенесення электродного металу на властивості наплавленого шару при наплавленні стрічковим електродом / Е.В. Лаврова // Актуальні задачі сучасних технологій: Міжнар. наук.-техн. конф. молодих учених та студентів, ТНТУ, м.Тернопіль, 27–28 листоп. 2019 р. – Тернопіль: ТНТУ, 2019. – Т. 1. – С. 28.
50. Лаврова Е.В. Исследование производительности процесса наплавки двумя ленточными электродами с управляемым переносом электродного металла / Е.В. Лаврова, В.С. Кибиш // Проблеми енергозбереження в промисловому регіоні. Наука і практика: Всеукраїнська науково-практична конференція молодих учених, спеціалістів, аспірантів, ДВНЗ «ПДТУ», м.Маріуполь, 19-21 листопада 2019 р.- Маріуполь: ДВНЗ «ПДТУ», 2019. – С. 100–101.

51. Ivanov V.P. Modeling of the weld pool formation during surfacing with strip electrode / V.P. Ivanov, E.V. Lavrova // Problèmes et perspectives d'introduction de la recherche scientifique innovante : sur les matériaux de la conférence scientifique et pratique internationale. – 2019, Bruxelles, Belgique –Vol. 2. – P. 80–82.
52. Лаврова Е.В. Дослідження наплавлення двома стрічковими електродами з керованим перенесенням електродного металу / Е.В. Лаврова, В.С. Кибиш // Проблеми енергозбереження в промисловому регіоні. Наука і практика: Всеукраїнська науково-практична конференція молодих учених, спеціалістів, аспірантів, ДВНЗ «ПДТУ», м.Маріуполь, 19-21 листопада 2019 р.- Маріуполь: ДВНЗ «ПДТУ», 2019. – С. 107.

Публікації, які додатково відображають наукові результати дисертації

53. Дослідження властивостей наплавленого металу при наплавленні стрічковими електродами з керованим перенесенням електродного металу / О.В. Лаврова, В.П. Іванов // Університетська наука – 2020: Міжнародна науково-техн. конф., Приазовський державний технічний університет, м. Маріуполь, 20-21 травня 2020 р. - Маріуполь: ДВНЗ «ПДТУ», 2020. - Т. 2. – С. 127-128.
54. Визначення параметрів керованого перенесення шляхом моделювання розподілу температур на торці стрічкового електрода / О.В. Лаврова. // Наука і металургія – 2019: Всеукраїнська науково-техн. конф., Інституту чорної металургії ім. З.І. Некрасова Національної академії наук України, м. Дніпро, 9-10 жовтня 2019 р. – м. Дніпро: ІЧМ ім. З.І. Некрасова Національної академії наук України, 2019. – Р.16-17.
55. Лаврова Е.В. Исследование влияния основных параметров режима наплавки на формирование шва при наплавке двумя ленточными электродами с контролируемым тепло-, массопереносом / Е.В. Лаврова, В.П. Иванов., В.С. Кибиш // Університетська наука – 2019: Міжнародна науково-техн. конф., ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Маріуполь, 16–17 травня 2019 р. - Маріуполь: ДВНЗ «ПДТУ», 2019. - Т. 2. – С. 129–130.
56. 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.
57. 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.
58. Лаврова Е.В. Совершенствование устройства для наплавки спеченной электродной лентой / Е.В. Лаврова, В.П. Иванов // Університетська наука – 2019: Міжнародна науково-техн. конф., ДВНЗ «Приазовський

- державний технічний університет», м. Маріуполь, 16–17 травня 2019 р. - Маріуполь: ДВНЗ «ПДТУ», 2019. - Т. 2. – С. 130–131.
59. Лаврова Е.В. Вимоги до механічних властивостей з'єднань корпусних конструкцій / Е.В. Лаврова, М.В. Комарова // Проблеми енергозбереження в промисловому регіоні. Наука і практика: Всеукраїнська науково-практична конференція молодих учених, спеціалістів, аспірантів, ДВНЗ «ПДТУ», м.Маріуполь, 19-21 листопада 2019 р.- Маріуполь: ДВНЗ «ПДТУ», 2019. – С.101–103.
60. Лаврова Е.В. Совершенствование схемы устройства для наплавки двумя ленточными электродами / Е.В. Лаврова, В.П. Иванов, В.С. Кибиш // Університетська наука – 2019: Міжнародна науково-техн. конф., ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Маріуполь, 16–17 травня 2019 р. - Маріуполь: ДВНЗ «ПДТУ», 2019. - Т. 2. – С. 128–129.
61. 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.
62. Патент України № 101288, МПК: В23К 9/12. Пристрій для наплавлення стрічковим електродом під флюсом / А.Н. Серенко, О.В. Лаврова, В.П. Иванов, В.О. Серенко (Україна). – № а 2012 05838. – Заявл. 14.05.13. Опубл. 11.03.13. Бюл. № 5.
63. Патент України № 140575, МПК: В23К 9/12. Пристрій для подачі стрічкового електрода / В.П. Иванов, О.В. Лаврова, Н.О. Макаренко – № и 201906539.– Заявл. 11.06.2019. Опубл. 10.03.2020. Бюл. № 5. – 4 с.

Особистий внесок автора в роботах, опублікованих у співавторстві: [1-3], [5-11], [16], [20], [24], [27], [29-31], [34-36], [46], [49-53], [55], [56] – основні ідеї та їх опис і реалізація; [4], [28], [33] – проведення досліджень формування наплавленого шару, математична обробка результатів досліджень; [12], [14], [38], [61], [62] – постановка задачі, проведення досліджень коефіцієнту розплавлення; [15] – формулювання мети і завдання роботи, розробка математичної моделі; [25], [54] – 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; [57-63] – проведення досліджень складу та властивостей наплавленого металу та розробка конструкцій обладнання.

АНОТАЦІЯ

Лаврова О.В. Розвиток теоретичних та технологічних основ управління тепломасопереносом при електродуговому наплавленні застосуванням механічного керуючого впливу на електрод. – 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») – Державний вищий навчальний заклад «Приазовський державний технічний університет» МОН України, Маріуполь.

Дисертація присвячена вирішенню актуальної проблеми – підвищенню ефективності електродугового наплавлення шляхом оптимізації процесу тепломасопереносу в зварювальну ванну за рахунок механічного керуючого впливу на електрод, що сприяє поліпшенню термічного циклу наплавлення та мінімізації термодформаційних змін в зоні наплавленого валика та навколошовній зоні (НШЗ).

У дисертаційній роботі поставлена і вирішена актуальна науково – технічна задача електродугового наплавлення з застосуванням механічного керуючого впливу на електрод.

З використанням математичного моделювання встановлено основні закономірності процесу плавлення електрода при застосуванні механічного керуючого впливу, що дозволило визначати розмір та масу крапель електродного металу при дії механічного керуючого впливу на електрод.

Розроблена математична модель кондукційного нагріву основного металу, яка враховує механічний вплив на електрод для випадку напівнескінченного тілу та плоского шару. Використання результатів моделювання дозволяють збільшити ефективність розплавлення електродного металу при зменшенні тепловкладання в основний метал, за рахунок чого зменшуються площі ізотерм плавлення на рівні поверхні основного металу до 12% при незмінному значенні продуктивності.

На основі результатів осцилографування процесу наплавлення розроблена методика розрахунку розмірів і маси крапель при наплавленні з застосуванням механічного керуючого впливу на електрод. Встановлено, що при частоті коливань 40÷80 Гц, середній радіус крапель зменшується до 1,3÷1,5 мм, а маса до 0,08÷0,1 г, забезпечуючи дрібнокрапельне перенесення без коротких замикань дугового проміжку.

Проведено дослідження впливу параметрів механічного керуючого впливу на електрод при наплавленні нелегованими і аустенітними електродами на формування зони проплавлення і структуру наплавленого шару.

Аналіз макро-, мікроструктури і розподілу мікротвердості по глибині наплавленого шару при електродуговому наплавленні з застосуванням

механічного керуючого впливу на електрод дозволяє зробити висновок, що для кожного варіанту використання механічних коливань для управління процесом наплавлення існує оптимальна область, яка дозволяє забезпечити максимальне зниження матеріальних та енергетичних витрат на одиницю довжини наплавленого валику при збереженні необхідних технологічних параметрів.

Ключові слова: тепломасоперенесення, електродугове наплавлення, механічний вплив, температура і маса крапель, навколошовна зона

SUMMARY

Lavrova O.V. Development of scientific and technological bases of heat and mass transfer control during electric arc surfacing using a control mechanical action on the electrode. - Qualifying scientific work on the rights of the manuscript.

The dissertation on competition of a scientific degree of the doctor of technical sciences on a specialty 05.03.06 – "Welding and related processes and technologies" (132 – "Materials science") – the State higher educational institution "Priazovskiyi state technical university" of the Ministry of Education and Science of Ukraine, Mariupol.

The dissertation is devoted to solving an urgent problem - increasing the efficiency of electric arc surfacing by optimizing the process of heat and mass transfer to the weld pool due to mechanical control action on the electrode, contributes to improving the thermal cycle of surfacing and minimizing thermal deformation changes in the deposited bead and the weakness zone.

In the dissertation work the actual scientific and technical problem of electric arc surfacing with application of mechanical control influence on an electrode is set and solved.

Using mathematical modeling, the main regularities of the electrode melting process were established when using a mechanical control action, which made it possible to determine the size and mass of electrode metal drops when exposed to a mechanical control action on the electrode.

A mathematical model of conductive heating of the base metal has been developed, which takes into account the mechanical effect on the electrode for the case of a semi-infinite body and a flat layer. The use of the simulation results makes it possible to increase the efficiency of melting the electrode metal with a decrease in heat input into the base metal, due to which the areas of melting isotherms at the level of the base metal surface are reduced to 12 % with a constant value of productivity.

Based on the results of oscillography of the surfacing process, a method has been developed for calculating the size and mass of drops during surfacing using a

mechanical control action on the electrode. It has been established that at an oscillation frequency of $40 \div 80$ Hz, the average radius of the droplets decreases to $1.3 \div 1.5$ mm, and the mass to $0.08 \div 0.1$ g, providing small droplet transfer mode without short circuits of the arc gap.

The study of the influence of the parameters of mechanical control actions on the electrode during surfacing with non-alloyed and austenitic electrodes on the formation of the penetration zone and the structure of the deposited layer is carried out.

Analysis of the macro- and microstructure and the distribution of microhardness along the depth of the deposited layer during electric arc surfacing with the use of mechanical control action on the electrode allows us to conclude that for each option for using mechanical vibrations to control the surfacing process, there is an optimal range of control parameters change, which allows the and energy costs per unit length of the deposited bead while maintaining the necessary technological parameters.

Key words: heat and mass transfer, electric arc surfacing, mechanical action, temperature and mass of droplets, weakness zone.

Наукове видання

**РОЗВИТОК ТЕОРЕТИЧНИХ ТА ТЕХНОЛОГІЧНИХ ОСНОВ
УПРАВЛІННЯ ТЕПЛОМАСОПЕРЕНОСОМ ПРИ
ЕЛЕКТРОДУГОВОМУ НАПЛАВЛЕННІ ЗАСТОСУВАННЯМ
МЕХАНІЧНОГО КЕРУЮЧОГО ВПЛИВУ НА ЕЛЕКТРОД**

05.03.06 – «Зварювання та споріднені процеси і технології»

Автореферат

дисертації на здобуття наукового ступеня
доктора технічних наук

ЛАВРОВА Олена Володимирівна

Підписано до друку 01.10.2020 р. Формат 60x84/16.
Ум. друк. арк. 2,25. Тираж 100 прим. Зам. № 79.

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