

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ ІМЕНІ ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»

НОВИКОВ Сергій Володимирович



УДК 621.791.927.5

**ДУГОВЕ НАПЛАВЛЕННЯ З НИЗЬКОЧАСТОТНИМИ МЕХАНІЧНИМИ
КОЛИВАННЯМИ ПЛАСКОЇ ДЕТАЛІ**

Спеціальність 05.03.06 – зварювання та споріднені процеси і технології

АВТОРЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Київ – 2025

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Інституті електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України.

Науковий керівник: доктор технічних наук, професор,
Лебедєв Володимир Олександрович,
Херсонський навчально-науковий інститут
Національного університету кораблебудування імені
адмірала Макарова,
професор кафедри зварювання.

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор,
Перемітько Валерій Вікторович,
Дніпровський державний технічний університет,
декан металургійного факультету;

кандидат технічних наук, доцент,
Сливінський Олексій Анатолійович,
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря
Сікорського»,
доцент кафедри зварювального виробництва.

Захист відбудеться "9" квітня 2025 р. о 15 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 26.002.15 при Національному технічному університеті України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» за адресою: Україна, 03056, м. Київ, просп. Берестейський, 37.

З дисертацією можна ознайомитися в Науково-технічній бібліотеці ім. Г.І. Денисенка Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» за адресою: Україна, 03056, м. Київ, пр. Берестейський (Перемоги), 37 Л.

Автореферат розісланий "4" березня 2025 р.

Учений секретар
спеціалізованої вченої ради,
доктор технічних наук, доцент



В.М. Пащенко

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Процеси наплавлення та зварювання широко використовуються як для підвищення експлуатаційних характеристик робочих поверхонь деталей та інструментів, так і для з'єднання елементів металевих конструкцій. В процесі реалізації цих технологічних процесів широко використовується дуговий метод формування зварювальної ванни на поверхні деталі під час її наплавлення або в зоні з'єднання під час зварювання. За результатами досліджень різних авторів із застосуванням дугового впливу на метал показано, що якість наплавленого металу залежить не лише від його хімічного складу, але й характеристик мікроструктури. Останні в значній мірі визначаються режимами дугового процесу і умовами кристалізації розплаву зварювальної ванни. Одним з розповсюджених методів впливу на процес кристалізації є періодичний вплив на метал, що кристалізується.

Суттєвий вплив періодичної дії механічних коливань на мікроструктуру металу, що кристалізується відомий ще з 19 століття, але значно розширити сферу знань в цій області вдалося у 20 столітті. В минулі роки в галузі зварювальних технологій із застосуванням періодичного впливу механічних коливань значних результатів досягли вчені, як-от: С.В. Арістов, В.Л. Руссо, Г.А. Славін, А.М. Болдирєв, *K. Wittke* та інші. На сьогоднішній день це роботи: І.О. Рябцева, В.О. Лебедева, С.В. Драгана, Ч.В. Пульки, Н.В. Спірідонові, *Selvi, Singh, Gill, Hsieh* та ін.

З літературних джерел відомо, що дослідження впливу механічних коливань на структуру наплавленого металу проводили за частотою коливань зварювальної ванни більшої ніж 10,0 Гц, а амплітуда коливань, водночас, знаходилася в діапазоні від 40,0 мкм до 2,0 мм. Проте, показано, що вплив на мікроструктуру наплавленого металу проявляється вже за частотою коливання дуги від 1,0 Гц до 1,5 Гц. Враховуючи те, що коливання дуги можуть бути реалізовані не лише переміщенням електроду відносно зварювальної ванни, а й за рахунок її переміщення відносно електроду, зменшення частоти коливання дозволяє реалізувати інший підхід до процесів наплавлення та зварювання, а саме, за рахунок коливання поверхні деталі відносно дуги. Таким чином, актуальним є дослідження впливу такого типу коливань за діапазоном частот до 10,0 Гц та амплітуд від 2 мм на процес дугового наплавлення.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Наукова робота виконувалась в період з 2015 по 2021 рр. у Державному підприємстві “Дослідне конструкторсько-технологічне бюро Інституту електрозварювання ім. Є.О. Патона Національної академії наук України” (ДП “ДКТБ ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАНУ”) в рамках плану науково-дослідних робіт за темою державної програми «Дослідження закономірностей та фізико-технічних особливостей дугового зварювання плавким електродом в імпульсному режимі конструкцій відповідального призначення в усіх просторових положеннях, в тому числі під водою. 2017-2021 р. р.» (номер держреєстрації 0117U001219); восьмої рамочної програми Європейського Союзу по розвитку наукових досліджень і

технологій «*Horizon 2020*» «*Integration of advanced experiments, computation and data for Duplex Stainless Steel joining innovation*» (№ 823786 – i – Weld).

Мета і задачі дослідження. Метою роботи є підвищення властивостей відновленого поверхневого шару опорних плит гідравлічного пресу дуговим наплавленням з використанням механічних низькочастотних коливань поверхні деталі обраного типу, встановлення закономірностей впливу цих коливань та режимів наплавлення на структуру та властивості наплавленого металу та металу зони термічного впливу.

Для досягнення поставленої мети необхідно було вирішити такі основні задачі:

1. Створити установку для наплавлення з коливаннями означеного типу виробу, що наплавляється.
2. Розробити аналітичні моделі, що встановлюють зв'язок параметрів коливань з основними параметрами режиму наплавлення за умов задовільного формування наплавленого металу, що отриманий під час дії обраного виду коливань.
3. Розробити числові моделі, що встановлюють зв'язок параметрів коливань та основних параметрів режиму наплавлення з характеристиками мікроструктури наплавленого металу та металу зони термічного впливу (ЗТВ), службовими властивостями наплавленого металу та геометричними розмірами валиків.
4. Дослідити вплив коливань на величину періоду горіння дуги, стабільність та енергоємність дуги.
5. Дослідити вплив коливань на мікроструктуру наплавленого металу та металу ЗТВ.

Об'єктом дослідження є комплекс властивостей наплавленого металу: твердість, мікроструктура, геометричні розміри наплавленого валику, процес перенесення електродного металу.

Предметом дослідження є наплавлений метал, отриманий з використанням механічних низькочастотних гармонічних коливань зазначеного типу поверхні зразка, що наплавляється.

Методи дослідження. Віккерса – визначення твердості наплавленого металу і металу ЗТВ; хімічне травлення – визначення границі дійсного зерна мікроструктури; оптичної та растрової мікроскопії – визначення загального виду мікроструктури та типу її структурних складових, висоти валиків; підрахунку перетину границь зерен – визначення розміру кристаліту (діаметр зерна); ступеню розбризкування – встановлення ступеню розбризкування металу електродного дроту; статистичного аналізу осцилограм – встановлення дійсного значення струму наплавлення і напруги на дузі; кількісної оцінки тепловмісту дуги на основі аналізу осцилограм – визначення кількості електричної енергії, витраченої на горіння дуги певної тривалості; “латинського квадрату” – визначення кількості наплавлень в серії експериментів; найменших квадратів регресійного аналізу – визначення параметрів регресії; визначення середніх значень відгуку – встановлення оцінки ступеню впливу технологічних факторів.

Наукова новизна одержаних результатів.

1. Вперше досліджено можливості модифікування низьколегованого наплавленого металу адитивною дією механічних низькочастотних коливань, що здійснюються у вертикальній та горизонтальній площинах та практично реалізується періодичним рухом зварювального виробу за траєкторією дуги окружності з частотою в діапазоні від 2,5 Гц до 4,5 Гц та амплітудою від 3,0 мм до 7,0 мм.
2. Вперше встановлено, що модифікування поверхневого шару деталі, що наплавляється дуговим наплавленням під дією механічних коливань означеного типу з частотою 2,5 Гц, амплітудою 7,0 мм, забезпечує максимальне збільшення твердості наплавленого металу відносно наплавлення без коливального впливу, що обумовлено як диспергуванням мікроструктури, так і формуванням в ній зерна із структурними складовими з високою твердістю: голчастого та пластинчатого фериту, сорбітоподібного перліту та бейніту.
3. Доведена можливість збільшення ширини наплавлених валиків в діапазоні від 1,3 рази до 1,8 рази, зменшення їх висоти – від 1,2 рази до 6,4 рази та глибини проплавлення основного металу у 2,0 рази у порівнянні з наплавленням без коливань, що обумовлено розосередженням розплаву зварювальної ванни на значну площу основного металу.

Практичне значення отриманих результатів. Створено установку для наплавлення плоских деталей з функцією їх коливань за напрямком дуги окружності, що обумовлює підвищену твердість наплавленого металу та формування валиків з ефективними геометричними розмірами. Розроблено технологічні рекомендації щодо наплавлення на плоскі поверхні деталей з вуглецевих сталей типу СтЗсп економно-легованим дротом на основі отриманих статистичних та аналітичних залежностей, достовірність яких перевірено за результатами відновлювального наплавлення робочих поверхонь опорних плит гідравлічного пресу, що використовуються у поліграфічному виробництві для обтискання книжних блоків, брошур, постерів та інших поліграфічних виробів. Даний спосіб наплавлення було реалізовано на підприємстві Видавничий Дім «Фоліант» м. Київ, що підтверджується відповідним актом впровадження. Доведена можливість наплавлення легованим дротом типу Нп-30ХГСА на визначеному оптимальному режимі з прогнозованим підвищенням мікротвердості наплавленого металу у порівнянні з відповідним наплавленням без коливального впливу, що довело перспективність використання даного методу наплавлення для дротів з більшим ступенем легування або з більшим вмістом легуючих елементів.

Особистий внесок здобувача. Дисертаційна робота є результатом експериментальних і теоретичних досліджень, проведених як особисто автором, так і за його безпосередньої участі. Постановка задач та аналіз отриманих результатів здійснювались спільно з науковим керівником та співавторами публікацій. За проведеними дослідженнями, результати яких опубліковано у співавторстві, автору належить: отримання експериментальної бази даних, статистична обробка результатів [1, 2, 22, 27], проведення циклу аналітичних [3,

7- 11, 14-18] та теоретичних досліджень [4-6, 12, 13, 21]; розробка алгоритму, структури меню блока керування та вибір вихідних даних крокового двигуна [24], створення установки [28]; розробка аналітичних моделей та її верифікація [19, 25, 30]; дослідження службових характеристик та мікроструктури, залежностей геометричних розмірів валика від параметрів коливань зварювальної ванни [20, 23, 26]; практичне застосування [29, 31-33].

Апробація результатів дисертації. Основні положення і результати роботи доповідалися та обговорювалися на: IV міжнародній науково – технічній конференції «Сварка и родственные технологии: перспективы развития», (Краматорськ, 2016 р.), 17-й Міжнародній науково – технічній конференції «Инженерия поверхности и реновация изделий» (Одеса – Київ, 2017), XVI Міжнародній науково – технічній конференції «Вібрації в техніці та технологіях» (Вінниця, 2017), VIII Міжнародній науково – технічній конференції «Інновації у суднобудуванні та океанотехніці» (Миколаїв, 2017), XIII Міжнародній науково – практичній конференції молодих вчених, аспірантів і студентів «Перспективна техніка і технології – 2017» (Миколаїв, 2017), 9th *International Conference of Young Scientists on Welding and Related Technologies* (Київ, 2017), 18th *International Scientific and Technical Seminar: Modern Questions of Production and Repair in Industry and in Transport* (Брно, Чехія, 2018), 19th *International Scientific and Technical Seminar: Modern Questions of Production and Repair in Industry and in Transport* (Кошице, Словаччина, 2019), X міжнародній науково-практичній конференції «Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем» (Чернігів, 2020 р.), XI міжнародній науково-практичній конференції «Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем» (Чернігів, 2021 р.), XII міжнародній науково-практичній конференції «Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем» (Чернігів, 2022 р.), XX міжнародній науково-технічній конференції «Важке машинобудування. Проблеми та перспективи розвитку» (Краматорськ – Тернопіль, 2022 р.), міжнародній науково-технічній конференції «Міцність і довговічність сучасних матеріалів та конструкцій» (Тернопіль, 2022 р.).

Публікації. Результати досліджень за темою дисертації опубліковано у 14 наукових працях у виданнях, з яких 2 включені до міжнародних наукометричних баз даних *SCOPUS* та *WoS*, 12 – до категорії Б у галузі знань 13 «Механічна інженерія»; 16 тез і матеріалів міжнародних науково-технічних та науково-практичних конференцій та семінарів; оформлено 3 патенти України на корисну модель.

Структура й об'єм роботи. Дисертаційна робота складається зі вступу і п'яти розділів, загальних висновків, списку використаної літератури і додатків. Загальний об'єм дисертації – 190 сторінок машинописного тексту, включаючи 7 додатків, 18 таблиць, 54 рисунки і список літератури з 123 найменувань.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** сформульована актуальність теми дисертації, визначені мета і основні напрямки досліджень, наведена інформація про об'єкт й методи досліджень, вказана наукова новизна, практичне застосування отриманих результатів та особистий внесок автора.

У **першому розділі** представлено результати аналітичного огляду літературних джерел з питань дисертаційної роботи. В останній час для покращення якості зварних конструкцій застосовують періодичний вплив на розплав зварювальної ванни, зокрема механічні коливання зварювальної ванни або інструменту. Позитивний вплив періодичної дії обумовлено особливостями процесу кристалізації металу зварювальної ванни. Даний метод покращення мікроструктури відомий ще з 19 століття, проте більшість сучасних досліджень реалізовані за частоти коливань, що значно перевищує 10,0 Гц, а амплітуди коливань знаходяться в діапазоні від 40,0 мкм до 2,0 мм. Окрім того, характер коливань є обмеженим горизонтальною або вертикальною площиною.

Значних результатів у вивченні впливу низькочастотних гармонійних коливань на метал зварювальної ванни досягли: В.О. Лебедев, І.В. Лендел, Г.В. Жук – Інститут електрозварювання ім. Е.О. Патона НАНУ; С.В. Драган, І.В. Сімутенков – Національний університет кораблебудування імені адмірала С.О. Макарова (м. Миколаїв). Також досліджували низькочастотний коливальний вплив на характер кристалізації: С.В. Арістов, В.Л. Руссо, Г.А. Славін, А.М. Болдирев, К. Wittke, А.А. Selvi та ін. Завдяки їх дослідом вдалося визначити основні фізико – хімічні й механічні процеси, які безпосередньо впливають на формування характерної мікроструктури, створити ефективні моделі щодо впливу періодичної дії на мікроструктуру і службові властивості наплавленого металу, але досі не існує універсальної теорії, яка б достовірно описувала характер впливу коливань на мікроструктуру наплавленого металу. Крім того, існують певні аспекти прикладного характеру стосовно впливу амплітуди й частоти на формування валика, структурні складові мікроструктури наплавленого металу й ЗТВ, деякі технологічні особливості у разі наплавлення порошковим дротом та при використанні сталей з різним ступенем легування у якості основного металу та ін.

В роботі авторів *V. S. Bade* та ін. експериментально доведено, що мікроструктура наплавленого металу починає подрібнюватись вже за значенням частоти коливань 1,076 Гц зварювальної дуги у разі наплавлення на вуглецеву сталь, а у роботі *A. A. Selvi* – за частотою 1,56 Гц за умови періодичній дії дуги на сплав типу *Inconel 690* без присадного дроту. Також, за експериментальними даними роботи *V. S. Bade* та ін. доведено, що за величиною частоти 5,4 Гц з подальшим її збільшенням розмір зерна починає зростати з відповідним зменшенням твердості.

Таким чином, періодичний вплив на мікроструктуру наплавленого металу у діапазоні частот від 1,0 Гц до 5,0 Гц та амплітуд понад 2,0 мм є малодослідженим.

З огляду на ці результати, дана робота присвячена дослідженню особливостей технологічного впливу механічних низькочастотних коливань з частотним

діапазоном від 2,5 Гц до 4,5 Гц та амплітудним – від 3,0 мм до 7,0 мм на процес дугового наплавлення в вуглекислому газі. Коливання здійснюються одночасно у вертикальній та горизонтальній площинах, а саме: за траєкторією дуги окружності заданої довжини.

Комплекс досліджень полягає у визначенні: величини твердості наплавленого металу та ЗТВ основного металу, геометричних розмірів наплавленого валику – ширини та висоти, особливостей формування мікроструктури наплавленого металу – розміру зерна кристалітів та типу структурних складових, можливості впливу на перенесення електродного металу у зварювальну ванну – часу періоду горіння дуги, як функції параметрів коливань.

Дані дослідження обумовлюють необхідність створення установки для наплавлення з функцією генерації такого типу коливань.

У другому розділі наведено вибір основних вузлів та пристроїв установки для наплавлення. Основними критеріями вибору є доступність обладнання як за ціновим показником, так і за простотою в експлуатації та ремонті, що обумовило створення цієї установки на базі використання крокового двигуна відповідної потужності з можливістю програмування.

Коливання, які здійснюються у напрямку траєкторії по дотичній до дуги окружності заданої довжини, що реалізуються завдяки переміщенню коливального столу де закріплений зразок для наплавлення, генеруються кроковим двигуном, вал якого переміщується за дугою окружності з центром O на певний кут α (рис. 1).

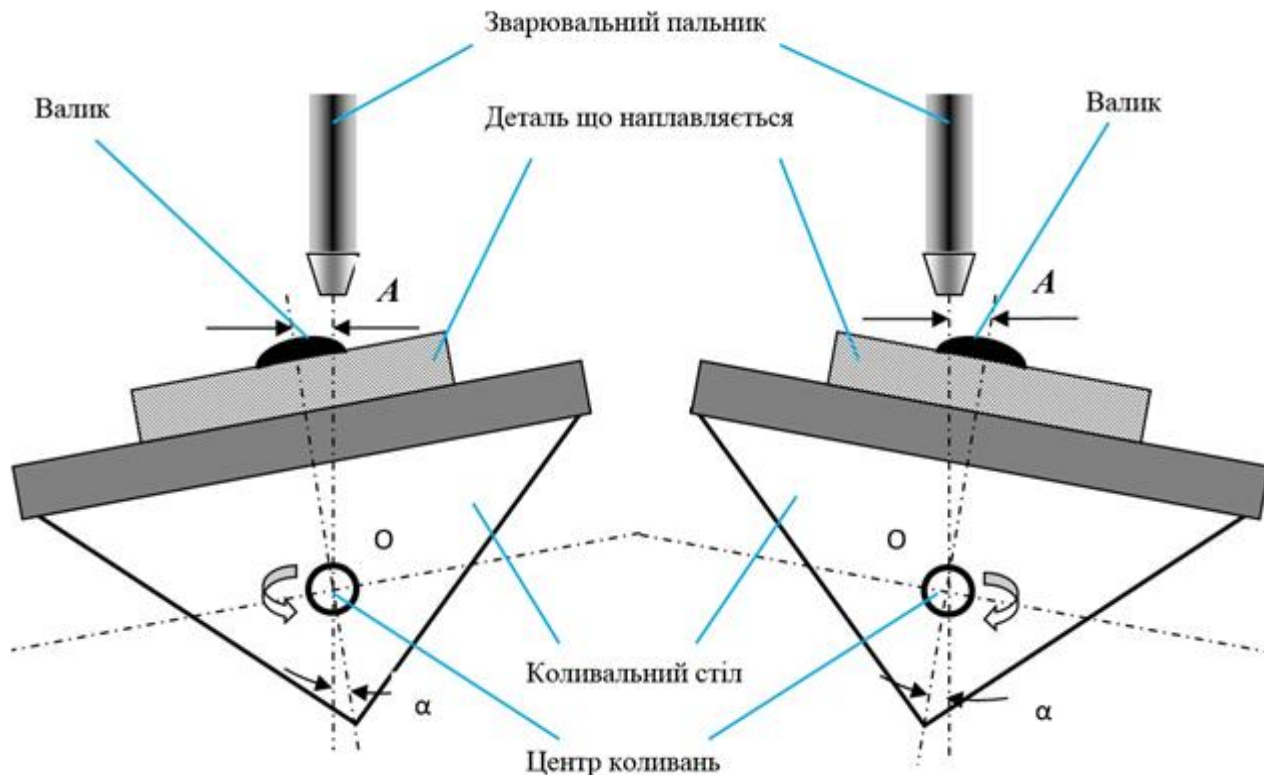


Рисунок 1 – Схема поперечних коливань рухомого столу, де A – амплітуда коливань, α – кут відхилення від осі наплавлення, O – центр

Граничне значення кута α визначало величину амплітуди коливання A . На базі коливального столу 3 створено установку для наплавлення, яка забезпечує автоматичне переміщення рухомої станини 1 (рис. 2) на якій закріплений зварювальний пальник 2, що переміщується вздовж коливального столу 3 з закріпленою деталлю, що наплавляється 4. Коливання столу 3 генеруються кроковим двигуном 5. Електричне живлення станини 1 здійснюється від центральної електричної мережі 220 В через перетворювач 6. Струм наплавлення контролювався за допомогою електронного індикатору 7. Напівавтомат подачі зварювального дроту підключався до центральної електромережі за посередництвом перетворювача 8. Введення величин параметрів коливань валу крокового двигуна – амплітуди й частоти – здійснювалось завдяки пульта керування 9 марки *Kinco MD 224L*.

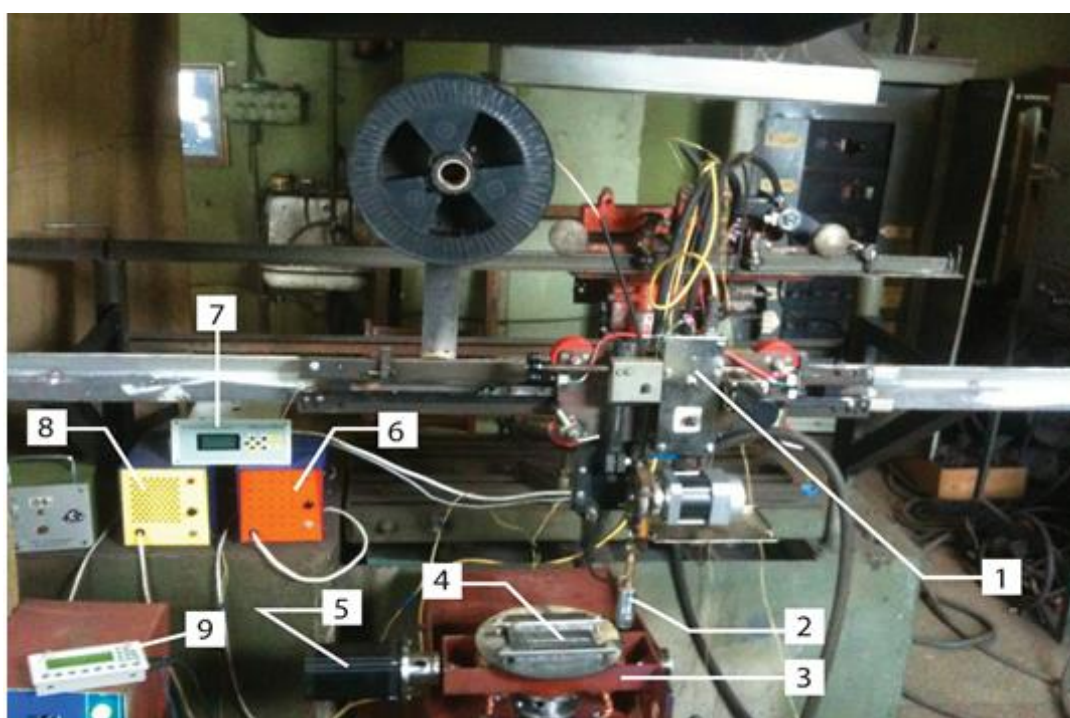


Рисунок 2 – Структурна схема установки для наплавлення: 1 – рухома станина; 2 – зварювальний пальник; 3 – коливальний стіл; 4 – деталь що наплавляється; 5 – кроковий двигун; 6, 8 – електричні перетворювача; 7 – електронний індикатор швидкості подачі зварювального дроту; 9 – пульт керування кроковим двигуном

Серійний кроковий двигун *Kinco 2S86Q-051F6* обирався за максимальним динамічним моментом коливальної системи за певною методикою. Відповідно до значень фазного струму та напруги живлення крокового двигуна було обрано драйвер *Kinco 2M880N* та джерело живлення *Mean Well DRP-24-24*. Запуск крокового двигуна, його зупинка, контроль, програмування та обробка режиму роботи здійснювалось відповідним блоком керування на базі контролера ПЛК *Kinco-K306-24AT*.

Базові методики досліджень та їх основні засоби:

- осцилографування дуги для вимірювання струму і напруги на базі спеціалізованого комплексу для моніторингу процесу зварювання;
- вимірювання висоти валика здійснювалось на оптичному мікроскопі *NEOPHOT–32*, ширини - штангенциркулем;
- вимірювання втрат електродного металу на розбризування;
- вимірювання твердості за Віккерсом за ДСТУ *ISO 6507–1:2007* здійснювалось за допомогою твердовимірювача *LECO M–400*;
- дослідження розміру зерна та фазового складу наплавленого металу типу Св- 08Г2С відповідно до ДСТУ *8972:2019* за допомогою оптичної мікроскопії на оптичному мікроскопі *NEOPHOT–32* зі збільшенням $\times 200$ та цифрової фотокамери *OLYMPUS–C 5050*.

Для досягнення контрастних зображень мікрошліфи підлягали попередньому травленню у реактиві 4% спиртового розчину азотної кислоти на термін від 5,0 с до 10,0 с.

25 заготовок для наплавлення являють собою металеві пластини товщиною 8,0 мм з листової сталі марки СтЗсп. У якості електроду використовувались суцільний дрiт діаметром 1,2 мм марки *ER70S-6* (С: від 0,06 % мас. до 0,15 % мас.; Si: від 0,80 % мас. до 1,15 % мас.; Mn: від 1,40 % мас. до 1,85 % мас.; Cu: 0,35 % мас.; P: 0,025 % мас.; S: 0,035 % мас.) – аналог Св-08Г2С. Витрата CO_2 у всіх експериментах була в діапазоні від 15,0 л/хв до 25,0 л/хв.

У третьому розділі наведено теоретичні розрахунки щодо визначення часу періоду горіння дуги, сили струму та швидкості наплавлення як функцій від параметрів керованих вимушених коливань зразка, що наплавляється – амплітуди і частоти.

Визначення впливу коливань на перенос електродного металу було проведено на базі осцилографування процесів наплавлення за одним технологічним режимом наплавлення: $I_n=125,0$ А, U =від 24,0 В до 26,0 В, $V_n=14,0$ м/год та коливальних режимах: $A=7,0$ мм, $\nu=3,0$ Гц; $A=3,0$ мм, $\nu=3,0$ Гц; $A=3,0$ мм, $\nu=4,5$ Гц; $A=7,0$ мм, $\nu=4,5$ Гц, а також без коливань. З аналізу осцилограм було встановлено, що частота впливає на перенесення рідкого металу у зварювальну ванну по різному: значення періоду горіння дуги t збільшується всього до 0,039 с на частоті коливань $\nu=3,0$ Гц та в діапазоні від 0,061 с до 0,068 с на частоті коливань $\nu=4,5$ Гц у порівнянні з наплавленням без впливу коливань. Значення амплітуди незначним чином впливає на величину періоду на частоті 3,0 Гц, але на частоті коливань 4,5 Гц збільшення амплітуди суттєво збільшує і величину часу періоду горіння дуги. Таким чином, спроможність впливу керованих коливань зразка, який наплавляється на перенос електродного металу має 2 складових: збільшення частоти коливань; збільшення амплітуди коливань. Додатково оцінена можливість керування, за рахунок зміни параметрів вимушених коливань, величиною періоду горіння дуги між короткими замкненнями, на підставі отриманої аналітичної залежності, що є аналітичним рішенням системи рівнянь зміни довжини дугового проміжку за рахунок коливань дуги та плавлення електродного металу. Для визначення зв'язку між періодом горіння та параметрами коливань було аналітично отримане трансцендентне

рівняння, що має похибку у межах від 8,0 % до 39,0 %. Велика похибка обумовлена факторами розбризкування та нестабільністю перенесення електродного металу до зварювальної ванни, що є специфікою зварювання/наплавлення в середовищі захисних газів, а також фактором впливу коливань, що не враховує аналітична модель. Окрім того, відносна похибка носить умовний характер, оскільки експериментальні дані відносяться лише до окремої ділянки осцилограм.

Щодо визначення швидкості наплавлення як функції параметрів коливань була вирішена наступна аналітична задача: зварювальна ванна шириною l рухається з постійною лінійною швидкістю V_n відносно осі x по траєкторії коливання зразка, що наплавляється за гармонічним законом $y = \frac{L}{2} \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot \nu \cdot t)$, де $L = 2 \cdot A$ – розмах коливання. Тоді основним критерієм розрахунку швидкості V_n є умова суцільності валика (рис. 3): нормаль до траєкторії руху за законом $y = f(L, \nu, t) - AB$, яка поєднує точку A – середину відрізка між двома сусідніми «вершинами» синусоїди A_1 та A_2 з довільною точкою траєкторії B – повинна мати довжину рівну половині ширини валику (зварювальної ванни) – $\frac{l}{2}$, що отриманий без впливу коливань.

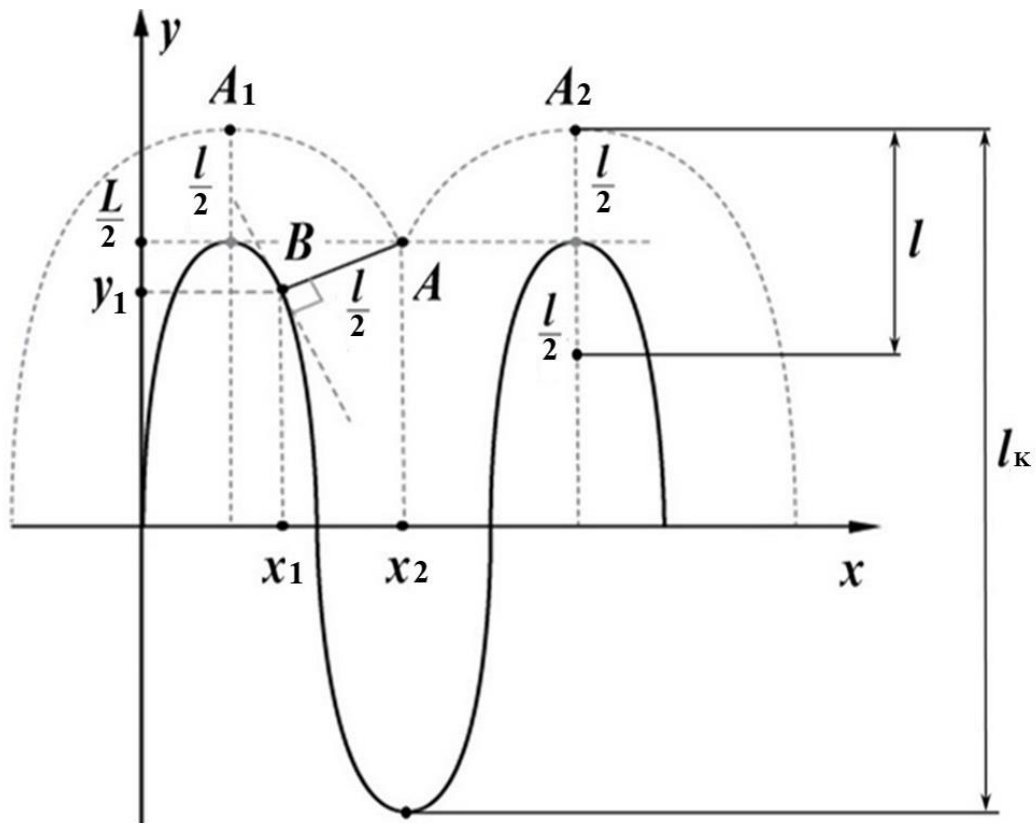


Рисунок 3 – Схема щодо пояснення визначення швидкості наплавлення в умовах коливань зразка, що наплавляється, де L – розмах коливань, l – ширина валика, що отриманий без коливань, l_k – ширина валика, що отриманий з коливаннями зразка, що наплавляється

Виразом критерія суцільності є система рівнянь:

$$\begin{cases} a = -\frac{V_H}{\pi \cdot v \cdot L \cdot \cos(2 \cdot \pi \cdot v \cdot t)} \\ |x_2 - x_1| = \frac{1}{|a|} \cdot \left(\frac{L}{2} - \frac{L}{2} \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot v \cdot t) \right) \\ \left(\frac{l}{2} \right)^2 = (x_2 - x_1)^2 + \left(\frac{L}{2} - \frac{L}{2} \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot v \cdot t) \right)^2 \end{cases}, \quad (1)$$

де a – кутовий коефіцієнт нормалі AB . Враховуючи, те, що тригонометричні функції можна за певних умов виразити через вищезначені параметри l , L та параметр n , який визначає ступінь суцільності наплавленого валику, то має місце сукупність:

$$\begin{cases} 1 - \sin(2 \cdot \pi \cdot v \cdot t_A) = \frac{1}{2 \cdot n} \cdot \left(\frac{l}{L} \right)^2 \\ \sin(2 \cdot \pi \cdot v \cdot t_A) = 1 - \frac{1}{2 \cdot n} \cdot \left(\frac{l}{L} \right)^2 \\ \cos(2 \cdot \pi \cdot v \cdot t_A) = \sqrt{1 - \left(1 - \frac{1}{2 \cdot n} \cdot \left(\frac{l}{L} \right)^2 \right)^2} \end{cases}. \quad (2)$$

Кінцевим рішенням системи (1) з урахуванням (2) є вираз:

$$V_H = \pi \cdot v \cdot L \cdot \frac{\left(\frac{1}{2 \cdot n} \cdot \left(\frac{l}{L} \right)^2 \right) \cdot \sqrt{1 - \left(1 - \frac{1}{2 \cdot n} \cdot \left(\frac{l}{L} \right)^2 \right)^2}}{\sqrt{\left(\frac{l}{L} \right)^2 - \left(\frac{1}{2 \cdot n} \cdot \left(\frac{l}{L} \right)^2 \right)^2}}. \quad (3)$$

Значення параметру n повинні задовольняти нерівності $n > 0,5 \cdot \frac{l}{L}$ та є оптимальним для даних умов наплавлення в CO_2 у діапазоні від 4,5 разів до 6,5 разів. Відповідно до отриманих за допомогою пакету *Mathcad* результатів встановлено, що за частотним від 2,5 Гц до 4,5 Гц й амплітудним від 3,0 мм до 7,0 мм діапазонами для плавкого дроту типу Св-08Г2С діаметром 1,2 мм у середовищі CO_2 , за значеннями l – 6,0 мм та 11,0 мм, що були отримані за величинами струму наплавлення $I_H=100,0$ А та $I_H=200,0$ А та швидкості наплавлення $V_H=18,0$ м/год, визначений практичний діапазон швидкості наплавлення за виразом (3) є від 9,0 м/год до 27,72 м/год.

З метою підвищення ефективності наплавлення, досліджена можливість підвищення ефективності наплавлення за рахунок зменшення прогалини A_1A_2 (рис. 3), також отримана залежність для V_H в умовах даного типу коливань за умови наплавлення на циліндричне тіло обертання заданого радіусу, що викладено у роботах [1], [38].

Характер зміни струму наплавлення за період горіння дуги t між короткими замкненнями має певний часовий проміжок, де його значення зменшується від максимального значення I_{max}^H (т. A) (рис. 4) до номінального значення I_H (т. B), майже за лінійним законом та який характеризується інтенсивним плавленням зварювального дроту.

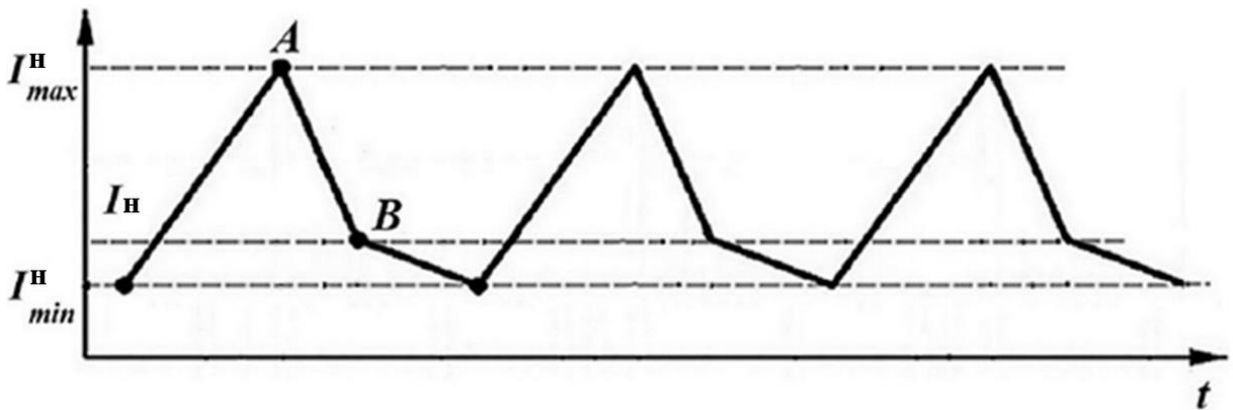


Рисунок 4 – Схема зміни струму наплавлення:

I_{max}^H – максимальне значення,

I_H – номінальне значення, I_{min}^H – мінімальне значення

Можливість впливати на характер плавлення за період часу, що відповідає відрізьку AB , обумовило потребу в дослідженні ролі коливань. Дана задача була вирішена за системою, що описує дугу рівнянням Гауса записаного у циліндричній системі координат, де прийнято, що форма дуги є циліндр з радіусом r . В рівнянні прийнято, що струм дуги I_H змінюється за часом на проміжку AB відповідно до першої похідної по довжині дуги l_d – $\frac{\partial I_H}{\partial t} = \frac{\partial I_H}{\partial l_d} \frac{\partial l_d}{\partial t}$. Тоді має місце система рівнянь:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\pi \cdot r^2 \cdot \varepsilon_0 \cdot \left(\frac{\partial E}{\partial l_d} \right)}{dt} = I_H \\ E = 2,05 \cdot 10^8 \cdot \frac{U_i^{12} \cdot g_e^{\frac{1}{3}}}{I_H^3 \cdot \chi^3} \\ \frac{\partial I_H}{\partial t} = \frac{\partial I_H}{\partial l_d} \frac{\partial l_d}{\partial t} \end{array} \right. \quad (4)$$

Відповідно до роботи [14], рішенням якої є вираз:

$$I_H = I_{max}^H - D \cdot l_d^{\frac{3}{8}} \quad (5)$$

де E – напруженість поля зварювальної дуги, t – час, ϵ_0 – електромагнітна проникність, U_i – потенціал іонізації дугової плазми, g_e – перетин Рамзауєра, χ – відношення статистичної ваги однократно заряджених іонів заліза до статистичної ваги атому у нормальному стані, коефіцієнт D має розмірність $[A / m^{\frac{3}{8}}]$ та визначає природу саморегулювання дуги в залежності від її довжини. У випадку дуги малої довжини коефіцієнт D визначає процес саморегулювання як похідний від зміни ЕРС самоіндукції зварювальної мережі, тобто визначається фізичними особливостями процесів джерела живлення, тому у даних дослідах D є саме розмірним коефіцієнтом та дорівнює 1. Тоді за формулою (5) номінальне значення струму наплавлення на ділянці AB (рис. 4) за рахунок коливань майже не зміниться від максимального значення струму наплавлення – $I_H \approx I_{max}^H$ у діапазоні зміни I_{max}^H від 400,0 А до 500,0 А та довжини дуги l_d від 4,0 мм до 7,0 мм за час 0,025 с. Цей факт означає майже відсутню залежність сили струму I_H від параметрів коливань, що підтверджено відповідними осцилограмами. Таким чином доведена неможливість керування за допомогою амплітудно частотних характеристик коливань відповідного типу деталі, що наплавляється зміною сили струму наплавлення у часовий період його спаду від максимального до номінального значення, що відповідає інтенсивному зростанню об'єму краплі металу дроту.

У четвертому розділі представлено основний комплекс досліджень на базі повнофакторного експерименту. Задля зменшення кількості експериментів та одночасного збереження незалежності між обраними основними факторами було задіяно метод «латинський квадрат». У якості функцій відгуку було обрано: значення твердості наплавленого H та ЗТВ – $H_{ЗТВ}$ основного металу, геометричні розміри валиків – висота b та ширина W , розмір зерна мікроструктури наплавленого металу δ . У якості незалежних факторів обрано: сила струму наплавлення – I_H , швидкість наплавлення – V_H , амплітуда коливань – A та частота коливань – ν . Визначення H , $H_{ЗТВ}$, b та δ проводилося за методом найменших квадратів регресійного аналізу. Діапазон коливань 5 рівнів незалежних факторів обирався відповідно висновків першої та третьої глав дисертаційної роботи та був наступним: для I_H – від 100,0 А до 200,0 А: 100,0 А, 125,0 А, 150,0 А, 175,0 А, 200 А; для V_H – від 10,0 м/год до 26,0 м/год: 10,0 м/год, 14,0 м/год, 18,0 м/год, 22,0 м/год, 26,0 м/год; A – від 3,0 мм до 7,0 мм: 3,0 мм, 4,0 мм, 5,0 мм, 6,0 мм, 7,0 мм; ν – від 2,5 Гц до 4,5 Гц: 2,5 Гц, 3,0 Гц, 3,5 Гц, 4,0 Гц, 4,5 Гц.

Відповідно до плану експерименту, на пласкі зразки з середнім розміром 220,0 мм × 35,0 мм було здійснено наплавлення за технологічними режимами відповідно до плану експериментів. Всього було отримано 25 зразків, які були досліджені щодо визначення значень H , $H_{ЗТВ}$, b , W , δ у відповідності до базових методів досліджень. За отриманими експериментальними даними побудовані

регресійні моделі за допомогою пакету *STATISTICA* для H , $H_{зТВ}$, b , δ . Вираз для W було отримано аналітичним шляхом на основі вирішення рівнянь вимушених коливань гармонійного осцилятора та моменту обертового руху коливальної системи, що викладено у роботі [25]. Відносна похибка між вимірними і розрахованими за цією залежністю даними становить 18,0 % (таблиця 1).

Таблиця 1 – Розраховані та виміряні значення ширини валиків з наведеною відносною похибкою

Сила струму напівнаплення I_n , А	Швидкість напівнаплення V_n , м/год	Частота коливань / відстань від осі коливань до центра мас розплаву ν , Гц / l_k , мм		Амплітуда коливань A , мм	Ширина валика розрахована $W_{роз}$, мм	Ширина валика виміряна $W_{вим}$, мм	Відносна похибка, Δ %
150,0	18,0	2,5	70,0	7,0	16,0	15,8	1,3
125,0	26,0		69,0	6,0	14,0	12,4	13,0
200,0	10,0		68,0	5,0	12,0	15,7	23,6
100,0	22,0		67,0	4,0	9,0	10,96	18,0
175,0	14,0		66,5	3,0	7,0	11,7	40,2
125,0	14,0	3,0	45,0	7,0	18,0	17,2	4,7
200,0	18,0		44,0	6,0	15,0	15,8	5,1
100,0	26,0		43,0	5,0	13,0	10,3	26,0
175,0	10,0		41,5	4,0	11,0	15,4	28,6
150,0	22,0		41,0	3,0	8,0	10,8	26,0
200,0	22,0	3,5	33,0	7,0	18,0	19	5,3
100,0	14,0		32,0	6,0	16,0	13,6	17,6
175,0	18,0		31,0	5,0	14,0	14	0
150,0	26,0		30,5	4,0	11,0	13,8	20,0
125,0	10,0		30,0	3,0	9,0	13,2	31,8
100,0	10,0	4,0	24,0	7,0	19,0	18,8	1,1
175,0	22,0		23,0	6,0	18,0	14,1	27,7
150,0	14,0		22,0	5,0	16,0	14,3	12,0
125,0	18,0		21,5	4,0	13,0	11,8	10,2
200,0	26,0		21,0	3,0	10,0	11,3	11,5
175,0	26,0	4,5	20,0	7,0	18,0	9	-
150,0	10,0		19,0	6,0	16,0	17,9	10,6
125,0	22,0		18,0	5,0	15,0	18	16,7
200,0	14,0		17,5	4,0	13,0	13,8	5,6
100,0	18,0		17,0	3,0	10,0	9,6	4,2

Всі отримані моделі є адекватними та мають ступені відповідності до істинної залежності у межах від 85,0 % до 94,0 %, загальний вигляд яких наведено у роботах [28], [33], [34]. За даними регресійними моделями встановлено, що максимальні значення H , $H_{зТВ}$ та мінімальні значення b та δ досягаються найчастіше у частотних діапазонах від 2,5 Гц до 3,0 Гц та від 4,0 Гц до 4,5 Гц (рис. 5). Співвідношення факторів сили струму I_n та швидкості V_n визначає значення амплітуди A та можливість формування максимального значення H або мінімальних значень b і δ у двох частотних діапазонах на одному технологічному режимі.

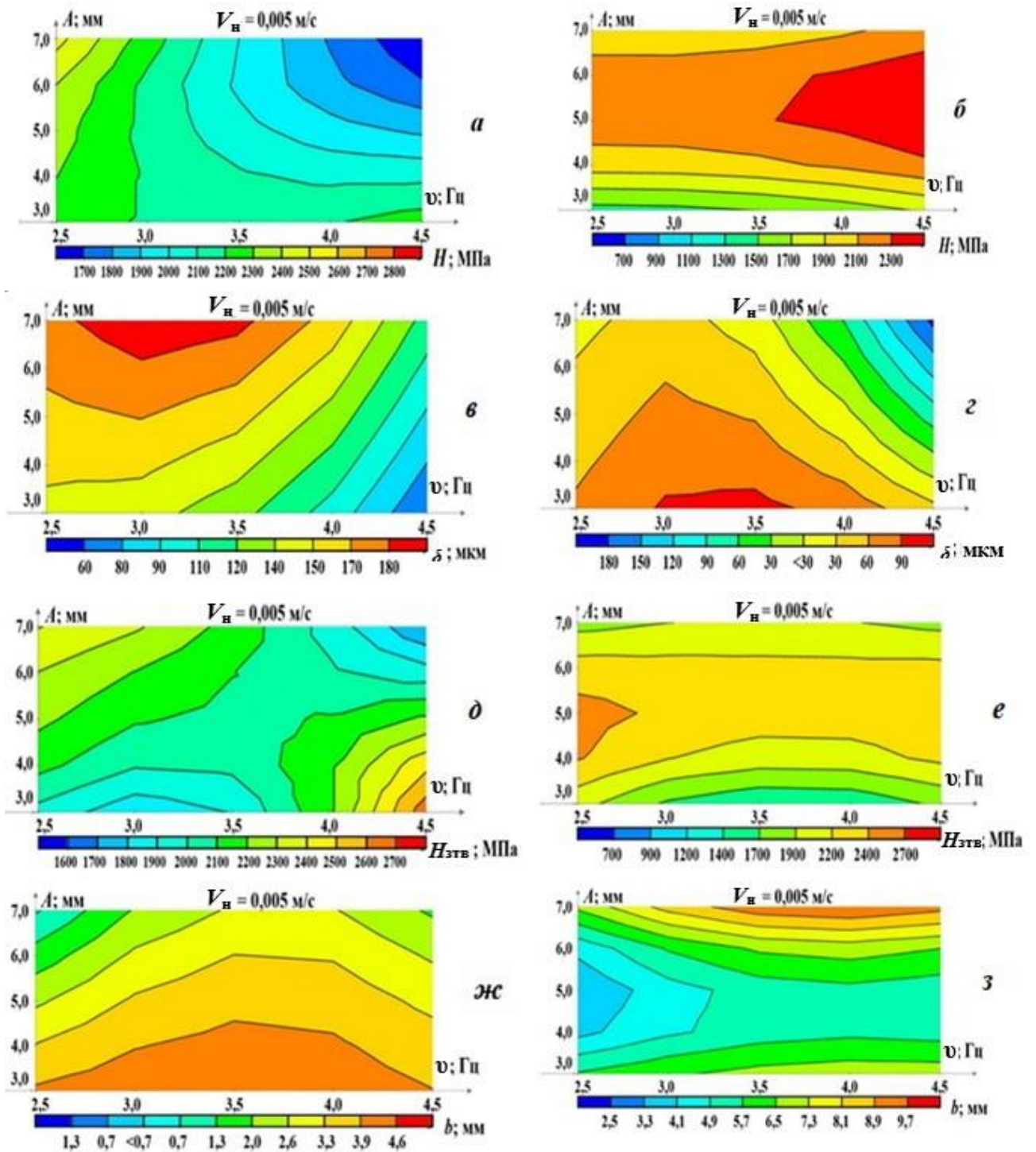


Рисунок 5 – Характерні контурні графіки отримані за регресійними моделями за $V_H=18,0$ м/год=0,005 м/с для:

твердості наплавленого металу H за: $a - I_H = 100,0$ А, $б - I_H = 200,0$ А;

розміру кристаліту δ за: $в - I_H = 100,0$ А, $г - I_H = 200,0$ А;

ЗТВ основного металу $H_{ЗТВ}$ за: $д - I_H = 100,0$ А, $е - I_H = 200,0$ А;

висоти наплавленого валику b за: $ж - I_H = 100,0$ А, $з - I_H = 200,0$ А

У порівнянні з валиками, що отримані без коливань показники H , $H_{ЗТВ}$, b , δ змінюються наступним чином: значення H збільшується приблизно в діапазоні від

7,0 % до 53,0 %; значення $H_{зТВ}$ – від 27,0 % до 144,0 %; значення W – від 60,0 % до 80,0 %; значення b зменшується приблизно у діапазоні від 1,2 разів до 6,4 разів; значення δ – від 2,8 разів до 6,1 разів.

Відповідно до регресійних та аналітичної моделей практично отримано валик з оптимальними параметрами: $H=2600,0$ МПа, $H_{зТВ}=2800,0$ МПа, $W=8,3$ мм, $b\approx 3,0$ мм за режимом наплавлення: $I_H=100,0$ А; $V_H=26,0$ м/год: $\nu=2,5$ Гц; $A=7,0$ мм.

У п'ятому розділі наведено аналіз впливу технологічних параметрів режиму наплавлення на середній розмір кристаліту (зерна) та твердості наплавленого металу, характерні типи мікроструктури та характерні структурні складові, загальний опис практичного впровадження щодо відновлення деталей поліграфічних пресів способом впливу низькочастотними механічними коливаннями опірної плити на структуру та властивості наплавленого на її поверхню дуговим методом металу.

Порівняльні оцінки середніх величин розміру кристаліту наплавленого металу, що отриманий без впливу коливань, відносно мінімального розміру кристаліту з аналогічним технологічним режимом, але з коливаннями деталі за відповідними контурними графіками (табл. 2). Відповідно до цієї таблиці побудована порівняльна діаграма залежності розміру кристаліту відносно параметру, що характеризує відношення сили струму до швидкості наплавлення (рис. 6).

Таблиця 2 – Співвідношення середніх значень умовного діаметру зерна наплавленого металу валиків, отриманих без коливань $\delta_{ср}$ та мінімального значення умовного діаметру наплавленого металу валиків, отриманих з коливаннями $\delta_{ср}^{кол}$ за відповідними контурними графіками

Номер режиму наплавлення з коливаннями; без коливань*	Струм наплавлення I_H , А	Швидкість наплавлення V_H , м/год	Параметр $\frac{I_H}{V_H}$, А·год/м	Середній розмір $\delta_{ср}$ кристаліту без впливу коливань (*) за табл. 5.1, мкм	Мінімальний розмір кристаліту $\delta_{ср}^{кол}$ за відповідними контурними графіками
1; 1*	100,0	10,0	10,0	183,0	30,0
7; 7*	125,0	14,0	9,0	107,0	30,0
13; 13*	150,0	18,0	8,3	71,0	20,0
19; 19*	175,0	22,0	8,0	85,0	30,0
25; 25*	200,0	26,0	7,7	42,0	50,0

З аналізу даних таблиці 2 та діаграми (рис.6) видно, що зі збільшенням параметру $\frac{I_H}{V_H}$ збільшується і різниця між значеннями розміру кристаліту наплавленого металу, отриманого без- та з використанням коливань. Тобто, вплив

коливань даного типу щодо диспергування мікроструктури наплавленого металу є найбільш ефективним за значеннями сили струму наплавлення в діапазоні від 100,0 А до 175,0 А. За струмом наплавлення у 200,0 А та швидкості не менше за 26,0 м/год спостерігається зворотній ефект – розмір кристаліту буде більше за умови використання коливань. Швидкість наплавлення щодо зменшення розміру кристаліту змінюється у досить широких межах: від 10,0 м/год до 22,0 м/год. Отже, основним параметром щодо формування розміру кристаліту є співвідношення сили струму та швидкості наплавлення.

Середній розмір кристаліту без $\delta_{\text{ср}}^{\text{б/к}}$ та

під впливом коливань $\delta_{\text{ср}}^{\text{кол}}$, мкм

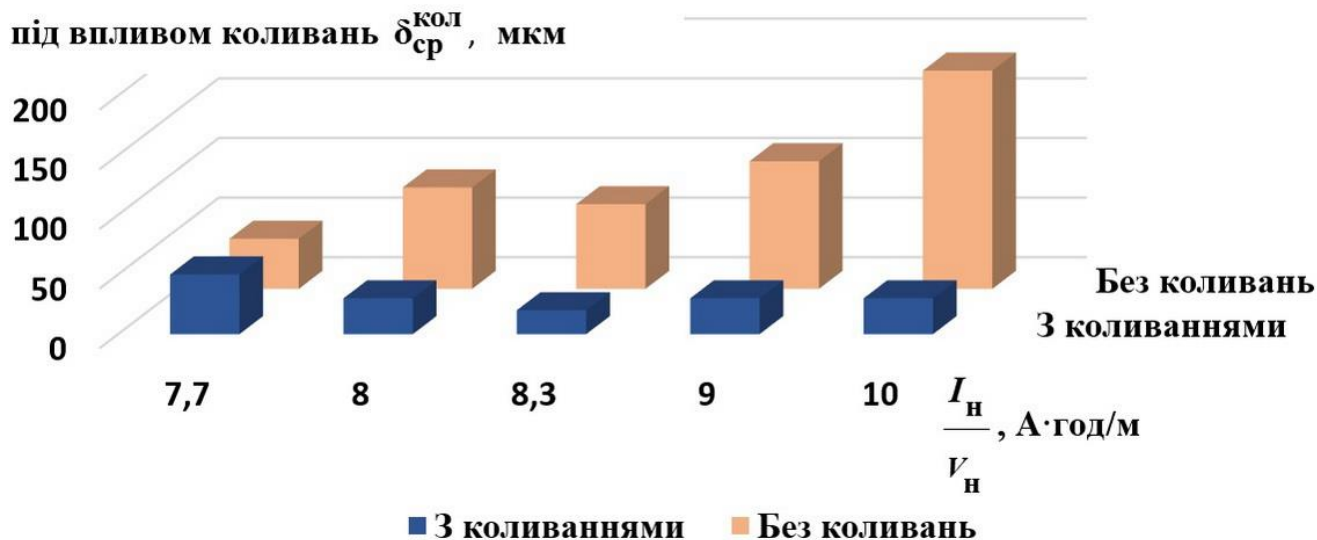


Рисунок 6 – Діаграма співвідношення середніх значень умовного діаметру зерна наплавленого металу валиків, отриманих без коливань $\delta_{\text{ср}}$ та мінімального значення умовного діаметру наплавленого металу валиків, отриманих з коливаннями $\delta_{\text{ср}}^{\text{кол}}$ за відповідними контурними графіками

З таблиці 2 можна зробити висновок: розмір кристаліту завдяки застосуванню коливань можна зменшити від 2,8 разів до 6,1 разів у порівнянні з аналогічними режимами без їх впливу. За експериментальними даними середніх значень твердості та відповідно діаметрів умовного зерна наплавленого металу (табл. 3) побудовано діаграму (рис. 7). Із загального аналізу якої видно, що коливання даного типу найбільш ефективні у діапазоні струмів від 100,0 А до 125,0 А відповідно до порівняння величин твердості наплавленого металу та розміру кристаліту зразків, отриманих без та з коливальним впливом.

У діапазоні струмів від 150,0 А до 200,0 А позитивний вплив коливань нівелюється: на режимах 13, 19, 25 значення твердості наплавленого металу майже однакові, а розмір кристаліту є значно меншим саме у тих зразків, що отримані без впливу коливань.

Найбільше середнє значення твердості 2700,0 МПа з мінімальним значенням розміру зерна 40,5 мкм отримано на режимі: $I_n=125,0$ А, $V_n=26,0$ м/год, $\nu=2,5$ Гц, $A=6,0$ мм (режим 10).

Таблиця 3 – Середнє значення ширини кристаліту мікроструктури δ_{cp} та середнє значення твердості наплавленого металу H_{cp} . * позначені режими наплавлення без впливу коливань

№ зразка	Сила струму наплавлення I_n ;	Швидкість наплавлення; V_n ; м/год	Частота коливань; ν ; Гц	Амплітуда коливань; A ; мм	δ_{cp} ; мкм	H_{cp} , МПа
1*	100,0	10,0	4,0	7,0	182,66	1 675,0
1	100,0	10,0	4,0	7,0	78,33	1 916,66
2	100,0	14,0	3,5	6,0	89,0	2 016,66
3	100,0	18,0	4,5	3,0	79,0	2 220,0
4	100,0	22	2,5	4,0	39,33	2263,33
5	100,0	26,0	3,0	5,0	47,66	2 106,66
6	125,0	10,0	3,5	3,0	75,0	2 070,0
7*	125,0	14,0	3,0	7,0	107,0	1 666,66
7	125,0	14,0	3,0	7,0	79,66	2 196,66
8	125,0	18,0	4,0	4,0	68,0	2 260,0
9	125,0	22,0	4,5	5,0	81,0	2 370,0
10	125,0	26,0	2,5	6,0	40,5	2 700,0
11	150,0	10,0	4,5	6,0	93,0	2 173,33
12	150,0	14,0	4,0	5,0	91,33	2290,0
13*	150,0	18,0	2,5	7,0	71,33	2 143,33
13	150,0	18,0	2,5	7,0	39,33	2 113,33
14	150,0	22,0	3,0	3,0	95,33	2 236,66
15	150,0	26,0	3,5	4,0	73,0	2 530,0
16	175,0	10,0	3,0	4,0	141,66	2 060,0
17	175,0	14,0	2,5	3,0	43,66	1 843,33
18	175,0	18,0	3,5	5,0	104,0	2 153,33
19*	175,0	22,0	4,0	6,0	85,2	2 220,0
19	175,0	22,0	4,0	6,0	109,33	2 263,33
20	175,0	26,0	4,5	7,0	63,0	2 130,0
21	200,0	10,0	2,5	5,0	113,65	1 926,66
22	200,0	14,0	4,5	4,0	66,1	2 243,33
23	200,0	18,0	3,0	6,0	129,66	2 203,33
24	200,0	22,0	3,5	7,0	100,1	2 133,33
25*	200,0	26,0	4,0	3,0	42,33	2 000,0
25	200,0	26,0	4,0	3,0	79,33	1 956,66

На деяких технологічних режимах наплавлення спостерігається збільшення твердості разом зі збільшенням розміру кристаліту:

- $I_n=125,0$ А, $V_n=22,0$ м/год, $\nu=4,5$ Гц, $A=5,0$ мм (режим 9) – 2370,0 МПа при $\delta=81,0$ мкм;

- $I_H=150,0$ А, $V_H=72,0$ м/год, $\nu=3,5$ Гц, $A=4,0$ мм (режим 15) – 2530,0 МПа при $\delta=73,0$ мкм.

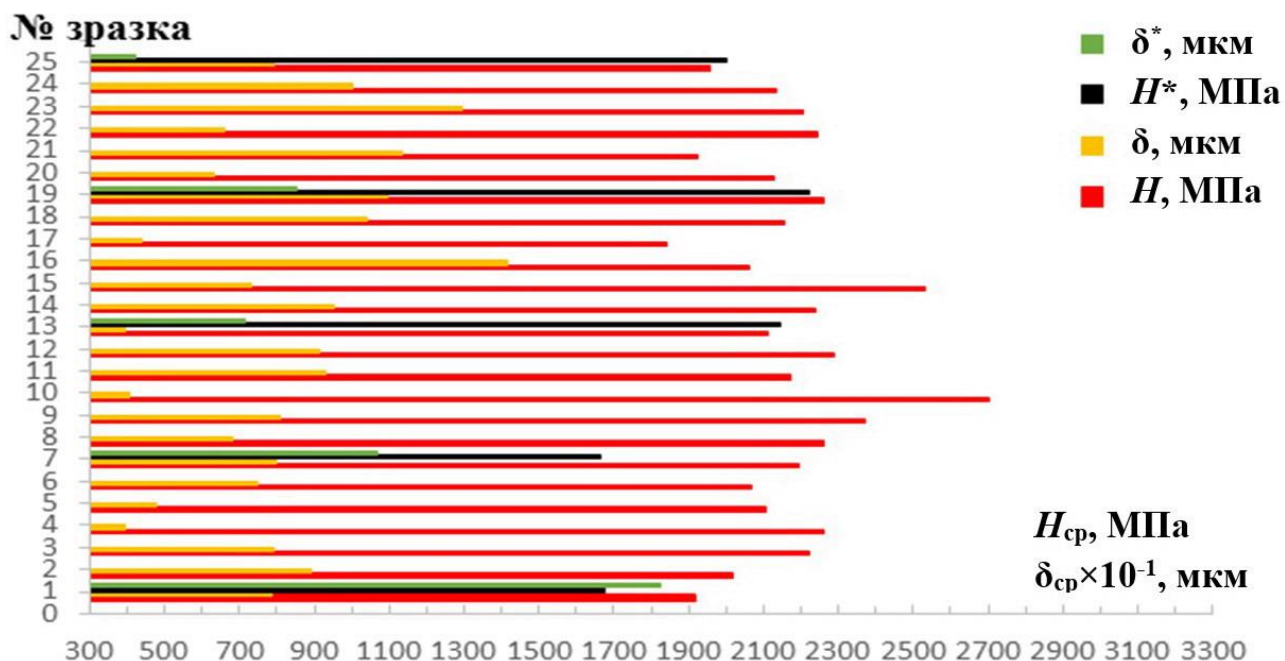


Рисунок 7 – Порівняльна діаграма середніх значень ширини кристалітів мікроструктури δ та твердості наплавленого металу H . (* – величини, що відносяться до режимів наплавлення без впливу коливань)

Даний факт свідчить про те, що величина твердості залежить не лише від ступеня диспергування мікроструктури наплавленого металу, але і від твердості окремих структурних складових мікроструктури. Таким чином величина твердості формується завдяки 2 факторам: 1 – розмір кристаліту, 2 – твердість структурних складових мікроструктури, що підтверджено дослідженнями мікроструктури наплавленого металу.

Зразки які отримані без впливу коливань мають класичну ферито–перлітну структуру з досить широкими литими кристалітами, а також з феритними прошарками по границям литих кристалітів, що являють собою виділення полігонального фериту (рис. 8, а). Вплив коливань значно покращує мікроструктуру, спостерігаються різні форми фериту (рис. 8, б): полігональний, полідрічний, пластинчастий ферит з впорядкованою вторинною фазою. Окрім того, спостерігається голчастий ферит у центрі литих кристалітів, а також невеликі ділянки перліту. Голчастий ферит супроводжується виділенням МАК – фази, що також сприяє збільшенню твердості та ударної в’язкості – відповідно до даних робіт інших авторів. Взагалі, спостерігається загальна тенденція –**найбільший вплив на мікроструктуру відбувається за підвищених значень сили струму і швидкості наплавлення, особливо швидкості наплавлення зі збільшенням амплітуди й одночасним зменшенням частоти коливань.** Найкращою структурою, яка отримана з використанням коливань є суміш верхнього та

нижнього бейніту (рис. 8, *в*) у поєднанні з мартенситно–бейнітною мікроструктурою ЗТВ, що отримана на режимі $I_H=125,0$ А; $V_H=26,0$ м/год; $A=6,0$ мм; $\nu=2,5$ Гц.

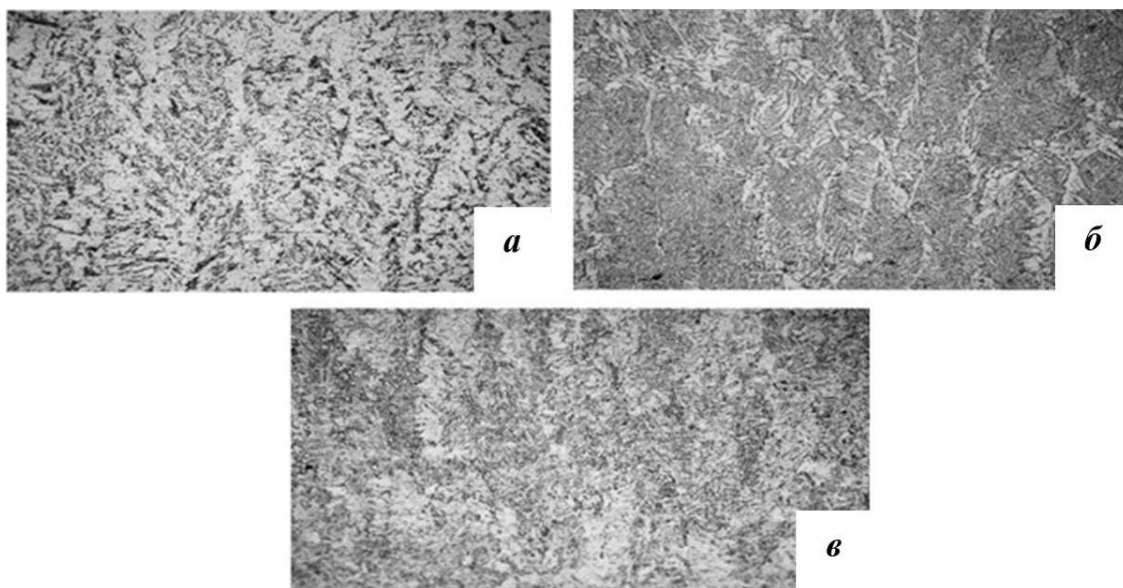


Рисунок 8 – Характерний вид мікроструктури наплавленого металу валиків ($\times 200$), що отримані наплавленням: *а* – без впливу коливань; *б*, *в* – з коливаннями

На основі отриманих ефективних діапазонів зміни основних параметрів наплавлення з використанням гармонійних коливань зварювальної ванни: амплітуди від 6,0 мм до 7,0 мм, частоти від 2,5 Гц до 3,0 Гц та від 4,0 Гц до 4,5 Гц, струму наплавлення від 100,0 А до 125,0 А, швидкості наплавлення від 22,0 м/год до 26,0 м/год, визначено оптимальний режим наплавлення дротом марки Нп-30ХГСА діаметром 1,2 мм на зразки зі сталі Ст3сп за критерієм твердості наплавленого металу: $I_H=100,0$ А, $V_H=22,0$ м/год, $\nu=2,5$ Гц, $A=7,0$ мм. Наплавлений за даним режимом метал має середнє значення мікротвердості $H=4401,0$ МПа, мікротвердість металу ЗТВ $H_{ЗТВ}=3150,0$ МПа, що на 23,55 % для наплавленого металу та на 2,6 % для металу ЗТВ вище за мікротвердість металу зразків, отриманих без коливального впливу за аналогічними за силою струму та швидкості наплавлення режимами.

Метод покращення мікроструктури наплавленого металу, що досліджується у даній дисертації був впроваджений для відновлення робочих поверхонь опорних плит гідравлічних пресів, що використовуються у поліграфічному виробництві. Матеріалами, що підлягають обтисканню, окрім паперу, є натуральна та штучна шкіра, пластик, тканина та металева фольга. Плити, де відбувається обтиск, зазвичай мають розмір до 330,0 мм \times 440,0 мм \times 10,0 мм. Зусилля притиску плит знаходиться в діапазоні від 4,0 кН до 49,0 кН, робоча температура – від 0 °С до 350,0 °С. Матеріал плит: Ст3, Ст15, Ст20. Основним видом дефекту таких плит є порушення площинності, що обумовлює необхідність відновлення геометричних розмірів та площинності цих пластин в тому числі і методом дугового наплавлення. Застосування способу впливу низькочастотних механічних коливань пласкої деталі

на структуру та властивості наплавленого дуговим методом металу збільшить ефективність відновлення, що полягає у підвищенні твердості наплавленого шару та збільшенню площі наплавлення за 1 прохід. Послідовність технологічних операцій була наступною:

- оглядають деталь і зачищають поверхню, що наплавляється від мастила, іржі і бруду до металевого блиску;
- деталь розрізається навпіл з розміром кожної частини 165,0 мм × 440,0 мм × 10,0 мм;
- обидві частини пластини піддаються рекристалізаційному відпалу у печі за режимом: швидкість нагріву – 12,0 °С/хв, температура витримки – 620,0 °С, витримка – 30,0 хв, час охолодження – 6,0 годин;
- деталь закріплюється на рухомому столі та затискається по периметру мідними накладками товщиною 12,0 мм задля запобіганню стікання рідкого металу. Висота мідних накладок була 18,0 мм (рис. 9, а);

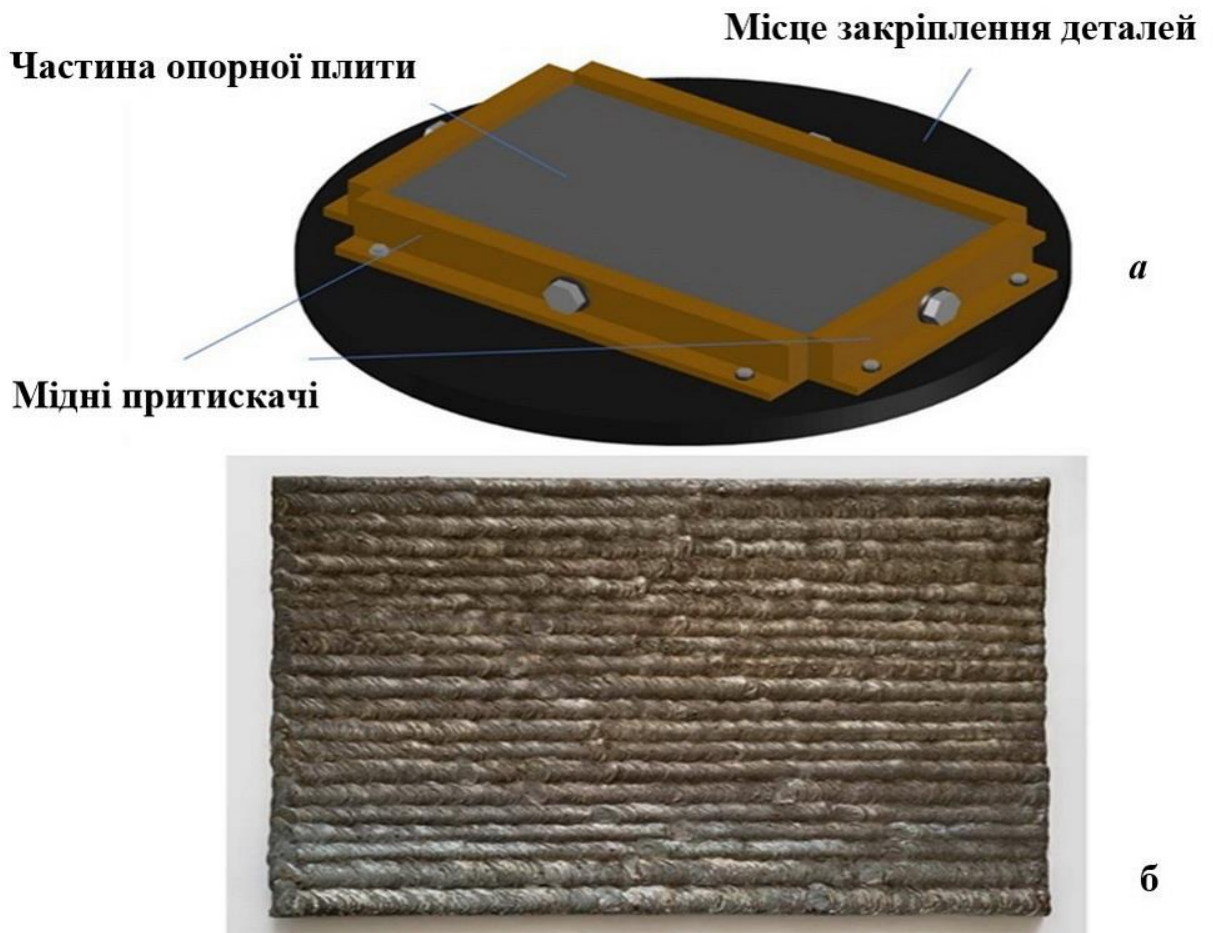


Рис. 9 – а – Загальна схема закріплення частини опорної плити для наплавлення із запобіганням розтікання рідкого металу з використанням мідних притискачів, б – загальний вигляд опорної плити після наплавлення та зварювання

- після наплавлення одного валику деталь охолоджувалась до кімнатної температури;
- наплавлення здійснюється по всій площі деталі. Вздовж лінії різку наплавлення не здійснюється;
- після наплавлення обидві частини зварюються по лінії різку ручним дуговим зварюванням за сили струму $165,0 \pm 5,0$ А, електроди марки МР-3 діаметром 5,0 мм.
- наплавлення валиків на поверхню пластини здійснювалось описаним вище методом за наступним технологічним режимом: $I_n=100,0$ А, $V_n=26,0$ м/год, $\nu=2,5$ Гц, $A=7,0$ мм з рекомендованою величиною перекриття валиків по ширині в межах від 1/3 до 1/2 ширини (рис. 9, б).

Вимірювання твердості відновленої поверхні плити було здійснено переносним твердоміром ТКР-35. Результати цього вимірювання склали 2500,0 МПа - 2600,0 МПа, що збігалось з вимірами твердості на зазначеному дослідному зразку, отриманому на режимі $I_n=125,0$ А, $V_n=26,0$ м/с, $\nu=2,5$ Гц, $A=6,0$ мм.

Після механічної обробки товщина наплавленого шару склала 1,8 мм, що відповідало 2-м міжремонтним циклам роботи з проміжною переточкою.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

1. Удосконалено технологію дугового наплавлення плавким електродом в CO_2 з використанням механічних низькочастотних коливань деталі, що наплавляється. Запропоновано даний тип коливань здійснювати за траєкторією дуги окружності, що відрізняє їх від інших типів механічного періодичного впливу задіяних у інших дослідженнях. Наплавлення здійснювалось зварювальним дротом діаметром 1,2 мм типу Св-08Г2С. Даним способом вдалось зменшити висоту валику в діапазоні від 1,2 разів до 6,4 разів та збільшити ширину валика в діапазоні від 1,3 разів до 1,8 разів у порівнянні з наплавленням на аналогічних технологічних режимах без коливань.
2. Розроблено конструкцію дослідно-промислового обладнання для дугового наплавлення з використанням механічних низькочастотних гармонійних коливань зварювального виробу, що здійснюються за траєкторією дуги окружності з частотою у діапазоні від 2,5 Гц до 4,5 Гц та амплітудою – від 3,0 мм до 7,0 мм.
3. На підставі обробки емпіричних даних методами регресійного аналізу на основі повнофакторного експерименту за планом експерименту «латинський квадрат» розроблено математичні моделі у вигляді поліномів другого та третього ступенів, які застосовні в діапазоні струмів наплавлення від 100,0 А до 200,0 А, швидкості наплавлення – від 10,0 м/год до 26,0 м/год, частоті коливань – від 2,5 Гц до 4,5 Гц, амплітуді – від 3,0 мм до 7,0 мм.
4. Встановлено, що твердість наплавленого металу можна збільшити в діапазоні від 3,0 % до 53,0 %, металу ЗТВ – від 27,0 % до 144,0 % у порівнянні з аналогічними технологічними режимами наплавлення без коливань. Встановлено оптимальний, за критеріями твердості наплавленого металу і оптимальних значень геометричних

розмірів наплавлених валиків, режим наплавлення: струм наплавлення 100,0 А, швидкість наплавлення 26,0 м/год, частота 2,5 Гц, амплітуда 7,0 мм.

5. Встановлена можливість збільшення диспергування мікроструктури наплавленого металу за рахунок впливу коливань даного типу. Методами регресійного аналізу показано, що зменшити розмір кристаліта можливо в діапазоні від 2,8 разів до 6,1 разів (приблизно від 20,0 мкм до 30,0 мкм – бал (номер) зерна 5, 6 за ДСТУ 8972:2019) у порівнянні із зразками, що отримані без коливального впливу (приблизно від 70,0 мкм до 180,0 мкм – бал зерна від 1 класу до 4 класу). Інші розповсюджені способи отримання наплавленого металу типу 08Г2С забезпечують ступень диспергування в межах від 30,0 мкм до 80,0 мкм (клас зерна від 4 класу до 6 класу), що більше від розміру зерна наплавленого металу, отриманого способом, що досліджується у даній дисертаційній роботі в межах від 1,5 разів до 2,7 разів.

6. Встановлені основні типи структурних складових мікроструктури, що сприяють підвищенню твердості в діапазоні від 2500,0 МПа до 2700,0 МПа: голчастий, пластинчатий ферит в наплавленому металі, а у металі ЗТВ – від 2500,0 МПа до 3200,0 МПа: пластинчатий ферит та сорбітоподібний перліт. Мікроструктура, що відповідала зразку з максимальним значенням твердості у 2700,0 МПа є сумішшю верхнього та нижнього бейніту у наплавленому металі, а у металі ЗТВ мікроструктура-мартинситно-бейнітна.

7. Встановлена загальна тенденція: найбільш ефективний вплив на мікроструктуру відбувається за умови підвищення технологічних параметрів режиму: сили струму та, особливо, швидкості наплавлення зі збільшенням амплітуди й одночасним зменшенням частоти коливань, що суттєво зменшує рівень введеної питомої енергії під час наплавлення в межах від 97,529 кДж/м до 9,726 кДж/м в порівнянні з режимами без впливу коливань, що характеризувалися значеннями питомої енергії за діапазоном від 267,0 кДж/м до 1640,0 кДж/м, що свідчить про зменшення теплового впливу на основний метал в межах від 16,8 разів до 27,5 разів.

8. Встановлено вплив механічних коливань на величину часу горіння дуги, що характеризує частоту перенесення електродного металу в зварювальну ванну. Показано, що при частоті 4,5 Гц час горіння дуги збільшується приблизно на 45,0 % при амплітуді 3,0 мм та на 63,0 % при амплітуді 7,0 мм. Розроблено математичну модель, що дозволяє оцінити величину періоду горіння дуги в залежності від параметрів коливань.

9. На підставі результатів технологічних досліджень дугового наплавлення з низькочастотними коливаннями означеного типу плоскої деталі на структуру та властивості наплавленого металу, було запроваджено технологію відновлення поверхонь опорних плит гідравлічних пресів. Відновлені плити знаходяться в дослідній експлуатації. Від замовника отриманий відповідний акт впровадження запропонованого методу наплавлення.

10. За результатами дослідно-практичних робіт за тематикою дисертаційної роботи у співавторстві отримано 3 Патенти України на корисну модель: "Спосіб електродугового наплавлення з керуванням формою поверхні

валика" (№ 120877), "Установка для автоматичного дугового наплавлення зовнішніх поверхонь деталей обертання" (№ 112270), "Спосіб забезпечення суцільності шару, наплавленого електродуговим зварюванням по гвинтовій лінії" (№ 113943).

ПЕРЕЛІК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ

1. Lebedev V.O., Novykov S.V. Influence of Weld Pool Low-Frequency Oscillations on the Formation of Crystallites' Size and Welded Metal Microstructure. *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.* 2022. No 3 (44), P. 419-430. doi: <https://doi.org/10.15407/mfint.44.03.0419>
2. Novykov S.V. Investigation of the influence of low-frequency harmonic oscillations on deposited metal. *Kovove Mater.* 2022. No. 5 (60), P. 315-326. doi: <https://doi.org/10.31577/km.2022.5.315>
3. Лебедев В. А., Новиков С. В.. Определение параметров процесса дуговой наплавки при программно изменяемых параметрах механических колебаний. *Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні.* 2016. № 1, С. 100-105.
4. Лебедев В. А., Яровицин А. В., Новиков С. В.. Способы формирования игольчатого феррита в металле наплавленного валика (краткий анализ). *Вісник приазовського державного технічного університету. Серія: Технічні науки.* 2016. Вип. 32. С. 113-117.
5. Лебедев В. А., Новиков С. В. Анализ управления формированием наплавленной структуры металла шва за счёт механического воздействия на сварочную ванну и сварочный инструмент. *Сварка и родственные технологии: перспективы развития: матер. 17 – ї Міжнар. ІV наук – техн. конф., м. Краматорськ, 04-08 жовтня 2016 р. / ДДМА, Краматорськ, 2016. С.90-92.*
6. Лебедев В. А., Новиков С. В.. Управление формированием структуры шва при воздействии низкочастотными механическими колебаниями на расплав сварочной ванны (обзор). *Збірник наукових праць НУК.* 2017. № 3, С. 21-28. doi: <https://doi.org/10.15589/jnn20170303>
7. Лебедев В. А., Новиков С. В., Лой С. А. Аналитическое определение частоты коротких замыканий дуги при наплавке в углекислом газе с механическими колебаниями сварочной ванны. *Journal of Engineering Sciences.* 2017. № 1 (4), С. В6–В10. doi: [https://doi.org/10.21272/jes.2017.4\(1\).b2](https://doi.org/10.21272/jes.2017.4(1).b2)
8. Лебедев В. А., Новиков С. В. Аналитическое определение скорости наплавки в условиях внешних механических колебаний сварочной ванны и инструмента. *Инженерия поверхности и реновация изделий: матер. 17 – ї Міжнар. наук – техн. конф., Одеса-Київ, 29 травня-02 червня 2017 р. / Асоціація технологів - машинобудівників України, Київ, 2017. С.252-254.*
9. Lebedev V. A., Novykov S. V. The hypothesis of formation of the structure of surfaced metal at the surfacing based on the application of the prognostic algorithm of control the electrode wire speed. *Journal of Engineering Sciences.* 2017. № 2 (4), С. В15–В18. doi: [https://doi.org/10.21272/jes.2017.4\(2\).b15](https://doi.org/10.21272/jes.2017.4(2).b15)

10. Lebedev V., Novykov S. Energy and resource saving at arc welding with a controlled oscillation of welding pool. *9th International Conference of Young Scientists on Welding and Related Technologies: proceedings*, Kyiv, 23-26 May 2017 / DIA Ltd., Kyiv, 2017. P. 81-83.
11. Лебедев В. А., Новиков С. В., Драган С. В., Симутенков И. В. Математическая модель процессов сварки и наплавки с управляемыми изменениями вылета электродной проволоки. *Збірник наукових праць НУК*. 2017. № 1, С. 48–54. doi: <https://doi.org/10.15589/jnn20170108>
12. Лебедев В. А., Симутенков И. В., Драган С. В., Жук Г. В., Новиков С. В. Автоматическая наплавка под флюсом с поперечной высокочастотной вибрацией электродной проволоки. *Вібрації в техніці та технологіях: збірник тез та доповідей XVI Міжнар. наук – техн. конф., м. Вінниця, 26-28 жовтня 2017 р. / ВНТУ, Вінниця, 2017. С.40-42.*
13. Лебедев В. А., Симутенков И. В., Драган С. В., Жук Г. В., Новиков С. В. Устройство для автоматической наплавки под флюсом с вибрационным воздействием на электродную проволоку. *Вібрації в техніці та технологіях: збірник тез та доповідей XVI Міжнар. наук – техн. конф., м. Вінниця, 26-28 жовтня 2017 р. / ВНТУ, Вінниця, 2017. С.71-73.*
14. Лебедев В. А., Новиков С. В., Жук Г. В. Расчёт скорости наплавки в условиях аддитивного воздействия колебания сварочного инструмента и вибрации сварочной ванны. *Вібрації в техніці та технологіях: збірник тез та доповідей XVI Міжнар. наук – техн. конф., м. Вінниця, 26-28 жовтня 2017 р. / ВНТУ, Вінниця, 2017. С.81-84.*
15. Лебедев В. А., Новиков С. В. Разработка методов снижения степени разбрызгивания металла при наплавке в среде углекислого газа с поперечными колебаниями сварочной ванны. *Інновації в суднобудуванні та океанотехніці: матеріали VIII міжнар. наук – техн. конф., м. Миколаїв, 11-13 жовтня 2017 р. / Нац. ун-т. кораблебуд. ім. адмірала Макарова, Миколаїв, 2017. С.160-162.*
16. Лебедев В. А., Новиков С. В. Расчёт скорости наплавки в условиях аддитивных колебаний сварочного инструмента и ванны. *Перспективна техніка і технології – 2017: матеріали XIII Міжнар. наук-практ. конф. молодих учених, аспірантів і студентів, м. Миколаїв, 27-29 вересня 2017 р. / М-во освіти і науки України, Миколаїв. нац. аграрний ун-т, Миколаїв, 2017. С.53-61.*
17. Лебедев В. А., Жук Г. В., Драган С. В., Симутенков И. В., Новиков С. В. Математическое обоснование дозированной импульсной подачи электродной проволоки при механизированной сварке в защитных газах. *Shipbuilding & Marine Infrastructure*. 2018. № 2(10), С. 158-167.
18. Лебедев В. А., Соломийчук Т. Г., Новиков С. В. The influence of weld pool harmonic oscillations by frequency up to 4,5 Hz onto the metal structure formation of weld bead and heat affected zone. *Shipbuilding & Marine Infrastructure*. 2018. № 2(10), С. 168-172.
19. Lebedev V., Novykov S. Analytical determination of increasing the surfacing bead width in depend on the amplitude-frequency characteristics of the welded bath vibration.

- Modern Questions of Production and Repair in Industry and in Transport: materials of the 18th International Scientific and Technical Seminar, Brno, 10-16 February 2018* / Асоціація технологів-машинобудівників України, Київ, 2018. Р. 165-169.
20. Lebedev V. A., Solomiichuk T. G., Novykov S. V. Study of a Welding Pool Harmonic Oscillations Influence on the Welded Metal Hardness and Weld Bead Width. *Journal of Engineering Sciences*. 2019. № 1 (6), С. С16–С21. doi: [https://doi.org/10.21272/jes.2019.6\(1\).c4](https://doi.org/10.21272/jes.2019.6(1).c4)
21. Лебедев В. А., Драган С. В., Жук Г. В., Новиков С. В., Симутенков И. В. Применение импульсных воздействий при дуговой сварке плавящимся электродом в среде защитных газов (обзор). *Автоматическая сварка*. 2019. № 8, С.30-40. doi: <https://doi.org/10.15407/as2019.08.04>
22. Лебедев В. А., Новиков С. В., Соломийчук Т. Г. Влияние гармонических колебаний сварочной ванны частотой до 5 Гц на величину зерна металла наплавленного. *Modern Questions of Production and Repair in Industry and in Transport: materials of the 19th International Scientific and Technical Seminar, Kosice, 18-23 February 2019* / Асоціація технологів-машинобудівників України, Київ, 2019. Р. 102-105.
23. Лебедев В. А., Новиков С. В., Соломийчук Т. Г. Определение твердости наплавленного металла и металла зоны термического влияния (ЗТВ) при низкочастотных колебаниях сварочной ванны. *Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні*. 2019. № 2, С. 54-61. doi: <https://doi.org/10.15588/1607-6885-2019-2-9>
24. Лебедев В. А., Новиков С. В. Колебатель изделия для автоматической дуговой наплавки. *Технічні науки та технології*. 2020. № 2 (20), С. 11-21. doi: [https://doi.org/10.25140/2411-5363-2020-2\(20\)-11-21](https://doi.org/10.25140/2411-5363-2020-2(20)-11-21)
25. Лебедев В. А., Новиков С. В., Халимовский А. М. Влияние параметров колебаний сварочной ванны на частоту переноса электродного металла. *Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем: матеріали Х Міжнар. наук-практ. конф., Т.2, м. Чернігів, 29-30 квітня 2020 р.* / Національний університет «Чернігівська політехніка» [та ін.], Чернігів, 2020. С.43-44.
26. Лебедев В. А., Новиков С. В. Моделирование величин твёрдости наплавленного металла и металла ЗТВ при низкочастотных колебаниях сварочной ванны. *Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем: матеріали Х Міжнар. наук-практ. конф., Т.3, м. Чернігів, 23-25 вересня 2020 р.* / Національний університет «Чернігівська політехніка» [та ін.], Чернігів, 2020. С.37- 38.
27. Новиков С. В. Дуговое наплавления у вуглекислому газі з використанням механічних низькочастотних гармонійних коливань зварювальної ванни. Доповідь. *Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем: матеріали ХІ Міжнар. наук-практ. конф., м. Чернігів, 26-27 травня 2021 р.* / *Витяг з протоколу пленарного засідання №2 для доповідей за закінченими дисертаційними роботами.*
28. Лебедев В. О., Новиков С. В. Установка для наплавления та зварювання в середовищі CO₂ з механічними поперечними гармонічними коливаннями

зварювальної ванни. *Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем*: матеріали XII міжнар. наук-практ. конф. Т.2, м. Чернігів, 26-27 травня 2022 р. / Національний університет «Чернігівська політехніка» [та ін.], Чернігів, 2022. С.42-43.

29. Лебедев В. О., Новиков С. В. Практичне застосування електродугового автоматичного наплавлення з керованими коливаннями виробу. *Важке машинобудування. Проблеми та перспективи розвитку*: матеріали XX міжнар. наук-техн. конф., Краматорськ-Тернопіль, 01-03 вересня 2022 р. / ДДМА, Краматорськ, 2022. С.132-133.

30. Лебедев В., Новиков С. Аналіз впливу низькочастотних коливань зварювальної ванни на частоту перенесення електродного металу. *Міцність і довговічність сучасних матеріалів та конструкцій*: праці Міжнар. наук-техн. конф., м. Тернопіль, 10-11 листопада 2022 р. / Тернопіль: ФОП Паляниця В. А., Тернопіль, 2022. С. 122-124.

31. Лебедев В. О., Драган С. В., Галь А. Ф., Сімутенков І. В., Новиков С. В. Спосіб забезпечення суцільності шару, наплавленого електродуговим зварюванням по гвинтовій лінії. Патент України на корисну модель № 113943. Бюлетень винаходу. №4. Дата публікації 27.02.17.

32. Лебедев В. О., Драган С. В., Галь А. Ф., Сімутенков І. В., Новиков С. В. Установка для автоматичного дугового наплавлення зовнішніх поверхонь деталей обертання. Патент України на корисну модель № 112270. Бюлетень винаходу. №23. Дата публікації 12.12.16.

33. Лебедев В. О., Драган С. В., Галь А. Ф., Сімутенков І. В., Новиков С. В. Спосіб електродугового наплавлення з керуванням формою поверхні валика. Патент України на корисну модель № 120877. Бюлетень винаходу. №22. Дата публікації 27.11.17.

АНОТАЦІЯ

Новиков С.В. Дугове наплавлення з низькочастотними коливаннями плоскої деталі. – Рукопис. Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.03.06 «Зварювання та споріднені процеси і технології». Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ, 2025.

Дисертаційна робота присвячена дослідженню особливостей технологічного впливу поперечних механічних коливань на процес дугового наплавлення в середовищі вуглекислого газу. Коливання являють собою періодичний рух за траєкторією по дотичній до дуги окружності зразка, що наплавляється. Частотний діапазон коливань є від 2,5 Гц до 4,5 Гц, амплітудний – від 3,0 мм до 7,0 мм. Дугове наплавлення здійснюється аналогом суцільного дроту Св-08Г2С діаметром 1,2 мм на плоскі зразки середнім розміром 220,0 мм × 35,0 мм × 8,0 мм з конструкційної вуглецевої сталі типу Ст3сп звичайної якості силою струму наплавлення від 100,0 А до 200,0 А при швидкості наплавлення від 10,0 м/год до 26,0 м/год. Захисний газ – вуглекислий, з витратою в діапазоні від 15,0 л/хв до 25,0 л/хв.

Дослідження являють собою:

встановлення залежностей між параметрами коливального (амплітуда і частота) та технологічного (сила струму зварювальної дуги й швидкість наплавлення) режимів;

встановлення можливості впливу коливань даного типу на характер перенесення електродного металу у зварювальну ванну;

встановлення залежностей між геометричними розмірами валиків (висота та ширина), величинами твердості наплавленого металу та ЗТВ основного металу, розміром кристаліту мікроструктури наплавленого металу з амплітудно- частотними параметрами коливань та параметрами технологічного режиму наплавлення.

За обраним типом коливань створено оригінальну установку для наплавлення з автоматичним переміщенням зварювального пальника, подаванням електродного дроту та захисного газу, де коливальним приводом є програмований кроковий двигун. Основними критеріями створення установки були простота конструкції та доступність складових.

Зв'язок між швидкістю наплавлення та амплітудно – частотними характеристиками встановлювався відповідно до критерія суцільності формування валика. Наведені відповідні розрахунки та отримані теоретичні залежності, відповідно до яких, обиралися значення швидкості наплавлення щодо подальших досліджень.

Вплив коливань на величину струму наплавлення досліджувався шляхом аналізу рівняння Гауса записаного в циліндричній системі координат для стовпа дуги, що горить в умовах коливань виробу, що наплавляється. Теоретично та експериментально доведено, що керувати значенням сили струму зварювальної дуги за допомогою параметрів коливань даного типу неможливо, однак можна ефективно контролювати величиною періоду горіння дуги між короткими замкненнями. Отримано відповідну аналітичну залежність величини часу горіння дуги від коливальних та технологічних параметрів наплавлення.

Вплив коливань зразка на значення твердості наплавленого металу та ЗТВ основного металу, висоти валика та розміру кристаліта мікроструктури наплавленого металу досліджувався шляхом аналізу контурних графіків, що побудовані за регресійними моделями, які отримані за методом найменших квадратів регресійного аналізу.

Наведено та верифіковано теоретичну модель визначення ширини валика, що отримана як рішення системи рівнянь примусових коливань гармонійного осцилятора та динаміки обертового руху коливальної системи.

Досліджено вплив амплітудно – частотних характеристик на формування структурних складових мікроструктури наплавленого металу та доведена можливість позитивного впливу не тільки на розмір зерна-кристаліту, але й на чинник структурних складових, що підвищують службові характеристики наплавленого металу, зокрема твердість.

Ключові слова: дугове наплавлення, коливання зварювальної ванни, розмір кристаліту, ширина валика, твердість наплавленого металу, амплітуда, частота.

ANNOTATION

Novykov S. Surfacing by GMAW-S with low-frequency mechanical oscillations of a flat specimen. - Manuscript.

The dissertation on competition of a scientific degree of the candidate of technical sciences on a specialty 05.03.06 "Welding and related process and technologies" – National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute», Kyiv, 2025.

The dissertation is devoted to researches of a technological influence features of transverse mechanical oscillations on surfacing weld process by Short Circuit Gas Metal Arc Welding (*GMAW-S*). Weld specimen oscillations were a periodic motion along trajectory tangential to circle arc. Frequency oscillations was range from 2.5 *Hz* to 4.5 *Hz*, amplitudes range was from 3.0 *mm* to 7.0 *mm*, welding currents range was from 100.0 *A* to 200.0 *A*, welding travel speeds range was from 10.0 *m/h* to 26.0 *m/h*. Surfacing weld process by *GMAW-S* was carried out with welding wire *ER70S-6* diameter 1.2 *mm* on flat specimens, shielding gas was carbon dioxide with consumption from 15.0 *l/min* to 25.0 *l/min*. Average size of specimens was 220.0 *mm* × 35.0 *mm* × 8.0 *mm*. Material specimens was structural carbon steel type *Fe37-3FN* with ordinary quality.

Researches have carried out:

establishment of dependencies between parameters of the oscillatory (amplitude and frequency) and technological (welding current and travel speed) modes;

establishment of influence possibility at this type oscillations on nature of short-circuiting transfer;

establishment of dependencies between the geometric dimensions of weld bead (height and width), hardness values of deposited metal and heat-affected zone (*HAZ*) of base metal, crystallite size of deposited metal microstructure with amplitude-frequency parameters of oscillations and parameters of surfacing technological mode.

Based on oscillations type chosen, original installation for surfacing weld process by *GMAW-S* with automatic movement of arc welding torch, welding wire feed and shielding gas was created. Oscillatory drive in installation was programmable stepper motor. Main criteria of installation create were simplicity design and components availability.

Relationship between welding travel speed and the amplitude-frequency characteristics was have established according to criterion of weld bead continuity formation. Relevant calculations and theoretical dependences to according which range of welding travel speed values for further researches have chosen are presented.

The oscillations influence to welding current value was researched by analysis of the Gaussian equation written in cylindrical coordinate system for arc column form was burning under oscillations conditions. The welding current value control

is impossible by parameters of these type oscillations has been proved theoretically and experimentally, but effectively control of period time value between short circuits have been possible. Appropriate analytical dependence of period time value between short-circuiting transfers on parameters of oscillational and technological surfacing weld modes was obtained.

Specimen oscillations influence on values of deposited metal hardness and *HAZ* metal hardness, values of weld bead height and the crystallite size of weld metal microstructure have researched by analysis of contour plots built according to regression models obtained by the least square's method of regression analysis.

Theoretical model for weld bead width determining have obtained as a solution to equations system of the forced oscillations of harmonic oscillator and the dynamics of oscillating system rotational motion have presented and verified.

Theoretical model for weld bead width determining have obtained as a solution to equations system of the forced oscillations of harmonic oscillator and the dynamics of oscillating system rotational motion have presented and verified.

Influence of amplitude-frequency characteristics of oscillations on formation of structural components of deposited metal microstructure have researched, and possibility of positive effect not only on grain-crystallite size have proven, but also on structural components factor that increase deposited metal characteristics, in particular hardness.

Key words: surfacing, weld pool oscillations, crystallites size, width bead, deposited metal hardness, amplitude, frequency.

