

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ДОНБАСЬКА ДЕРЖАВНА МАШИНОБУДІВНА АКАДЕМІЯ

Сенчишин Віктор Степанович



УДК 621.791.92

**ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ
ІНДУКЦІЙНОГО НАПЛАВЛЕННЯ ШЛЯХОМ ЗАСТОСУВАННЯ
МЕХАНІЧНОЇ ВІБРАЦІЇ**

Спеціальність 05.03.06 – Зварювання та споріднені процеси і технології

АВТОРЕФЕРАТ
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Краматорськ – 2021

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Тернопільському національному технічному університеті імені Івана Пулюя Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник: доктор технічних наук, професор
Пулька Чеслав Вікторович,
Тернопільський національний технічний університет
імені Івана Пулюя, професор кафедри «інжинірингу
машинобудівних технологій»

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Макаренко Наталя Олексіївна,
завідувач кафедри обладнання і технологій
зварювального виробництва Донбаської державної
машинобудівної академії, м. Краматорськ

доктор технічних наук, професор
Биковський Олег Григорович
професор кафедри обладнання і технологій
зварювального виробництва Національного
університету «Запорізька політехніка», м. Запоріжжя

Захист відбудеться 29 квітня 2021 р. о 11⁰⁰ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 12.105.02 у Донбаській державній машинобудівній академії за адресою: 84313, Донецька обл., м. Краматорськ, вул. Академічна, 72, корп. 3, ауд. 3308.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Донбаської державної машинобудівної академії за адресою: 84313, Донецька обл., м. Краматорськ, вул. Академічна, 72, корп. 1 або за web-адресою:

<http://www.dgma.donetsk.ua/spetsializovana-vchena-rada-d12.105.02.html>

Автореферат розісланий « 26 » _____ 03 _____ 2021 р.

Вчений секретар спеціалізованої
вченої ради Д 12.105.02



С. Л. Міранцов

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Підвищення довговічності та надійності робочих поверхонь деталей машин і механізмів є важливими завданнями подальшого розвитку промислового комплексу України. У секторі сільськогосподарського машинобудування цей напрямок насамперед пов'язаний з виготовленням таких деталей, як дискові ножі-гичкорізи, лемехи плугів, лапи культиваторів, диски луцильників, тощо. Ці процеси визначають технологічну ефективність роботи ґрунтообробної та збиральної техніки загалом. Рішення таких завдань, зазвичай, здійснюють з метою підвищення їх стійкості проти спрацювання та одночасного забезпечення самозагострювання в процесі експлуатації і досягається за рахунок зміцнення робочих поверхонь різними методами наплавлення.

Для зміцнення деталей ґрунтообробних знарядь і інших деталей сільськогосподарських машин найбільш широко застосовується індукційне наплавлення зносостійкими порошкоподібними твердими сплавами.

Проте основним недоліком процесу індукційного наплавлення є низька стабільність товщини наплавленого шару металу і, відповідно, незадовільна зносостійкість робочих органів у процесі їх експлуатації.

Тому перспективним напрямком підвищення стабільності товщини наплавленого шару металу та зносостійкості є удосконалення індукційного способу наплавлення шару металу на робочі поверхні деталей шляхом застосуванням механічної вібрації деталі в процесі наплавлення, що є актуальним науково-технічним завданням.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Робота виконувалась в Тернопільському національному технічному університеті імені Івана Пулюя відповідно до НДР «Основи проектування енергоощадних джерел і режимів нагрівання для наплавлення тонких елементів конструкцій» (номер реєстрації 0107U000540), «Механіко-технологічне обґрунтування розробки адаптивних коренезбиральних машин» (номер реєстрації 0113U00253) та «Діагностичні параметри та механічні аспекти формування мезоскопічного деформаційного рельєфу на поверхні експлуатованих трубних сталей» (номер реєстрації 0116U006908), а також згідно договору про співпрацю та партнерство між Тернопільським національним технічним університетом імені Івана Пулюя та Інститутом електрозварювання імені Є.О. Патона НАН України (2012-2017 рр.), де автор був безпосередньо їх виконавцем.

Мета роботи і завдання досліджень. Метою роботи є підвищення стабільності товщини шару наплавленого металу та експлуатаційних характеристик тонких деталей машин шляхом удосконалення та обґрунтування раціональних параметрів в процесі індукційного наплавлення з застосуванням механічної вібрації.

Згідно з поставленою метою сформульовано основні задачі дослідження:

- на основі аналізу відомих способів наплавлення тонких деталей машин і результатів наведених теоретично-експериментальних досліджень розробити технологічний процес індукційного наплавлення з застосуванням механічної вібрації;

- розробити розрахунково-математичну модель для визначення параметрів структури наплавленого металу індукційним способом із застосування механічної вібрації;

- розробити аналітичні залежності для визначення впливу частоти та амплітуди коливання механічної вібрації розплавленого металу на зміну середнього діаметра рухомої частинки кластера;

- провести експериментальні дослідження відхилення товщини наплавленого шару металу на робочу поверхню деталі залежно від зміни основних параметрів індукційного наплавлення із застосуванням механічної вібрації;

- розробити спеціальне обладнання для реалізації запропонованого технологічного процесу наплавлення і забезпечення впровадження його на практиці.

Об'єкт дослідження – процес індукційного наплавлення тонких деталей порошкоподібними твердими сплавами з застосуванням механічної вібрації.

Предмет дослідження – параметри індукційного наплавлення із застосуванням механічної вібрації та закономірності їх впливу на показники рівномірності товщини шару наплавленого металу та експлуатаційні властивості.

Методи дослідження. Для досягнення поставлених завдань і отримання основних результатів роботи використано експериментальні та аналітичні методи дослідження.

Аналітичні дослідження процесу індукційного наплавлення проводилися шляхом математичного моделювання теплових і енергетичних процесів індукційного наплавлення шару металу з застосуванням механічної вібрації.

Експериментальні дослідження проводилися в лабораторних умовах в Тернопільському національному технічному університеті ім. Івана Пулюя та в Інституті електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України.

Склад наплавленого шару металу визначали хімічним та мікрорентгеноспектральним методами аналізу, а його структуру – методами електронної та оптичної мікроскопії. Проведення та обробку результатів експериментальних досліджень реалізували на основі застосування відомих методик планованих факторних експериментів з використанням прикладного програмного пакету для статистичного аналізу даних Statistica 10.

Наукова новизна одержаних результатів:

- вперше розроблено розрахунково-математичну модель, яка описує зміну параметрів структури наплавленого шару металу залежно від співвідношення характеристик і властивостей порошкоподібних сплавів та отримано аналітичні залежності для визначення амплітуди та частоти коливань, за яких забезпечуються оптимальні розміри структурних складових наплавленого металу;

- встановлено, що застосування механічної вібрації в процесі наплавлення порошкоподібним твердим сплавом типу ПГ-С1 (Сормайт1) призводить до зміни розмірів структурних складових карбідів типу $(Fe, Cr)_7C_3$ і $(Fe, Cr)_3C$, які подрібнюються з (10...12) мкм без вібрації до (7...10) мкм при вертикальній і до (3,5...7) мкм при горизонтальній вібрації та рівномірного розподілу вмісту хрому по товщині наплавленого шару металу.

- вперше показано, що механічна вібрація в процесі наплавлення призводить до підвищення зносостійкості наплавленого металу з 2.2 без вібрації до 3.1 та 3.4 відповідно при вертикальній та горизонтальній вібрації із застосуванням порошкоподібного твердого сплаву ПГ-С1 (Сормайт 1) та зростання твердості наплавленого шару металу з 3500 МПа до 4800 МПа та 5400 МПа відповідно;

- отримані емпіричні математичні моделі товщини відхилення наплавленого металу залежно від зміни основних параметрів індукційного наплавлення та способів прикладання механічної вібрації.

Практичне значення одержаних результатів. Розроблено технологію та обґрунтовано основні параметри індукційного наплавлення із застосуванням механічної вібрації в процесі наплавлення тонких деталей ґрунтообробних сільськогосподарських машин, яка дозволяє підвищити експлуатаційні характеристики наплавлених деталей. Виробничу перевірку способу індукційного наплавлення з застосуванням механічної вібрації проведено на підприємствах: ПП «Чіп» (Волинська обл., м. Володимир-Волинський) та КЗЕСО ПрАТ «Каховський завод електрозварювального устаткування» (Херсонська обл., м. Каховка). Отримані результати підтвердили технологічну ефективність його використання у виробництві. Розроблено рекомендації для виробничого застосування індукційного способу наплавлення деталей машин.

Результати досліджень також використовуються в навчальному процесі при підготовці фахівців освітнього рівня бакалавр і магістр за спеціальністю «Зварювання» та 131 «Прикладна механіка» під час вивчення дисциплін «Наплавлення та напилення», «Підвищення зносостійкості та відновлення спрацьованих деталей машин та механізмів», «Прогнозування розвитку зварювальної науки і техніки».

Особистий внесок здобувача. Постановку задач дослідження та вибір наукових підходів для їх вирішення було сформульовано спільно з науковим керівником. Підготовку, проведення та обробку результатів теоретичних і експериментальних досліджень, формулювання загальних висновків, розробку рекомендацій для промислового використання результатів досліджень виконано автором особисто.

У наукових працях, які виконано у співавторстві, дисертантові належить наступне: [1, 26, 30] – запропоновано обладнання і нову технологію індукційного наплавлення та конструктивну схему пристрою; [2] – розроблено методика дослідження; [3, 20, 23] – проведено аналіз впливу вібрації на якість наплавлення металу; [4, 11-14] – проведено аналіз методів наплавлення; [5, 18] – проведено аналіз впливу параметрів наплавлення на товщину наплавленого шару; [6, 27, 28] – наведено аналіз впливу струму, частоти та амплітуди коливання на властивості наплавленого металу; [7, 32] – запропоновано структурну схему потокової лінії; [8] – розроблено метод розрахунку структурних складових наплавленого металу; [9, 10, 29, 31] – запропоновано способи застосування механічної вібрації; [15-17, 19] – проведено аналіз способів індукційного наплавлення; [21] – проведено аналіз властивостей шару наплавленого металу; [22] – наведено переваги застосування індукційного способу наплавлення; [24] – запропоновано

застосування механічної вібрації індукційного способу наплавлення; [25] – наведено аналіз шляхів підвищення зносостійкості наплавленого металу.

Під час написання роботи автор проводив аналіз результатів дослідження в галузі наплавлення, які отримано в Інституті електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України, в Донбаській державній машинобудівній академії, Приазовському державному технічному університеті та в інших організаціях і вищих навчальних закладах України і за кордоном.

Апробація результатів дисертації. Основні положення та результати роботи отримали позитивну оцінку на: VIII Міжн. наук. конф. «Математичні проблеми механіки неоднорідних структур» (м. Львів, 2010 р.); п'яти міжн. симпозіумах українських інженерів-механіків у Львові (м. Львів, 2011 р., 2013 р., 2015 р., 2017 р., 2019 р.); Міжн. наук.-техн. конф. Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя (м. Тернопіль, 2010-2012 рр., 2014 р., 2015 р., 2018 р., 2020 р.); Міжн. наук.-метод. Конф. «Сучасні проблеми зварювання та споріднених технологій, підготовка кадрів» (м. Маріуполь, ПДТУ, 2011 р.); V Всеукраїнській міжгалузевій наук.-техн. конф. студентів, аспірантів та наукових співробітників «Зварювання та споріднені процеси і технології» (м. Київ, НТУУ «КПІ», 2012 р.); наук.-техн. конф. «Современные проблемы металлургии, технологии сварки и наплавки сталей и цветных металлов» (м. Київ, ІЕЗ ім. Є.О. Патона, 2012 р.); на пленарному засіданні Міжн. конф. в ІЕЗ ім. Є.О. Патона «Сварка и родственные технологии – настоящее и будущее» (м. Київ, 2013р.); VII та VIII наук.-техн. конф. молодих вчених і спеціалістів, відповідно, «Сварка и родственные технологи» та «Зварювання та споріднені технології» (сmt. Ворзель, 2013 р. та 2015 р.); II Міжн. інтернет-конф. «Проблеми довговічності матеріалів, покриттів та конструкцій», (м. Вінниця, 2014 р.); VIII міжн. конф. молодих вчених та спеціалістів (сmt Ворзель, 2015р.); IV міжн. наук.-техн. конф. «Сварка и родственные технологии. Перспективы развития», присвяченої 50-ти річчю кафедри «Обладнання і технологія зварювального виробництва» (м. Краматорськ, ДДМА, 2016 р.); Міжн. конф. «Зварювання та споріднені технології – сьогодні і майбутнє» присвяченої сторіччю НАН України (м. Київ, ІЕЗ ім. Є.О. Патона, 2018р.); Всеукраїнській конф. з міжн. участю «Проблеми зварювання та споріднених технологій» (м. Миколаїв, НУК, 2019 р.).

Публікації. Основний зміст дисертації відображено у 32 наукових публікаціях, з них: 11 статей у наукових фахових виданнях України, 1 стаття у закордонному періодичному виданні, включеного до міжнародної наукометричної бази Scopus, 4 патенти України на корисну модель; 16 – у матеріалах конференцій.

Структура і обсяг дисертації. Дисертаційна робота складається зі вступу, 5 розділів, загальних висновків, списку використаної літератури і додатків. Загальний обсяг дисертації становить 182 сторінок, включаючи 72 рисунки, 6 таблиці, 4 додатка на 17 сторінках, список використаних джерел із 158 найменувань на 20 сторінках.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі подано загальну характеристику роботи: обґрунтовано актуальність теми дисертації, її зв'язок з науковими програмами; сформульовано мету роботи та задачі дослідження; наведено наукову новизну та практичне значення отриманих результатів.

У першому розділі проведено огляд існуючих методів наплавлення тонких деталей машин, в тому числі деталей ґрунтообробних машин, а також проаналізовано технологічні можливості та обладнання, показано переваги індукційного наплавлення та розглянуто область застосування механічної вібрації при зварюванні та обробленні деталей після наплавлення.

Суттєвий вклад у розробку технологічних процесів наплавлення внесли вчені Фрумін І.І., Юзвенко Ю.А., Гладкий П.В., Ткачев В.Н., Рубанов В.В., Рябцев І.О., Пулька Ч.В., Макаренко Н.О., Гулаков С.В., Чигарьов Г.В., Новомлинець О.О., Перемітько В.В. та зарубіжні вчені Кречмар Е., Річардсон Л., Морігакі О., Хасуї А. та інші.

На основі аналізу зроблено висновки про доцільність вдосконалення процесу індукційного наплавлення з метою підвищення рівномірності товщини шару наплавленого металу та його експлуатаційних властивостей.

Запропоновано удосконалений спосіб індукційного наплавлення робочих поверхонь тонких деталей машин з застосуванням механічної вібрації та способом її прикладення до деталі.

У другому розділі наведено розробку розрахунково-математичної моделі для визначення параметрів структурних складових наплавленого металу із застосуванням механічної вібрації.

У розплавленому шарі металу під час наплавлення утворюється об'єднання частинок металу в кластери, а в результаті коагуляції відбувається злипання цих частинок (рис. 1). У подальшому частинки невеликих за розміром кластерів об'єднуються у більші кластери.

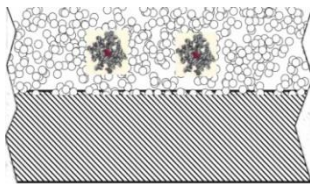


Рис. 1. Схема утворення кластерів у розплавах під час наплавлення з вібрацією

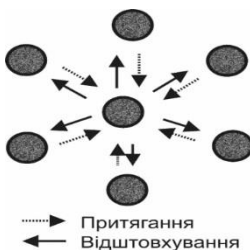


Рис. 2. Силова взаємодія між частинками в металевому розплаві

Припускаємо, що розплавлений шар металу є електролітом. Між частинками розплавленого металу діють сили різної природи (рис. 2), а при зближенні частинок дисперсної фази виникає розклинюючий тиск рідини металу, розміщеного між ними.

Цей тиск визначається молекулярними силами притягання та електростатичними силами відштовхування. Сили притягання Ван-дер-Ваальса є наслідком дії сил орієнтаційної, індукційної та дисперсійної взаємодії між частинками розплавленого металу. Електростатичні сили відштовхування виникають при перекриванні дифузних шарів частинок металу (рис. 3). При цьому стан системи визначається балансом енергії притягання та енергії відштовхування, який визначається рівнянням:

$$U = Be^{-kh} - Ah^{-2}, \quad (1)$$

де U — сумарна енергія взаємодії частинок; B — коефіцієнт, який залежить від електричних потенціалів, властивостей середовища, температури; k — величина, зворотна товщині

дифузного шару; h – відстань між частинками; A – стала молекулярних сил притягання (стала Гамакера).

За відносно великих відстаней між частинками сумарна енергія U є від'ємною (далекій потенціальний мінімум). На близьких відстанях, де превалюють сили притягання, сумарна енергія взаємодії частинок U буде додатна (близький потенціальний мінімум).

Таким чином, для частинок існує близька та дальня потенціальні ями, глибину яких позначимо потенціальними складовими відповідно E_1, E_2 , а ширину h_1, h_2 . Представимо рух частинок діаметра D поблизу кожного потенціального мінімуму, як коливання гармонічного осцилятора відповідно з власними частотами f_1, f_2 .

Розглянемо вплив механічної вібрації на структуру розплавленого металу в момент, коли з кластерів середнього діаметра D утворюються дендрити великого розміру H , які не коливаються в розплавленому металі, що відповідає нерівності:

$$H^2 \gg \eta \omega^{-1} \rho^{-1}, \quad (2)$$

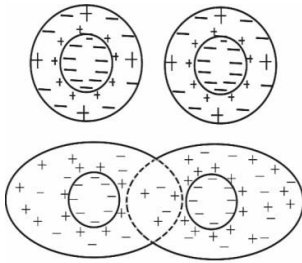


Рис. 3. Перекривання подвійних електричних шарів і злипання частинок в розплаві

де η – середня в'язкість твердіючого розплаву; ω – частота коливання; ρ – густина розплавленого металу.

Розглянемо коливання розплаву металу залежно від амплітуди a та частоти ω коливання. Зміна швидкості $\dot{x}(t)$ коливання розплаву вздовж поверхні наплавлення за координати x та часу коливання t описується рівнянням:

$$\dot{x}(t) = a \omega \sin \omega t. \quad (3)$$

Тоді сила P , яка діє на рухому частинку металу діаметром D буде наближено дорівнювати:

$$P \approx \eta D^2 h_i^{-1} a \omega. \quad (4)$$

З врахуванням (3) і (4) рівняння вимушених коливань частинки дендриту в ближній потенціальній ямі (ближня коагуляція) під дією вібрації і зовнішніх сил матиме вигляд:

$$\ddot{x} + 2\xi \dot{x} + f_1^2 x = P m^{-1} \sin \omega t, \quad (5)$$

де $\xi \approx n \eta D^2 m^{-1} h_i^{-1}$.

Диференціальне рівняння (5) розв'язуємо шляхом запису шуканої функції $x(t)$ в тригонометричній формі. У результаті цього отримаємо закон коливання частинок в об'ємі дендриту за умови, що початкова фаза α_0 коливання рівна нулю

$$x(t) = V_0 \sin(\omega t + \alpha_0). \quad (6)$$

Тоді амплітуда V_0 вимушених коливань частинки дорівнює

$$V_0^2 = P^2 m^{-2} [(\omega^2 - f_1^2)^2 + 4\xi^2 \omega^2]^{-1}. \quad (7)$$

Якщо частинка діаметром D вистрибне при вібрації з потенціальної ями, то це фізично означає, що дендрит, який складається із таких частинок, почне розвалюватися. Це може бути можливим тільки тоді, коли амплітуда V_0 коливання

частинки буде більша від ширини ближньої потенціальної ями h_1 , тобто вийде за межі дії поверхневих сил, або отримає таку енергію, що перевершує глибину потенціальної ями E_1 і буде рухатися немов би за відсутності поверхневих сил.

У результаті чого отримаємо:

$$\omega^4 - \omega^2(2f_1^2 - 4\xi^2 + \eta^2 D^4 m^{-2} a^2 h_1^{-4}) + f_1^4 \leq 0; \quad (8)$$

$$(E_1^{-1} \eta^2 m^{-1} D^4 h_1^{-2} a^2 - 1)\omega^4 + (2f_1^2 - 4\xi^2)\omega^2 - f_1^4 \geq 0. \quad (9)$$

Розв'язавши нерівності (8), (9) за прийнявши умови, що вираз $m \approx 0,5\rho D^3$ та ω є додатними, отримаємо співвідношення, яке характеризує оцінку параметрів вібрації структурних складових, на які розпадеться дендрит для встановленого діаметра D частинок наплавленого металу:

$$\omega^2 \leq 0,5(2f_1^2 - 4\xi^2 + 4\rho^{-2} D^{-2} \eta^2 a^2 h_1^{-4}) + \sqrt{0,25(2f_1^2 - 4\xi^2 + 4\rho^{-2} D^{-2} \eta^2 a^2 h_1^{-4})^2 - f_1^4};$$

$$a^2 \geq \frac{f_1 \rho^2 D^2 h_1^4 [\omega^4 - (2f_1^2 - 4\xi^2)\omega^2 + f_1^4]}{4\eta^2 \omega^4}. \quad (10)$$

Нерівності (10) дозволяють визначати параметри вібрації ω і a залежно від заданих характеристик структури наплавлення $f_1, \xi, \rho, \eta, h_1$ розплавленого порошкоподібного твердого сплаву та розміру частинок металу D .

Для перевірки отриманої математичної моделі проведено розрахунок залежності впливу величини амплітуди a та частоти коливання ω на зміну розміру структурних складових при наплавлення порошкоподібним твердим сплавом ПГ-С1 (Сормайт 1) з наступними характеристиками:

$$\rho = 7,8 \cdot 10^{-6} \frac{\text{кг}}{\text{мм}^3}; \eta \approx 7 \cdot 10^{-6} \frac{\text{кг}}{\text{мм} \cdot \text{с}}; \omega = 50 \text{ Гц};$$

$$f_1 \approx 2 \cdot 10^3 D^{-1} \text{ Гц}; \xi \approx 2 \cdot 10^6 D^{-1} \text{ Гц}; h_1 \approx 2 \cdot 10^{-6} \text{ мм}.$$

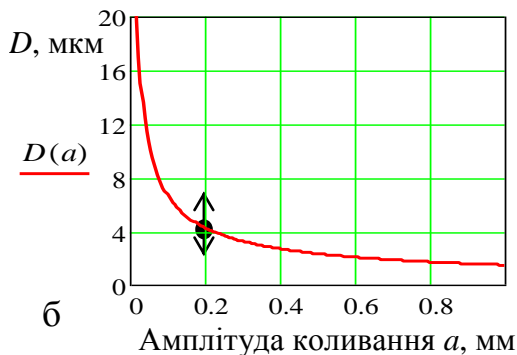
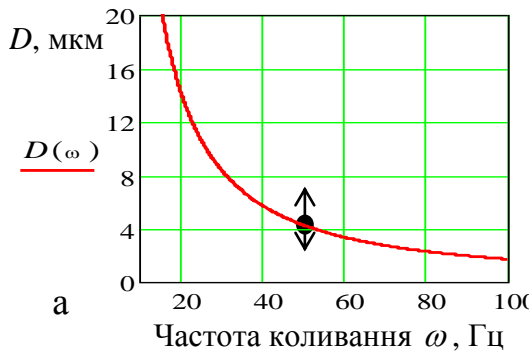


Рис. 4. Залежності зміни розміру зерна D : а – від частоти вібрації $D \sim \omega$ ($a = 0,2 \text{ мм}$); б – від амплітуди вібрації $D \sim a$ ($\omega = 50 \text{ Гц}$)

Для побудови графічних відтворень, які характеризують залежності зміни величини зерна D від параметрів вібрації (амплітуди a та частоти ω коливання) застосуємо другу нерівність залежності (10). Враховуючи, що $f_1^4 \gg \omega^4 - (2f_1^2 - 4\xi^2)\omega^2$, другу нерівність (10) запишемо наближено у вигляді:

$$D^3 \geq \frac{8 \cdot 10^{15} \rho^2 h_1^4}{a^2 \eta^2 \omega^4}. \quad (11)$$

Згідно з (11) побудовано залежності зміни розміру зерна D від частоти ω та амплітуди a коливання, рис. 4. Встановлено, що при збільшенні параметрів вібрації a та ω розмір зерна D значно зменшується.

Таким чином, на основі співвідношення (10) та аналізу рис. 4 можна за заданими значеннями параметрів вібрації a, ω отримати необхідну раціональну структуру наплавлення.

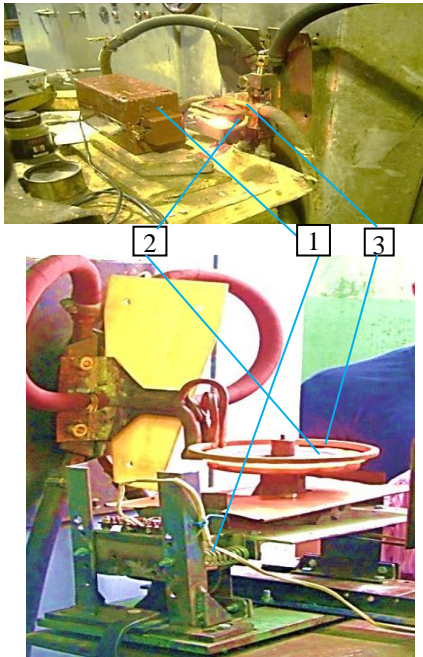


Рис. 5. Пристрій для індукційного наплавлення:
1 – електромагнітний вібратор; 2 – деталь;
3 – індуктор

У третьому розділі наведено методику проведення експериментальних досліджень.

Для експериментального дослідження зміни відхилення товщини шару наплавленого металу та його стійкості проти спрацювання залежно від впливу амплітуди a та частоти коливання ω і способу прикладання механічної вібрації було розроблено лабораторне обладнання (рис. 5), а для визначення амплітуди коливання – часткову методику, яка ґрунтувалася на основі визначення зміни опору тензорезисторів, які закріплено на рівноопірній балці 1 (рис. 6) з двох сторін. На датчики подається постійна напруга, при цьому аналоговий сигнал від датчиків надходить на звукову карту комп'ютера 8, або на самописець 5.

При зміні амплітуди коливань електромагнітного вібратора 4 (рис. 7) змінюється сигнал, який поступає на прилади реєстрації 5, 8. Це дозволяє змінювати амплітуду коливань в залежності від напруги живлення електромагнітного вібратора.

Обробку результатів вимірювання відхилення товщини шару наплавленого металу проводили за допомогою методів математичної статистики.

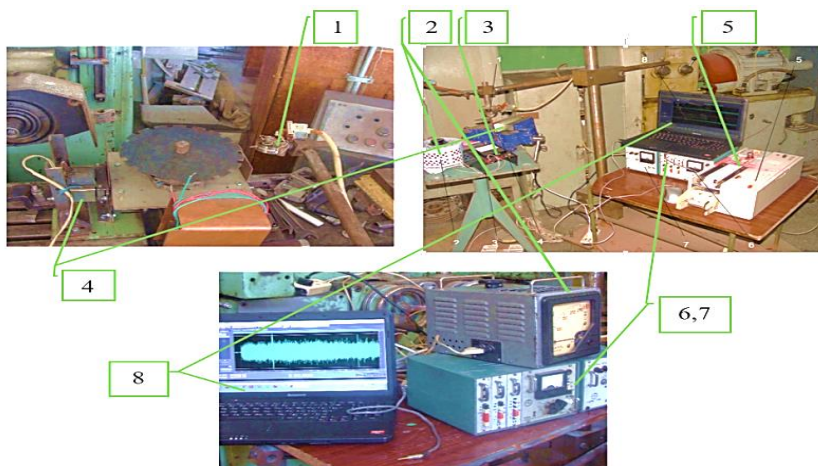


Рис. 6. Загальний вигляд станда для визначення амплітуди коливання:

- 1 – рівноопірна балка з тензорезисторами;
- 2 – ЛАТР-1М;
- 3 – вольтметр;
- 4 – електромагнітний вібратор;
- 5 – самописець;
- 6 – тензопідсилювач ТОПА3-4-01;
- 7 – блок живлення АГАТ-7;
- 8 – комп'ютер

Для дослідження відносної зносостійкості наплавленого металу проти спрацювання було використано установку НК-М, яка дозволяє проводити дослідження одночасно для шести зразків у рівних умовах, одним з яких є еталонним. Заготовка являє собою тонкий диск товщиною $\delta = 3$ мм та наплавленим шаром металу товщиною 0,8...1,5 мм.

Для встановлення функціональної залежності, яка характеризує відхилення товщини шару наплавленого металу на поверхню тонких деталей реалізували планований дво- та трифакторний експеримент типу, відповідно, ПФЕ 3^2 та ПФЕ 3^3 на трьох рівнях варіювання факторами. При цьому незалежними змінними факторами приймали: напругу живлення на контурі U_k , яку кодували індексом x_1 , тобто $U_k \rightarrow x_1$; час наплавлення t_n , який кодували індексом x_2 , тобто $t_n \rightarrow x_2$;

амплітуду коливання зразка a_k , яку кодували індексом x_3 , тобто $a_k \rightarrow x_3$.

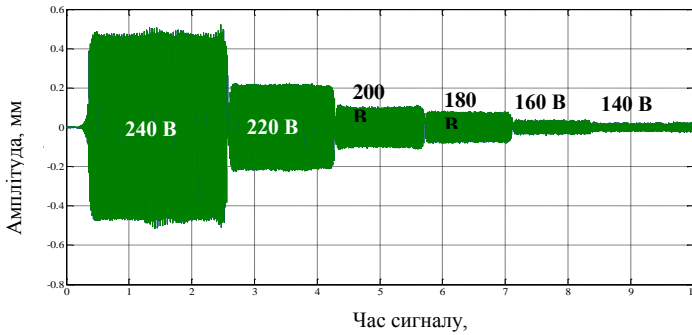


Рис. 7. Вигляд записаного сигналу при різних значеннях напруги живлення вібратора

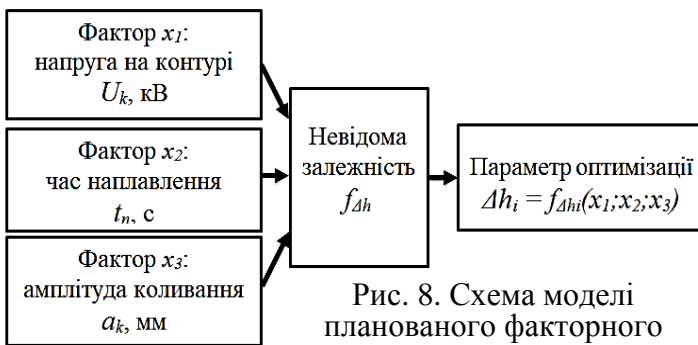


Рис. 8. Схема моделі планованого факторного експерименту

емпіричної моделі, яку записано у вигляді $\Delta h_1 = f_{\Delta h 1}(U_k; t_n)$, $\Delta h_2 = f_{\Delta h 2}(a_k; U_k; t_n)$ та $\Delta h_3 = f_{\Delta h 3}(a_k; U_k; t_n)$.

У четвертому розділі наведено результати порівняльних експериментальних досліджень властивостей наплавленого металу, які отримано під час індукційного наплавлення за традиційною технологією та з використанням механічної вібрації, а також результати відхилення товщини шару наплавленого металу.

Залежно від способу прикладання механічної вібрації та її параметрів можна регулювати рівномірність товщини шару наплавленого металу та його зносостійкість. Для проведення порівняльних досліджень властивостей металу, наплавленого без застосування вібрації (зразок А) (рис. 9) та із застосуванням вертикальної (зразок Б) або горизонтальної (зразок В) вібрації було проведено наплавлення на деталі зі сталі Ст.3 порошкоподібного твердого сплаву ПГ-С1. Наплавлення здійснювалось одночасно по всій робочій поверхні від генератора типу ВЧГ 6-60/0,44.

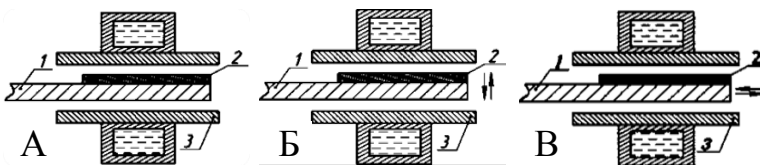


Рис. 9. Схеми наплавлення зразків: а – без вібрації, б, в – з вертикальною та горизонтальною вібрацією

Встановлено, що за зовнішнім виглядом наплавлені зразки (товщина та ширина) практично мало відрізнялися один від одного. Загальною для всіх варіантів наплавленого металу є структура крайових ділянок наплавлень. Вона складається з карбідів хрому різної дисперсності при практично повній відсутності пластинчатих карбідів хрому.

Мікроструктура матриці наплавленого металу являє собою ферит і перліт, а

Структурну модель експерименту типу ПФЕ 3^2 та ПФЕ 3^3 наведено на рис. 8.

Для дослідження відхилення товщини шару наплавленого металу без застосування вібрації Δh_1 , з застосуванням вертикальної Δh_2 та горизонтальної Δh_3 вібрації вибрано апроксимуючу математичну модель у вигляді функціональної залежності

$$\Delta h_1 = f_{\Delta h 1}(x_1; x_2), \quad \Delta h_2 = f_{\Delta h 2}(x_1; x_2; x_3), \\ \Delta h_3 = f_{\Delta h 3}(x_1; x_2; x_3).$$

Оброблення отриманого експериментального масиву даних проводили за загальновідомими методиками та методами статистичної обробки з використанням методик кореляційного та регресійного аналізу для отримання

мікроструктура наплавленого металу всіх досліджуваних зразків складається з первинних карбідів (комплексні карбіди типу $(Fe, Cr)_7C_3$ і $(Fe, Cr)_3C$) у вигляді великих пластин «олівцевого» типу, які мають гексагональну решітку з чіткою границею з'єднання з матрицею, карбідної евтектики і матричної аустенітної структури. Мікротвердість карбідів змінювалася в межах $HV_{0,5} = 11710...12830$ МПа (табл. 1). Загальним для всіх варіантів наплавленого металу є:

Таблиця 1. Мікротвердість структурних складових $HV_{0,5}$, МПа

| Зразок | Карбіди хрому | Матриця | Перехідна зона |
|--------|---------------|-------------|----------------|
| А | 11710...12830 | 4120...4410 | 3030...3410 |
| Б | 11710...12830 | 4120...4800 | 3410...3810 |
| В | 11710...12830 | 4800...5090 | 3860 |

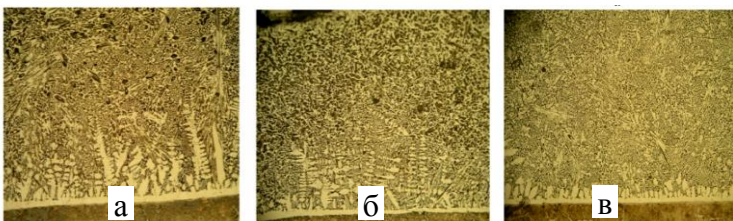


Рис. 10. Мікроструктура наплавленого металу ($\times 200$): а – без вібрації, б – вертикальна вібрація, в – горизонтальна вібрація

- з боку основного металу в лінії з'єднання є дифузійна зона у вигляді тонкопластинчастого перліту і фериту по межах зерен, іноді з орієнтацією по відманштету.

Відмінності в структурі трьох варіантів наплавленого металу такі: карбіди, що мають вид шестигранників з середньою довжиною сторони $10...12$ мкм, без вібрації (рис. 10а) подрібнюються до $7...10$ мкм при вертикальній (рис. 10б) та до $3,5...7$ мкм при горизонтальній вібрації (рис. 10в). Горизонтальна вібрація призводить до помітного подрібненню карбідної складової (рис. 10в).

Для визначення складу структурних складових і встановлення впливу їх на властивості наплавленого металу проведений також мікрорентгено-спектральний аналіз наплавленого металу для трьох варіантів – розподіл хрому і вуглецю в наплавленому металі, рис. 11.

Встановлено, що: значного дифузійного перерозподілу вуглецю біля лінії сплавлення не спостерігається; для зразків наплавлених без вібрації (рис. 10а) та з вертикальною вібрацією (рис. 10б) спостерігається значне збільшення хрому та

- наявність у наплавленому шарі доевтектичної зони, яка примикає до лінії з'єднання та характеризується формуванням дендритів твердого розчину (легованого аустеніту) з осями першого і другого порядку, а також карбідної евтектики, яка кристалізується в міждендритному просторі;

- утворення граничної білої смужки (перехідна зона) твердого розчину (легованого аустеніту) між наплавленим і основним металом шириною $10-20$ мкм;

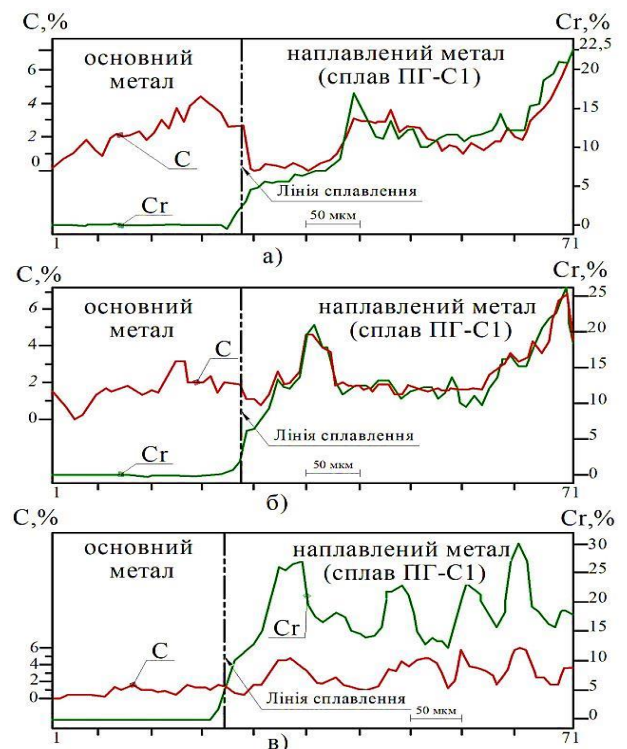


Рис. 11. Розподіл елементів по висоті наплавленого металу вуглецю і хрому: а - без вібрації; б - вертикальна вібрація; в - горизонтальна вібрація

вуглецю у верхній частині наплавленого шару; при застосуванні горизонтальної вібрації (рис. 10в) вони розподілені рівномірно по всій товщині; вуглець зв'язаний в карбідах. За даними рентгеноструктурного аналізу, це карбіди типу $(Fe, Cr)_7C_3$ та $(Fe, Cr)_3C$. На рис. 12 наведено діаграми відносної стійкості проти спрацювання і твердості наплавлених зразків (середні за трьома випробуваннями). Аналіз рис. 12 показує, що: найменшу твердість, яка знаходиться в межах до 3500 МПа має зразок А, наплавлений за існуючою технологією; зразки Б і В, що наплавлені із застосуванням вертикальної і горизонтальної вібрації мають твердість, яка знаходиться в межах до 4800 МПа та 5400 МПа відповідно. Відносна стійкість проти спрацювання становить 2,2 – без застосування вібрації (зразок А) та 3,1 і 3,4 (зразки Б та В) при вертикальній та горизонтальній вібраціях відповідно.

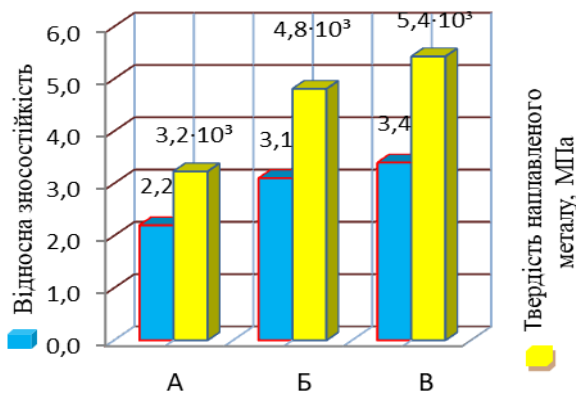


Рис. 12. Відносна стійкість проти спрацювання та твердість зразків при індукційному наплавленні без вібрації (А), із вертикальною (Б) та горизонтальною (В) вібрацією

шару наплавленого металу для трьох способів наплавлення тонких деталей: без застосування вібрації під час наплавлення шару металу на робочу поверхню деталі Δh_1 (рис. 13а); з застосуванням вертикальної вібрації Δh_2 : (рис. 13б); з застосуванням горизонтальної вібрації Δh_3 (рис. 14).

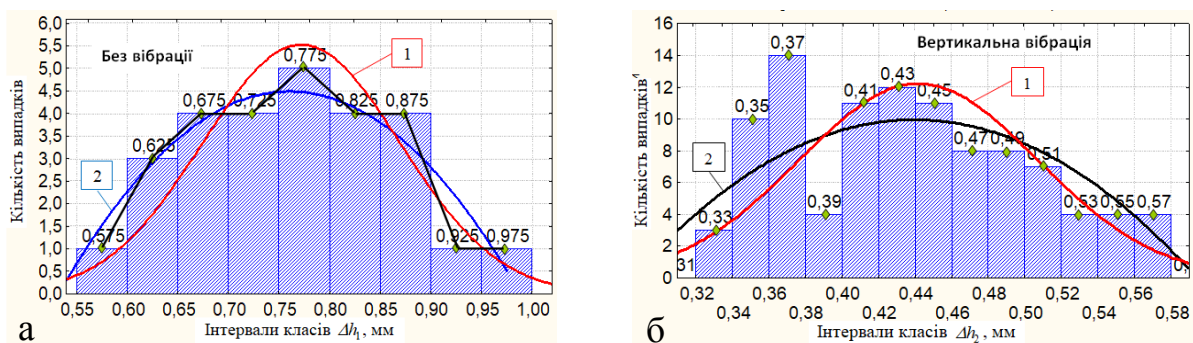


Рис. 13. Гістограма та полігон щільності розподілу: а – Δh_1 ; б – Δh_2 ; 1 – крива нормального закону розподілу; 2 – функція полінома другої степені

При цьому побудована гістограма та полігон розподілу частот відхилення товщини шару наплавленого металу Δh_1 , Δh_2 та Δh_3 відтворює диференційний закон, або щільність розподілу випадкової величини Δh_1 , Δh_2 та Δh_3 відповідно для кожного із трьох способів наплавлення шару металу на робочу поверхню деталей.

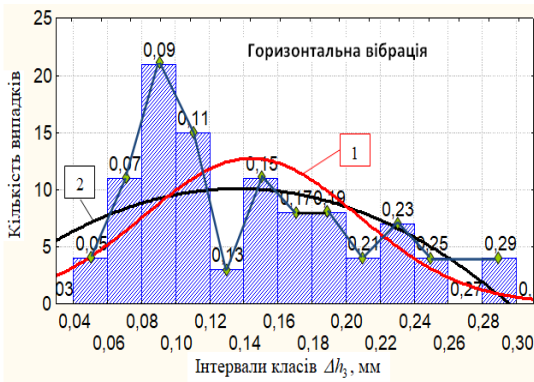


Рис. 14. Гістограма та полігон щільності розподілу Δh_3 : 1 – крива нормального закону розподілу; 2 – функція полінома другої степені

товщини шару наплавленого металу знаходиться в межах: без вібрації $\Delta h_1 = 0,62 \dots 0,87$ мм з кількістю випадків рівним 27 (рис. 13а); з вертикальною вібрацією $\Delta h_2 = 0,35 \dots 0,37$ мм з кількістю випадків рівним 24 та $\Delta h_2 = 0,41 \dots 0,51$ мм з кількістю випадків рівним 57 (рис. 13б); з горизонтальною вібрацією $\Delta h_3 = 0,07 \dots 0,11$ мм та $\Delta h_3 = 0,15 \dots 0,19$ мм з кількістю випадків рівним 47 та 37 (рис. 14).

Для побудови емпіричної моделі, яка характеризує функціональну зміну відхилення товщини наплавленого шару металу для трьох способів наплавлення, було реалізовано планований дво- (Δh_1) та трифакторний (Δh_2 та Δh_3) експерименти. Після оцінки статистичної значущості коефіцієнтів рівняння регресії за критерієм Стюдента та перевірки адекватності моделі згідно з критерієм Фішера, отримано рівняння регресії зміни відхилення товщини наплавленого металу залежно від зміни вхідних факторів у натуральних величинах як функція $\Delta h_1 = f_{\Delta h_1}(U_k; t_n)$ і $\Delta h_2 = \Delta h_3 = f_{\Delta h_{2,3}}(a_k; U_k; t_n)$:

- без застосування вібрації

$$\Delta h_1 = 1,18 - 0,05U_k + 0,002t_n + 0,001U_k t_n - 0,005U_k^2 - 0,0002t_n^2 ; \quad (12)$$

- з застосуванням вертикальної вібрації

$$\Delta h_2 = 0,64 - 0,81a_k + 0,02U_k - 0,003t_n - 0,05a_k U_k + 2,03a_k^2 - 0,006U_k^2 - 0,00002t_n^2 ; \quad (13)$$

- з застосуванням горизонтальної вібрації

$$\Delta h_3 = 1,9 - 0,74a_k - 0,6U_k - 0,004t_n + 0,01a_k U_k - 0,003U_k t_n + 1,28a_k^2 + 0,06U_k^2 + 0,0002t_n^2 . \quad (14)$$

Аналіз числового підрахунку значень Δh_1 , Δh_2 і Δh_3 за рівняннями регресії (12)-(14) та побудованих згідно з ними графічних відтворень у вигляді поверхонь відгуку та їх двомірних перерізів, що основний масив апроксимованих відповідних значень Δh_1 (рис. 15), Δh_2 (рис. 16) і Δh_3 (рис. 17) знаходиться у межах: без застосування вібрації $\Delta h_1 = 0,57 \dots 0,92$ мм; з застосуванням вертикальної вібрації $\Delta h_2 = 0,34 \dots 0,58$ мм; з застосуванням горизонтальної вібрації $\Delta h_3 = 0,08 \dots 0,26$ мм.

Аналіз побудованих гістограми та полігону щільності розподілу випадковості процесу (рис. 13, рис. 14) показує, що диференційний закон щільності розподілу близький до нормального (крива 1), а функцією, яка описує функціональну залежність розподілу є поліном другої степені, крива 2.

Аналіз наведених графічних відтворень (гістограм і полігонів щільності розподілу) випадковості процесу функціональної зміни Δh_1 , Δh_2 та Δh_3 показує, що імовірність значень генеральної вибірки експериментального масиву даних основної зміни відхилення

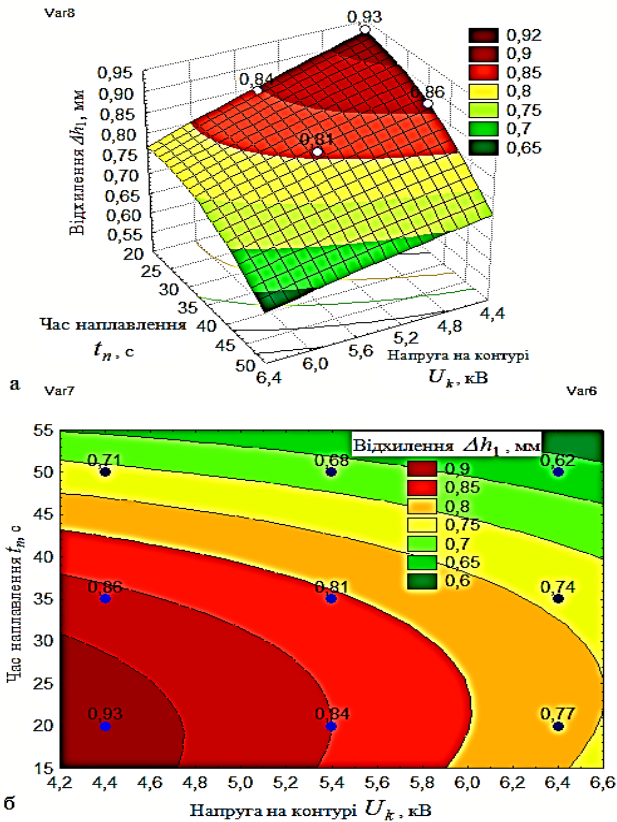


Рис. 15 – Поверхня відгуку як функція $\Delta h_1 = f_{\Delta h_1}(U_k; t_n)$

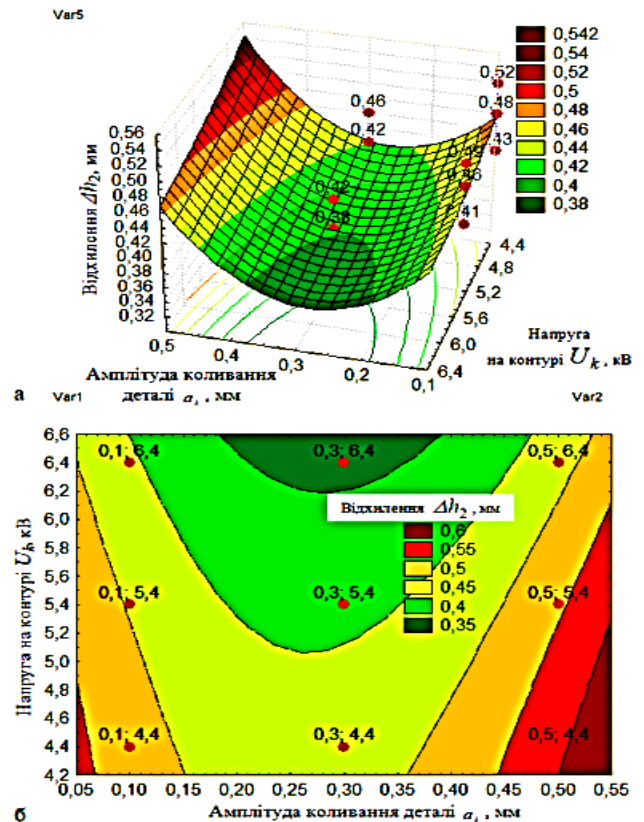


Рис. 16 – Поверхня відгуку як функція $\Delta h_2 = f_{\Delta h_2}(a_1; U_k)$

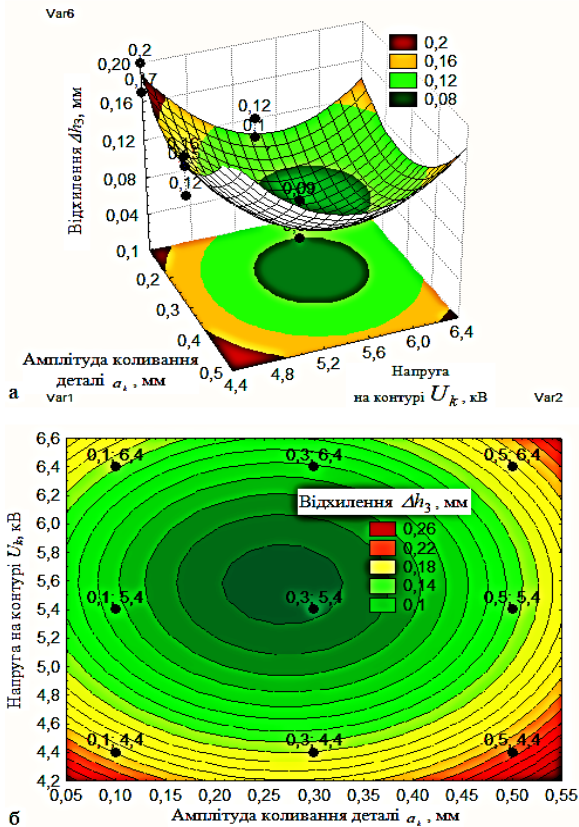


Рис. 16 – Поверхня відгуку (а) та її двомірний переріз (б) як функція $\Delta h_3 = f_{\Delta h_3}(a_1; U_k)$

При цьому застосування, як вертикальної, так і горизонтальної вібрації деталі під час наплавлення металу призводить до зменшення відхилення Δh_2 і Δh_3 товщини шару наплавленого металу на робочу поверхню деталі від раціонального значення $h = 1_{-0,2}^{+0,5}$ мм відносно відхилення Δh_1 товщини шару наплавленого металу на робочу поверхню деталі без застосування вібрації, відповідно, $\Delta h_2 - 1,6...1,8$ рази, а $\Delta h_3 -$ у $3,5...7,5$ рази, що підтверджує ефективність застосування індукційного наплавлення металу з застосуванням механічної вібрації. Крім того, застосування горизонтальної вібрації деталі зменшує відхилення Δh_3 товщини шару наплавленого металу на робочу поверхню деталі відносно відхилення Δh_2 товщини шару наплавленого металу на робочу поверхню деталі з застосуванням вертикальної вібрації у $2,2...4,3$ рази. Справедливість наведеної констатації

також характерна графічним побудовам, які наведено на рис. 18 та рис. 19.

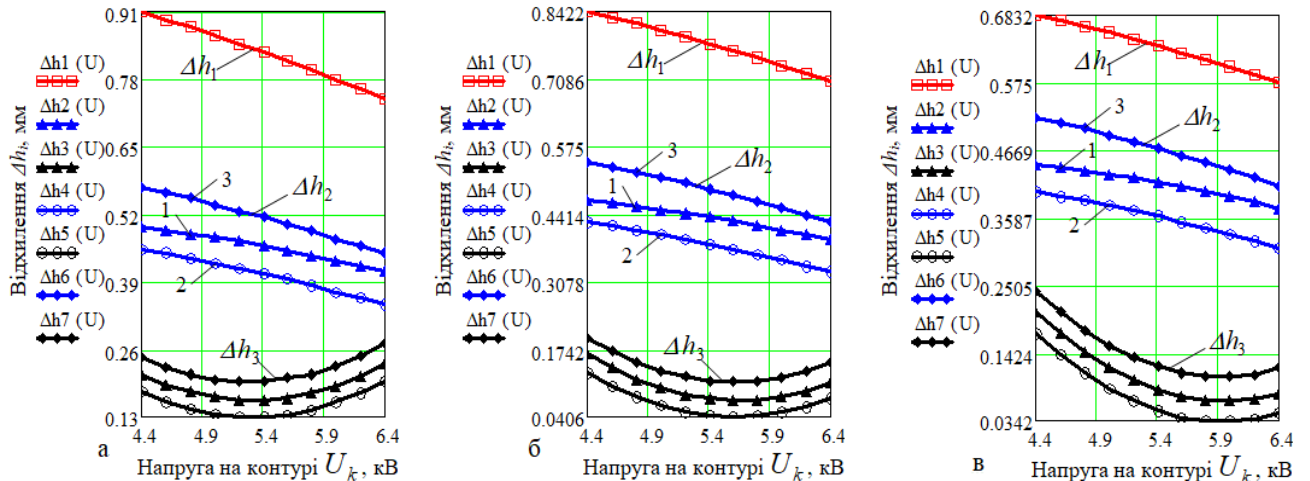


Рис. 18. Залежність функціональної зміни відхилення товщини шару наплавленого металу як функція $\Delta h_i = f_{\Delta h_i}(U_k)$: а, б, в – відповідно, час наплавлення деталі $t_n = 20; 35; 50$ (с); 1, 2, 3 – відповідно, амплітуда коливання деталі $a_k = 0,1; 0,3; 0,5$ (мм)

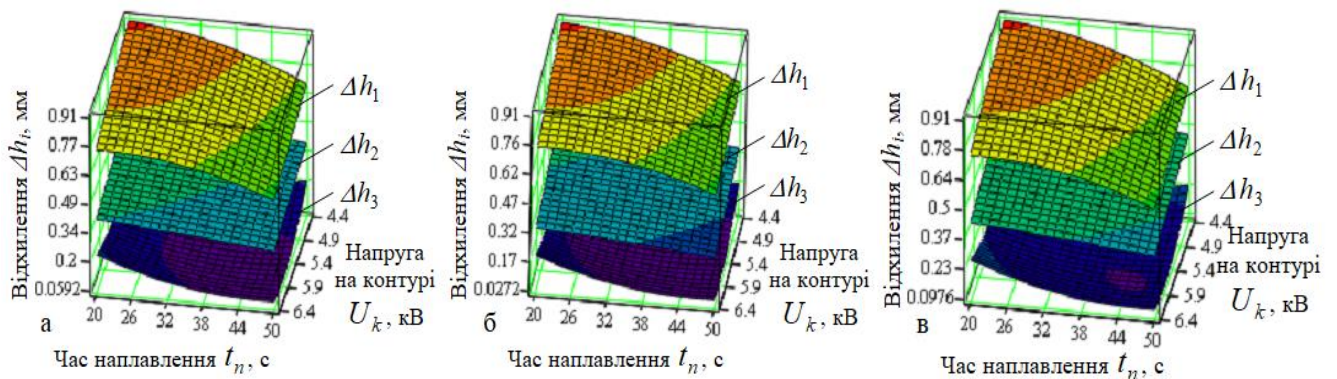


Рис. 19 Залежність функціональної зміни відхилення товщини шару наплавленого металу як функція $\Delta h_i = f_{\Delta h_i}(U_k)$: а, б, в – амплітуда коливання деталі, відповідно, $a_k = 0,1; 0,3; 0,5$ мм

Таким чином, на основі проведеного аналізу характеру зміни мінімального відхилення товщини шару наплавленого металу $\Delta h_{3min} = 0,03 \dots 0,04$ мм на поверхню деталі від раціонального значення $h = 1_{-0,2}^{+0,5}$ мм згідно з графічними побудовами можна констатувати, що раціональні значення параметрів індукційного способу наплавлення сплавом типу ПГ-С1 (Сормайт) із застосуванням горизонтальної вібрації будуть: амплітуда коливання деталі $a_k = 0,2 \dots 0,35$ мм; напруга на контурі $U_k = 5,3 \dots 5,8$ кВ; час наплавлення $t_n = 30 \dots 40$ с.

У п'ятому розділі наведено розробку обладнання для наплавлення тонких плоских деталей. На основі запропонованого способу з прикладанням горизонтальної вібрації в процесі індукційного наплавлення розроблено технологічний модуль, який встановлено на всіх трьох позиціях роторної лінії, що дозволяє здійснювати на першій позиції завантаження і розвантаження дисків, на другій – одночасне по всій зоні наплавлення засипання шихти, а на третій – одночасне нагрівання всієї зони наплавлення та механічні горизонтальні коливання деталі амплітудою 0,2 мм та частотою 50 Гц.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі вирішено нове наукове завдання підвищення експлуатаційних властивостей та стабільності товщини наплавленого шару металу на робочі поверхні деталей шляхом розроблення та обґрунтування параметрів в процесі індукційного наплавлення з застосуванням механічної вібрації.

1. На основі аналізу розробленої розрахунково-математичної моделі, яка описує вплив параметрів індукційного наплавлення з застосуванням механічної вібрації на структуру наплавленого металу встановлено, що оптимальні розміри структурних складових наплавленого металу досягаються за амплітуди та частоти механічних коливань 0,2 мм та 50 Гц відповідно.

2. Застосування механічної вібрації в процесі наплавлення порошкоподібним твердим сплавом типу ПГ-С1 (Сормайт1) на сталь Ст3 призводить до зміни розмірів структурних складових карбідів типу $(\text{Fe}, \text{Cr})_7\text{C}_3$ і $(\text{Fe}, \text{Cr})_3\text{C}$ та рівномірного розподілу вмісту хрому по товщині наплавленого шару металу, при цьому структурні складові подрібнюються з 10...12 мкм без вібрації до 7...10 мкм при вертикальній та до 3,5...7 мкм при горизонтальній вібрації.

3. Показано, що механічна вібрація в процесі наплавлення із застосуванням порошкоподібного твердого сплаву ПГ-С1 (Сормайт 1) дозволяє підвищити зносостійкість наплавленого шару металу з 2,2 без вібрації до 3,1 та 3,4 при вертикальній і горизонтальній вібрації та твердість наплавленого шару металу з 3500 МПа до 4800 МПа та 5400 МПа відповідно.

4. На основі аналізу гістограм і полігонів щільності розподілу випадковості процесу функціональної зміни товщини відхилення наплавленого шару металу на робочу поверхню деталі встановлено, що відхилення товщини шару наплавленого металу знаходиться в межах: без вібрації 0,62...0,87 мм з кількістю випадків рівним 27; з вертикальною вібрацією 0,41...0,51 мм з кількістю випадків рівним 57; з горизонтальною вібрацією 0,07...0,11 мм з кількістю випадків рівним 47.

5. Експериментально встановлено, що при застосуванні горизонтальної вібрації відхилення товщини шару наплавленого металу на робочу поверхню деталі від її раціонального значення рівного 1 мм знаходиться у допустимих межах від 0,03 мм до 0,04 мм за зміни амплітуди коливань 0,2...0,35 мм, напруги на контурі високочастотного генератора 5,3...5,8 кВ і часу наплавлення 30...40 с

6. За результатами аналітично-емпіричних досліджень встановлено раціональні параметри індукційного наплавлення із застосуванням механічної горизонтальної вібрації: амплітуда коливання 0,2...0,35 мм; середня напруга наплавлення 5,5 кВ; середній час наплавлення 35 с.

7. Розроблено трипозиційну роторну лінію для індукційного наплавлення сталевих дисків на базі технологічного процесу з використанням механічної вібрації, які захищені 4 патентами на корисні моделі України.

8. Результати роботи впроваджені на підприємствах ПП «Чіп» (Волинська обл., м. Володимир-Волинський) та КЗЕСО ПрАТ «Каховський завод електрозварювального устаткування» (Херсонська обл., м. Каховка) та навчальному процесі при підготовці бакалаврів та магістрів за спеціальністю «Зварювання» та «Прикладна механіка».

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Публікації у закордонних виданнях, включених до міжнародних наукометричних баз

1. Pulka Ch.V. Improving induction surfacing equipment and technology / Ch.V. Pulka, V.Ya. Gavrilyuk, **V.S. Senchishin** // Welding International. 2014. Vol. 28. No 4. P. 320-323. (**Scopus**). *(Здобувачем запропоновано пристрій і нову технологію індукційного наплавлення).*

Публікації, що входять до переліку фахових видань

2. Пулька Ч.В. Методика визначення амплітуди коливань електромагнітного вібратора при індукційному наплавленні / Ч.В. Пулька, **В.С. Сенчишин**, М.В. Шарик // Вісник ТНТУ. 2011. № 4. С. 120 - 125. *(Здобувачем розроблено методіку дослідження)*

3. Пулька Ч.В. Влияние вибраций детали в процессе наплавки на структуру и свойства металла / Ч.В. Пулька, О.М. Шаблій, **В.С. Сенчишин** та ін. // Автоматическая сварка. 2012. № 1. С. 27 - 29. *(Здобувачем проведено аналіз впливу вібрації на якість наплавлення металу)*

4. **Сенчишин В.С.** Современные методы наплавки рабочих органов почвообрабатывающих и уборочных сельскохозяйственных машин (обзор) / В.С. Сенчишин, Ч.В. Пулька // Автоматическая сварка. 2012. № 9. С. 48 - 54. *(Здобувачем проведено аналіз методів наплавлення)*

5. Пулька Ч.В. Влияние технологических схем индукционной наплавки на стабильность толщины наплавленного слоя / Ч.В. Пулька, **В.С. Сенчишин**, В.Я. Гаврилюк, М.С. Базар // Автоматическая сварка. 2013. №4. С. 65 - 67. *(Здобувачем проведено аналіз впливу параметрів наплавлення на товщину наплавленого шару)*

6. Пулька Ч.В. Влияние частоты тока на свойства наплавленного металла при индукционной наплавке / Ч.В. Пулька, В.Я. Гаврилюк, **В.С. Сенчишин**, Н.Г. Гордань // Технологические системы. 2014. № 2 (67). С. 75 - 80. *(Здобувачем наведено аналіз впливу струму на властивості наплавленого металу)*

7. Пулька Ч.В. Вібраційна потокова лінія для індукційного наплавлення тонких дисків / Ч.В. Пулька, В.М. Барановський, **В.С. Сенчишин** та ін. // Електронний науковий фаховий журнал Наукові доповіді НУБіП України. 2015. № 8 (57) (http://nd.nubip.edu.ua/2015_8/32.pdf) *(Здобувачем запропоновано структурну схему лінії)*

8. **Сенчишин В.С.** Расчет размеров структурных составляющих наплавленного индукционным способом металла с наложением механической вибрации / В.С. Сенчишин, Ч.В. Пулька // Автоматическая сварка. 2015. № 8. С. 34 - 37. *(Здобувачем розроблено метод розрахунку структурних складових)*

9. Пулька Ч.В. Пути совершенствования технологии индукционной наплавки тонких стальных дисков / Ч.В. Пулька, О.Н. Шаблій, **В.С. Сенчишин** та ін. // Автоматическая сварка. 2015. № 5-6 (742). С. 64 - 67. *(Здобувачем запропоновано способи застосування механічної вібрації)*

10. Пулька Ч.В. Исследование технологии индукционной наплавки с использованием механической вибрации / Ч.В. Пулька, М.І. Підгурський, **В.С. Сенчишин**, М.В. Шарик // Вісник Донбаської державної машинобудівної

академії. 2016. № 2(38). С. 202 - 205. *(Здобувачем запропоновано способи застосування механічної вібрації)*

11. Пулька Ч.В. Підвищення довговічності деталей ґрунтообробних сільськогосподарських машин з використанням різних методів наплавлення / Ч.В. Пулька, **В.С. Сенчишин**, М.В. Шарик // Технічний сервіс агропромислового, лісового та транспортного комплексів. 2018. № 13. С. 75 - 89. *(Здобувачем проведено аналіз методів наплавлення)*

12. Пулька Ч.В. Вплив горизонтальної механічної вібрації на експлуатаційні властивості наплавленого металу / Ч.В. Пулька, М.І. Підгурський, **В.С. Сенчишин** та ін. // Автоматическая сварка 2019. № 10. С 22 - 27. *(Здобувачем проведено аналіз методів наплавлення)*

Публікації апробаційного характеру

13. Шаблій О.М. Віброіндукційне наплавлення тонких плоских деталей / О.М. Шаблій, Ч.В. Пулька, **В.С. Сенчишин** : тези доп. 10 Міжн. симпозіуму українських інженерів механіків у Львові. НУ “Львівська політехніка”, 2011. С. 289 - 290. *(Здобувачем проведено аналіз методів наплавлення)*.

14. Шаблій О.М. Віброіндукційна технологія наплавлення тонких сталевих дисків / О.М. Шаблій, Ч.В. Пулька, **В.С. Сенчишин** : тези доп. Міжн. наук.-методичній конф. «Сучасні проблеми зварювання та споріднених технологій, підготовка кадрів». ПДТУ, 2011. С. 120 - 121. *(Здобувачем проведено аналіз методів наплавлення)*

15. Пулька Ч.В. Напрямки підвищення зносостійкості деталей машин при індукційному напавленні / Ч.В. Пулька, **В.С. Сенчишин**, В.Я. Гаврилюк, М.В. Шарик : тези доп. V Всеукраїнської міжгалузевої наук.-техн. конф. студентів, аспірантів та наукових співробітників «Зварювання та споріднені процеси і технології», НТУУ “КПІ”, 2012. С.164 - 166. *(Здобувачем проведено аналіз способів індукційного наплавлення)*

16. Пулька Ч.В. Совершенствование технологии индукционной наплавки стальных дисков / Ч.В. Пулька, **В.С. Сенчишин**, В.Я. Гаврилюк, М.В. Шарик : тези доп. наук.-техн. конф. «Современные проблемы металлургии, технологии сварки и наплавки сталей и цветных металлов». ІЕЗ ім. Є.О. Патона, 2012. С. 37 - 38. *(Здобувачем проведено аналіз способів індукційного наплавлення)*

17. Шаблій О.М. Нові технологічні процеси індукційного наплавлення тонких фасонних дисків / О.М. Шаблій, Ч.В. Пулька, **В.С. Сенчишин** та ін. : тези доп. Міжн. конф. в ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України «Сварка и родственные технологии. ІЕЗ ім. Є.О. Патона, 2013. С. 185 - 186. *(Здобувачем проведено аналіз способів індукційного наплавлення)*

18. Пулька Ч.В. Вплив технологічних операцій індукційного наплавлення на стабільність товщини шару наплавленого металу / Ч.В. Пулька, **В.С. Сенчишин**, В.Я. Гаврилюк : тези доп. 11 Міжн. симпозіумі українських інженерів-механіків у Львові. НУ “Львівська політехніка”, 2013. С. 199 - 200. *(Здобувачем проведено аналіз впливу параметрів наплавлення на товщину наплавленого шару)*

19. Пулька Ч.В. Шляхи вдосконалення процесу індукційного наплавлення деталей машин / Ч.В. Пулька, В.Я. Гаврилюк, **В.С. Сенчишин** : тези доп. II Міжн. інтернет-конференції «Проблеми довговічності матеріалів, покриттів та

конструкцій». м. Вінниця, 2014. С. 7. *(Здобувачем проведено аналіз способів індукційного наплавлення)*

20. Пулька Ч.В. Розрахункова модель оцінки впливу параметрів вібрації на структуру наплавленого шару металу / Ч.В. Пулька, **В.С. Сенчишин**, В.Я. Гаврилюк : тези доп. 12 Міжн. симпозіуму українських інженерів-механіків у Львові, Н.У. «Львівська політехніка», 2015. С. 125. *(Здобувачем проведено аналіз впливу вібрації на якість наплавлення металу)*

21. Пулька Ч.В. Дослідження властивостей шару наплавленого металу з використанням вібрації / Ч.В. Пулька, **В.С. Сенчишин**, В.Я. Гаврилюк : тези доп. VIII Міжн. конф. молодих вчених та спеціалістів «Зварювання та споріднені технології». с.м.т. Ворзель, 2015. С. 123. *(Здобувачем проведено аналіз властивостей шару наплавленого металу)*

22. Пулька Ч.В. Технологічні процеси в зварюванні та споріднених технологіях з використанням механічної вібрації / Ч.В. Пулька, М.І. Підгурський, В.М. Барановський, **В.С. Сенчишин** : тези доп. IV міжн. наук.-техн. конф. «Сварка и родственные технологии. Перспективы развития», присвяченої 50-ти річчю кафедри «Обладнання і технологія зварювального виробництва». ДДМА, м. Краматорськ, 2016. С.118 - 120. *(Здобувачем наведено переваги застосування індукційного способу наплавлення)*

23. Пулька Ч.В. Дослідження індукційного наплавлення тонких елементів конструкцій з використанням механічної вібрації / Ч.В. Пулька, **В.С. Сенчишин**, В.Я. Гаврилюк, М.В. Шарик : тези доп. 13у Міжн. симпозіумі українських інженерів-механіків у Львові. Н.У. «Львівська політехніка», 2017. С. 169 - 171. *(Здобувачем проведено аналіз впливу вібрації на якість наплавлення металу)*

24. Пулька Ч.В. Основні напрямки вдосконалення технології індукційного наплавлення тонких елементів конструкцій / Ч.В. Пулька, М.І. Підгурський, **В.С. Сенчишин** та ін. : тези доп. Міжн. конф. «Зварювання та споріднені технології – сьогодні і майбутнє», присвячена сторіччю НАН України. ІЕЗ ім. Є.О. Патона, 2018. С. 97. *(Здобувачем запропоновано застосування механічної вібрації індукційного способу наплавлення)*

25. Пулька Ч.В. Підвищення зносостійкості наплавленого металу з використанням механічної вібрації / Ч.В. Пулька, **В.С. Сенчишин**, М.В. Шарик : тези доп. Міжн. наук.-техн. конф. «Фундаментальні та прикладні проблеми сучасних технологій» до 100 річчя з дня заснування НАН України та на вшанування пам'яті Івана Пулюя (100 річчя з дня смерті). ТНТУ, 2018. С. 67. *(Здобувачем наведено аналіз шляхів підвищення зносостійкості наплавленого металу)*

26. Пулька Ч.В. Пристрій для керування енергоощадним режимом при індукційному наплавленні тонких елементів конструкції / Ч.В. Пулька, **В.С. Сенчишин**, М.В. Шарик : тези доп. 14 Міжн. симпозіумі українських інженерів-механіків у Львові. Н.У. «Львівська політехніка», 2019. С. 164 - 166. *(Здобувачем запропоновано пристрій для індукційного наплавлення)*

27. Пулька Ч.В. Вплив різних частот на експлуатаційні властивості наплавленого металу / Ч.В. Пулька, М.І. Підгурський, В.Я. Гаврилюк, **В.С. Сенчишин** : тези доп. Всеукраїнської конф. з міжн. участю «Проблеми

зварювання та споріднених технологій». м. Миколаїв: НУК, 2019. С. 40 - 42. *(Здобувачем наведено аналіз впливу частоти коливання на якість наплавленого металу)*

28. **В.С. Сенчишин.** Дослідження впливу параметрів віброіндукційного наплавлення на характеристики наплавленого шару металу / В.С. Сенчишин, Ч.В. Пулька, М.В. Шарик, В.Я. Гаврилюк : тези доп. ІХ Міжн. наук.-техн. конф. молодих учених та студентів «Актуальні задачі сучасних технологій». ТНТУ, 2020. С. 23 - 24. *(Здобувачем проведено аналіз впливу амплітуди на якість наплавленого металу)*

Патенти

29. Патент України на корисну модель № 54204, МПК (2009) В23К 13/00. Спосіб наплавлення тонких плоских сталевих деталей / Шаблій О.М., Пулька Ч.В., **Сенчишин В.С.**, Король О.І., Шарик М.В. – № u201006501. – Заявл. 28.05.2010. Опубл. 25.10.2010, Бюл. № 20/2010. *(Частка всіх співавторів однакова. Здобувачем запропоновано застосування механічної вібрації)*

30. Патент України на корисну модель № 59994, МПК (2011.01) В23К 13/00 Пристрій для наплавлення тонких фасонних дисків / Пулька Ч.В., **Сенчишин В.С.** – № u201013152. – Заявл. 05.11.2010. Опубл. 10.06.2011, Бюл. №11/2011. *(Частка всіх співавторів однакова. Здобувачем запропоновано конструктивну схему пристрою)*

31. Патент України на корисну модель №64371, МПК (2011.01) В23К 13/00. Спосіб наплавлення сталевих деталей / Пулька Ч.В., **Сенчишин В.С.** – № u201103195. – Заявл. 18.03.2011. Опубл. 10.11.2011, Бюл. № 21/2011. *(Частка всіх співавторів однакова. Здобувачем запропоновано застосування механічної вібрації)*

32. Патент України на корисну модель № 94727, МПК (2014.01) В23К 13/00. Автоматична потокова лінія для наплавлення тонких дисків / Пулька Ч.В., Гаврилюк В.Я., **Сенчишин В.С.**, Шарик М.В. – № u201406882. – Заявл. 19.06.2014. Опубл. 25.11.2014, Бюл. № 22/2014. *(Частка всіх співавторів однакова. Здобувачем запропоновано конструктивну схему потокової лінії)*

АНОТАЦІЯ

Сенчишин В.С. Підвищення ефективності індукційного наплавлення шляхом застосування механічної вібрації. – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.03.06 – зварювання та споріднені процеси і технології. – Донбаська державна машинобудівна академія, м. Краматорськ, 2021.

Дисертаційна робота присвячена підвищенню стабільності товщини шару наплавленого металу та експлуатаційних характеристик тонких деталей машин шляхом удосконалення та обґрунтування раціональних параметрів індукційного наплавлення з застосуванням механічної вібрації.

В роботі розроблено розрахунково-математичну модель, яка описує зміну параметрів структури наплавленого шару металу залежно від співвідношення характеристик і властивостей порошкоподібних сплавів та отримано аналітичні

залежності для визначення амплітуди та частоти коливань за яких забезпечуються оптимальні розміри структурних складових наплавленого металу. Отримано емпіричні математичні моделі відхилення товщини наплавленого металу залежно від зміни основних параметрів індукційного наплавлення та способів прикладання механічної вібрації.

На основі проведених теоретичних і експериментальних досліджень розроблена нова технологія і обладнання для індукційного наплавлення порошкоподібним твердим сплавом ПГ-С1 тонких деталей із застосуванням вертикальної і горизонтальної вібрації, яка дозволяє підвищити стабільність товщини шару наплавленого металу та зносостійкість в 1,5 рази за рахунок рівномірного розподілу карбідів $(Fe, Cr)_7C_3$ і $(Fe, Cr)_3C$ в наплавленому металі.

Ключові слова: індукційне наплавлення, механічна вібрація, зносостійкість, амплітуда коливань, порошкоподібний твердий сплав, товщина наплавленого металу.

АННОТАЦИЯ

Сенчишин В.С. Повышение эффективности индукционной наплавки путем применения механической вибрации. - На правах рукописи. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.03.06 – сварка и родственные процессы и технологии. – Донбасская государственная машиностроительная академия, г. Краматорск, 2021.

Диссертационная работа посвящена повышению стабильности толщины слоя наплавленного металла и эксплуатационных характеристик тонких деталей машин путем усовершенствования и обоснования рациональных параметров индукционной наплавки с применением механической вибрации.

В работе разработаны расчетно-математическую модель, которая описывает изменение параметров структуры наплавленного слоя металла в зависимости от соотношения характеристик и свойств порошкообразных сплавов и получены аналитические зависимости для определения амплитуды и частоты колебаний, при которых обеспечиваются оптимальные размеры структурных составляющих наплавленного металла. Получены эмпирические математические модели отклонения толщины наплавленного металла в зависимости от изменения основных параметров индукционной наплавки и способов приложения механической вибрации.

На основе проведенных теоретических и экспериментальных исследований разработана новая технология и оборудование для индукционной наплавки порошкообразным твердым сплавом ПГ-С1 тонких деталей с применением вертикальной и горизонтальной вибрации, которая позволяет повысить стабильность толщины слоя наплавленного металла и износостойкость в 1,5 раза за счет равномерного распределения карбидов $(Fe, Cr)_7C_3$ и $(Fe, Cr)_3C$ в наплавленном металле.

Ключевые слова: индукционная наплавка, механическая вибрация, износостойкость, амплитуда колебаний, порошкообразный твердый сплав, толщина наплавленного металла.

ABSTRACT

Senchyshyn V.S. Improvement of the efficiency of induction surfacing by applying mechanical vibration. – Manuscript copyright.

Ph. D. thesis in Engineering Science by speciality 05.03.06 - welding and related processes and technologies. – Donbass State Engineering Academy, Kramatorsk, 2021.

The thesis deals with the problems of increasing the stability of layer thickness of the deposited metal and operational characteristics of thin machine parts by improvement and substantiation of rational parameters of induction surfacing with the application of mechanical vibration.

The structure, wear resistance, stability of the deposited metal layer thickness on the working surfaces of the powdered hard alloy PG-C1 during induction surfacing using vertical and horizontal vibration are investigated.

The computational-mathematical model describing the change of parameters of the deposited metal layer structure depending on the ratio of characteristics and properties of powdered alloys structure is developed, and analytical dependences for the determination of oscillations amplitude and frequency which provide optimal dimensions of deposited metal structural components are obtained. Empirical mathematical models of the deposited metal thickness deviation depending on the change of the main induction surfacing parameters and methods of applying mechanical vibration are obtained.

On the basis of the carried out theoretical and experimental investigations the new technology and equipment for induction surfacing of thin parts with application of mechanical vibration which makes it possible to increase uniformity of thickness of the deposited metal layer and uniform distribution of carbides $(Fe, Cr)_7C_3$ and $(Fe, Cr)_3$ along the deposited metal thickness, which increases wear resistance by 1.5 times, is developed.

Experimental investigations of the deviation of the deposited metal layer thickness to the working surface of the part depending on the change of main induction surfacing parameters using mechanical vibration are carried out.

Special equipment for implementation of the proposed technological surfacing process and ensuring its implementation in practice is developed.

Key words: induction surfacing, mechanical vibration, wear resistance, oscillation amplitude, powdered hard alloy, deposited metal thickness.

Підписано до друку 26.03.2021 р.
Формат 60×90 Папір ксероксний.
Обл. вид. арк. 1,18
Наклад 100 прим. Зам. № 3393

Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя.
46001, м. Тернопіль, вул. Руська, 56.

E-mail: vydavnytstvo@tntu.edu.ua

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 4226 від 08.12.11.