

## ВІДГУК

офіційного опонента доктора технічних наук, професора, зав. кафедри  
«Обладнання і технологій зварювального виробництва»

**Макаренко Наталії Олексіївни**

на дисертаційну роботу **СЕНЧИШИНА Віктора Степановича**

### **«ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ІНДУКЦІЙНОГО НАПЛАВЛЕННЯ ШЛЯХОМ ЗАСТОСУВАННЯ МЕХАНІЧНОЇ ВІБРАЦІЇ»,**

представлену на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук  
за спеціальністю 05.03.06 – «Зварювання та споріднені процеси і технології»

#### **1. Актуальність теми дисертаційної роботи**

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.

Ці показники можна значно покращити завдяки введенням додаткових технологічних операцій, таких як, механічна вібрація в процесі наплавлення, а також способи їх прикладання. В літературних джерелах відсутні такі дослідження, які описують механізм подрібнення структурних складових наплавлених валиків, що дозволяють підвищити зносостійкість та стабільність товщини шару наплавленого металу. Тобто, маючи один і той

Вх. №	233/05
19.04	2021
ДДМА	

самий порошкоподібний твердий сплав, можна значно покращити експлуатаційні властивості наплавленого металу, які необхідно дослідити в даній роботі з використанням вертикальної та горизонтальної вібрації в процесі наплавлення.

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.

## 2. Наукова новизна одержаних результатів

Наукова новизна дисертаційної роботи полягає в розвитку методології розрахунку оптимальних параметрів структури наплавленого металу, в основі якої покладені співвідношення, що описують розпад структурних складових при індукційному наплавленні зносостійким порошкоподібним сплавом із застосуванням механічної вібрації в процесі наплавлення. Подрібнення структури вібраційним полем проаналізовано таку його проміжну стадію, як коагуляцію і взаємодію його частинок, розглядаючи рідкий метал як електроліт. Отримані математичні формули для визначення значень амплітуди і частоти вібрації, які забезпечують відповідні розміри структурних складових, що дозволяють покращити службові характеристики наплавленого шару металу.

*В якості нових наукових результатів можна визначити наступне:*

- 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;

– експериментально 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;

– експериментальні дослідження показали, 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.

### **3. Практична цінність роботи**

За результатами досліджень, виконаних дисертантом:

– 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;

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

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

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

– розроблено спеціальне обладнання для реалізації запропонованого технологічного процесу наплавлення.

Виробничу перевірку запропонованого способу 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.

Результати досліджень 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».

#### **4. Обґрунтованість наукових положень у дисертації та їх достовірність**

Ступінь обґрунтованості наукових положень, які сформульовані у дисертаційній роботі, а також висновків та практичних рекомендацій є високим, мету і задачі досліджень поставлено чітко. Достовірність одержаних результатів не викликає сумніву. Вірогідність викладених наукових положень та практичних рекомендацій підтверджено сучасними методиками, які автор використовував у своїх дослідженнях.

Основні наукові положення та результати досліджень доповідалися на численних національних і міжнародних семінарах, конференціях, а також симпозиумах. Це свідчить про достатню ступінь апробації роботи.

Основний зміст дисертації та найважливіші висновки викладені у статтях, опублікованих у фахових журналах, що входять до переліку рекомендованих МОН України видань для публікації праць здобувачів наукового ступеня.

#### **5. Структура та зміст дисертації**

Дисертація та автореферат містять усі необхідні структурні розділи, написані українською мовою й оформлені відповідно до вимог ДАК України.

Дисертаційну роботу виконано в Тернопільському національному технічному університеті імені Івана Пулюя. 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.

Представлено автореферат дисертації, який містить 20 сторінок друкованого тексту, в тому числі список з 32 робіт, опублікованих автором за темою дисертації.

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

У першому розділі проведено огляд існуючих методів наплавлення тонких деталей машин, в тому числі деталей ґрунтообробних машин, а також проаналізовано технологічні можливості і обладнання, показано переваги індукційного наплавлення та розглянуто область застосування механічної вібрації при зварюванні та обробленні деталей після наплавлення. Відзначено, що застосування віброоброблення в процесі зварювання дозволяє підвищити довговічність та ударну в'язкість зварних з'єднань відповідно в 4 та 2 рази за рахунок зниження рівня залишкових напружень і деформацій, які виникають після зварювання, а також утворення дрібнозернистої структури металу шва і біля шовної зони. Застосування віброоброблення деталей після наплавлення призводить до утворення рівномірної і більш дрібнозернистої структури наплавленого шару, за рахунок чого підвищується твердість наплавленого металу на 25%.

Із розглянутих способів встановлено, що найбільш ефективним для наплавлення деталей ґрунтообробних машин є спосіб індукційного наплавлення порошкоподібними твердими сплавами, але він також потребує удосконалення з метою підвищення експлуатаційних властивостей (зносоустійкості та стабільності товщини) наплавленого шару металу, сформульовано мету роботи і визначено основні задачі досліджень.

Другий розділ містить результати досліджень, які лягли в основу розроблення розрахунково-математичної моделі для визначення параметрів структурних складових наплавленого металу із застосуванням механічної вібрації.

Проведений аналіз і синтез досліджень вібраційної обробки металевих розплавів. Розглянуто вплив вібраційної обробки на якість зварних з'єднань, а також на процес кристалізації металевих розплавів і їх структуру після остигання металу. При цьому зазначено, що дія ультразвуку призводить до наступних змін структури: зменшенню середньої величини зерна; усуненню стовпчастої структури і утворенню рівноважного зерна; підвищенню

однорідності зливка, зменшенню міри розвитку ліквідаційних процесів, більш рівномірному розподілу неметалевих включень за усім обсягом зливка.

Для розуміння всього процесу кристалізації металу з метою побудови розрахункової моделі подрібнення його структури вібраційним полем проаналізовано таку його проміжну стадію, як коагуляцію і взаємодію його частинок, розглядаючи рідкий метал як електроліт.

На основі вище зазначеного, а також використовуючи деякі основні положення колоїдної хімії і атомної фізики, розроблена розрахунково-математична модель для оцінки параметрів структури наплавлень за вібрації. В основу моделі покладені математичні співвідношення, що описують розпад структурних складових при наплавленні за вібрації. Отриманні математичні формули для визначення значень амплітуди і частоти вібрації, які забезпечують відповідні розміри зерен наплавленого металу. На основі цих формул визначені параметри структури металу наплавленого індукційним методом в процесі вібрації на сталі Ст 3 з використанням шихти сплаву ПГ-С1. Отримані розрахунки добре узгоджуються з отриманими експериментальними даними, що підтверджує коректність і достатню точність сформульованої моделі.

В 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 та частоти коливання і способу прикладання механічної вібрації в роботі описано розроблені спеціальні методики та спеціальне лабораторне обладнання.

Для дослідження відносної зносостійкості наплавленого металу проти спрацювання було використано установку НК-М, яка дозволяє одночасно проводити дослідження для шести зразків у рівних умовах, одним з яких є еталонним. З метою встановлення функціональної залежності, яка характеризує та описує відхилення товщини шару наплавленого металу на робочу поверхню тонких деталей реалізували планований дво- та трифакторний експеримент типу, відповідно, ПФЕ  $3^2$  та ПФЕ  $3^3$  на трьох рівнях варіювання факторами.

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

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.

В роботі досліджено структуру, зносостійкість, стабільність товщини шару наплавленого металу на робочі поверхні порошкоподібним твердим сплавом ПГ-С1 при індукційному наплавленні з використанням вертикальної та горизонтальної вібрації.

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 мікроструктура наплавленого металу всіх досліджуваних зразків складається з первинних карбідів (комплексні карбіди типу  $(\text{Fe}, \text{Cr})_7\text{C}_3$  і  $(\text{Fe}, \text{Cr})_3\text{C}$ ) у вигляді великих пластин «олівцевого» типу, які мають гексагональну решітку з чіткою межею з'єднання з матрицею, карбідної евтектики і матричної аустенітної структури. Мікротвердість карбідів змінювалася в межах  $\text{HV}_{0,5} = 11710 \dots 12830$  МПа.

Показано, що карбіди, які мають вид шестигранників з середньою довжиною сторони 10...12 мкм, без вібрації подрібнюються до 7...10 мкм при вертикальній та до 3,5...7 мкм при горизонтальній вібрації.

Встановлено, що для зразків наплавлених без вібрації та з застосуванням вертикальної вібрації спостерігається значне збільшення хрому та вуглецю у верхній частині наплавленого шару, а при застосуванні горизонтальної вібрації вони розподілені рівномірно по всій товщині.

Показано, що застосування запропонованого способу наплавлення призводить до підвищення твердості з 3500 МПа за існуючою технологією до 4800 МПа та 5400 МПа відповідно при наплавленні із застосуванням вертикальної і горизонтальної вібрації, а також підвищення зносостійкості в 1,5 рази.

На основі проведених теоретично-експериментальних досліджень отримано емпіричні математичні моделі відхилення товщини наплавленого металу залежно від зміни основних параметрів індукційного наплавлення та

способів прикладання механічної вібрації.

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.

Результатами експериментальних досліджень показали, 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.

В п'ятому розділі розроблено 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 засипання шихти, а на третій – одночасне наплавлення всієї зони та механічні горизонтальні коливання деталі амплітудою 0,2 мм та частотою 50 Гц. Механізм горизонтальних коливань, змонтований у обертаючому столі, в якому на кожній із трьох позицій виконані прорізи в які встановлено корпуси, з можливістю їх вільного переміщення у горизонтальному напрямку, що містять шпинделі із тризубими фіксаторами, корпуси оснащені електромагнітами з датчиками годинникового типу та пружинами і встановлені за допомогою гнучких ланок на опорах кочення задля їх переміщення по напрямних, які змонтовані в обертаючому столі на місцях виконаних прорізів, а електромагніти механізму завантаження-розвантаження дисків виконані з трапецієподібним заглибленням із можливістю зручного встановлення та знімання деталей у тризубих фіксаторах.

**Висновки дисертації** повністю відображають найважливіші наукові та практичні результати дисертації. Вони сформульовані конкретно та логічно, відповідно до змісту дисертації.



**Зміст дисертації та автореферату ідентичний.** Автореферат дисертації достатньо повно висвітлює результати, наведені в самій дисертації.

#### **6. Апробація положень та результатів дисертації та повнота їх викладення в опублікованих роботах**

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.

Обсяг друкованих робіт та їх кількість відповідають вимогам МОН України щодо публікації основного змісту дисертації на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук.

#### **7. Зауваження по дисертаційній роботі**

1. На рисунку 12 було б доцільно представити відносну зносостійкість еталону, з яким Ви порівнювали результати, а також вказати з якого матеріалу він виготовлений.

2. В роботі Ви наплавляєте тонкі деталі товщиною 2-6 мм, а в роботі не показано чи можна даним способом наплавляти більші товщини.

3. В розділі 4 не вказана температура плавлення (шихти) °С і яким методом її заміряли.

4. В розділі 2 пункт 2.2 та 2.3 на графіках не представлено розмірностей величин.

5. В розділі 4 пункт 4.1 вазуєте на механізм регулювання амплітуди від 0 до 1,2 мм., а в роботі представлено тільки величина 0,2 мм. Доцільно було представити результати досліджень або пояснити як впливають інші величини амплітуди коливань.

6. В роботі описана технологія наплавлення твердим сплавом ПГ-С1 на сталь Ст3, а в першому розділі Ви згадуєте деталі які виготовлені з іншими сталей. Доцільно було б представити результати наплавлення і для них.

7. Не зрозумілим є те, що в п'ятому розділі запропоновано модернізовану конструкцію установки із прикладанням механічної горизонтальної вібрації на позиції наплавлення, а в роботі Ви досліджуєте вертикальну так і горизонтальну вібрацію.

8. В тексті роботи зустрічається багато граматичних помилок.

9. В розділі 1 описані способи підвищення ефективності індукційного наплавлення шляхом застосування екранування теплових і електромагнітних полів, доцільно було б в роботі представити порівняння отриманих вами результатів із результатами які були отримані вченими при застосуванні екранування.

### **Загальний висновок**

Відмічені недоліки та зауваження, зроблені до окремих положень дисертації, не стосуються кваліфікаційних ознак роботи і не знижують її загального наукового рівня.

У цілому дисертаційна робота Сенчишина Віктора Степановича «ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ІНДУКЦІЙНОГО НАПЛАВЛЕННЯ ШЛЯХОМ ЗАСТОСУВАННЯ МЕХАНІЧНОЇ ВІБРАЦІЇ», є завершеним науковим дослідженням в області наплавлення, яке за обсягом виконаних досліджень, їх новизною, науковою та практичною значимістю одержаних результатів та їх рівнем повністю відповідає вимогам до робіт на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук, зокрема, пунктам 9, 11 та 12 «Порядку присудження наукових ступенів», затвердженого постановою Кабінету Міністрів України від 24 липня 2013 року № 567.

Автор дисертаційної роботи — Сенчишин Віктор Степанович — заслуговує на присудження наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.03.06 – Зварювання та споріднені процеси і технології.

Завідувач кафедри «Обладнання і технологій зварювального виробництва» Донбаської державної машинобудівної академії,  
доктор технічних наук, професор,  
академік Підйомно-транспортної Академії наук України



Н.О. Макаренко

*Підпис Макаренко Н.О. засвідчує:*

Перший проректор, проректор з науково-педагогічної та методичної роботи



А.М.Фесенко