

Пояснювальна записка до кваліфікаційної роботи

бакалавра

Освітньо-кваліфікаційний рівень

Напрямок підготовки (спеціальність) 132 «Матеріалознавство. Відновлення та
технічний сервіс автомобілів»

Шифр і назва напрямку підготовки (спеціальності)

на тему: **«Вплив технології та складу на структуру композиційних
матеріалів автомобільної техніки»**

Шифр КвРМТВА 022138.01.07.00

Виконав студент 4-го курсу
група МТВА 22-1
Шифр

Підпис

Ярослав КЛЕПАЦЬКИЙ
Ім'я, ПРІЗВИЩЕ

Керівник к.т.н., доц.
Науковий ступінь, звання

Підпис

Владислав СВІДЕРСЬКИЙ
Ім'я, ПРІЗВИЩЕ

Нормоконтролер

Підпис

Олег БАБАК
Ім'я, ПРІЗВИЩЕ

До захисту допускаю:
Завідувач кафедри ТАМ
Назва

Підпис

Олександр ДИХА
Ім'я, ПРІЗВИЩЕ

Дата 10.06.26

ХМЕЛЬНИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет інженерії, транспорту та архітектури

Кафедра трибології, автомобілів та матеріалознавства

Галузь знань 13 «Механічна інженерія»

Спеціальність – 132 «Матеріалознавство»

Рівень вищої освіти – Перший бакалаврський

Освітньо-професійна програма – «Відновлення та технічний сервіс автомобілів»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри ТАМ

проф., д.т.н. Духа О.В.

15 04 2026 року

ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

Клепацького Ярослава Валентиновича

Прізвище, ім'я, по батькові

1. Тема проекту:

«Вплив технології та складу на структуру композиційних матеріалів автомобільної техніки»

керівник роботи Свідерський Владислав Петрович к.т.н., доцент

Прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, учені звання

Затверджено наказом ректора університету від 7 лютого 2026р. № 23 Д14)

2. Строк подання студентом роботи на кафедру 10 червня 2026 року

3. Вихідні дані до проекту: Матеріали практики; робочі креслення ущільнюючих елементів; нормативно – технологічна документація по розбиранню, дефектації, складанню і регулюванню вузла тертя; вимоги з охорони праці та безпеки роботи при виконанні ремонтних робіт.

4. Зміст пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити).

1. Аналіз особливостей механізму абразивного зношування робочих органів дорожньо-транспортних машин. 2. Аналіз технологій і матеріалів для отримання шаруватих композиційних матеріалів. 3. Розробка технології отримання шаруватих композиційних матеріалів. 4. Дослідження впливу швидкості нагрівання і охолодження, товщини шару, що наплавляється та введення графіту на структуру та властивості шаруватого композиційного матеріалу.

5. Перелік графічного матеріалу (із зазначенням обов'язкових креслень)

Графічна частина роботи представлена у вигляді презентації на слайдах.

6. Консультанти розділів роботи

| Розділ | Прізвище, ініціали та посада консультанта | Підпис, дата | |
|--------|---|----------------|------------------|
| | | завдання видав | завдання прийняв |
| | | | |
| | | | |
| | | | |

6. Дата видачі завдання: 15.04 2026 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

| № з/п | Назва розділу кваліфікаційної роботи | Строки виконання | Примітка |
|-------|---|------------------|----------|
| 1 | Аналіз особливостей механізму абразивного зношування робочих органів дорожньо-транспортних машин. | 1.05.2026 | |
| 2 | Аналіз технологій та складу для отримання шаруватих композиційних матеріалів автомобіля. | 15.05.2026 | |
| 3 | Розробка технології отримання шаруватих композиційних матеріалів. | 25.05.2026 | |
| 4 | Дослідження впливу швидкості нагрівання і охолодження, товщини шару, що наплавляється та введення графіту на структуру та властивості шаруватого композиційного матеріалу | 1.06.2026 | |
| 5 | Оформлення пояснювальної записки | 2.06.2026 | |
| 7 | Оформлення презентації бакалаврської роботи | 5.06.2026 | |
| 8 | Нормоконтроль бакалаврської роботи | 9.06.2026 | |
| 9 | Підписання розділів. Затвердження дати захисту | 10.06.2026 | |

Студент



Ярослав КЛЕПАЦЬКИЙ

Керівник роботи



Владислав СВИДЕРСЬКИЙ

РЕФЕРАТ

Кваліфікаційна бакалаврська робота студента групи МТВА-22-1 Клепацького Ярослава Валентиновича на тему: «Вплив технології та складу на структуру композиційних матеріалів автомобільної техніки».

Обсяг роботи: 52 с., 4 табл., 19 рис., 14 джерел зі списку літератури, 1 додаток.

Актуальність роботи. В машинах дорожньо-транспортного призначення найпоширенішим пошкодженням вважається зношення робочих органів. Згідно даних фірм, які ремонтують і експлуатують дану техніку, майже 50 відсотків усіх операцій по відновленню працездатності їх – це заміна чи реставрація робочих органів, що втратили свої розміри або форму в результаті ударно-абразивного зносу. Частіше всього найбільшого зношення отримують робочі органи машин, що працюють при високих тисках на поверхні, які виконують безпосередньо корисну роботу. В даний час з ціллю модернізації виробництва впроваджується новітнє обладнання та інноваційні рішення. Використання композиційних матеріалів у багатьох галузях промисловості дає можливість одержати потрібне поєднання експлуатаційних та механічних властивостей. Розроблення технології керування процесами структуроутворення матеріалів з урахуванням швидкості їх нагріву та охолодження дозволяє застосовувати один і той самий матеріал для отримання заданих фізико-механічних і експлуатаційних властивостей. Використання даних технологій для отримання шаруватих композиційних матеріалів робочих органів дорожньо-транспортної техніки дає можливість підвищити термін експлуатації і збільшити техніко-економічні показники.

Об'єкт дослідження – шаруватий композиційний матеріал, одержаний способом індукційної наплавки, нанесений на поверхні робочих елементів автомобільної техніки.




Метою роботи є дослідження впливу технології одержання та методу введення графіту до складу наплавлювальної шихти на процес структуроутворення та властивості шаруватого композиційного матеріалу, призначеного для робочих органів автомобільної техніки.

Графічна частина представлена у вигляді презентації.

Ключові слова: МЕХАНІЗМ, АБРАЗИВНЕ ЗНОШУВАННЯ, ШАРУВАТИЙ КОМПОЗИЦІЙНИЙ МАТЕРІАЛ, ТЕХНОЛОГІЯ НАПЛАВЛЕННЯ, ФЛЮС, ТВЕРДІСТЬ, ЗНОСОСТІЙКІСТЬ, КАРБІД, МІКРОСТРУКТУРА.

Зміст

| | |
|--|----|
| Вступ..... | 7 |
| 1 Аналіз особливостей механізму абразивного зношування робочих органів дорожньо-транспортних машин | 9 |
| 2 Аналіз технологій та складу для отримання шаруватих композиційних матеріалів | 13 |
| 2.1 Аналіз технологій отримання шаруватих композиційних матеріалів | 13 |
| 2.2 Аналіз зносостійких матеріалів..... | 20 |
| 2.3 Вибір компонента основи шаруватого композиційного матеріалу..... | 23 |
| 2.4 Вибір флюсу | 24 |
| 2.5 Постановка задачі на дослідження впливу технології отримання та складу на структуру зносостійких композиційних матеріалів робочих органів автомобільної техніки..... | 26 |
| 3 Технологія отримання шаруватих композиційних матеріалів | 27 |
| 3.1 Аналіз процесів, що протікають при індукційній наплавці | 27 |
| 3.2 Технологія проведення наплавлення..... | 29 |
| 3.3 Вибір режимів проведення наплавлення | 32 |
| 3.4 Технологія проведення наплавлення на установці УВГ 2-25..... | 35 |
| 3.4.1 Підготовка шихтових матеріалів..... | 35 |
| 3.4.2 Підготовка підкладки під наплавлення..... | 35 |
| 3.4.3 Вибір флюсу..... | 35 |
| 3.4.4 Метод подвійного наплавлення..... | 36 |
| 3.4.5 Індукційне нагрівання зразка..... | 36 |
| 3.5 Методи проведення досліджень та застосовуване наукове обладнання..... | 37 |

| | | | | |
|--|------|------------------|---|----------|
| КвРМТВА 022138.01.07.00 | | | | |
| Зм. | Арк. | Надокум. | Підпис | Дата |
| Виконав | | Клепацький Я.В. |  | 10.06.20 |
| Перевір. | | Свідерський В.П. |  | 12.06.20 |
| Н.контр. | | Бабак О.П. |  | 10.06.20 |
| Затвер. | | Диха О.В. |  | 10.06.20 |
| Вплив технології та складу на структуру композиційних матеріалів автомобільної техніки | | | | |
| | | Літера | Аркуш | Аркушів |
| | | Н | 5 | 52 |
| ХНУ, група МТВА-22-1 | | | | |

| | |
|---|----|
| 4 Дослідження впливу технології отримання та складу на структуру шаруватого композиційного матеріалу..... | 38 |
| 4.1 Вплив швидкості нагрівання та охолодження на структуроутворення зносостійких композиційних матеріалів | 38 |
| 4.2 Вплив на структуроутворення зносостійких композиційних матеріалів товщини шару, що наплавляється | 40 |
| 4.3 Вплив введення графіту на структуру та властивості шаруватого композиційного матеріалу | 43 |
| Висновки | 49 |
| Список використаних джерел | 50 |
| Додатки..... | 52 |

| | | | | | | |
|------|------|----------|--------|------|-------------------------|------|
| | | | | | КвРМТВА 022138.01.07.00 | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | 6 |

ВСТУП

Сучасний прогрес машинобудівної галузі нерозривно пов'язаний із застосуванням інноваційних технологій і новітніх матеріалів. На даному етапі українські та зарубіжні науковці активно досліджують зносостійкі матеріали, призначені для виготовлення робочих органів дорожньої автомобільної техніки.

Система, що включає абразивне середовище, робочі поверхні деталей, які з ним взаємодіють, кінематику та параметри їх відносного руху, а також робочі зусилля і тиски взаємодії, становить основні чинники, які необхідно враховувати під час дослідження питань, пов'язаних із якістю роботи дорожніх машин, довговічністю їхніх робочих органів і деталей несучих конструкцій [1,2]. Згідно основних положень протидії абразивному зносу необхідно підвищувати міцність робочих поверхонь деталей, а це знижує інтенсивність процесів їх мікрорізання і термін зношування.

Оновним з напрямків даної проблеми науковці вважають отримання матеріалів, властивості яких формуються в процесі застосування відповідних технологій виготовлення виробу.

В даний час перспективними будуть сталі з регульованою аустенітною матрицею, що має карбоборидні дисперсні включення [3,4]. При цьому залишається можливість проведення локальної термічної обробки та нанесення зміцнювальних або відновлювальних покриттів.

Формування крупнозернистої структури матеріалу суттєво знижує міцність і зносостійкість робочих поверхонь, оскільки така структура погіршує механічні властивості та сприяє дифузії й накопиченню вуглецю, водню та других елементів як із зовнішнього середовища, так і з глибших шарів металу. Через підвищені коефіцієнти дифузії вздовж меж зерен створюються сприятливі умови для накопичення у цих ділянках вакансій, дефектів та розвитку мікротріщин. Дослідження впливу розміру зерна на абразивну зносостійкість сталі засвідчили, що зі зменшенням зерна підвищується опір сталі ударному та мікроударному руйнуванню [4].

На даному етапі актуальними вважаються дослідження технологій та

| | | | | | | |
|------|------|----------|--------|------|-------------------------|------|
| | | | | | КвРМТВА 022138.01.07.00 | Арк. |
| | | | | | | 7 |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | |

матеріалів, їх термічної обробки та подрібнення зерна, зниження коефіцієнта дифузії водню і інших елементів.

Використання таких матеріалів під час отримання шаруватих композиційних структур дає змогу сформувати необхідний комплекс фізико-механічних властивостей, які забезпечують високу експлуатаційну стійкість виробу в заданих умовах роботи.

Застосування високоенергетичного впливу до порошкових матеріалів дає змогу регулювати швидкість їх нагрівання та охолодження, а відтак – контролювати формування максимально рівноважних структур. Перевагою використання порошкових матеріалів є можливість їх змішування чи введення різноманітних добавок, що забезпечує додатковий вплив на формування необхідних експлуатаційних властивостей.

| | | | | | | |
|------|------|----------|--------|------|-------------------------|------|
| | | | | | КвРМТВА 022138.01.07.00 | Арк. |
| | | | | | | 8 |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | |

1 АНАЛІЗ ОСОБЛИВОСТЕЙ МЕХАНІЗМУ АБРАЗИВНОГО ЗНОШУВАННЯ РОБОЧИХ ОРГАНІВ ДОРОЖНЬО-ТРАНСПОРТНИХ МАШИН

Найбільш поширеним видом спрацювання деталей дорожньо-транспортних машин, а саме їх робочих органів вважається абразивне зношування. У процесі роботи тверді частинки ґрунту (глинисті включення, пісок, пил та каміння) виконують роль абразиву, спричиняючи інтенсивне зношування поверхонь робочих органів. Аналіз показав, що до 80 відсотків випадків простоїв дорожньо-транспортних машин спричинено саме абразивним зношуванням деталей. В результаті цього, звичайно знижується продуктивність та збільшуються витрати. Зношування робочих органів підвищує опір і енергоспоживання агрегату. До речі, тертя ґрунту о робочі поверхні може становити до 30 відсотків загального опору дорожньо-транспортних машин. При цьому збільшенням зношування інструментів приводить до ще більшого зростання опору руху.

Зношені робочі органи менш ефективно ріжуть ґрунт, потребують більшого тягового зусилля, що спричиняє підвищену витрату палива та погіршення якості виконання робіт. Внаслідок інтенсивного зношування термін служби деталей обмежений. До прикладу: роторні ножі, фрези нерідко потребують заміни вже після приблизно 80 годин експлуатації. Отже, підвищення зносостійкості робочих органів є надзвичайно важливим для дорожньо-транспортних машин, оскільки воно безпосередньо впливає на економічність та надійність автомобільної техніки. Це обумовлює посилену увагу науковців до дослідження механізмів абразивного зношування та розроблення способів його зменшення.

З позиції фізико-механічних процесів, абразивне зношування відбувається під час контакту твердих частинок із поверхнею матеріалу за умови наявності відносного руху та прикладеного навантаження.

Різнять двотільне та тритільне абразивне зношення. При двотільному зношуванні абразив є складовою однієї з контактуючих поверхонь. Наприклад, виступи шорсткості твердішого матеріалу дряпають поверхню м'якшого металу.

| | | | | | | |
|------|------|----------|--------|------|-------------------------|------|
| | | | | | КвРМТВА 022138.01.07.00 | Арк. |
| | | | | | | 9 |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | |

Тритільне абразивне зношення характерне для робочих органів дорожньо-транспортних машин: тверді частинки ґрунту виступають третім тілом між робочим органом та дорожнім покриттям, вільно перекочуються або ковзають між ними, виконуючи роль абразивного середовища. Тому, саме тритільний абразивний знос присутній при роботі дорожньо-транспортних машин.

Абразивне зношування на мікрорівні відбувається через кілька основних механізмів.

Перший – це мікрорізання або різальний знос, відбувається, коли частинка тверда ковзає по м'якій поверхні як різець, зрізуючи при цьому дрібні часточки матеріалу у вигляді стружки. Під час мікрорізання на поверхні утворюються подовжені подряпини, а знятий шар матеріалу переходить у дрібні частинки – продукти зношування.

Другий механізм мікрорізання полягає в тому, що абразивна частинка не зрізає матеріал повністю, а вдавлюється в нього, спричиняючи його пластичне переміщення убік. У результаті утворюється борозна з піднятими гребенями по краях, до яких частина матеріалу прилипає, формуючи валики. З часом ці гребені можуть зазнавати наклепу тобто ущільнення та частково відламуватися, зокрема через утворення втомних тріщин під дією багаторазових навантажень.

Третій механізм – крихке викришування, що супроводжується утворенням мікротріщин та відколюванням частинок. Він характерний для відносно крихких матеріалів або виникає за умов високих локальних напружень. У цьому випадку тверда частинка спричиняє зародження тріщин у приповерхневому шарі металу, внаслідок чого фрагменти матеріалу вириваються у вигляді пластинок чи лусочок. Після такого процесу на поверхні залишаються вибоїни, ямки різних розмірів.

Досить часто всі ці механізми діють одночасно, хоча в залежності від умов один із них домінує. До прикладу: для в'язких сталей мають перевагу пластичні механізми зношування – мікрорізання та борознення, тоді як у твердих або крихких матеріалах домінує тріщиноутворення та крихке уламкове зношування.

Основним чинником, який визначає характер зношування вважають співвідношення твердості абразивних частинок та матеріалу деталі. Чим вища

| | | | | | | |
|------|------|----------|--------|------|-------------------------|------|
| | | | | | КвРМТВА 022138.01.07.00 | Арк. |
| | | | | | | 10 |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | |

твердість абразивних частинок порівняно з металом, тим інтенсивніше проявляється різальний тип зношування з утворенням стружки. Відповідно до класичної теорії, коли твердість інструмента перевищує твердість абразиву менш ніж у 1,3 рази, спостерігається інтенсивне зношування за механізмом мікрорізання. Натомість при суттєво вищій твердості матеріалу інструмента процес зношування сповільнюється і переважає мікрорізання без відриву великих частинок матеріалу. Досліджуючи ковкий чавун було доведено, що збільшення твердості матриці від бейніту до мартенситу підвищило її зносостійкість лінійно.

Додатковий захист від зношування у сплаві виконують карбідні тверді включення, проте вони можуть навіть самі вириватися, коли слабкий зв'язок з основою. Додатковим підтвердженням впливу міцності є порівняння сталей із різною мікроструктурою: мартенситна сталь із твердістю 45 HRC зношувалася помітно повільніше, ніж перлітна сталь із твердістю 25 HRC за однакових умов, причому шорсткість її поверхні після випробування була у 1,3–1,9 рази меншою [5]. Можна зробити висновок, що твердість та мікроструктура матеріалу підтверджують переважний механізм його спрацювання із-за пластичної деформації та крихке руйнування.

Механізм абразивного зношування проявляється в утворенні борозни і формування частинок зносу в результаті відламування гребня та утворення тріщин. Рухаючись по поверхні, часточки абразиву створюють повздовжнє заглиблення з підняттям гребнів матеріалу. У слідуючих циклах гребінь стискається та досить часто ламається, утворюючи пластинчасті дрібненькі зношені часточки.

За звичайних умов експлуатації робочі органи дорожньо-транспортних машин зазнають багаторазового дряпання поверхні потоком абразивних частинок. Унаслідок цього поступово відбувається наклеп, тобто зміцнення поверхневого шару при пластичному деформуванні або накопичення мікротріщин у разі крихкого руйнування. Після певного періоду роботи на сталі зазвичай формується тонкий зміцнений шар із втисненими залишками абразиву чи оксиду – так званий трибошар, який частково виконує захисну функцію. Отже, механізм абразивного

| | | | | | | |
|------|------|----------|--------|------|-------------------------|------|
| | | | | | КвРМТВА 022138.01.07.00 | Арк. |
| | | | | | | 11 |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | |

зношування має ряд стадій: притирка початкова, стабільне зношування і при високих навантаженнях прискорене руйнування.

Під час детального аналізу процесу зношування безпосередньо на робочій поверхні інструмента можна виокремити кілька послідовних стадій та характерних ознак. Спочатку поверхня нового знаряддя має власну мікрогеометрію, тобто шорсткість, що залишилася після обробки. У перші години роботи відбувається процес притирання: абразив згладжує нерівності, на поверхні з'являються хаотично розташовані подряпини. Згодом встановлюється більш стабільний режим зносу, за якого рельєф поверхні адаптується до дії потоку абразивних частинок. Основним механізмом, як зазначалося раніше, є утворення численних дрібних заглиблень і подряпин, орієнтованих уздовж напрямку відносного руху ґрунту. Аналіз шорсткості робочих органів показав, що на їхніх поверхнях переважають поздовжні риски, при цьому середня глибина подряпин приблизно у 2,7 раза більша за висоту гребенів [5]. Це свідчить про те, що матеріал переважно видаляється у вигляді стружки, а не накопичується на поверхні. По краях деяких заглиблень спостерігалися мілкі тріщини, а також відламані шматки гребнів, які утворюють ямки. Крім того, були зафіксовані окремі круглі заглибини, що отримані від ударів більших за розміром камінчиків під крутим кутом. Навколо подібних вибоїн спостерігається відсутність деформованого пластичного краю, що свідчить про крихкий характер відколювання матеріалу в цих зонах. У разі дрібнозернистого ґрунту картина дещо інша: подряпини стають меншими й менш глибокими, проте їх кількість зростає, а широкі борозни практично відсутні. Водночас збільшується число дрібних вибоїн, значна частина яких заповнена часточками абразиву. Це свідчить про те, що за переважання дрібного абразиву зношування матеріалу відбувається переважно шляхом мікрорізання дрібними частинками, тоді як великі зерна, хоча й трапляються рідше, спричиняють локальні, глибші пошкодження. Встановлено, що принципової різниці у механізмах зношування різних ділянок робочого органу не виявлено. Вирішальним чинником є склад ґрунту, а не геометрія поверхні.

| | | | | | | |
|------|------|----------|--------|------|-------------------------|------|
| | | | | | КвРМТВА 022138.01.07.00 | Арк. |
| | | | | | | 12 |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | |

2 АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЙ ТА СКЛАДУ ДЛЯ ОТРИМАННЯ ШАРУВАТИХ КОМПОЗИЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ

2.1 Аналіз технологій отримання шаруватих композиційних матеріалів

Останнім часом в промисловості використовують досить різні способи та методи зміцнення поверхні виробів, а також їх відновлення [1,2]. Детальному дослідженню різних методів відновлення зношених деталей сільськогосподарської, дорожньої та іншої техніки присвячені праці чисельних зарубіжних та вітчизняних науковців [3,4]. Одержані підсумки досліджень даних науковців дали можливість визначити більш перспективні способи отримання шаруватих композиційних матеріалів (ШКМ), а саме: нанесення на основу спеціальних розплавів із використанням новітніх технологій і нового обладнання. Основними методами одержання шаруватих композиційних матеріалів для значного підвищення зносостійкості робочих органів техніки вважають плазмовий, електрошлаковий, електродуговий, індукційний та інші способи.

Одержання шаруватих композиційних матеріалів у процесі високоенергетичного нагріву супроводжується частковим розплавленням металу основи та його змішуванням із розплавленим металом наплавленого шару, що змінює хімічний склад системи. Такі зміни ускладнюють прогнозування структурно-фазового стану й властивостей сформованих шаруватих композиційних матеріалів [6,7]. Тому під час вибору способу їх одержання ключовими критеріями виступають глибина проплавлення металу основи та швидкість нагріву. Електродуговий метод у різних модифікаціях використовують для відновлення зношених поверхонь деталей, усунення дефектів у литих виробах, а також для наплавлення шарів із заданими або спеціальними властивостями. За усталеного режиму електродугового процесу плавлення електрод розплавляється рівномірно під дією теплоти дуги. Однак не вся її потужність витрачається безпосередньо на розплавлення металу – частина енергії втрачається через випромінювання, плавлення покриття тощо. Крім того, не весь розплавлений метал бере участь у

| | | | | | | |
|------|------|----------|--------|------|-------------------------|------|
| | | | | | КвРМТВА 022138.01.07.00 | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | 13 |

формуванні наплавленого шару, оскільки частина його втрачається внаслідок випаровування та розбризкування. Сукупні втрати під час наплавлення покритими електродами, з урахуванням втрат на випромінювання, розбризкування та недогарки, можуть досягати 30 відсотків. До недоліків дугових методів наплавлення належить значна глибина проплавлення металу основи. Під час одношарового наплавлення вміст основного металу в наплавленому шарі може сягати до 60 відсотків [8].

Електрошлаковий спосіб має цілий ряд переваг, які в значній мірі відрізняють його від інших методів одержання шаруватих композиційних матеріалів [9,10]. На утворення шлакової кірки на поверхні одержаного шару металу застосовується флюс, витрата якого становить не більше 5 відсотків маси. У порівнянні із дуговим процесом, витрата електроенергії буде у 1,5 разів менше, а флюсу менше аж у 20 разів. У випадку вертикального положення поверхні, яка формується, спостерігається полегшене спливання газових бульбашок, часточок шлаку та видалення їх з металу. Ось чому при електрошлаковому способі утворення пустот та нещільностей значно нижча, ніж при дуговому. Сприяють цьому і значно нижчі швидкості нагріву і охолодження межі розділу, ніж при електродуговому способі.

Недоліками вважається: можливість формування шару на поверхні виробу лише у вертикальному розташуванні, можливість одержати однакову товщину шару лише на плоских поверхнях, переривання процесу не можливе, ділянка розплавлення більше 3,0 мм.

Останнім часом ефективно використовується плазмове поверхнєве зміцнення – це один із методів зміцнення джерелами нагріву з високою щільністю [11]. Суть його полягає у термічних фазових та структурних перетвореннях, які спостерігаються при концентрованому нагріві робочої поверхні виробу плазмовим струменем і відведення тепла у матеріал.

Плазмовий метод ґрунтується на подачі електродного матеріалу в порошковому вигляді у плазмовий струмінь, де він нагрівається до температури плавлення і в розплавленому стані у формі крапель переноситься на поверхню

| | | | | | | |
|------|------|----------|--------|------|-------------------------|------|
| | | | | | КвРМТВА 022138.01.07.00 | Арк. |
| | | | | | | 14 |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | |

основного металу [12,13]. Введення металевих порошків у плазмовий струмінь здійснюють за допомогою інертних газів, таких як аргон або азот. Для нанесення покриття на деталі циліндричної форми плазмотрон закріплюють на супорті токарного верстата, який переобладнано для роботи з низькою частотою обертів. Як матеріал наплавленого шару можуть застосовуватися не лише металеві, а й неметалеві порошки, зокрема керамічні, що дає змогу формувати металокерамічні покриття.

Під час реалізації плазмово-порошкового методу застосовують три типи плазмових дуг: прямої, непрямої дії та комбіновану. Найбільш технологічно досконалою є комбінована дуга, оскільки така схема дає змогу в широкому діапазоні окремо регулювати ступінь нагрівання присадкового матеріалу та металу основи.

Вміст металу основи в наплавленому шарі не перевищує 5 відсотків. Струмінь плазмовий оточений потоком захисного газу, який ефективно запобігає окисненню та забезпечує надійний захист розплавленого металевого порошку. Завдяки стабільності тиску дуги сформована поверхня відзначається гладкістю і потребує мінімальної механічної обробки. Плазмовий порошковий спосіб може також виконуватися з подачею порошку в хвостову частину зварювальної ванни. Такий підхід забезпечує більш стабільне надходження присадкового матеріалу, а при використанні порошкових карбідів запобігає їх розкладанню, оскільки вони, потрапляючи безпосередньо у ванну, не зазнають руйнівної дії електричної дуги. В результаті формується шар металу з композиційною структурою. Реалізація цього методу передбачає застосування порошків сферичної форми з розміром частинок у межах 40–400 мкм.

Плазмовий метод із використанням струмопровідного присадного дроту надає мінімальне оплавлення металу основи та забезпечує високу продуктивність процесу. В залежності від товщини наплавленого шару, діаметра дроту та розмірів деталі, сила струму, яка подається на дріт, становить 30–70 А, а на виріб – 100–200 А. Глибина проплавлення в середовищі аргону становить приблизно 0,65–1,6 мм, а в середовищі CO₂ – 4,5–5 мм.

| | | | | | | |
|------|------|----------|--------|------|-------------------------|------|
| | | | | | КвРМТВА 022138.01.07.00 | Арк. |
| | | | | | | 15 |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | |

Недоліками газотермічних і плазмових способів наплавлення, що використовують порошкові матеріали для формування покриттів, вважають складність забезпечення стабільних властивостей та необхідного рівня якості покриттів, одержаних із багатокомпонентних механічних сумішей порошоків. Це зумовлено можливістю сегрегації компонентів під час змішування та транспортування суміші. Окрім того, розмір частинок порошку визначається параметрами живильника, тому при створенні багатокомпонентних систем розміри гранул усіх складових повинні бути однаковими або відрізнятися лише у допустимих межах.

В даний час широко використовується у промисловості для відновлення зношених деталей індукційний метод, який має особливість перед іншими способами [14]. Отримання розплаву металевого порошку при даному індукційному способі проходить за рахунок дії струму, який індукується. Для нагріву над деталлю розташовують індуктор, який представляє собою кілька витків мідної трубки чи шини. Саме по індуктору тече струм високої частоти (СВЧ), навколо якого створюється електромагнітне змінне поле. Змінне електромагнітне поле приводить до збудження вихрових струмів у поверхневому шарі виробу, а це в свою чергу викликає інтенсивне нагрівання цього верхнього шару та розплавлення присадкового матеріалу. При збільшенні частоти струму глибина плавлення, тобто частка металу компонента основи у розплаві металевого порошку знижується. За такого методу отримання композиційних шаруватих матеріалів товщина межі розділу буде становити до 40–60 мкм.

Отримання шаруватих композиційних матеріалів за індукційним способом виконується із використанням металевих порошоків досить різного хімічного складу. Розмір частинок порошку шихти має широкий гранулометричний діапазон і може бути від 0,1 до 1 мм.

Спікання металевих порошоків, які входять до флюсової частини шихти, запобігає притягуванню феромагнітних компонентів до індуктора під час його вмикання на нагрів. При застосуванні парамагнітних порошоків попередня термічна обробка чи брикетування не обов'язкові.

| | | | | | | |
|------|------|----------|--------|------|-------------------------|------|
| | | | | | КвРМТВА 022138.01.07.00 | Арк. |
| | | | | | | 16 |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | |

Використання індукційного методу дає змогу наносити шар на деталі циліндричної форми. Для цього шихту висипають на поверхню виробу, попередньо нагріту до 300–400 °С, після чого флюсова частина забезпечує спікання та повторення конфігурації деталі. Розплавлений металевий порошок утримують у горизонтальному положенні.

Відомі наступні методи нанесення розплавів металу на поверхню деталей із застосуванням струму високої частоти:

- армування розплавленого приповерхневого шару основного металу за рахунок введення тугоплавкої або малорозчинної присадки;
- виливання розплавленого присадного металу на попередньо нагрітий основний матеріал;
- заливання розплавленого додаткового металу на заздалегідь підігріту основу деталі;
- опускання попередньо нагрітої деталі у форму-тигель, заповнену розплавленим металом;
- заливка відцентрова деталей циліндричної форми;
- плавлення спеціально нанесеної на зміцнювану поверхню порошкової шихти.

Метод розплавлення пасти безпосередньо на поверхні основного компонента, де паста являє собою суміш порошкоподібних твердих сплавів із зв'язувальною речовиною, був опрацьований Г. Глушковим і М. Лозинським для наплавлення плужних лемешів. Твердосплавний порошок заданої granulometрії змішують із рідким зв'язувальним компонентом (наприклад, патокою або мелясою). Одержаною пастою покривають зміцнювану ділянку (ріжуче лезо), далі проводять сушку на протязі 3–4 годин попередньо на повітрі, а потім у термопечі при температурі 100 °С. Така операція передбачає щільне прилягання присадкового металу до основи. Опісля пасту повністю розплавляють в ізолюваному багатовитковому індукторі, виконаному у вигляді сплюснутої спіралі. Для більш інтенсивного нагрівання твердого сплаву повітряний проміжок між верхнім шаром пасти та внутрішньою поверхнею індуктора роблять у кілька разів меншим, ніж

| | | | | | | |
|------|------|----------|--------|------|-------------------------|------|
| | | | | | КвРМТВА 022138.01.07.00 | Арк. |
| | | | | | | 17 |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | |

зазор з протилежного боку лемеша. Джерелом струмів високої частоти слугує лампова установка ГЗ-46. Мінімальна тривалість індукційного нагрівання становить 2 хвилини. Отриманий шар стеліту має твердість НВ 600, його структура складається з евтектики та карбідів голчастої та ромбічної форм. Утворення монолітної та міцної сполуки пояснюється частковим оплавленням поверхневого шару основного металу та подальшої дифузії вуглецю з твердого сплаву у сталь. Перевагою цієї роботи є розплавлення більш легкоплавкого, ніж сталь, сплаву на ділянці компонента основи, що зміцнюється.

Одержання шаруватого композиційного матеріалу оснований на застосуванні струму високої частоти для нагріву компонента основи і плавлення додаткового наповнювального матеріалу. В якості наповнювального матеріалу використовують спеціальну порошкову шихту. Шихта формується із гранульованого порошку металевого та флюсів на основі борного ангідриду, бури, фтористого кальцію тощо. Варто зазначити, що під час застосування цього методу склад шихти можна готувати безпосередньо перед проведенням процесу, змішуючи порошки різного хімічного складу з флюсом. Шихту наносять на поверхню деталі шаром певної товщини, що визначається вимогами до товщини майбутнього покриття. Після цього компонент із нанесеною шихтою підводять під індуктор, під'єднаний до високочастотної установки, за аналогією з процесом індукційного загартування.

Коли струм високої частоти проходить по контуру індуктора, у приповерхневих шарах основного металу виникають струми Фуко, внаслідок чого зовнішній шар деталі швидко нагрівається. Шар шихти, що знаходиться між індуктором і нагріваною поверхнею, через високий електричний опір металевого порошку майже не реагує на змінне електромагнітне поле. Її нагрів відбувається переважно шляхом передачі тепла від розігрітого металу основи. Тому температура, за якої завершується плавлення шихти, має бути нижчою за температуру солідус основного металу, а надходження тепла до нагріваної поверхні повинно відбуватися значно швидше, ніж його відведення вглиб деталі та втрати в навколишнє середовище.

До складу шихти входить флюс, що виконує наступні захисні функції:

| | | | | | | |
|------|------|----------|--------|------|-------------------------|------|
| | | | | | КвРМТВА 022138.01.07.00 | Арк. |
| | | | | | | 18 |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | |

– усунення оксидної плівки з поверхні основного металу та частинок порошку, що перешкоджає їх взаємодії з киснем повітря;

– уповільнення втрати тепла в навколишнє середовище.

Доречно відмітити, що підбір флюсу виконується з розрахунком таким, щоб розкислення розплаву порошку металевого проходило на протязі декількох секунд. При виконанні наплавлення як джерела живлення безпосередньо застосовують високочастотне обладнання з частотою 70 кГц.

Нині науковці створили та впровадили у виробництво транзисторний високочастотний генератор нового покоління УВГ2-25, який відрізняється високим коефіцієнтом корисної дії. Застосування даного обладнання дає можливість в двічі скоротити тривалість нагрівання (рисунок 2.1).

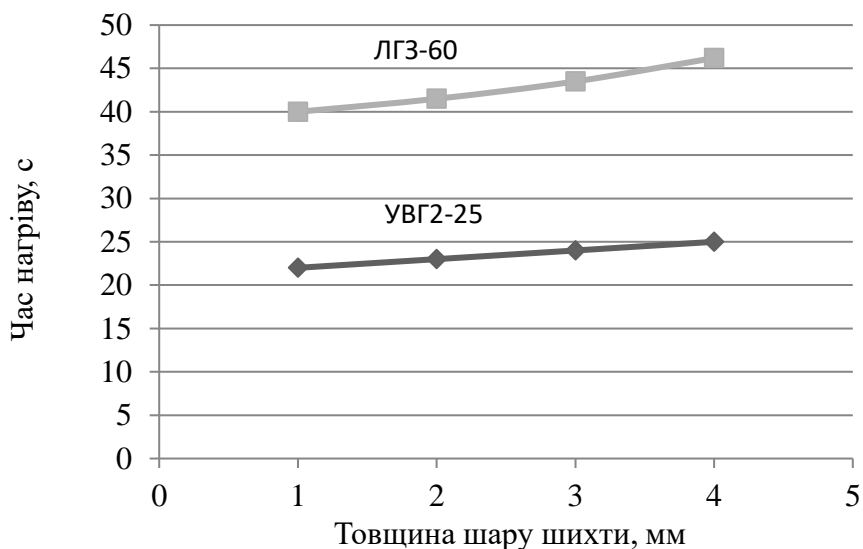


Рисунок 2.1 – Залежність часу нагріву від товщини шару шихти

Максимальне споживання потужності не перевищує 30 кВт, тоді як гранична вихідна потужність складає 25 кВт. При цьому використання електроенергії у три рази менше у порівнянні з ламповими генераторами. Швидкість формування покриття становить приблизно 1 дм²/хв. Завдяки швидкому виходу на робочий режим і можливості оперативної зміни технологічної операції істотно зростає коефіцієнт виробничого завантаження установки. Використання цього генератора дає можливість одержувати шаруваті композиційні матеріали з заданою швидкістю

| | | | | | | |
|------|------|----------|--------|------|-------------------------|------|
| | | | | | КвРМТВА 022138.01.07.00 | Арк. |
| | | | | | | 19 |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | |

нагрівання та товщиною проплавлення металу компонента основи.

Утворення наплавленого поверхневого шару композиційного матеріалу при частоті генератора 44 або 66 кГц зменшує розмір перехідної зони до 5–10 мкм. Створення межі розділу шаруватого композиційного матеріалу відбувається в результаті адгезії при рідкотвердофазній взаємній дії компонентів при перебігу дифузійних процесів. Ця перевага направлена на регулювання структури і властивостей шаруватого композиційного матеріалу із врахуванням характеру зношення виробу.

Індукційний спосіб одержання композиційних матеріалів відповідає простій технологічній схемі. Ця схема є стабільною в умовах серійного виробництва і використовується для зміцнення деталей різного призначення, крім того і для зміцнення фасонних деталей [14].

2.2 Аналіз зносостійких матеріалів

Дослідження та розробки науковців у галузі зносостійких матеріалів показують, що для отримання деталей, які працюють в умовах абразивного, ударно-абразивного чи ударного зносу ефективним є використання білих чавунів. Про це свідчить ряд експериментальних досліджень, проведених у цій галузі [16, 17]. Досить висока зносостійкість даних сплавів має місце завдяки наявності в структурі легованих карбідів заліза і карбідів легуючих елементів.

Ученими розглянуто та виділено три групи, які мають практичне значення для одержання композиційних шаруватих матеріалів в умовах індукційного високоенергетичного нагрівання:

– леговані чавуни, призначені для роботи в умовах абразивного зношування як у ґрунтовому середовищі чи за наявності сипучого абразиву, так і під дією агресивних абразивних середовищ без ударних навантажень.;

– сплави на основі кобальту та нікелю застосовують для виготовлення литих деталей, що працюють в умовах абразивного зношування при низьких і середніх температурах, а також за поєднання абразивного впливу з ударними

| | | | | | | |
|------|------|----------|--------|------|-------------------------|------|
| | | | | | КвРМТВА 022138.01.07.00 | Арк. |
| | | | | | | 20 |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | |

навантаженнями;

– псевдосплави застосовують у вузлах, що працюють в умовах абразивного зношування, у тому числі за поєднання абразивної дії з ударними навантаженнями, а також під впливом агресивних абразивних середовищ без ударних ефектів.

Наглядне відображення позитивних сторін та недоліків зносостійких матеріалів для індукційного способу та області їх використання представлені у таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 - Рекомендації щодо застосування зносостійких матеріалів

| Умови експлуатації | Рекомендований сплав | Позитивні сторони | Недоліки |
|---|---------------------------|---|---|
| Абразивне зношування в ґрунтовому середовищі та під дією сипучого абразиву | Псевдосплави різних типів | Відсутність дефектів в поверхневому шарі, застосування не дефіцитних матеріалів, значне збільшення терміну служби | Неприпустимість експлуатації за наявності ударних навантажень |
| Зношування під дією агресивного абразивного середовища без ударних навантажень | ФБХ-6-2 | Висока зносостійкість | Підвищена крихкість під час статичного, а особливо динамічного навантаження |
| Зношування в абразивно-корозійному середовищі | Стеліти різних типів | Висока жароміцність, достатній спротив абразивному зносу, ерозії та корозії | Висока ціна із-за наявності вольфраму і кобальту |
| Виготовлення литих деталей, що працюють в умовах абразивного зношування в діапазоні низьких і середніх температур | Ніхард | Висока зносостійкість як при низьких так і при середніх температурах | Чутливість до ударів та різких змін температури, необхідність термічної обробки |
| Абразивний знос у комплексі з ударними навантаженнями | Сормаїт № 1 ПГС-27 | Висока зносостійкість при ударно- абразивному зношуванні, не потрібна термічна обробка | Нижча зносостійкість по відношенню до сплавів: ФБХ-6-2, псевдосплавів |

Хімічний склад досліджуваних матеріалів представлений у таблиці 2.2.

| | | | | | | |
|------|------|----------|--------|------|-------------------------|------|
| | | | | | КвРМТВА 022138.01.07.00 | Арк. |
| | | | | | | 21 |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | |

Таблиця 2.2 – Хімічний склад зносостійких матеріалів

| Марка матеріалу | Хімічний склад, % | | | | | | | | | | | |
|---------------------|---|---------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|---------------|---------------|-------------|--------|-----|
| | C | Cc | Ni | B | Si | Mn | V | Co | W | Ti | Fe | |
| Сормайт | 2,5– 3,5 | 25,0– 31,0 | 3,0– 5,0 | – | 2,8– 4,2 | 0,5– 1,5 | – | – | – | – | Основа | |
| ПГС-27 | 3,9 | 28,0 | 2,5 | – | 1,2 | 0,8 | – | – | – | | | |
| ФБХ-2 | 3,5– 5,5 | 32,0– 37,0 | – | 1,5– 2,2 | 1,0– 2,5 | 1,5– 4,0 | – | – | – | | | |
| ХТ 5У | 3,5– 4,0 | 28,0– 30,0 | – | – | 4,5– 5,5 | 1,5– 2,0 | 1,5– 2,0 | – | – | 3,2– 3,7 | | |
| Ніхард | 2,7– 3,6 | 1,5– 2,6 | 3,0– 5,0 | – | 0,4– 0,7 | 0,4– 0,7 | – | – | – | – | | |
| ВИСЧХОМ-9 | 2,5– 4,8 | 2,0– 4,5 | – | – | 0,4– 0,7 | 4,0– 6,5 | – | – | – | – | | |
| Колмоної | До 1,0 | 8,0– 18,0 | основа | 1,5– 4,0 | 1,0– 5,0 | – | – | – | – | – | | |
| Стеліт В2К | 1,8– 2,5 | 27,0– 33,0 | 2,0 | – | 1,0– 2,0 | До 1,0 | – | 47,0– 53,0 | 13,0– 17,0 | – | | 2,0 |
| Стеліт В3К | 1,0– 1,5 | 28,0– 32,0 | 2,0 | – | 2,5 | До 1,0 | – | 58,0– 62,0 | 4,0– 6,0 | – | | 2,0 |
| НХ13С2Р2 | 0,2– 0,35 | 12,0– 14,0 | основа | 1,8– 2,0 | 2,0– 2,2 | До 0,4 | – | – | – | 0,2 | | 3,0 |
| Реліт | 3,8– 4,0 | – | – | – | – | – | – | – | 95,0 | – | – | |
| Псевдосплав ПС-3 | Сормайт № 1 + реліт | | | | | | | | | | | |
| Псевдосплав ПС-4 | Сормайт № 1 + ферохром | | | | | | | | | | | |
| Псевдосплав ПС-5 | Сормайт № 1 + ферохром (58 %) + феротитан (2 %) | | | | | | | | | | | |

Після кристалізації переважна більшість високовуглецевих матеріалів утворюють безліч тріщин. Але це не завжди утворюється дефект, так як знімаються напруги на межі розділу одержаного металу та металу основи, при цьому запобігаючи розтріскуванню основи. Якщо передбачається, що поверхня з сіткою тріщин зазнаватиме під час експлуатації сильних ударних навантажень, доцільно попередньо нанести на металеву основу пластичний буферний шар.

2.3 Вибір компоненту основи шаруватого композиційного матеріалу

На сьогодні використовують різноманітні зносостійкі матеріали, склад яких варіюється від залізних сплавів із загальним вмістом легуючих елементів 1,5–2 % до сплавів на основі нікелю, кобальту та вольфраму з концентрацією легуючих компонентів 90–96 %.

Завдяки зміні хімічного складу та структури наплавленого матеріалу можливо отримати комплекс механічних та експлуатаційних властивостей, потрібний для конкретних експлуатаційних умов.

Температура плавлення металеві основи, що використовується для отримання ШКМ, повинна перевищувати температуру плавлення наплавленої шихти на 100–150 °С. Така різниця необхідна для коректного визначення механізму взаємодії компонентів і контролю глибини проплавлення основного металу. Температура плавлення матеріалу основи має становити 1350–1400 °С. Металева основа повинна характеризуватися високою міцністю, належною жорсткістю, теплопровідністю, а також забезпечувати якісне зварювання та можливість механічної обробки, залишаючись при цьому економічно вигідною. Зсилаючись на поставлені вимоги, у якості металеві основи шаруватих композиційних матеріалів для виконання експериментальних досліджень обрана будівельна низьколегована конструкційна сталь 09Г2С – ГОСТ 1577-93.

Даний вид сталі легований марганцем та кремнієм. До речі, відрізняється низьким вмістом вуглецю, що надає можливість цю сталь зварювати. Коефіцієнт лінійного температурного розширення (КЛТР) сталі 09Г2С відповідає значенню

| | | | | | | |
|------|------|----------|--------|------|-------------------------|------|
| | | | | | КвРМТВА 022138.01.07.00 | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | 23 |

$13,8 \cdot 10^{-6}$, а температура плавлення – вихідним вимогам.

2.4 Вибір флюсу

Одержання шаруватих композиційних матеріалів з використанням індукційного високоенергетичного нагріву виконується без спеціального обладнання та в звичайних умовах, при яких неминуче відбуваються такі процеси як взаємозв'язок розплаву металевго порошку із киснем, азотом та парами води. Окрім того, потрібно забезпечити необхідний захист металу, який наплавляється. Для досягнення цього застосовують флюси, саме вони захищають метал від окислювання на усьому протязі отримання шаруватих композиційних матеріалів. Склад шихти наступний: 70–80 % металевго порошку і 20–30 % флюсу.

Вимоги до флюсів. Під дією змінного електромагнітного поля у розплавленому металі виникає циркуляція, яка сприяє його активній взаємодії з флюсом. У процесі такої взаємодії рідкий метал очищується: зменшується вміст кисню, що зазвичай присутній у формі оксидної плівки на поверхні частинок. Окрім того, флюс уповільнює втрати тепла в навколишнє середовище і може легувати метал під час перебування в розплаві. Склад флюсу необхідно підбирати так, щоб процес розкислення відбувався протягом кількох секунд. Флюс має формувати щільний захисний шар шлаку над розплавленим металом. При нагріванні металевго основи і шихти першочергово має плавитися флюс, тому його температура плавлення повинна бути значно нижчою, ніж у компонентів ШКМ. Флюси відіграють ключову роль у процесі плавлення металу, тож до них висувається низка вимог. Вони мають забезпечувати надійний захист зони плавлення від дії навколишнього повітря, сприяти якісному формуванню металевго шару, забезпечувати легке відділення шлакової кірки та запобігати появі пор, тріщин і інших дефектів.

Отже, до флюсів індукційного методу пред'являють наступні вимоги:

– під час контакту флюсу з рідким металом неприпустиме надходження до сплаву елементів, які можуть погіршити його фізико-механічні властивості.;

| | | | | | | |
|------|------|----------|--------|------|-------------------------|------|
| | | | | | КвРМТВА 022138.01.07.00 | Арк. |
| | | | | | | 24 |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | |

– температура плавлення флюсу має бути набагато нижчою від температури плавлення компонентів ШКМ;

– рідкий флюс має ще до початку плавлення металевго порошку очистити поверхню його частинок і поверхню металевої основи від оксидних плівок, а також захистити як основу, так і частинки сплаву від подальшого окиснення під час нагрівання до температури наплавлення;

– за умов температурних коливань склад флюсу має залишатися стабільним. Його зміна є небажаною, оскільки може виникати внаслідок випаровування окремих компонентів флюсу або їхньої взаємодії між собою чи з розплавленим металом;

– шлак, який утворюється, повинен бути мінімальної щільності, що приводить до виведення неметалічних елементів із розплавленого металу;

– під час кристалізації металу шлак має характеризуватися максимально низькою в'язкістю та високою газопроникністю.

При збільшенні в'язкості шлаку газові бульбашки, піднімаючись до межі поділу металу й шлаку, тиснуть на шар шлаку та рідкого металу. За низької газопроникності шлакового шару це призводить до утворення на поверхні розплавленого металу заглиблень (кратерів), які погіршують рівномірність сформованого шару та знижують якість його зовнішнього вигляду:

– флюс у робочому температурному діапазоні не повинен утворювати чи виділяти токсичних речовин;

– суміш флюсу з гранульованими сплавами має зберігати однорідність і не розшаровуватися під час транспортування, зберігання та процесу наплавлення.

На основі проведеного зовнішнього огляду матеріалів для проведення експериментальних досліджень у якості наплавляючого матеріалу вибрано сплав сормайт в порошковому виді, хімічний склад якого приведено у таблиці 2.1. Цьому сплаву відповідає низький коефіцієнт тертя, крім цього, він стійкий до інтенсивного абразивного і ударного помірною зносу. Температура плавлення сормайту має чисельне значення – 1250 °С.

У якості матеріалу підкладки обрано будівельну низьколеговану

| | | | | | | |
|------|------|----------|--------|------|-------------------------|------|
| | | | | | КвРМТВА 022138.01.07.00 | Арк. |
| | | | | | | 25 |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | |

конструкційну сталь 09Г2С ГОСТ 1577-93. Ця сталь температуру плавлення має на 150 °С вище чим температура плавлення металевого порошку.

У якості захисного середовища обрано подрібнений флюс АН-20.

2.5 Постановка задачі на дослідження впливу технології отримання та складу на структуру зносостійких композиційних матеріалів робочих органів автомобільної техніки

Мета роботи полягала в дослідженні впливу технології одержання та введення до складу наплавлюваної шихти графіту на структуроутворення і властивості шаруватого композиційного матеріалу робочих органів автомобільної техніки.

Об'єкт дослідження: шаруватий композиційний матеріал, отриманий способом індукційної наплавки та нанесений на робочі органи автомобільної техніки.

Предметом досліджень є технологія наплавлення, склад та властивості зносостійких композиційних матеріалів.

Основні завдання дослідження.

1. Виконати аналіз особливостей механізму абразивного зношування робочих органів дорожньо-транспортних машин.
2. Проаналізувати технології та склад для одержання шаруватих композиційних матеріалів.
3. Розробити технологію одержання шаруватих композиційних матеріалів.
4. Виконати дослідження впливу швидкості нагрівання та охолодження, товщини шару, який наплавляється та введення графіту, на структуру і властивості шаруватого композиційного матеріалу.

| | | | | | | |
|------|------|----------|--------|------|-------------------------|------|
| | | | | | КвРМТВА 022138.01.07.00 | Арк. |
| | | | | | | 26 |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | |

3 ТЕХНОЛОГІЯ ОТРИМАННЯ ШАРУВАТИХ КОМПОЗИЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ

3.1 Аналіз процесів, що протікають при індукційному наплавленні

З енергетичної та технологічної точки зору, найважливішою відмінністю одержання шаруватих композиційних матеріалів в умовах індукційного високоенергетичного нагріву, науковці вважають метод підведення тепла та кінетику індукційного нагріву.

Розплавлення нанесеної шихти, що відбувається завдяки теплопередачі від основного металу, зумовлює певні особливості процесу. Зокрема, це призводить до підвищення температури металевого порошку до рівня температури металу основи.

Під час нагрівання до температури точки Кюрі (768 °С) індукований струм через поверхневий ефект зосереджується переважно у тонкому приповерхневому шарі основного компонента, товщиною приблизно 0,1 мм. Такий період характеризується попереднім нагрівом компонента основи та температурним градієнтом, який підсилюється. У випадку переходу точку Кюрі глибина проникнення струму у метал компонента основи підвищується в залежності від частоти у 10–20 разів. Завдяки цьому, розподілення температури у металі компонента основи буде більш рівномірним. А коли шар шихти досягне температури 600–750 °С в залежності від складу флюсу, почнеться плавлення флюсів, а також почнуть осідати частинки металевого порошку і прохідиме видалення газових бульбашок.

До початку плавлення флюсів різниця температур між основним компонентом і шихтою є особливо значною та досягає 250–300 °С. Після появи рідкої фази теплопередача в присадковому матеріалі різко інтенсифікується, що призводить до помітного зменшення температурного градієнта. Розплавлений флюс добре змочує окиснену поверхню сталі й частинки металевого порошку, утворюючи навколо них безперервну захисну оболонку. По мірі подальшого нагрівання поверхневий натяг між флюсом та металом знижується. При цьому

| | | | | | | |
|------|------|----------|--------|------|-------------------------|------|
| | | | | | КвРМТВА 022138.01.07.00 | Арк. |
| | | | | | | 27 |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | |

умови змочування покращуються і відповідно підвищується хімічна активність флюсу.

За температур близько 800 °С рідкий флюс реагує з оксидними плівками та тонким приповерхневим шаром основного компонента, перетворюючи їх на рідкий шлак і тим самим захищаючи матеріали від подальшого окиснення. Це створює сприятливі умови для формування міцного металевого з'єднання між шарами композиційного матеріалу. Коли температура досягає солідусу металевого порошку, металева частина шихти починає плавитися, а шлак, який має значно меншу густину, витісняється на поверхню розплавленої ванни.

Розплавлені частинки металевого порошку змочують очищену від оксидів поверхню металу основного компонента, розтікаються по ній і з'єднуються між собою, що призводить до зниження вільної енергії системи. Комплекс процесів, які проходять при формуванні шаруватих композиційних матеріалів при високоенергетичному індукційному нагріві, поділяють на наступні етапи:

- нагрівання компонента основи до температури плавлення флюсової частини шихти;
- розплавлення флюсів;
- нагрів і розплавлення металевої частини шихти;
- взаємодія між собою розплаву металевого порошку, флюсів і компонента основи;
- в період кристалізації формування шару з рідкого металу;
- у верхньому інтервалі температур охолодження, яке супроводжується дифузійними процесами;
- охолодження у нижньому інтервалі температур, у випадку, коли дифузійні процеси повністю припинені.

Головні закономірності, що визначають перебіг фізико-хімічних процесів на кожному етапі, значною мірою подібні до тих, які спостерігаються при газоплазових або електродугових способах [8].

| | | | | | | |
|------|------|----------|--------|------|-------------------------|------|
| | | | | | КвРМТВА 022138.01.07.00 | Арк. |
| | | | | | | 28 |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | |

3.2 Технологія проведення наплавлення

Експериментальне обладнання та оснащення. Одержання експериментальних зразків шаруватого композиційного матеріалу виконували при допомозі індукційної високочастотної установки типу УВГ 2-25 з генератором ГНОМ-25М1 (рисунок 3.1).



а – індукційний генератор ГНОМ-25М1; б – виносний навантажувальний контур

Рисунок 3.1 – Високочастотна індукційна установка типу УВГ 2-25 з генератором ГНОМ-25М1

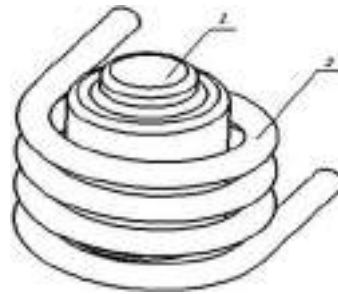
Представлений генератор надає можливість зменшити кількість можливих негативних факторів, що можуть виникнути при застосуванні даного методу.

Генератор установки УВГ 2–25 працює від стандартної трифазної мережі 380/220 В із частотою 50 Гц і повністю виконаний на напівпровідникових компонентах. Він відзначається компактністю, тривалим ресурсом роботи та високим коефіцієнтом корисної дії. За максимальної вихідної потужності 25 кВт генератор споживає не більше 30 кВт. Транзисторна електрична схема перетворює вхідну частоту 50 Гц у робочі частоти 44 або 66 кГц, які подаються на індуктор. Пристрій оснащений ефективною системою обмеження струму, що захищає електронні елементи від перевантаження та запобігає його виходу з ладу.

| | | | | | | |
|------|------|----------|--------|------|-------------------------|------|
| | | | | | КвРМТВА 022138.01.07.00 | Арк. |
| | | | | | | 29 |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | |

Габаритні розміри генератора такі: 720 – 500 – 470 мм, маса 60 кг. Генератор з'єднується з погоджувальним пристроєм за допомогою гнучкого кабелю, а з системою охолодження – через водоохолоджувальні шланги. Охолодження забезпечується звичайною проточною водою під тиском 2–5 атм і витратою до 10 л/хв. За відсутності водопостачання може застосовуватися автономна система рідинного охолодження, що працює в замкненому циклі циркуляції охолоджувальної рідини.

Індуктор – це чотири виткові спіралі з феритовим концентратором всередині (рисунок 3.2).



- 1 – водоохолоджувана кварцова колба з феритним сердечником;
- 2 – витковий індуктор.

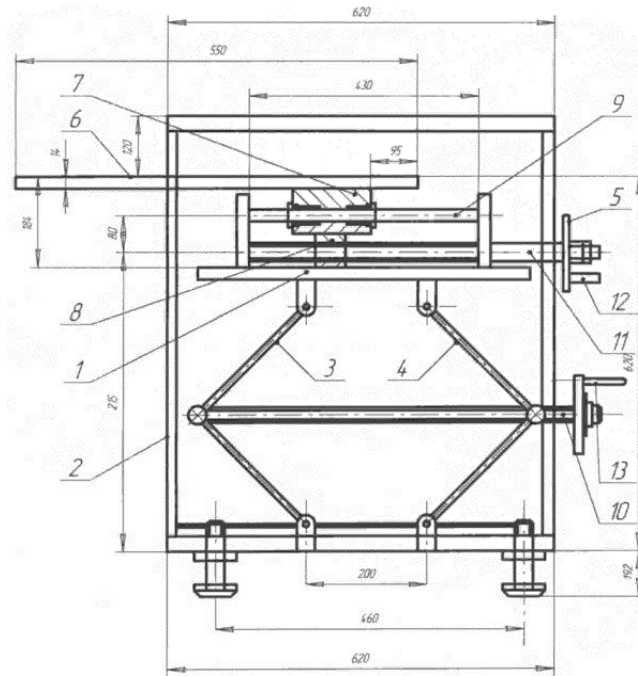
Рисунок 3.2 – Схема виткового індуктора з феритним сердечником

Горизонтальне і вертикальне переміщення виробу відносно індуктора здійснюється спеціальним столом (рисунок 3.3). Переміщення вертикальне стола виконується за допомогою рукоятки 13 та ходового гвинта 10, які приводять у дію важелі 3 та 4. Саме важелі приводять до переміщення середнього стола 1 у вертикальному напрямку. Крім того, до середнього стола прикріплена ходова гайка 8 із повзуном 7. При допомозі рукоятки 12 та гвинта ходового 11 приводиться в дію повзун, переміщаючи одночасно горизонтально стіл 6.

Шихту у вигляді порошку наносять на поверхню базового елемента рівномірним шаром за допомогою дозатора чи розрівнюючи лопаткою до заданої

| | | | | | | |
|------|------|----------|--------|------|-------------------------|------|
| | | | | | КвРМТВА 022138.01.07.00 | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | 30 |

товщини. Оскільки використовуваний металевий порошок не має феромагнітних властивостей, технологія виготовлення шаруватих композиційних матеріалів спрощується, а саме: відпадає потреба попереднього брикетування порошку для усунення його електромагнітної взаємодії з індуктором.



1 – стіл середній; 2 – каркас; 3, 4 – важіль; 5 – колонка; 6 – стіл верхній; 7 – повзун; 8 – гайка ходова; 9 – направляюча; 10, 11 – гвинт ходовий; 12, 13 – рукоятка

Рисунок 3.3 – Схема стола для вертикального та горизонтального переміщення деталі

Формування гетерогенних металевих матеріалів із заданими фізико-механічними характеристиками можливе лише за умови застосування комплексного підходу, який поєднує вибір оптимального хімічного складу, відповідну технологію виготовлення та зміцнювальну обробку. Це забезпечує отримання потрібного фазового складу та визначеного структурного стану шаруватих матеріалів. На властивості сплавів впливають не лише їхній хімічний склад і мікроструктура, а й тип, розміри, форма та особливості розподілу фаз різного походження і природи.

Використання технологій із високоенергетичним впливом у період

| | | | | | | |
|------|------|----------|--------|------|-------------------------|------|
| | | | | | КвРМТВА 022138.01.07.00 | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | 31 |

формування структури дає змогу цілеспрямовано регулювати макро- та мікробудову, а також міцнісні й експлуатаційні властивості виробів різного призначення. Сучасний підхід до ефективного керування характеристиками матеріалів базується на створенні таких умов, що здатні істотно змінювати перебіг процесів самоорганізації структур.

3.3 Вибір режимів проведення наплавлення

Структура наплавленого металу, форма сформованого шару та, в підсумку, характеристики відновленої деталі визначаються правильним вибором режиму індукційного наплавлення.

Тривалість процесу наплавлення є ключовим параметром, який впливає не лише на якість і властивості сформованого шару, а й на продуктивність та економічну ефективність технології. Швидкість наплавлення залежить від частоти струму, потужності високочастотної установки, товщини шару, що формується, а також фізичних характеристик використовуваної шихти.

Під час наплавлення важливо забезпечити мінімальний перегрів основного металу. Оскільки порошкова шихта характеризується дуже низькою теплопровідністю, для прогрівання її верхніх шарів до температури плавлення потрібен довший час, і він зростає зі збільшенням товщини нанесеного присадкового шару.

Потрібно обов'язково враховувати фактори, що при дослідженні процесів визначають умови нагрівання, які проходять як при нагріванні так і при плавленні порошкової шихти. По-перше, дати оцінку впливу частоти струму на кінетику розігрівання і плавлення частинок. Відомо, що із підвищенням частоти струму підвищуються енергетичні показники нагрівання, проте спостерігається зниження товщини скін-шару [15,17]. Товщину скін-шару можна підрахувати за формулою:

$$\Delta = \sqrt{\frac{2\rho}{\omega\mu\epsilon_0}} \quad (3.1)$$

| | | | | | | |
|------|------|----------|--------|------|-------------------------|------|
| | | | | | КвРМТВА 022138.01.07.00 | Арк. |
| | | | | | | 32 |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | |

де $\omega = 2\pi \cdot f$ – циклічна частота генератора, μ – магнітна проникність речовини, μ_0 – магнітна постійна, ρ – питомий опір речовини.

При високочастотному нагріванні (наприклад, індукційному) струм не проходить рівномірно по всьому перерізу деталі, а «стискається» біля її поверхні. Товщина зони, у якій зосереджена більшість струму та теплова дія і є скін-шаром.

Розрахунок товщини скін-шару для Сормайт у при частоті $f = 100$ кГц (за умов парамагнітності $\mu = 1$, $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Ф/м і питомого опору $\rho = 10^{-8}$ Ом·м) показує, що вона становить близько 500 мкм, тобто має той самий порядок величини, що й товщина порошкового шару під час наплавлення. Тому, в даному випадку часточки розміром біля 200 мкм прогріваються рівномірно.

Що стосується феромагнітної підкладки, на яку виконується наплавлення, то вона прогрівається більш інтенсивніше. При цьому, товщина скін-шару підкладки має значення 16 мкм практично до переходу матеріалу підкладки в парамагнітний стан. Саме така поведінка підкладки є одним із методів регулювання процесу наплавлення.

На початку проходить досить швидкий розігрів підкладки, тому що поглинається потужність пропорційна $\sqrt{\mu\rho}$, де μ – магнітна проникність матеріалу підкладки, ρ – питомий опір матеріалу підкладки.

За кімнатної температури глибина проникнення струму δ_n підкладки при частоті 10^5 Гц має числове значення близьке до 0,06 мм. По мірі розігріву підкладки глибина проникнення струму зростає за рахунок підвищення питомого опору та зниження магнітної проникності матеріалу підкладки. А при температурі 1300 °С глибина проникнення струму досягає значення 1,8 мм [14].

У цьому випадку порошок Сормайт нагрівається незначно, так як його частинки електрично ізольовані одна від одної завдяки оксидній плівці на поверхні та флюсовому шару. Тому кожна частинка поглинає тепло окремо, а глибина проникнення електромагнітної хвилі в Сормайт за кімнатної температури становить приблизно $\delta_s \sim 0,16$ мм, що відповідає середньому діаметру зерен порошку.

Коли магнітоанізотропний матеріал потрапляє в магнітне поле, хімічний

| | | | | | | |
|------|------|----------|--------|------|-------------------------|------|
| | | | | | КВРМТВА 022138.01.07.00 | Арк. |
| | | | | | | 33 |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | |

потенціал атомів у його зернах визначається не лише звичними скалярними характеристиками, а й орієнтацією зерен відносно поля. До того ж потрібно брати до уваги енергетичний стан поверхні частинок. Оскільки зерна наплавлюваного тврдосплаву мають розміри до 200 мкм – значна частина атомів розташована саме на поверхні, де їх хімічний потенціал відрізняється від потенціалу атомів, що містяться всередині, на певній відстані від поверхні. Підвищений термодинамічний потенціал поверхневого шару частинки спричиняє те, що її оплавлення може розпочатися при температурах дещо нижчих, ніж ті, що потрібні для повного розплавлення всієї частинки. Даний процес може відбуватися в умовах термодинамічної рівноваги, оскільки плавлення має дифузійний характер і потребує певного часу для свого протікання.

Для того, щоб визначити тривалість наплавлення в залежності від потрібної товщини шару, який наплавляється, використовуємо дані, представлені на рисунку 3.4.

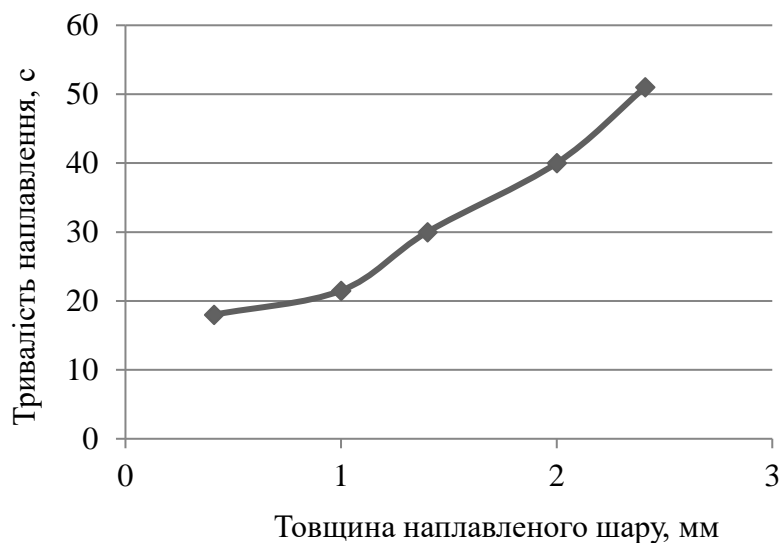


Рисунок 3.4 – Тривалість наплавлення залежно від товщини наплавленого шару

Оскільки для цього генератора оптимальні параметри наплавлення ще не встановлені, експерименти виконували за сталої товщини шару, змінюючи швидкість наплавлення в межах 5–8 м/год. Подальший аналіз отриманих результатів дав змогу визначити найбільш раціональні режими проведення

| | | | | | | |
|------|------|----------|--------|------|-------------------------|------|
| | | | | | КвРМТВА 022138.01.07.00 | Арк. |
| | | | | | | 34 |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | |

наплавлення.

3.4 Технологія проведення наплавлення на установці УВГ 2-25

3.4.1 Підготовка шихтових матеріалів

Цей етап передбачає складання шихтового матеріалу згідно необхідної пропорції, застосовуючи вагове чи дозуюче обладнання. Далі виконується змішування компонентів шихти у спеціальному змішувальному обладнанні пальцевого типу чи вручну для отримання достатнього ступеня однорідності. Одержана шихта має парамагнітні властивості. Виконувати брикетування наплавного матеріалу чи захист його від електромагнітних полів індуктора не має потреби.

3.4.2 Підготовка підкладки під наплавлення

Підкладки для виконання наплавлення застосовувались пластини розміром 100×200×10мм. Для оцінювання впливу стану підготовленої поверхні на якість наплавленого шару та зони сплавлення були використані пластини, поверхню яких підготували різними методами:

- пластини механічно не оброблені, що мають іржу та інші забруднення;
- механічно оброблені пластини, на яких відсутні забруднення, іржа та жирові плівки;
- поверхня пластини механічно оброблена на фрезерному верстаті з кроком 3,0×1,0 та 4,0×1,5мм.

3.4.3 Вибір флюсу

З ціллю одержання наплавленого шару з максимальним збереженням хімічного складу вихідного матеріалу та достатньо якісною зоною зеднання

| | | | | | | |
|------|------|----------|--------|------|-------------------------|------|
| | | | | | КвРМТВА 022138.01.07.00 | Арк. |
| | | | | | | 35 |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | |

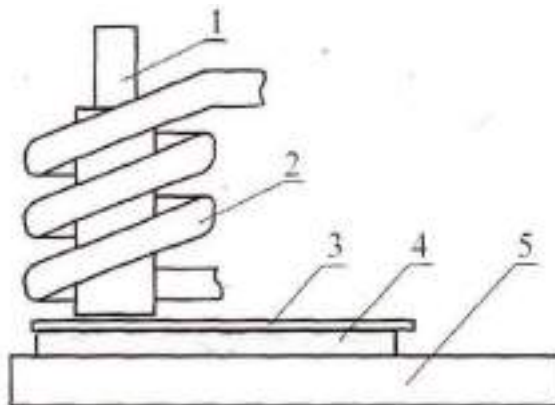
потрібно чітко підрахувати склад та кількість флюсу, який додається у шихту. Експериментальне наплавлення з вмістом флюсу в такій кількості: 15%, 20 %, 25 % і 30 %, дало можливість правильно визначити це співвідношення.

3.4.4 Метод подвійного наплавлення

Після нанесення першого шару й очищення його від шлакової кірки виконували наплавлення другого шару. Товщина та склад шихти другого шару були такими ж, як у першого.

3.4.5 Індукційне нагрівання зразка

На поверхню пластини шар шихти наносили при допомозі дозатора, потім вирівнювали його лопаткою до товщини 1,5–10,0 мм. Після укладання шихтового матеріалу зразок підводили під індуктор таким чином, щоб зазор між поверхнею індуктора та шихтою становив приблизно 5–7 мм (рисунок 3.5)



1 – феритний сердечник; 2 – витковий індуктор; 3 – наплавляюча шихта;
4 – металева підложка у формі пластини; 5 – стіл

Рисунок 3.5 – Схема наплавлення пластини на установці УВГ 2-25

Для виконання експериментальних досліджень використали зразки, одержані термоспінанням при різних технологічних режимах, з різною товщиною

| | | | | | | |
|------|------|----------|--------|------|-------------------------|------|
| | | | | | КвРМТВА 022138.01.07.00 | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | 36 |

наплавленого шару. Також застосували зразки, наплавлені методом подвійного наплавлення.

3.5 Методи проведення досліджень та застосовуване наукове обладнання

Для проведення досліджень одержані експериментальні зразки шаруватих композиційних матеріалів піддавали механічній обробці задля того, щоб досягти потрібних розмірів.

В даній роботі були проведені наступні дослідження отриманих зразків шаруватих композиційних матеріалів:

- дослідження металографічні, які включають використання оптичної мікроскопії (мікроскопа Carl Zeiss Axio Vision), а також застосування растрових електронних мікроскопів PEM-100У та JEOL JSM 7001F;

- проведення енергодисперсійного аналізу та хімічного аналізу із використанням растрового електронного мікроскопа JEOL JSM 7001F, який обладнаний ергодисперсійним спектрометром фірми Oxford Instruments;

- виконання аналізу твердості зразків за методом Роквелла, застосовуючи прилад TP-5013;

- дослідження мікротвердості зразків на приладі ПМТ-3М;

Отже, для виготовлення шаруватих композиційних матеріалів як експериментальне обладнання було обрано установку УВГ-2-25. А також, підібрано відповідне оснащення, необхідне для роботи на цій установці, щоб забезпечити належне кріплення та переміщення виробу. На основі підбраного обладнання та матеріалів, розроблена технологія одержання шаруватих композиційних матеріалів. Розроблена технологія враховує при індукційному нагріванні особливості протікаючих процесів. Крім того, враховує особливості наступного плавлення і кристалізації отриманого шару.

Були визначені та обрані потрібні засоби та методики для дослідження зразків, отриманих експериментальним шляхом.

| | | | | | | |
|------|------|----------|--------|------|-------------------------|------|
| | | | | | КвРМТВА 022138.01.07.00 | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | 37 |

4 ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ТЕХНОЛОГІЇ ОТРИМАННЯ ТА СКЛАДУ НА СТРУКТУРУ ТА ВЛАСТИВОСТІ ШАРУВАТОГО КОМПОЗИЦІЙНОГО МАТЕРІАЛУ

4.1 Вплив швидкості нагрівання та охолодження на структуроутворення зносостійких композиційних матеріалів

Особливості формування структури наплавленого шару зумовлені швидкостями його нагріву та охолодження. Металографічний аналіз засвідчив, що швидкість наплавлення визначає ступінь дисперсності і характер розподілу фаз у структурі наплавленого шару (рисунки 4.1, 4.2). Підвищення швидкості наплавлення до 7,5 м/год забезпечує формування більш дисперсної структури наплавленого шару, одержання якої відповідає високим швидкостям охолодження і утворення наплавлення із незначним розчиненням карбідів в рідкій фазі. Саме високодисперсна будова структури приводить до підвищення зносостійкості при абразивному зносі. Одержана мікроструктура матеріалу має будову, яка аналогічна структурі вихідного металевих порошку (рисунок 4.3).

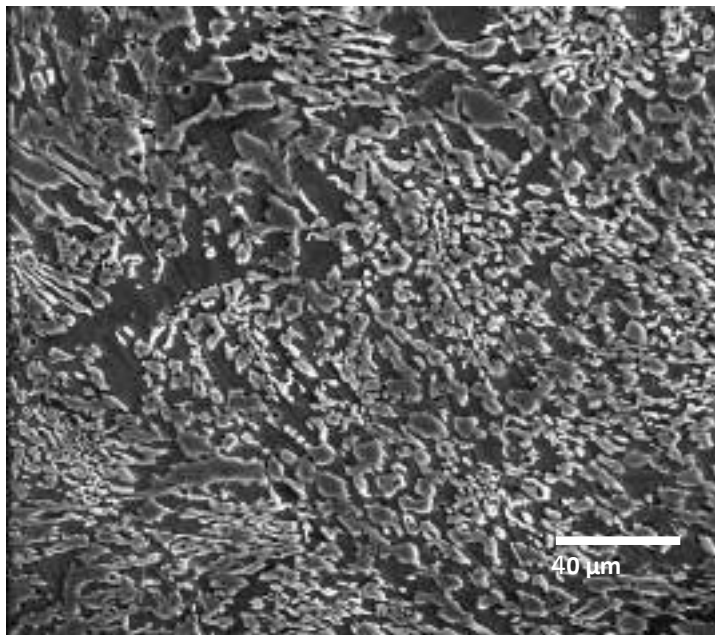


Рисунок 4.1 – Мікроструктура наплавленого шару із швидкістю 7,5 м/год

| | | | | | | |
|------|------|----------|--------|------|-------------------------|------|
| | | | | | КвРМТВА 022138.01.07.00 | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | 38 |

У випадку зниження швидкості наплавлення до 5 м/год спостерігається більший прогрів компоненту підкладки і, відповідно, повне розчинення карбідів в рідкій фазі. При цьому, швидкість охолодження знижується. Структура, яка утворюється, характеризується підвищенням метастабільного аустеніту та огрубленням карбідної фази.

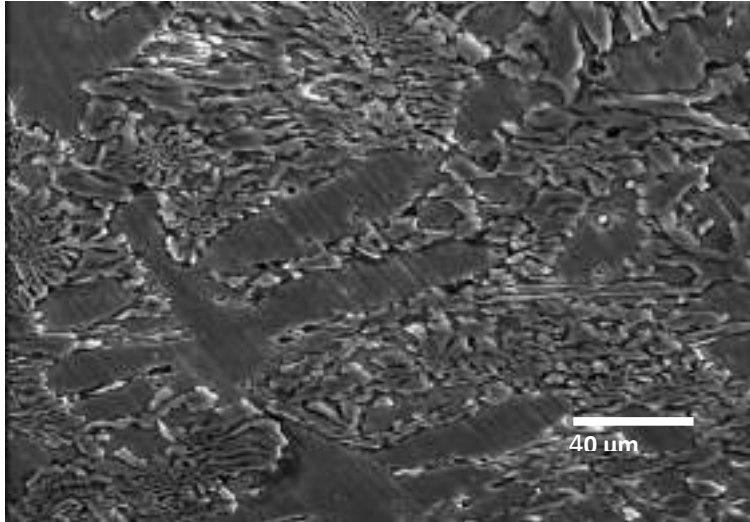


Рисунок 4.2 – Мікроструктура наплавленого шару зі швидкістю 5 м/год

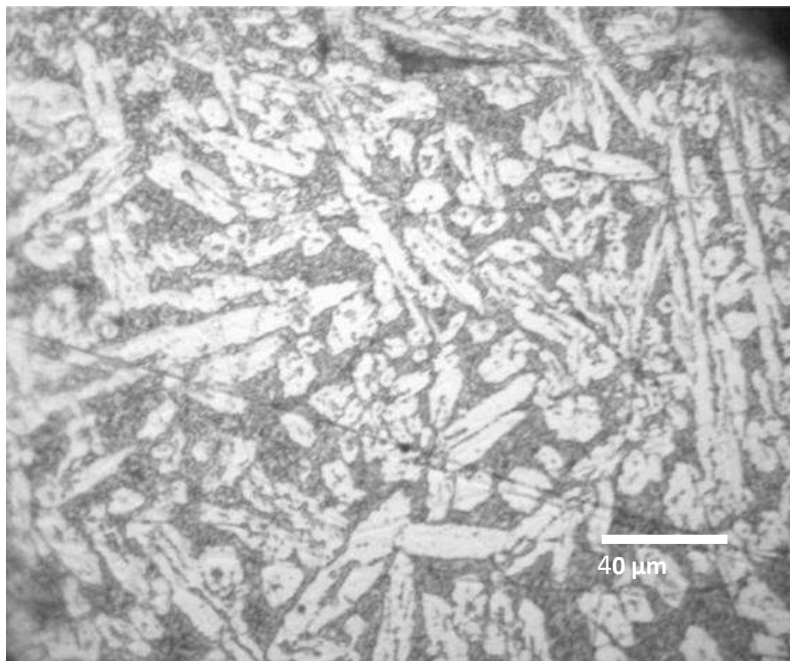


Рисунок 4.3 – Мікроструктура частинки сормаїту

Використання зазначених режимів під час формування шаруватих композиційних матеріалів забезпечує підвищення їхньої зносостійкості в умовах

| | | | | | | |
|------|------|----------|--------|------|-------------------------|------|
| | | | | | КвРМТВА 022138.01.07.00 | Арк. |
| | | | | | | 39 |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | |

ударно-абразивного зношування.

4.2 Вплив на структуроутворення зносостійких композиційних матеріалів товщини шару, що наплавляється

Збільшення товщини наплавлюваного шару потребує тривалішої дії високоенергетичного індукційного нагріву, що, у свою чергу, зменшує швидкість наплавлення. У таких умовах частина розплавленого сплаву певний час залишається в контакті з підкладкою, спричиняючи її додатковий нагрів. Після виходу індуктора із зони наплавлення швидкість охолодження знижується, що веде до утворення крупніших карбідів.

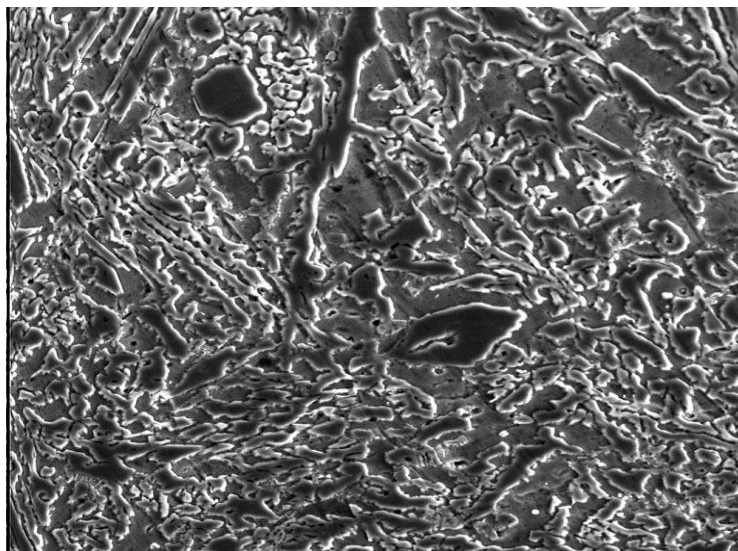


Рисунок 4.4 – Структура шару товщиною 2 мм, відстань від поверхні – 0,5 мм

Для визначення твердості та мікротвердості були відібрані зразки, наплавлені за різних швидкостей наплавлення та із різною товщиною шару. Проведення такого аналізу є доцільним, оскільки твердість слугує одним із ключових лабораторних критеріїв оцінки зносостійкості, яка визначає ресурс і умови роботи робочих органів будівельно-дорожньої техніки.

Дані, наведені в таблиці 4.1, отримано на основі зразків, наплавлених на попередньо механічно оброблену поверхню, та обмежених максимальною

| | | | | | | |
|------|------|----------|--------|------|-------------------------|------|
| | | | | | КвРМТВА 022138.01.07.00 | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | 40 |

швидкістю наплавлення, за якої забезпечується формування шаруватих композиційних матеріалів без дефектів в зоні розділу.

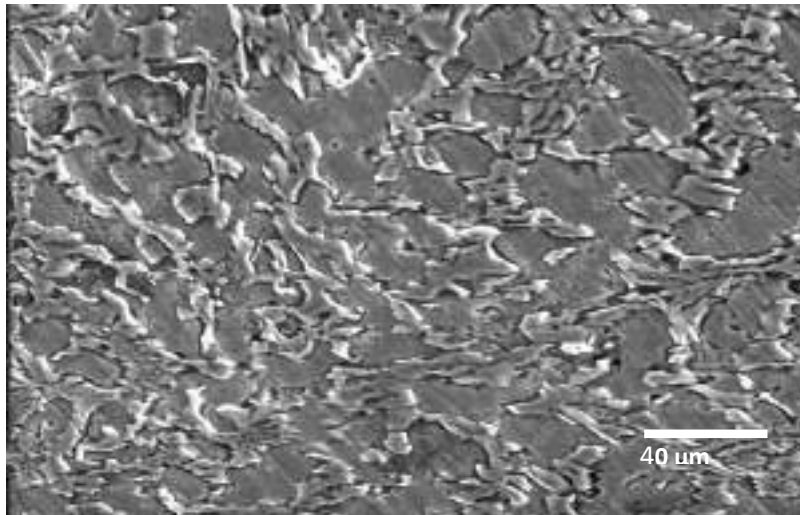


Рисунок 4.5 – Структура шару товщиною 4 мм, відстань від поверхні – 0,5мм

Використовуючи одержані результатами аналізу твердості наплавлених зразків, побудований графік залежності твердості від швидкості наплавлення за різної товщини шару демонструє, що зі зростанням швидкості наплавлення твердість наплавленого шару підвищується (рисунок 4.6).

Таблиця 4.1 – Залежність зміни твердості від швидкості проведення наплавлення та товщини наплавленого шару

| Швидкість, м/год | 5,0 | 5,5 | 6,0 | 6,5 | 7,0 | 7,5 | 8,0 | 8,5 |
|------------------|----------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| Товщина шару, мм | Твердість, НСС | | | | | | | |
| 0,5 | – | – | – | – | 55 | 56 | 57 | 58 |
| 1,0 | – | – | – | 53 | 55 | 56 | 57 | – |
| 1,5 | – | – | 51 | 52 | 54 | 56 | – | – |
| 2,0 | – | 47 | 49 | 51 | 54 | – | – | – |
| 3,0 | 43 | 45 | 48 | 51 | – | – | – | – |
| 4,0 | 42 | 44 | 47 | – | – | – | – | – |
| 4,5 | 41 | 43 | 45 | – | – | – | – | – |
| 5,0 | 41 | 43 | – | – | – | – | – | – |
| 5,5 | 40 | 42 | – | – | – | – | – | – |
| 6,0 | 40 | – | – | – | – | – | – | – |

Одержані дані свідчать, що збільшення товщини наплавлюваного шару, приводить до зниження твердості. Таке зростання твердості зумовлене інтенсивнішим прогрівом основного матеріалу та зменшенням швидкості кристалізації наплавленого металу, що спричиняє збільшення розмірів карбідної фази.

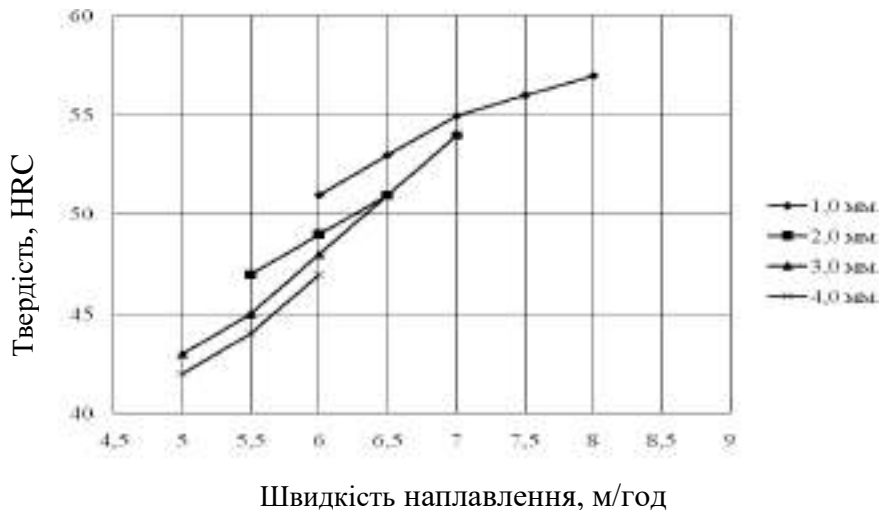


Рисунок 4.6 – Графік зміни твердості в залежності від швидкості проведення наплавлення при різній товщині шару

Узагальнення результатів металографії та дослідження зміни твердості дало змогу визначити оптимальну швидкість наплавлення, що забезпечує формування шаруватого композиційного матеріалу без дефектів на межі поділу й сприяє досягненню максимальної твердості (рисунки 4.7, 4.8).

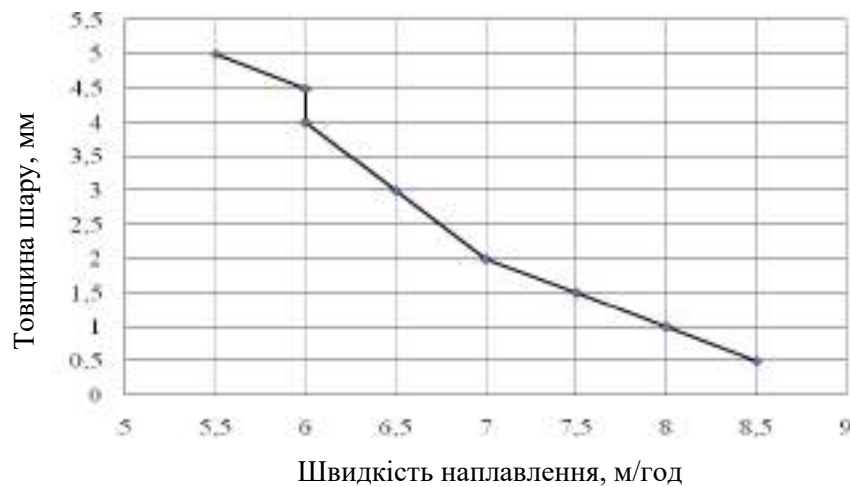


Рисунок 4.7 – Залежність товщини наплавленого шару від швидкості наплавлення

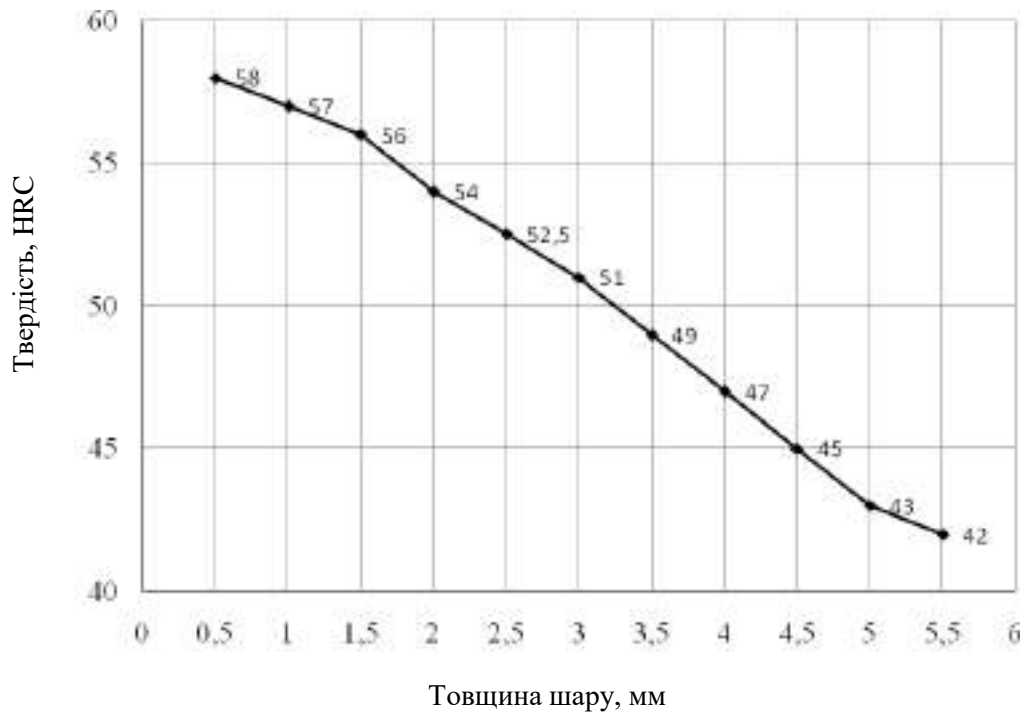


Рисунок 4.8 – Залежність твердості від товщини наплавленого шару

Композиційні шаруваті матеріали, одержані із наплавляючої шихти з металевого порошку сормайт та флюсу АН-20, підтвердили ефективність використання при товщині наплавляючого шару до 3 мм. При збільшенні товщини наплавляючого шару, спостерігається збільшення часу впливу високоенергетичного індукційного нагріву. Як результат, веде до більшого прогрівання металу підкладки та зниження швидкості охолодження наплавляючого шару. При сповільненні охолодження карбідна фаза збільшується в розмірах, що негативно впливає на твердість і абразивну зносостійкість шаруватого композиційного матеріалу (рисунок 4.8).

4.3 Вплив введення графіту на структуру та властивості шаруватого композиційного матеріалу

Для покращення твердості наплавленого шару та підвищення абразивної зносостійкості шаруватого композиційного матеріалу було запропоновано модифікувати шихту, що складається з металевого порошку ПГС-27 і флюсу АН-20, шляхом введення до її складу графітового порошку.

| | | | | | | |
|------|------|----------|--------|------|-------------------------|------|
| | | | | | КвРМТВА 022138.01.07.00 | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | 43 |

Введення до наплавної шихти графіту приводить до формування у структурі цього шару збільшеної кількості карбідної фази, при одночасному зниженні об'ємної частки аустеніту.

Як об'єкт дослідження використано малозольний графіт ГСМ-1 із зольністю до 0,1 % та гранулометриєю 100–600 мкм. Для виготовлення експериментальних зразків ШКМ застосовували наплавну шихту зі змінним вмістом графітового порошку.

Склад шихти, що наплавляється приведено у таблиці 4.2.

Таблиця 4.2 – Склад наплавляючої шихти

| Склад наплавляючої шихти, % | | |
|-----------------------------|--------------|------------|
| ПГС-27 | Графіт ГСМ-1 | Флюс АН-20 |
| 72 | 3 | 25 |
| 70 | 5 | 25 |
| 68 | 7 | 25 |

Металографічний аналіз отриманих експериментальних зразків шаруватого композиційного матеріалу показав, що навколо первинних тригональних карбідів формуються колоніальні структури карбідної фази ланцетоподібної форми (рисунок 4.10), які не спостерігаються у зразках наплавлених без графіту (рисунок 4.9).

Поява колоніальних структур карбідної фази є непрямою ознакою підвищення її вмісту в загальному об'ємі матеріалу.

Здійснений енергодисперсійний аналіз експериментальних зразків дав змогу виявити трансформацію хімічного складу фаз у структурі матеріалу. Результати дослідження переконливо свідчать про різке зменшення вмісту хрому у 2-му та 4-му спектрах і відсутність нікелю в 1-му, 3-му та 5-му спектрах (рисунки 4.11, 4.12).

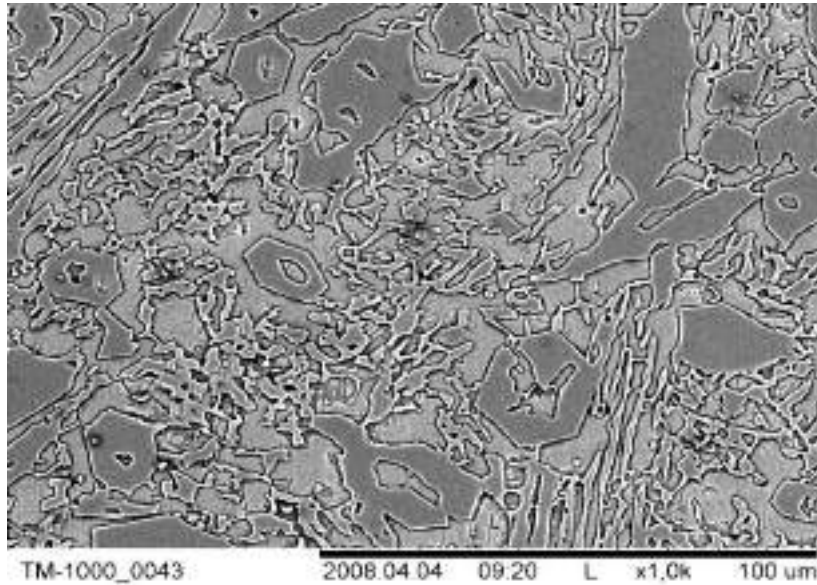


Рисунок 4.9 – Структура наплавленого шару без графіту

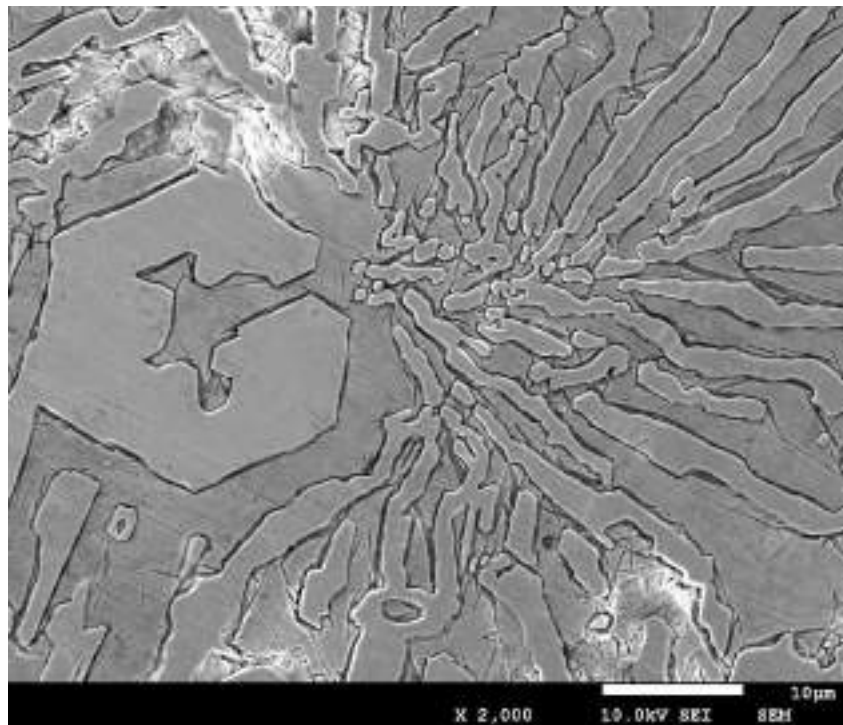


Рисунок 4.10 - Структура наплавленого шару з введенням графіту за металографічним аналізом

Так як хром вважається карбідоутворюючим елементом, а нікель здатний пригнічувати поліморфне перетворення та приводить до аустенізації сталі, то ця зміна хімічного складу підтверджує, що структура наплавленого шару складається з аустеніту та карбідів.

| | | | | | | |
|------|------|----------|--------|------|-------------------------|------|
| | | | | | КвРМТВА 022138.01.07.00 | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | 45 |

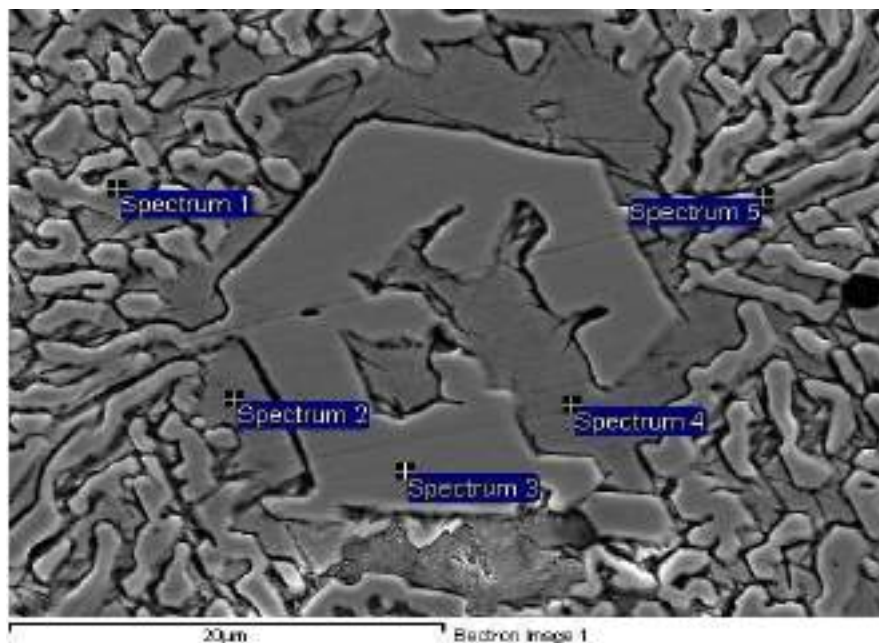


Рисунок 4.11 – Структура наплавленого шару з графітом за енергодисперсійним аналізом

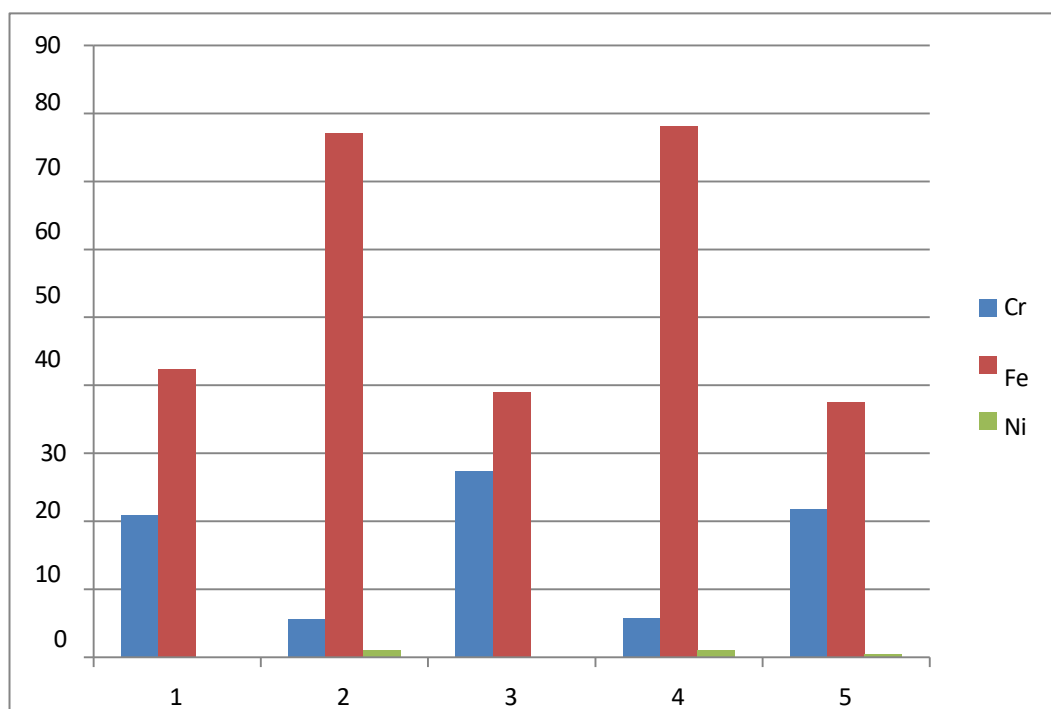


Рисунок 4.12 – Хімічний склад фаз у зазначених спектрах

Додавання графіту до складу шихти для наплавлення сприяє підвищенню

вмісту вуглецю безпосередньо у структурі наплавленого шару.

Відповідно до діаграми залізо-хром-вуглець збільшення частки вуглецю до 4 відсотків за вмісту хрому близько 30 відсотків приводить до формування карбідної фази типу $(Fe, Cr)_3C$ (рисунок 4.13).

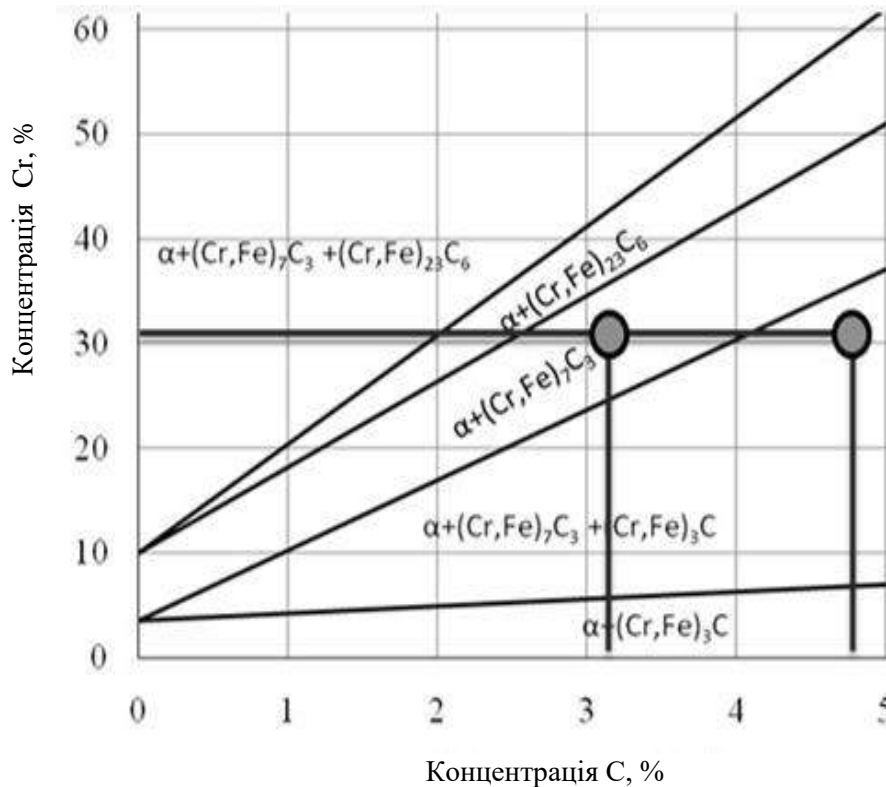
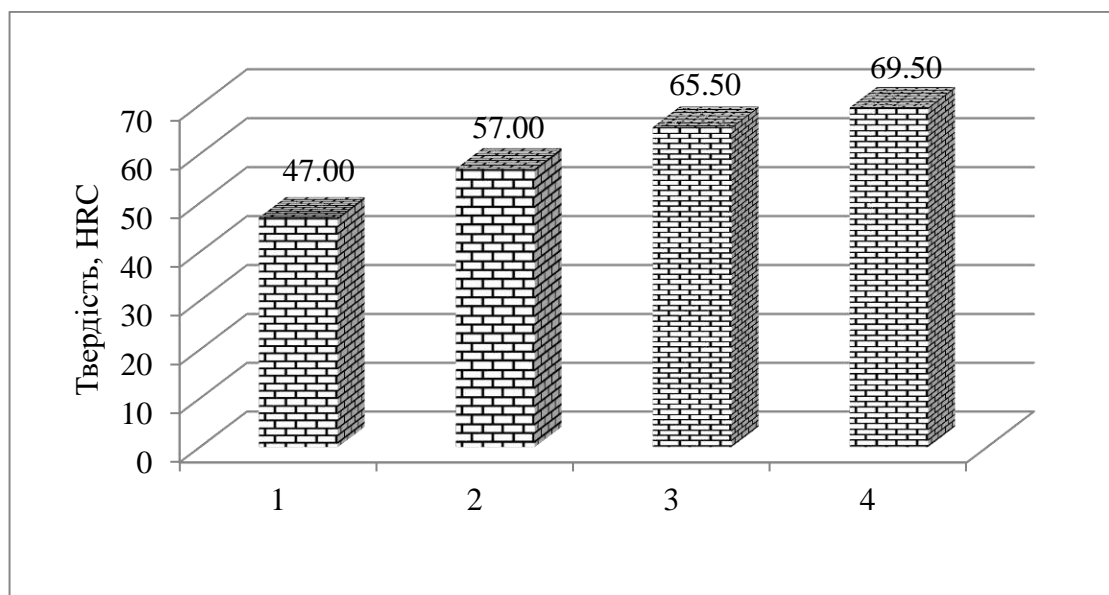


Рисунок 4.13 – Діаграма залізо-хром-вуглець

Виконані рентгено-фазові дослідження підтвердили наявність декількох піків інтенсивності [14]. Результати аналізу показують, що у структурі наплавленого шару формується ШКМ, представлений нікель- і хромовмісним аустенітом, карбідами типу $(Cr,Fe)_7C_3$, а також карбідною фазою, яка не спостерігається в наплавленому шарі без введення графіту (Fr).

Одержані результати експериментів показали, що додавання графіту спричиняє формування в структурі наплавленого шару карбідної фази типу $(Fe,Cr)_3C$. Результати експериментальних досліджень твердості наплавленого шару в залежності від концентрації графіту наведені на рисунку 4.14.

| | | | | | | |
|------|------|----------|--------|------|-------------------------|------|
| | | | | | КвРМТВА 022138.01.07.00 | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | 47 |



1– Вихідний матеріал; 2 – 3 мас.% графіту; 3 – 5 мас.% графіту; 4 – 7 мас.% графіту.

Рисунок 4.14 – Твердість наплавленого шару за різних концентрацій графіту

Аналіз твердості одержаних зразків (рис. 4.15) свідчить, що зі збільшенням вмісту графіту у шихті твердість наплавленого шару підвищується. Це зростання твердості зумовлене більшою кількістю карбідної фази в структурі наплавленого шару та формуванням карбідів типу $(Fe,Cr)_3C$. Карбіди типу $(Fe,Cr)_3C$ являють собою цементитоподібні утворення, у яких частина атомів заліза заміщена хромом. Таке заміщення підвищує їхню твердість, термостійкість і хімічну стійкість. Подібні карбіди характерні для хромистих та зносостійких наплавлених сплавів.

ВИСНОВКИ

1. Виконано аналіз особливостей абразивного зношування робочих органів дорожньо-транспортних машин. Встановлено, що за основними усталеними положеннями протидії абразивному зношуванню потрібно підвищувати твердість робочих органів автомобільної техніки для зменшення інтенсивності процесів їх мікрорізання та зниження швидкості зносу.

2. В результаті аналізу технічних наукових джерел встановлено, що актуальним є розробка матеріалів та технологій їх термообробки для подрібнення зерна наплавленого шару, зменшення коефіцієнтів дифузії водню, інших неметалевих елементів. Одержання шаруватих композиційних матеріалів із застосуванням таких матеріалів дозволяє формувати необхідний комплекс фізико-механічних властивостей, що забезпечує високу експлуатаційну стійкість виробу.

3. Розроблена технологія отримання шаруватих композиційних матеріалів. Збільшення швидкості наплавлення до 7,5 м/год сприяє формуванню більш дисперсної структури наплавленого шару, одержання якої характерне при високих швидкостях охолодження та реалізації наплавлення з частковим розчиненням карбідів у рідкій фазі. Високодисперсна будова структури підвищує зносостійкість при абразивному зношуванні.

4. Шаруваті композиційні матеріали, отримані із застосуванням шихти, що наплавляється та складається з металевого порошку сормайт і флюсу АН-20, показали ефективність застосування при товщинах наплавленого шару в межах до 3 мм. Збільшення товщини шару, що наплавляється, приводить до збільшення часу впливу високоенергетичного індукційного нагріву, і, відповідно, веде до більшого прогріву металу підкладки та зниження швидкості охолодження наплавленого шару. Зниження швидкості охолодження призводить до збільшення розміру карбідної фази, зниження твердості та зносостійкості шаруватих композиційних матеріалів в умовах абразивного зносу.

5. Проведені дослідження показали, що введення графіту ГСМ-1 (3–7 %) до складу шихти, що наплавляється, сприяє підвищенню твердості наплавленого шару за рахунок утворення додаткових карбідів типу $(Fe,Cr)_3C$.

| | | | | | | |
|------|------|----------|--------|------|-------------------------|------|
| | | | | | КвРМТВА 022138.01.07.00 | Арк. |
| | | | | | | 49 |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | |

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Білецький В. С. Механіка ґрунтів у будівництві. – К.: Вища школа. – 2010. – 384 С.
2. Галико А.В. Ударно-абразивне зношування деталей машин та агрегатів / Наукові записки. – Кіровоград: КНТУ. –2007. – № 8. – с. 77-78.
3. Бережний М. М., Чорний Г. С. Основи механіки ґрунтів і фундаментоутворення. — Харків: ХНУМГ. – 2015. — 280 с.
4. Yulong Li, Nikolay Garabedian, Johannes Schneider, Christian Greiner. Waviness Affects Friction and Abrasive Wear/ Published. –2023. – № 64. с. 1-12.
5. Борак К.В. Особливості механізму зношування робочих органів ґрунтообробних машин / К.В. Борак, П.О. Рябчук, О.П. Рябчук // Проблеми трибології. – 2014. – №1. – С. 11–14.
6. Бобрицький В.М. Підвищення зносостійкості різальних елементів робочих органів ґрунтообробних машин: дис. канд. тех. наук: 05.02.04 / Бобрицький Віталій Миколайович. – Кіровоград, 2007. – 182 с.
7. Аулін В.В. Аналіз характеру зношування лез ґрунторіжучих деталей та підвищення їх ресурсу лазерними технологіями / В.В. Аулін, В.М. Бобрицький, Є.К. Солових // Загальнодержавний міжвідомчий науково-технічний збірник. Конструювання, виробництво та експлуатація с/г машин. – Кіровоград,: 2005. – Вип. 35. – С. 153-157.
8. Лузан С. О. Підвищення ресурсу деталей машин за рахунок дугового наплавлення композиційних матеріалів [Електронний ресурс] / С. О. Лузан, П. А. Ситников // Впровадження інноваційних матеріалів і технологій при проектуванні, будівництві та експлуатації об'єктів транспортної інфраструктури в рамках програми "Велике будівництво" : матеріали Міжнар. конф., 24-25 листопада 2022 р. – Електрон. текст. дані. – Київ, 2022. – С. 403-404. – URI: <http://repository.kpi.kharkov.ua/handle/KhPI-Press/61780>.
9. Головка, Л. Ф. Лазерне наплавлення та термомеханічна обробка композиційних матеріалів з пам'яттю форми / Л. Ф. Головка, О. Й. Мажейка, С. І.

| | | | | | | |
|------|------|----------|--------|------|-------------------------|------|
| | | | | | КвРМТВА 022138.01.07.00 | Арк. |
| | | | | | | 50 |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | |

Маркович // Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин: загальнодерж. міжвід. наук.-техн. зб. - Кіровоград: КНТУ, 2009. - Вип. 39. - С. 402-407.

10. Yu J., Zhang S. Induction cladding of alloys and metal-matrix composite coatings: A review Journal: Heliyon, 2024 DOI: 10.1016/j.heliyon.2024.e38866

11. Віхрова, Л. Г. Математичні основи процесу індукційного нагрівання деталей машин і наплавлення композиційних покриттів / Л. Г. Віхрова, В. А. Бісюк, Є. П. Босов // Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин: загальнодерж. міжвід. наук.-техн. зб. - Кіровоград: КНТУ, 2010. - Вип. 40, ч. 1. - С. 248-252.

12. Лузан С. О. Композиційні матеріали для наплавлення, одержанні з використанням СВЧ-процесу [Електронний ресурс] / С. О. Лузан, П. А. Ситников // Експлуатаційна та сервісна інженерія : матеріали міжнар. наук.-практ. конф., 04-05 травня 2023 р. / гол. ред. В. М. Кондратюк. – Електрон. текст. дані. – Київ, 2023. – С. 93-95.

13. Бісюк, В. А. Автоматизація процесу нанесення композиційних покриттів при неперервно-послідовному індукційному наплавленні / В. А. Бісюк, В. М. Каліч, О. К. Дідик // Збірник наукових праць Кіровоградського національного технічного університету. Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація. - Кіровоград: КНТУ, 2016. - Вип. 29. - С. 152-155.

14. Yu J., Zhang S. (2024) Induction cladding of alloys and metal-matrix composite coatings: A review (Heliyon, Scopus/WoS) DOI: 10.1016/j.heliyon.2024.e38866

| | | | | | | |
|------|------|----------|--------|------|-------------------------|------|
| | | | | | КвРМТВА 022138.01.07.00 | Арк. |
| | | | | | | 51 |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | |

ДОДАТКИ

| | | | | | | |
|------|------|----------|--------|------|-------------------------|------|
| | | | | | КвРМТВА 022138.01.07.00 | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | 52 |