

**ПОЛТАВСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ АГРАРНИЙ УНІВЕРСИТЕТ**

**Факультет інженерно-технологічний**

**Кафедра галузевого машинобудування**

Пояснювальна записка

до *дипломної роботи* на здобуття ступеня вищої освіти «магістр»  
на тему: «Підвищення надійності робочих поверхонь деталей за рахунок  
плазмової обробки»

Виконав: здобувач вищої освіти за  
освітньо-професійною програмою  
Технології і засоби механізації  
сільськогосподарського виробництва  
спеціальності 208 Агроінженерія  
ступеня вищої освіти «*магістр*» групи 2  
Ковтун Ярослав Юрійович  
Керівник: Яхін С. В.  
Рецензент: Келемеш А. О.

**Полтава – 2021 року**

## ВСТУП

На сучасному етапі розвитку науки і виробництва назріла необхідність в розробці комплексної методології проектування оптимальної технології, що дозволяє одночасно оптимізувати технологічний процес відновлення або зміцнення деталі, прогнозувати довговічність вузла в разі застосування даної технології і оцінювати її собівартість. Проектування оптимальної технології і матеріалів із заданими властивостями вимагає, як правило, проведення значних за обсягом і вартості досліджень.

Відновлення зношених деталей з метою їх повторного використання в якості запасних частин сільськогосподарської техніки є одним з основних шляхів вдосконалення технічної експлуатації і стратегії прискореного впровадження наукоємних та ресурсозберігаючих технологій.

При відновленні деталей вирішують одну з наступних задач [1]:

- 1) надання деталям і обладнання в цілому початкових експлуатаційних властивостей;
- 2) підвищення початкових експлуатаційних властивостей деталей за рахунок застосування при відновленні сучасних технологій і матеріалів для збільшення конструкційної міцності, триботехнічних властивостей та вдосконалення інших характеристик деталей або їх окремих елементів.

Цілеспрямоване науково обгрунтоване рішення цієї проблеми дозволить підвищити показники надійності і ефективності експлуатації сільськогосподарської техніки і механізмів за рахунок заміни зношених деталей на більш довговічні, упорядкування і зниження витрати запасних частин, економії матеріальних, трудових і грошових ресурсів у сфері ремонтного виробництва та технічного обслуговування.

Світовий досвід показує, що понад 80% зношених деталей можна відновити з метою їх повторного використання в якості запасних частин [2].

Однак для забезпечення ефективності та економічної доцільності відновлення деталей необхідно, щоб вартість відновлення деталі не

перевищувала 40-60% від ціни нової деталі при її гарантійному наробітку не менше 80% від ресурсу нової. Зараз технології в кращому випадку забезпечують ресурс відновлених деталей в межах 40-50% від ресурсу нової [3].

Широке використання чавуну в відповідальних деталях сільськогосподарської техніки обумовлено тим, що він має малу чутливість до концентраторів напруг, має підвищену здатність гасити вібрації, добре обробляється і характеризується хорошими ливарними властивостями.

Основні причини відмов чавунних деталей машин:

- значні статичні і циклічні напруги, що викликають утворення тріщин (корпуси насосів, втулки і блоки циліндрів дизелів і т. д.);
- корозійно-ерозійне зношування;
- кавітаційне зношування порожнин охолодження (блоки і втулки циліндрів та ін.);
- робота деталей в умовах тертя при високих питомих навантаженнях, температур і швидкостях ковзання, яка веде до підвищеного нерегламентованого зношування;
- робота деталей в умовах тертя і одночасного впливу статичних і циклічних напружень, що призводить як до підвищеного зношування, так і утворення тріщин.

Тому вивчення можливостей відновлення чавунних деталей, що зазнають в процесі роботи вплив важких експлуатаційних навантажень, є вкрай актуальним.

## РОЗДІЛ 1

### СТАН ПИТАННЯ ТА ВИБІР НАПРЯМКУ ДОСЛІДЖЕНЬ

#### 1.1. Аналіз відказів деталей сільськогосподарської техніки

Стан складальних одиниць, агрегатів, корпусних деталей сільськогосподарської техніки лімітує ресурс, як її окремих елементів, так і машини вцілому. Методи ремонту чавунних деталей, що застосовуються на ряді підприємств технічного сервісу України, забезпечують відновлення ресурсу лише до 20% в порівнянні з ресурсом нових [4]. Тому досить актуальним є підвищення зносостійкості чавунних деталей при їх відновленні.

Чавунні деталі сільськогосподарської техніки забезпечують координоване розміщення різних складальних одиниць і елементів протягом заданого ресурсу, що забезпечується за рахунок базових поверхонь при їх проектуванні. Тому характерною особливістю чавунних корпусних деталей є наявність точно скоординованих між собою базових площин і отворів [5].

Відповідно до технічних умов для забезпечення нормальної роботи складальних одиниць і механізмів сільськогосподарської техніки до корпусних чавунних деталях ставляться такі вимоги [5, 6]:

- шорсткість робочої поверхні по  $R_a = 0,2 - 1,0$  мкм;
- відхилення від конусоподібності і овалоподібності не більше  $0,03 - 0,05$  мм;
- відхилення від співвісності  $0,02 - 0,06$  мм;
- відхилення від паралельності і перпендикулярності осей  $0,03 - 0,05$  мм на довжині 100 мм.

Вимоги до чавунних корпусних деталях визначені умовами роботи, характером виробництва, технологічністю і економічною доцільністю конструкцій.

Корпусні деталі виготовляють переважно з сірого низьколегованого і середньолегованого перлітного чавуну (СЧ 18 - 79%; СЧ 21 - 12%; СЧ 20 і СЧ 24 - 7%) [7,8]. Вони сприймають більшість зовнішніх і внутрішніх навантажень, головним чином, посадочними поверхнями під підшипники. Аналіз експлуатації посадочних поверхонь сільськогосподарської техніки показує, що вони працюють при питомих навантаженнях 1,0 - 1,5 МПа, швидкостях до 1,0 - 1,5 м/с і при температурному діапазоні 50 - 65°C з невеликою кількістю змащуючого матеріалу [9].

Аналіз результатів досліджень [8-11] і досвід ремонтних підприємств з відновлення чавунних корпусних деталей сільськогосподарської техніки дозволив виявити основні їх дефекти:

- знос контактних поверхонь в сполученні корпус-підшипник;
- тріщини, злами;
- пошкодження різьби;
- викривлення приєднувальних поверхонь.

Найбільша повторюваність дефектів характерна для посадочних отворів під підшипники і стакани. Усунення цих дефектів представляє основну складність технологічного процесу відновлення деталей. В результаті зносу, старіння і деформації корпусів порушуються не тільки розміри отворів, але і їх взаємне розташування, паралельність і перпендикулярність осей отворів між собою.

Аналіз проведених досліджень дозволив створити структурну схему втрати працездатності корпусних чавунних деталей сільськогосподарської техніки (рис. 1.1).

На підставі проведених досліджень роботи сільськогосподарської техніки можна виділити наступні основні причини зношування їх корпусних деталей:

- ослаблення посадкового натягу в сполученні;
- порушення геометричних характеристик посадочних поверхонь при експлуатації, а також після їх відновлення;

- порушення режиму експлуатації.

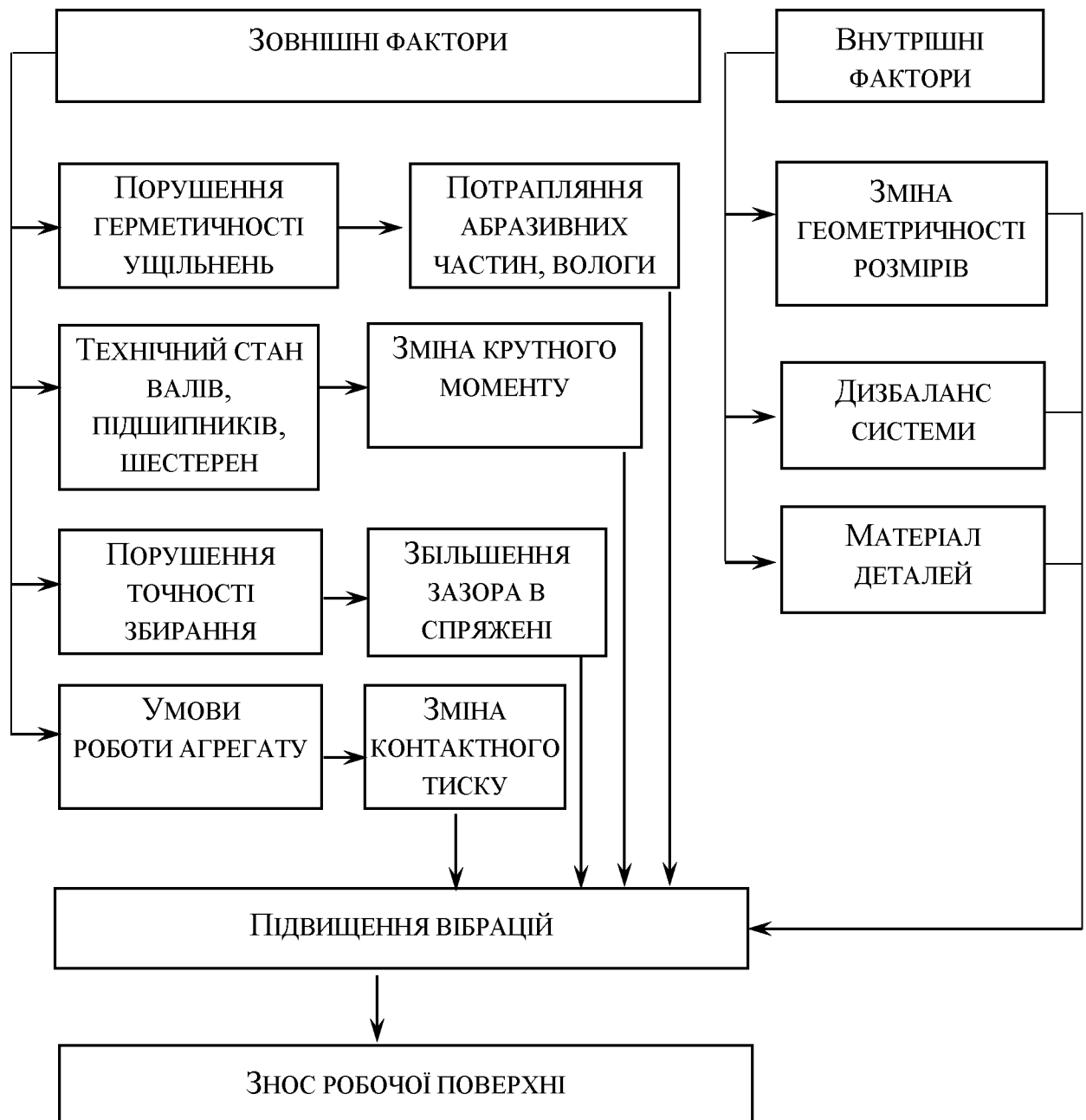


Рисунок 1.1 – Структурна схема втрати працездатності циліндричних деталей сільськогосподарської техніки

Знос посадочних поверхонь підшипників в корпусних чавунних деталях призводить до зниження довговічності машини за рахунок збільшення зазорів в сполученнях, виникнення перекосів і збільшення

інтенсивності вібрацій [12]. Зношування посадочних поверхонь, а також порушення режиму експлуатації викликає відмову в роботі підшипників кочення.

Процес руйнування поверхневих шарів корпусних деталей супроводжується фретинг-корозією, втомними і абразивними ушкодженнями. Ці види зносу тісно пов'язані між собою і в залежності від температурного і силового режимів, що виникають в посадочних поверхнях, якості змащення, властивостей матеріалів деталей і шорсткості поверхні мають різну інтенсивність протікання [13].

При фретинг-корозії інтенсивність руйнування поверхонь визначається в основному механічним фактором: впливом амплітуди відносного переміщення, питомим контактним навантаженням, частотою коливань, кількості циклів навантаження, твердістю поверхонь [14]. При цьому відбувається як послаблення натягу між поверхнями, так і перекіс в сполученні. Різке збільшення величини зносу відбувається при амплітудах 0,1 - 0,15 мм внаслідок інтенсифікації процесу схоплювання. Поряд з цим динамічні навантаження сприяють підвищенню процесу пластичної деформації, яка проявляється при більш низьких значеннях навантаження. Це, в свою чергу, призводить до накопичення структурних ушкоджень (ослаблення міжатомних зв'язків, збільшення щільності дефектів кристалічної решітки) і, як наслідок, руйнування матеріалу і зниження міцності металу.

Як відомо, зовнішні кільця підшипників сільськогосподарської техніки можуть сприймати місцеві, циркуляційні та коливальні навантаження. У зв'язку з цим через різницю довжини отвору і кільця, при наявності зазору в сполученні, виникає провертання кільця в напрямку протилежному обертанню валу. В результаті чого відбувається развальцьовування і знос посадочного отвору деталі [15].

Особливості умов експлуатації деталей в певній мірі пов'язані з тривалим зберіганням (до 83%) і подальшою активною експлуатацією. Це дає

підставу стверджувати, що має місце зміни властивостей і характеристик корпусних деталей, так як чавун може сприймати такі зовнішні фактори, як вологість і температуру середовища [16].

Для зернозбиральних машин і інших видів сільськогосподарської техніки, що працюють при підвищеній запиленості, головним видом зносу є абразивний. Рівень запиленості навколишнього середовища залежить від запиленості ґрунту, швидкості руху повітря і агрегату, розміщення складальних одиниць машини, характеру виконуваних робіт. Внаслідок специфічних умов експлуатації зернозбиральної машини в з'єднання корпус-підшипник можуть потрапляти абразивні частинки і волога, що сприяє інтенсивному протіканню абразивного зношування посадочних поверхонь корпусних деталей. При зношуванні деталей найбільше проявляється заїдання, якому передують адгезійна взаємодія деталей.

Таким чином, довговічність чавунних корпусних деталей визначається головним чином зносостійкістю посадочних поверхонь, яка залежить від цілого ряду перерахованих вище факторів, а також від інтенсивності протікання фретінг-корозії і провертання кільця підшипника кочення в сполученні.

## **1.2. Аналіз способів відновлення деталей**

У більшості випадків дефекти в деталях можна усунути. Аналіз дефектів показав, що їх глибина може бути від 0,5 мм до 5 мм. При правильному виборі способів усунення дефектів і їх ретельному виконанні якість відновлених деталей, як правило, відповідає вимогам експлуатації. Для усунення дефектів при ремонті чавунних деталей, що вийшли з ладу, широко застосовують зварювальні процеси [3, 10, 11- 15].

Однак чавун має специфічні властивості, які в значній мірі ускладнюють застосування зварювання. Це, з одного боку, високий вміст вуглецю і тенденція до утворення метастабільних структур (цементиту і

ледебуриту) при швидкому охолодженні, характерному для процесу зварювання, а з іншого - низька пластичність і велика крихкість. Чавун відрізняється відносно низькою температурою кристалізації в порівнянні з металом зварювальної ванни на залізній чи залізонікелевій основі, високою газонасиченістю, а також наявністю в ньому мікропорожнин. Іноді виникають додаткові труднощі, викликані умовами експлуатації виробу (наприклад, при зварюванні виробів з горілого або просоченого маслом чавуну).

Однією з найважливіших характеристик металів при усуненні дефектів за допомогою зварювання, є зварюваність [13, 17].

Чавун з точки зору фізичної зварюваності відноситься до групи добре зварюваних, так як має необмежену розчинність основного і присадочного металу в рідкому стані, можливістю дифузії в твердому і рідкому станах і утворення твердих розчинів [18].

Здатність металу зварюватись ще не визначає можливість отримання зварного з'єднання, що відповідає експлуатаційним вимогам (працездатність, економічність і т.д.). Метал шва і навколошовної зони (НШЗ) зазвичай за багатьма показниками помітно відрізняється від основного металу. Ці відмінності, навіть при гарній фізичній зварюваності, можуть призводити до низьких властивостей зварного з'єднання в цілому.

Тому прийнято здатність основного металу при даній технології утворювати зварне з'єднання без порушення цілісності, спотворення форм і зниження його якості характеризувати технологічною зварюваністю. Це поняття залежить від стану технологічних процесів. Стан сучасної зварювальної техніки показує, що всі матеріали, що володіють фізичною зварюваністю, можуть утворювати задовільні зварні з'єднання. При цьому важко зварювані матеріали вимагають застосування більш складної технології зварювання. З точки зору технологічної зварюваності чавун відноситься до важко зварюваних металів [13,17].

При всіх способах зварювання плавленням для локального розплавлення металу застосовуються потужні джерела теплової енергії, що дозволяють вводити велику кількість теплоти, створювати значне місцеве підвищення температури. Це призводить, як правило, до значного перегріву металу при зварюванні.

Високий перегрів металу, що викликається процесом горіння дуги; витримка рідкої ванни, регульована температурою попереднього підігріву і технікою зварювання (швидкість переміщення електрода, зварювання валиками або ванним способом і т. п.); підготовка зварювальних матеріалів і введення до складу покриття електрода, або порошкового дроту модифікованих добавок - всі ці питання вимагають досліджень при розробці технології зварювання [18].

Для чавунів властива схильність до утворення в зварному з'єднанні структур відбілу і загартування, тріщин і пор. Структура наплавленого металу визначається умовами і кінетикою його кристалізації, яка в значній мірі залежить від умов зварювання: швидкості охолодження, стану рідкого металу і хімічного складу [19,20].

Тріщини в зварному з'єднанні можуть виникати від нерівномірного нагрівання та охолодження деталей, ливарної усадки металу шва, жорсткості виробу, що зварюється. Вони можуть виникати не тільки в шві і НШЗ, але і в інших ділянках деталі, в яких внаслідок додаткової деформації, спричиненої термічними циклами процесу зварювання або локальним попереднім підігрівом, виникають напруги, що перевищують межу міцності чавуну. Тріщини, які утворюються при зварюванні чавуну, можна віднести до холодних тріщин, так як верхня межа температурного інтервалу появи тріщин не перевищує 250 - 400°C. Небезпека утворення тріщин значно збільшується при наявності цементиту на межі сплаву і мартенситу [20].

Таким чином, механічні властивості чавуну (міцність і твердість) в основному залежать від характеру металевої маси (співвідношення фериту і перліту) та від кількості і характеру розташування графіту. В умовах

підвищених швидкостей охолодження зварювальної ванни при зварюванні відбувається подрібнення графіту і отримання більш дисперсних форм металевої основи у вигляді сорбітоподібного перліту. Твердість наплавленого металу в цьому випадку підвищується до 250 НВ, проте чавун зберігає хорошу оброблюваність.

В силу причин, обумовлених властивостями чавунів, при наплавленні потрібно зважати на конструктивні особливості виробів, експлуатаційні призначення поверхонь і окремих частин деталей. На вибір методу відновлення впливає характер, розмір і розташування дефекту на деталі.

Способи зварювання та наплавлення чавуну мають безліч технологічних особливостей, обумовлених різним тепловкладенням і хімічним складом зварювальних матеріалів. Це стримує широке використання зварювання і наплавлення для відновлення відповідальних деталей сільськогосподарської техніки. Вибір хімічного складу і виду присадочного матеріалу (електрод, порошок, дріт) і способу зварювання (наплавлення) необхідно здійснювати з урахуванням не тільки умов експлуатації деталі, але і технологічних можливостей способів зварювання (наплавлення), а також накопиченого підприємством досвіду і наявного обладнання.

Всі способи зварювання (наплавлення) чавуну за властивостями наплавленого металу можна розділити на дві групи:

1) способи, призначені для отримання наплавленого металу у вигляді чавуну із заданими властивостями, що досягається застосуванням відповідних зварювальних матеріалів;

2) способи, що призначені для отримання наплавленого металу - не чавуну, до якого пред'являються вимоги забезпечення оброблюваності різанням (сплави з високим вмістом нікелю, міді, високолегованої сталі та ін.).

Існує ряд способів, що використовуються в інших випадках: контактно-порошкове і електрошлакове наплавлення, наплавлення

стрічковим електродом, пайка цинковим сплавом при температурі 350°C, електроіскрове нарощування і ін.

Технологічні процеси виправлення дефектів чавунних деталей представляють можливість виконання зварювальних операцій із загальним або частковим попереднім нагріванням виробів до температури 600 - 650°C (гаряче зварювання) і отриманням наплавленого металу у вигляді чавуну; з невеликим нагріванням до температури 150 - 400°C або без попереднього нагрівання (холодне зварювання) і з отриманням наплавленого металу - не чавуну - у вигляді сплавів, що піддаються механічній обробці різанням [20].

Зварювальний та наплавочний процеси можна виконувати з розплавленням основного металу (зварювання) або без розплавлення основного металу (низькотемпературні засоби пайки-зварювання), окремими валиками або з утворенням ванни великого обсягу, вручну або механізованими способами. Технологічні процеси виправлення дефектів не виключають можливості застосування незварювальних способів.

Класифікація способів зварювання (наплавлення) за технологічними і якісними ознаками приведена в табл. 1.1.

Таблиця 1.1 – Класифікація способів зварювання (наплавлення) за технологічними і якісними ознаками

Способи зварювання	Характеристика дефекту	Характеристика наплавленого металу і з'єднання
1	2	3
Наплавлений метал - чавун з заданими властивостями <i>Газове зварювання</i>		
Гаряче чавунною присадкою	Різні дефекти невеликих і середніх розмірів на оброблених, оброблених і відповідальних не-оброблених поверхнях різного експлуатаційного призначення	Гарна оброблюваність і щільність, близький збіг з основним по мікро-структурі, твердості, міцності показників і відтінку кольору
Паяння-зварювання з чавунним прутком	Різні дефекти на оброблених робочих поверхнях	Те ж

## Продовження таблиці 1.1

1	2	3
<i>Дугове зварювання ванним способом</i>		
Ручне чавунними електродами. Механізоване порошковим дротом	Різні дефекти великих і дуже великих розмірів на оброблюваних, оброблених і відповідальних не-оброблюваних поверхнях	Гарна оброблюваність і щільність, близький збіг з основним по мікро-структурі, твердості, міцності показників і відтінку кольору
Механізоване порошковим дротом з керамічною присадкою	Різні дефекти невеликих і середніх розмірів на оброблюваних поверхнях, що не піддаються поверхневому гартуванню	Те ж
Наплавлений метал - нечавун, до якого висуваються умови оброблюваності різанням <i>Холодне дугове зварювання наплавленими валиками</i>		
Ручне електродами на мідно-нікелевої основі	Різні дефекти невеликих і середніх розмірів на оброблюваних і оброблених поверхнях. В окремих випадках наскрізні дефекти невеликої довжини	Гарна оброблюваність, щільність і міцність
Ручне електродами на залізонікелевій основі	Різні дефекти невеликих і середніх розмірів на різних поверхнях деталей	Гарна оброблюваність, щільність і міцність. Колір збігається з кольором основного металу
Ручне електродами на основі низько-вуглецевої сталі зі спеціальним покриттям	Різні дефекти невеликих розмірів на оброблених поверхнях	Твердість і колір збігаються з твердістю і кольором основного металу
Ручне електродами на мідно-сталевій основі	Наскрізні дефекти на необроблюваних поверхнях деталей і стінках резервуарів	Висока міцність і щільність. Оброблюваність затруднена. Відрізняється за кольором
Механізована тонкими дротами: - на нікелевої основі	Перехідні шари при багатошаровому наплавленні дефектів на поверхнях. Різні дефекти на тонких стінках деталей	Мінімальне проплавлення основного металу, добре обробляється

## Продовження таблиці 1.1

1	2	3
- на мідній основі несучільного металу	Перехідні шари при багатошаровому наплавленні, наскрізні дефекти на тонких стінках деталей	Мінімальне проплавлення основного металу. Гарна щільність і міцність
<i>Газові низькотемпературні (без розплавлення основного металу) засоби пайки-зварювання</i>		
Мідно-сплавними присадочними матеріалами типу латуні	Ненаскрізні дефекти невеликих розмірів на оброблених поверхнях	Щільний, має стабільні показники твердості НВ 170-190
Самофлюсуючими порошковими сплавами	Ненаскрізні дефекти невеликих і середніх розмірів, виявлені на фінішних операціях механічної обробки деталей. Вироблення, вм'ятини, негерметичності в деталях	Гарна оброблюваність, міцність і щільність. Твердість, зносостійкість і колір збігаються з основним металом
<i>Металізація</i>		
Сплавами на основі молібдену, цинку	Пористість на робочих поверхнях	Щільний, зносостійкий
Наплавлений метал - нечавун, до якого не пред'являються умови оброблюваності різанням		
<i>Зварювання</i>		
Ручне сталевими електродами або напівавтоматичне порошковим дротом або дротом суцільного перетину	Ненаскрізні дефекти на необроблюваних поверхнях валів	Висока твердість, недостатня щільність і міцність

Аналізуючи представлену таблицю можна сказати, що для відновлення зношених поверхонь використовуються дугові, плазмові й інші методи, що відрізняються особливостями теплового впливу на основний метал. Способи зварювання та зварювальні матеріали повинні забезпечувати високу якість і надійність роботи відновлених чавунних виробів [13, 21].

В оцінці значущості тих чи інших способів зварювання (наплавлення) чавуну для отримання високих показників якості, надійності та економічної ефективності істотне значення має технологічність застосовуваних способів і матеріалів. Технологічність виявляється зазвичай в зіставленні технологічних

особливостей процесу зварювання (наплавлення) і показників зварного з'єднання з технічними вимогами до якості відновлюваних поверхонь деталей.

Наприклад, стосовно до оброблюваних поверхонь, коли наплавлений метал повинен бути чавуном, застосовують гарячі способи зварювання. Кращими показниками технологічності [22, 23] будуть володіти при виправленні дефектів невеликих розмірів - газове зварювання, що забезпечує теплові умови плавлення і затвердіння металу, необхідні для утворення сірого чавуну; при виправленні дефектів великих розмірів - дугове зварювання з використанням високих значень струму; при виправленні дефектів середніх розмірів кращих результатів можна досягти, застосувавши механізоване зварювання порошковим дротом з використанням керамічних сумішей. При виправленні дефектів на механічно оброблених поверхнях більш високою технологічністю володіють низькотемпературні процеси пайки-зварювання, газопорошкове наплавлення і холодне дугове зварювання спеціальними електродами.

Способи відновлення (ремонт) відповідальних чавунних деталей мають безліч особливостей, обумовлених різним тепловкладенням при формуванні зварного з'єднання, хімічним складом наплавлювальних матеріалів.

Зварювання та наплавлення чавуну виконуються, як правило, з підігрівом і виконують на постійному струмі прямої полярності. Вибір режиму зварювання визначається товщиною стінки деталі, жорсткістю конструкції, величиною і розташуванням дефекту.

Недоліком гарячого зварювання є відсутність на багатьох ремонтних підприємствах потрібної бази для виконання гарячого зварювання чавуну. Крім того, попередній підігрів чавунних виробів істотно ускладнює технологічний процес, а висока температура погіршує умови праці працюючих. У багатьох випадках зварювання з високим підігрівом просто нездійсненна по ряду технічних причин: великі габаритні розміри деталей,

порушення точності розмірів тонкостінних виробів складної конфігурації, неможливість демонтажу обладнання для вилучення зруйнованої деталі, відсутність нагрівальних пристроїв і т.д. Тому для розширення використання методів дугового зварювання, потрібно відмовитися від попереднього підігріву або обмежитися невисоким місцевим підігрівом, який можна виконати відносно простими засобами.

Безперервне вдосконалення способів зварювання (наплавлення) чавуну, підвищення показників технологічності способів при виправленні дефектів різних груп дозволяє поліпшити якість виправлення дефектів деталей і розширити номенклатуру виправних дефектів.

Наприклад, для відновлення чавунних деталей двигунів (блоків і кришок циліндрів, картерів та ін.) можуть бути застосовані лише ті методи зварювання, які забезпечують досить високу міцність, щільність і оброблюваність з'єднання, не вимагають попереднього підігріву до високих температур і термічної обробки після зварювання.

Досвід зарубіжної практики ремонту таких деталей показує, що хороші результати досягаються при зварюванні електродами Castolin 2-23, Castolin 2-24, Castolin 2-44, UTP-8, FOX GNi, ОК G6 діаметром 2-3 мм [24]. Однак щільність зварних з'єднань особливо тонкостінних частин деталей в НШЗ не завжди гарантується, в зв'язку з чим потрібна додатково герметизація нанесенням шару припою або епоксидної смоли.

В ІЕЗ ім. Патона розроблено метод механізованого зварювання самозахисним дротом суцільного перетину зі сплаву на основі нікелю марки ПАНЧ-11 діаметром 1,2 мм [25], за допомогою якого успішно вирішується завдання отримання міцних, стійких проти відбілювання тріщин зварних з'єднань, особливо при зварюванні тонкостінних частин деталей з сірого, ковкого і високоміцного чавунів, а також створення комбінованих з'єднань згаданих чавунів зі сталлю. Нанесення додаткових герметизуючих покриттів на деталі в зоні шва не потрібно. Недоліком даного методу є зварювання короткими швами довжиною 50-70 мм з подальшим проковуванням шва.

Якість зварювання без підігріву чавунних деталей багато в чому залежить від режиму зварювання і техніки її виконання. Щоб запобігти утворенню біляшовних тріщин, прагнуть зменшити тепловкладення в деталь на ділянці зварювання. Подальша проковка наплавленого металу зменшує зварювальні напруги і ймовірність утворення тріщин. Для зварювання використовуються електроди переважно малого діаметра, що дозволяють стійко вести процес на низьких режимах, а зварювання виконувати короткими швами з тривалими перервами для вирівнювання температури і охолодження деталі (до 50 - 70°C).

При зварюванні (наплавленні) чавуну - матеріалу з високим вмістом шкідливих домішок - дротами або електродами на нікелевої основі підвищується ймовірність утворення гарячих тріщин в швах.

Для обґрунтованого вибору технології зварювання (наплавлення) важливо врахувати вплив умов кристалізації на формування структури модифікованого наплавленого чавуну.

Відносно високі значення тимчасового опору чавуну (більше 350 МПа) досягаються головним чином наданням графітної фази компактної форми. При цьому істотно підвищується роль металевий основи, структура якої може регулюватися відповідною термічною обробкою, а також легуванням.

У зв'язку з високою схильністю чавуну до відбілювання і до утворення гартувальних структур при прискореному охолодженні в інтервалі температур розпаду аустеніту досить важливим є питання поліпшення структури і властивостей шва.

Важливою вимогою до зварних швів в відповідальних деталях є їх герметичність. Найбільш небезпечні наскрізні пори, які найчастіше виникають у кратерах.

При зварюванні (наплавленні) з попереднім підігрівом деталей створюється можливість в широких межах регулювати швидкість охолодження наплавленого металу, що сприяє отриманню зварного з'єднання, повністю відповідного основного металу, і позбавляє метал від

утворення тріщин. Крім того, зварювання (наплавлення) із загальним і місцевим підігрівом забезпечує високу продуктивність процесу.

Аналіз технологічних особливостей існуючих методів зварювання (наплавлення), що застосовуються для відновлення відповідальних чавунних деталей, коли до зварних з'єднань пред'являються такі вимоги як рівномірність основного металу, оброблюваність ріжучим інструментом, зміна розмірів деталі після зварювання в межах полів допусків показав, що спосіб зварювання (наплавлення) повинен відповідати таким вимогам:

- механізація технологічного процесу;
- висока локальність подачі тепла;
- низьке тепловкладення в виріб;
- мінімальне розплавлення основного металу;
- стабільність якості наплавленого металу і зварного з'єднання;
- висока продуктивність процесу.

Таким чином, спосіб зварювання (наплавлення) і зварювальні матеріали повинні забезпечувати високу якість і надійність роботи відновлених чавунних виробів.

### **1.3. Аналіз методів оптимізації параметрів технологічних процесів відновлення деталей наплавленням**

Розвиток промисловості призвів до необхідності дослідження складних завдань на екстремум і до появи варіаційного обчислення. На виробництві постало завдання оптимального використання енергії, матеріалів, робочого часу, більшої актуальності набули питання найкращого в тому чи іншому сенсі управління різними процесами фізики, техніки, економіки та ін.

Потреби розвитку самої обчислювальної математики також привели до необхідності дослідження таких задач на максимум і мінімум, як наприклад, задачі найкращого наближення функцій, оптимального вибору параметрів ітераційного процесу або вузлів інтерполяції і т. д. [18].

На математичній мові такі завдання можуть бути сформульовані як задачі відшукування екстремуму (максимуму або мінімуму) деякої функції або функціоналу  $F(x)$ , що виражає собою якість управління  $x$  із заданої множини  $X$  деякого простору. Вимога належності управління  $x$  деякому безлічі  $X$  висловлює собою обмеження, зазвичай випливають із законів збереження, обмеженості наявних ресурсів, можливостей технічної реалізації управління, небажаність будь-яких заборонених (аварійних) станів і т. Д. Завдання відшукування екстремуму функції  $f(x)$  на безліч  $X$  прийнято називати екстремальними задачами.

Останнім часом наука приділяє все більше уваги питанням організації та управління. Швидкий розвиток і ускладнення техніки, небувале розширення масштабів проведених заходів і спектра їх можливих наслідків, впровадження автоматизованих систем управління (АСУ) в усі області практики – все це призводить до необхідності аналізу складних цілеспрямованих процесів під кутом зору їх структури і організації [16, 18, 20, 26]. Від науки потрібні рекомендації по оптимальному управлінню такими процесами.

Дослідження операцій починається тоді, коли для обґрунтування рішень застосовується той чи інший математичний апарат.

Будь-який певний вибір залежних від нас параметрів називається рішенням. Рішення можуть бути вдалими і невдалими, розумними і нерозумними. Оптимальними називаються рішення, за тими або іншими ознаками кращі перед іншими. Мета дослідження операцій – попереднє кількісне обґрунтування оптимальних рішень [20].

Підвищення ефективності виробництва і якості продукції, що випускається нерозривно пов'язане з вирішенням проблеми достовірної оцінки руйнувань деталей в процесі експлуатації, з більш повним використанням можливостей, які закладені в конструкційних матеріалах і технологіях.

Особливість проблеми полягає в тому, що крім досягнення заданого рівня параметрів матеріалу поверхневого шару деталей, важливо визначати також, в яких межах вони можуть змінюватися, не порушуючи несучої здатності матеріалу поверхневих шарів деталей сполучення, і оптимальні інтервали їх значень, щоб забезпечити заданий і більш тривалий термін служби відновлених деталей.

Технічне рішення проблеми полягає у виборі оптимальних значень параметрів матеріалу і чинників процесів формування, їх класів точності і вимагає розробки методів, які б враховували:

- випадковий характер зміни параметрів матеріалу і чинників процесу формування;

- багатокритеріальність проблеми, так як якість матеріалу поверхневого шару деталей характеризується комплексом фізико-хімічних, механічних, структурних і геометричних параметрів;

- невизначеність у виборі значень параметрів матеріалу і чинників процесу формування при відновленні деталей;

- обмеженість ресурсів в процесі формування параметрів матеріалу.

Формування властивостей матеріалу поверхневого шару деталей полягає в створенні умов найбільш повного і точного задоволення технічних вимог і нормативів, які впливають на показники надійності деталей при мінімальних трудових, матеріальних і фінансових ресурсах на ремонт і експлуатацію відремонтованих технічних засобів.

Загальний методологічний підхід до вирішення завдання формування заданих властивостей можна сформулювати як досягнення таких параметрів матеріалу поверхневого шару деталей, які б забезпечили задану надійність роботи матеріалу поверхневого шару деталей при різних потенційних відмовах [26].

Рішення завдання вибору оптимальних параметрів процесу відновлення деталей здійснюється в рамках створення комплексної системи

автоматизованого технологічного проектування відновлення деталей технічних засобів [27].

В даний час розроблено безліч математичних моделей, що описують вплив основних параметрів режиму на формування властивостей поверхневого шару деталей для багатьох методів відновлення і зміцнення [8, 14, 22, 25]. Перехід від традиційних методів розробки технологічних процесів відновлення деталей до автоматизованим методам проектування дозволить підвищити якість, знизити матеріальні витрати, скоротити терміни проектування, підвищити продуктивність праці інженерів-технологів, зайнятих розробкою технологічних процесів, а також оперативно розробляти технології, оптимальні за витратами і гарантують необхідний ресурс для умов експлуатації конкретної деталі машини або механізму.

Важливими елементами будь-якої технології є режими процесу формування та технологічні прийоми, зумовлені специфікою обраного методу і необхідністю забезпечення необхідних параметрів матеріалу поверхневого шару деталі.

Формування заданих параметрів матеріалу поверхневого шару оцінюється приватними значеннями структурних, механічних і геометричних параметрів, функцією середніх темпів зміни властивостей матеріалу поверхневого шару і узагальненим показником працездатності, кількісно виражають ступінь досягнення мети в процесі конструктивно-технологічного формування структурно-механічних і геометричних параметрів матеріалу поверхневого шару.

Формування властивостей матеріалу в системі «матеріал-технологія-експлуатація» («М-Т-Е») розглядається як задача, що включає в себе три основних процеси [28]:

- відновлення геометричних розмірів деталі до номінальних, або переходів на новий ремонтний розмір;
- надання матеріалу поверхневого шару заданих структурно-механічних і геометричних параметрів;

- зміна структурно-механічних і геометричних параметрів в процесі експлуатації.

Система піддана зовнішнім впливам і може впливати на інші системи даної структури.

В цілому постановка проблеми комплексу формулюється так: «необхідно відновити безліч пошкоджених деталей  $D$ , на яких в процесі експлуатації діють задані силові, швидкісні і теплові параметри (безліч зовнішніх умов), існує безліч технологічних схем відновлення, що включають в себе методи підготовки поверхні деталі під відновлення, номенклатуру, що наноситься на поверхню відновлюваної деталі, процеси нанесення матеріалу на пошкоджену поверхню відновлюємо ой деталі, її зміцнення та механічної обробки, випробування; визначено безліч властивостей, одержуваних при відновленні з тієї чи іншої технологічної схеми; задано безліч допустимих параметрів техніко-економічних показників і властивостей матеріалу відновлюваних деталей».

У загальному вигляді, стан матеріалу поверхневого шару в процесі формування можна визначити [17, 20]:

$E(t)$  –  $k$ -вимірним вектором, що визначає показники техніко-економічної доцільності формування властивостей матеріалу;

$W(t)$  –  $m$ -вимірним вектором, що визначає можливі стану матеріалу поверхневого шару при технологічних впливах;

$J(t)$  –  $l$ -вимірним вектором, що визначає можливі стану експлуатаційної надійності матеріалу поверхневого шару;

$X(t)$  –  $n$ -вимірним вектором, що визначає управління на етапі технологічного впливу;

$Y(t)$  –  $c$ -вимірним вектором, що визначає управління в процесі зміни умов експлуатації;

$\Pi_{WJ}(t)$  –  $q$ -вимірним вектором спостережуваного стану комплексу «матеріал-технологія-експлуатація» (вектор значень експлуатаційно-технологічного показника).

При оптимізації технологічних процесів часто виникає необхідність в одночасному розгляді декількох параметрів оптимізації. У таких випадках вирішують компромісні завдання, тобто знаходять умовний екстремум для однієї поверхні відгуку, при обмеженнях, що накладаються однією або декількома іншими поверхнями відгуків. Так, наприклад, режим наплавлення на чавун необхідно вибрати таким, щоб забезпечувалися мінімальні глибина проплавлення чавуну і ширина ледебуритної зони при заданій товщині наплавленого шару. Дуже часто при визначенні умов протікання того чи іншого процесу накладаються обмеження економічного характеру, наприклад, вартість присадочного матеріалу.

До теперішнього часу розроблено та досліджено велике число методів мінімізації функцій багатьох змінних, їм присвячена велика література [2, 18, 20, 24 та ін.]. Згадаємо лише деякі найбільш відомі і часто використовуються на практиці методи мінімізації (оптимізації):

- градієнтні методи;
- методи напрямків (можливих і пов'язаних);
- метод Ньютона;
- метод з кубічної швидкістю збіжності;
- метод пошуку глобального мінімуму;
- метод множників Лагранжа;
- метод штрафних функцій;
- метод бар'єрних функцій;
- метод навантажених функцій;
- метод випадкового пошуку;
- метод динамічного програмування.

Результат оптимізації, отриманий графоаналітичним способом (наприклад, градієнтні методи), є суб'єктивним і залежить від кваліфікації і досвіду інженера, і в більшості випадків відрізняється від результату, отриманого експериментальним шляхом [21]. Тому для вирішення оптимізаційних завдань більш точним і прийнятним є аналітичний спосіб.

Теорія оптимізації являє собою сукупність результатів експериментів (математичних моделей) і чисельних методів, орієнтованих на знаходження і ідентифікацію найкращих варіантів з безлічі альтернатив і дозволяють уникнути повного перебору і оцінювання можливих варіантів.

Для того щоб використовувати математичні результати і чисельні методи теорії оптимізації для вирішення конкретних інженерних задач, необхідно встановити межі підлягає оптимізації завдання, визначити кількісний критерій, на основі якого можна зробити аналіз варіантів з метою виявлення «найкращого», здійснити вибір внутрішньосистемних змінних, які використовуються для визначення характеристик та ідентифікації варіантів і побудувати модель, яка відображатиме взаємозв'язку між змінними.

Незалежно від змісту оптимізаційних методів тільки один критерій (і, отже, характеристична міра) може використовуватися при визначенні оптимуму.

В процесі вибору незалежних змінних слід взяти до уваги ряд обставин:

1. Необхідно провести відмінність між змінними, значення яких можуть змінюватися в досить широкому діапазоні, і змінними, значення яких фіксовані і визначаються зовнішніми факторами. Важливо провести різницю між тими параметрами системи, які можуть передбачатися постійними, і параметрами, які схильні до флуктуацій внаслідок впливу зовнішніх або неконтрольованих чинників.

2. Необхідно враховувати всі основні змінні, які впливають на функціонування досліджуваної системи. Істотним чинником, що впливає на вибір змінних, є рівень деталізації при дослідженні системи. Дуже важливо ввести в розгляд всі основні незалежні змінні, але не менш важливо не «перевантажувати» завдання великою кількістю дрібних, несуттєвих змінних.

Виникають природні запитання: чим керуватися при виборі методу для вирішення тієї чи іншої конкретної екстремальної задачі, який же метод є найкращим? Іноді вважають, що той метод краще, у якого вище швидкість

збіжності на деякому фіксованому класі задач [18]. Однак при такому способі оцінки методів не береться до уваги така важлива якість, як трудомісткість кожної окремо взятої ітерації методу.

Велика кількість різноманітних і частково суперечливих характеристик методів, недостатня розробленість методики оцінки згаданих характеристик ускладнюють порівняння методів один з одним. Іноді для порівняння методів мінімізації задають деякої набір тестових завдань і найкращим визнають той метод, за допомогою якого вдається вирішити зазначені тестові завдання з потрібною точністю за менше число ітерацій, менше число обчислень значень функції або її похідних, або за менший машинний час. Безсумнівно, такі «змагання» методів корисні, хоча і на їх основі не можна робити остаточні висновки про переваги того чи іншого методу.

Хотілося б мати метод, найкращий в усіх відношеннях, проте такого універсального методу поки немає. Тому для ефективного вирішення конкретного завдання мінімізації потрібно розумно поєднувати різні методи з урахуванням всілякої апріорної інформації про розв'язувану задачу (гладкість вихідних даних, опуклість, фізичні або будь-які інші міркування про область можливого розташування точки мінімуму і т. д.).

Успішне вирішення різних класів прикладних екстремальних задач неможливо без пакета мінімізації, що складається з бібліотеки програм, що охоплює досить багато методів мінімізації, а також керівників і допоміжних програм. Пакети мінімізації можуть бути використані в автоматизованому або діалоговому режимі.

При роботі з пакетом в діалоговому режимі фахівець, отримуючи відомості про поточні результати, оперативно втручається в процес мінімізації, здійснює перехід від одного методу до іншого, змінює параметри методів, параметри програм. Діалоговий режим роботи з пакетом мінімізації дозволяє найкращим чином використовувати досвід і інтуїцію фахівця і пред'являє високі вимоги до його професійних знань в області методів вирішення екстремальних задач.

## **Висновки, мета і завдання досліджень**

Вивчення літературних джерел та їх аналіз дозволяє зробити наступні висновки:

– приведені літературні дані про застосовані технології відновлення свідчать про недостатню їх ефективність для обробки деталей, внаслідок чого вони не одержали поки широкого застосування;

– метод підвищення зносостійкості деталей плазмовою обробкою їх поверхонь, що застосовується в машинобудуванні, не знайшов належного застосування в ремонтному виробництві при їх відновленні через відсутність достатніх даних по його використанні.

На основі аналізу даних літературних джерел поставлена мета: дослідити параметри технології плазмового наплавлення деталей сільськогосподарської техніки.

Для реалізації поставленої мети в даній роботі поставлені наступні задачі.

1. Провести аналіз та виявити можливість відновлення деталей плазмовою обробкою їх поверхонь.
2. Виконати теоретичне обґрунтування плазмової обробки при різних технологічних процесах.
3. Оптимізувати параметри технологічного процесу наплавлення деталей плазмовою обробкою їх робочих поверхонь.
4. Виконати економічне обґрунтування запропонованих розробок.

## РОЗДІЛ 2

### МЕТОДИКА І ОСНОВНІ МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕНЬ

#### 2.1. Методика пошуку компромісного рішення в багатокритеріальній задачі оптимізації технологічних процесів

Для застосування кількісних методів дослідження в будь-якій області завжди потрібно якась математична модель. При побудові моделі реальне явище (операція) неминуче спрощується, схематизується, і ця схема («макет» явища) описується за допомогою того чи іншого математичного апарату. Чим далі буде підібрана математична модель, чим краще вона буде відбивати характерні риси явища, тим успішніше буде дослідження і корисніше впливають з нього рекомендації.

Математична модель повинна відображати найважливіші риси явища, всі істотні фактори, від яких в основному залежить успіх операції [20]. Разом з тим, модель повинна бути по можливості простою [20, 26].

В існуючих програмах апроксимація експериментальних даних здійснюється шляхом побудови їх графіка з подальшим підбором підходящої апроксимуючої функції (лінії тренду). Можливі такі варіанти функцій:

1. Лінійна –  $y = ax + b$ .
2. Поліноміальна –  $y = a_0 + a_1x + a_2x^2 + \dots + a_nx^n$ , де до шостого порядку включно ( $n \leq 6$ ).
3. Логарифмічна –  $y = a \ln x + b$ , де  $a$  і  $b$  – константи,  $\ln$  – функція натурального логарифма.
4. Степенева –  $y = bx^a$ , де  $a$  і  $b$  – константи.
5. Експоненційна –  $y = be^{ax}$ , де  $a$  і  $b$  – константи,  $e$  – основа натурального логарифма.

Ступінь близькості апроксимації експериментальних даних обраної функції оцінюється коефіцієнтом детермінації. Якщо є декілька відповідних варіантів типів апроксимуючих функцій, можна вибрати функцію з великим коефіцієнтом детермінації (які прагнуть до 1).

Після побудови адекватних математичних моделей досліджуваного процесу приступають до вирішення екстремальної задачі (або, іншими словами, завдання оптимізації).

Існує велика кількість методів вирішення екстремальних задач, які можна розділити на методи мінімізації функцій однієї змінної та методи мінімізації функцій багатьох змінних. Так як завдання оптимізації технологічних процесів є багатокритеріальним [24, 25, 27], що залежать від певного числа змінних, то зупинимося більш детально на другій групі методів.

Рішення задачі знаходження оптимальної області параметрів режиму технологічної операції здійснюється в два етапи:

- 1) пошукових рухів до області екстремуму;
- 2) уточнення розташування екстремальної точки або за допомогою додаткових пошукових дослідів, або за допомогою математичної моделі охоплює область екстремуму, причому модель ця виходить іноді за допомогою спеціально організованих дослідів (наприклад, покрокове рух або додавання певної кількості зіркових і нульових точок до раніше виконаним дослідом по методикою повного або дрібного факторного експерименту).

Пошукові методи визначення екстремуму при активному експерименті діляться на класичні і факторні.

При оптимізації технологічних процесів часто виникає необхідність в одночасному розгляді декількох параметрів оптимізації. У таких випадках вирішують компромісні завдання, тобто знаходять умовний екстремум для однієї поверхні відгуку, при обмеженнях, що накладаються однією або декількома іншими поверхнями відгуків.

Якщо моделі для всіх параметрів оптимізації – лінійні функції, то для вирішення компромісної задачі можна користуватися методами лінійного програмування [27].

Однак при вирішенні задач оптимізації технологічного процесу моделі для параметрів оптимізації часто представлені нелінійними функціями.

У цих випадках компромісні завдання можна вирішувати двома способами – графоаналітичним і аналітичним. Перший спосіб, заснований на аналізі суміщених функцій відгуків, простий і відрізняється великою наочністю (рис. 2.1).

При зміні чинників від  $+1$  до  $-1$  значення функцій  $Y_i = f(x)$  утворюють багатокутну фігуру – область  $D$  (рис. 2.1) змін параметрів матеріалу поверхневого шару від факторів процесу формування.

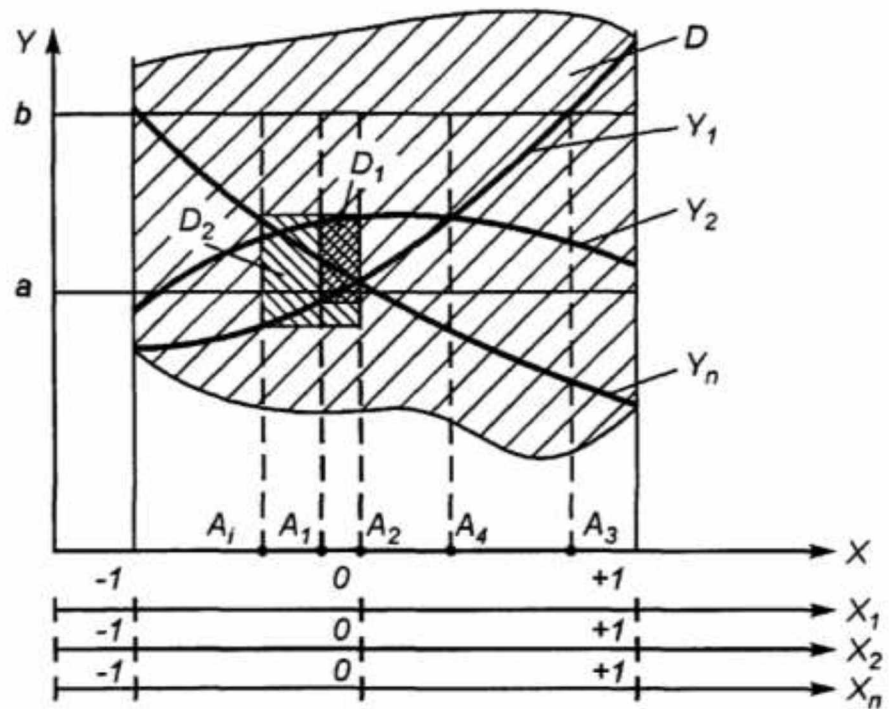


Рисунок 2.1 – Схема представлення параметрів матеріалу і чинників процесу формування

При вирішенні будь-якої технологічної задачі існують обмеження на параметри матеріалу поверхневого шару або зони сплаву для конкретної поверхні деталі в залежності від умов її експлуатації, наприклад, твердість,

міцність зчеплення нанесеного шару з основою, величина залишкових напруг, глибина проплавлення, обмеження за наявністю структур або дефектів (пори, непроплавлення, мікротріщини і ін.) і т. д. Тому з усієї області необхідно вибрати якусь область  $D$ , яка буде забезпечувати всі вимоги, що пред'являються до даної деталі або будь-якої її поверхні. Для цього на номограму (рис. 2.1) наносяться обмеження на параметри матеріалу  $a$  і  $b$ . Рішення завдання побудови кордонів області  $D$  називається визначенням допусків на параметри матеріалу поверхневого шару і фактори процесу формування. Завдання синтезу допусків на параметри матеріалу і фактори процесу формування в залежності від  $Y$  на інтервалі  $[a, b]$  розглядається як задача оптимальної апроксимації області формування заданих параметрів.

## **2.2. Методика вибору оптимальних значень параметрів матеріалу і чинників процесу формування**

На підставі аналізу можливостей існуючих методів оптимізації при вирішенні багатокритеріальних задач в технологічних процесах (ТП) обґрунтовано застосування комбінованого методу оптимізації, який дозволяє вирішувати ці завдання аналітичним шляхом і може бути реалізований в пакеті MS Excel.

Постановка завдання оптимізації при вирішенні багатокритеріальних задач має ряд характерних етапів:

1. Виділення незалежних керованих змінних математичної моделі (відгуків), які приймаються за параметри оптимізації, тобто визначення  $n$  - числа параметрів оптимізації і самих факторів  $(x_1, x_2, \dots, x_n)$
2. Подання меж зміни параметрів оптимізації у вигляді явних обмежень, тобто аналітичний опис областей.
3. Визначення критеріїв якості поверхневого шару матеріалу деталі. За критерії якості приймають параметри, що увійшли в набір відгуків.

4. Подання меж змін критеріїв (якщо це можливо) і інших змінних у вигляді неявних обмежень на параметри оптимізації.

5. Встановлення (призначення) для кожної критеріальною функції напрямки пошуку (мінімізація або максимізація).

Результатом постановки задачі по даній методиці є узагальнена канонічна задача оптимізації у вигляді комбінацій трьох множин: математичних моделей, критеріальних функцій і напрямків пошуку.

Для виконання дослідження по оптимальному поєднанню параметрів технологічних процесів рекомендується скласти таблицю параметрів (критеріїв) оптимізації та дати оцінку кожному параметру. Оцінки параметрів можуть бути обрані виходячи з: результатів опитування експертів, результатів дослідів.

Після складання таблиці вихідна система математичних моделей наводиться до задачі умовної оптимізації (загальному завданню лінійного програмування):

$$F = \sum_{j=1}^n c_j x_j \rightarrow \max (\min).$$

При умовах:

$$\sum_{j=1}^n a_{ij} x_j \leq b_i \quad (i = \overline{1, k});$$

$$\sum_{j=1}^n a_{ij} x_j \leq b_i \quad (i = \overline{k+1, m});$$

$$x_j \geq 0 \quad (j = \overline{1, l}; l \leq n),$$

де  $a_{ij}$ ,  $b_j$ ,  $c_j$  – задані постійні величини і  $k \leq m$ .

Згідно загальних принципів математичного програмування в якості максимізуючої (мінімізуючої) функції (параметра оптимізації) повинна виступати функція, що залежить від найбільшого числа факторів, всі інші функції можуть виступати в якості обмежень.

### 2.3. Методика планування експериментів

Під експериментом розуміється сукупність активних дій, що створюють різні умови протікання досліджуваного процесу з метою отримання про нього інформації, що цікавить дослідника. Експеримент складається з окремих дослідів, кожен з яких проводиться при деяких постійних для нього умовах [1, 26].

Експеримент ставлять для вирішення однієї з двох основних завдань:

1) інтерполяційної, що складається в побудові інтерполяційної формули для передбачень значень досліджуваного параметра, що залежить від ряду факторів;

2) екстремальній, що полягає в знаходженні умов процесу, що забезпечують отримання оптимального значення обраного параметра (екстремуму деякої функції).

Для вирішення цих завдань необхідно мати математичну модель досліджуваного об'єкта. Модель об'єкта отримують, використовуючи результати дослідів.

Завдання планування експерименту полягає у встановленні мінімально необхідного числа дослідів і умов їх проведення, у виборі методів математичної обробки результатів дослідів і в прийнятті рішень [26].

При плануванні екстремального експерименту мета дослідження повинна бути чітко сформульована і мати кількісну оцінку. Характеристику мети, задану кількісно, називають параметром оптимізації. Параметр оптимізації є реакцією, або відгуком, на вплив чинників, що визначають поведінку процесу.

Параметр оптимізації повинен відповідати таким вимогам:

- бути кількісним, доступним для вимірювання, характеризуватися числом;

- бути однозначним в статистичному сенсі, тобто заданому поєднанню рівнів факторів має відповідати одне (з точністю до помилки експерименту) значення параметра оптимізації;

- бути ефективним в статистичному сенсі, т. Е. Певним з найбільшою точністю, що дозволяє скоротити до мінімуму число паралельних дослідів;

- існувати в усіх станах досліджуваного об'єкта;

- мати ясний фізичний зміст.

Кожен фактор має область визначення – сукупність всіх значень, які може приймати фактор. Межі цієї області можуть задаватися або принциповими обмеженнями, які не можуть бути порушені ні за яких умов (наприклад, розплавлення при нагріванні сплаву під час термічної обробки, поломка преса при обробці тиском, перегорання печі при плавці і т.д.), або техніко-економічними міркуваннями (наприклад, вартість матеріалів, тривалість ведення процесу і т.д.), або умовами в кожному конкретному випадку (відсутність відповідної апаратури, установок, інструменту; неможливість сильно або взагалі порушувати технологію і т. д.). Приклад області визначення в задачі з двома факторами показаний на рис. 2.2 (товста крива лінія).

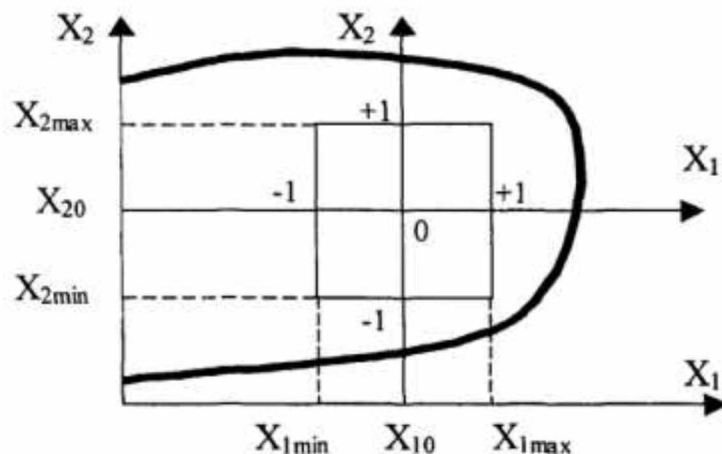


Рисунок 2.2 – Область визначення факторів та їх рівні

У загальному випадку чинники – це розмірні величини. Розмірності можуть бути найрізноманітніші, і числа, що виражають величини факторів,

можуть мати різні порядки. Тому з факторами в початковому вигляді зазвичай не працюють, а проводять їх попереднє кодування, що представляє собою лінійне перетворення факторного простору.

Для здійснення операції кодування, перш за все, вибирають вихідну область експерименту, задаючи верхні і нижні межі зміни кожного фактора в ході експерименту  $X_{i \max}$  та  $X_{i \min}$ .

Застосування методу планування багатофакторного експерименту дозволяє значно зменшити число необхідних дослідів і отримати математичні моделі досліджуваного процесу [1, 26, 27].

На підставі літературних даних [10, 15, 18, 20 і ін.], та попередніх експериментів було обрано чотири чинника (табл. 2.1), які суттєво впливають на якість зварного з'єднання і можуть бути керовані: сила зварювального струму, витрата плазмоутворюючого газу, швидкість наплавлення і полярність струму.

Таблиця 2.1 – Рівні факторів та інтервали їх варіювання

Назва фактору	Кодове позначення	Рівні фактору			Інтервал варіювання
		Нижній –1	Основний 0	Верхній +1	
Сила зварювального струму, А	$X_1$	140	150	160	10
Витрата плазмоутворюючого газу, л/хв.	$X_2$	3	4	5	1
Швидкість наплавки, м/год.	$X_3$	5	6	7	1
Полярність струму	$X_4$	зворотна	–	пряма	–

Постійні параметри процесу:

Амплітуда коливань – 13 мм;

Діаметр сопла плазмотрона – 9 мм;

Частота коливань плазмотрона – 0,67 Гц;

Витрата порошку – 2 кг/год.;

Витрата захисного газу (аргону) – 10 л/хв.;

Витрата транспортуючого газу – 1 л/хв.;

Відстань від торця сопла до виробу – 9 мм.

Планування проводили за допомогою головної напіврепліки типу  $2^{4-1}$ , що дозволяє оцінити усі лінійні ефекти та парні взаємодії  $X_1X_2 = X_3X_4$ ;  $X_1X_3 = X_2X_4$ ;  $X_2X_3 = X_1X_4$ . Кількість дослідів для такого типу реплік дорівнює 8 (табл. 2.2).

Таблиця 2.2 – Матриця планування експерименту

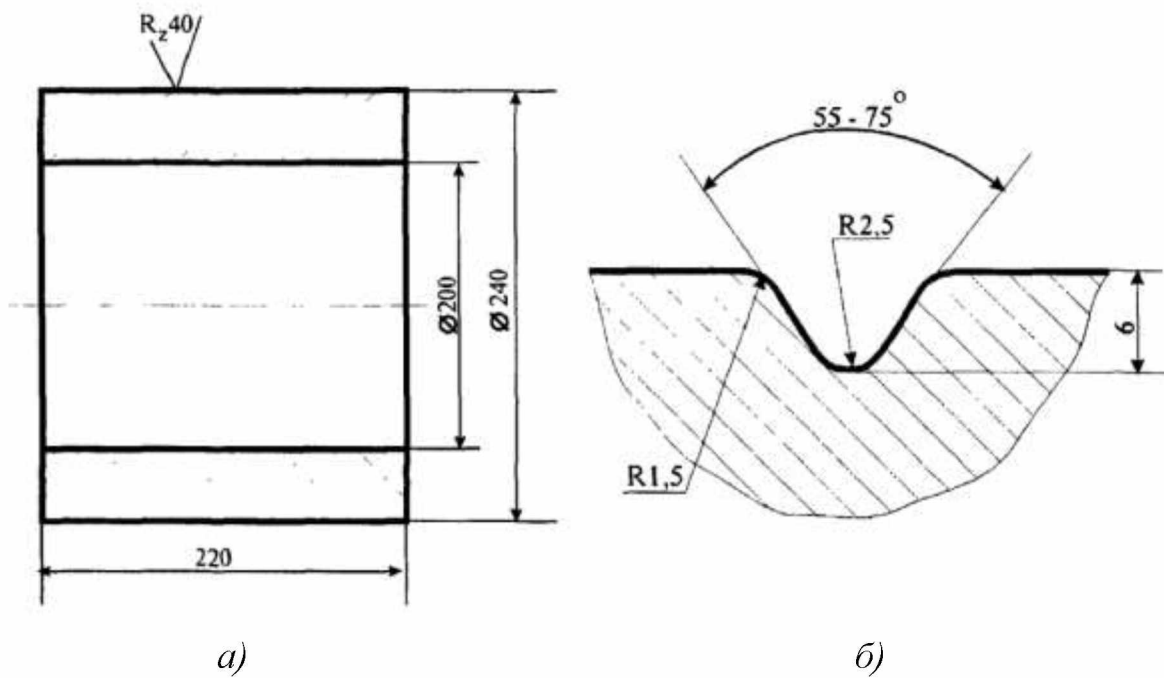
Фактор	Номер дослідів							
	1	2	3	4	5	6	7	8
$X_1$	–	+	–	+	–	+	–	+
$X_2$	–	–	+	+	–	–	+	+
$X_3$	+	+	+	+	–	–	–	–
$X_4$	+	–	–	+	–	+	+	–

Як параметри оптимізації були обрані: якість наплавленого металу, ширина і висота валика, глибина проплавлення чавуну, кількість ледебурита в зоні розплавлення, ширина зони термічного впливу (ЗТВ) і структурні зміни в ЗТВ.

#### **2.4. Методика дослідження металографічних і механічних властивостей зварного з'єднання**

При проведенні досліджень процесу плазмового порошкового наплавлення використовували такі матеріали:

- основний метал втулки з сірого чавуну марки СЧ25 (рис. 2.3, а). Для визначення технічної можливості плазмового наплавлення порошковими матеріалами в оброблення деталі на втулках механічним шляхом проточували канавку глибиною 6 мм (рис. 2.3, б), кут оброблення змінювався в межах 55-75°.



а) зразок для наплавки; б) форма обробки під зварювання

Рисунок 2.3 – Ескізи оброблюваних зразків

- присадний матеріал – самофлюсуючі порошок на нікелевій основі ПГ-10Н-04 і механічна суміш порошку ПГ-10Н-04 з залізом фракцією 100-300 мкм. Добавку заліза до порошку ПГ-10Н-04 змінювали в межах 0-60% від загальної маси суміші.

- плазмоутворюючий, захисний і транспортуючий газ – аргон газоподібний вищого сорту.

Експериментальні дослідження проводили на спеціалізованій установці для плазмового наплавлення порошками, зібраної на базі серійної зварювальної плазмової установки УПС-501 (рис. 2.4).

Дослідження структури біметалевих зразків проводили на нетравних і травлених шліфах на металографічному мікроскопі ММР-2 при збільшенні 100-500 разів. При дослідженні мікроструктури вимірювали глибину проплавлення основного металу, ширину зон ледебурита і термічного впливу (ЗТВ), площа, зайнята ледебуритом в зоні повного розплавлення чавуну і площа, зайнята мартенситом в ЗТВ чавуну.



Рисунок 2.4 – Загальний вигляд установки для плазмової обробки деталей

Макроструктуру наплавлених з'єднань досліджували неозброєним оком і за допомогою біноклярного мікроскопа МВС-1 при збільшенні від 2,5 до 25 разів. При дослідженні макроструктури виміряли ширину ( $B$ ) і висоту ( $H$ ) валика. Крайовий кут змочування наплавленого матеріалу визначали за допомогою кутоміра.

Вимірювання мікротвердості біметалевих з'єднань (основного і наплавленого металів і зони сплаву) проводили на приладі ПМТ-3.

Міцність зварного з'єднання визначали на машині УММ-20 на плоских зразках.

### **Висновки**

1. Розроблена методика проведення порівняльних досліджень деталей плазмовою обробкою.

2. Для визначення параметрів технологічного процесу відновлення деталей та оцінки їх довговічності розроблена методика експериментальних досліджень.

## РОЗДІЛ 3

### РЕЗУЛЬТАТИ ТЕОРЕТИЧНИХ І ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

#### 3.1. Алгоритм проектування технології відновлення чавунних деталей зварювальними процесами

Вибір присадочного матеріалу, методу зварювання (наплавлення), визначення оптимальних параметрів зварювання і термообробки (зміцнення) деталей є складним завданням, яке вирішується головним чином на основі експериментального підходу, що пов'язано з великою трудомісткістю і тривалістю процесу дослідження. Тим часом наукова база, створена працями дослідників в галузі математичного моделювання зварювальних процесів, дозволяє вирішувати ці завдання аналітично. Для розрахункового визначення впливу параметрів технології зварювання і термообробки на властивості зварних з'єднань і довговічність зварних конструкцій з урахуванням змін властивостей в процесі експлуатації розроблений комп'ютерний оптимізатор зварювання, що представляє собою автоматизоване робоче місце інженера-технолога зі зварювання [28].

Для врахування впливу параметрів технології зварювання і термообробки на структуру і властивості зварних з'єднань, а також довговічність зварних конструкцій з урахуванням зміни властивостей в процесі експлуатації пропонується алгоритм проектування технологічного процесу відновлення відповідальних чавунних деталей зварювальними методами, що дозволяє не тільки уніфікувати, а й автоматизувати процес проектування – створити підсистему САПР ТП для відновлення деталей, що враховує технологічні особливості зварювання (наплавлення) [25].

Рішення завдання аналітичного визначення довговічності відновлених чавунних деталей сільськогосподарського устаткування забезпечується набором математичних моделей, що застосовуються для розрахунку.

Вирішення завдання забезпечення довговічності відновлених деталей сільськогосподарського обладнання досягається на основі аналізу наявного позитивного досвіду відновлення відповідальних деталей, розмірів деталі і дефекту, вихідного стану металу в районі дефекту, наявності необхідного обладнання для зварювання, термообробки, зміцнення та ін., набору математичних моделей, що описують вплив параметрів різних етапів технологічного процесу на властивості зварного з'єднання.

Проектування ТП починається з аналізу геометричних параметрів деталі і дефекту, виду і причин утворення дефекту, вихідного стану металу в районі дефекту. Наприклад, в процесі експлуатації деталей графітні включення з поверхні, охолоджуються або змащують рідиною, вимиваються, і чавун стає пористим, тому при наплавленні на таку поверхню утворюється пористий шар наплавленого металу, що має низьку міцність зчеплення з основним металом. Для виключення даного дефекту перед наплавленням необхідно переплавити поверхневий шар на глибину, приблизно рівну глибині проплавлення основного металу при подальшій наплавленні.

Після аналізу габаритів деталі, виду і причин дефекту вибирається метод і зварювальний матеріал з урахуванням аналізу технологічних можливостей методів, наведених вище, наявного обладнання для зварювання (наплавлення) і термообробки, а також умов експлуатації деталі.

При холодному зварюванні чавуну якість зварного з'єднання і наплавленого металу визначається одночасною дією декількох факторів, що роблять істотний вплив на кінцеві результати зварювання (наплавлення). Найважливіші з них: термічний режим, який визначається в першу чергу методом наплавлення (температура нагріву, підтримання деталі в нагрітому стані в процесі наплавлення, охолодження після наплавлення); хімічний склад присадочного матеріалу; технологія ведення наплавлення (вплив режимів наплавлення (сили струму, швидкості зварювання і т. п.)).

Структура і розміри зон зварного з'єднання визначаються в основному методом зварювання (наплавлення), хімічним складом присадочного

матеріалу і параметрами режиму, а також режимами попереднього або супутнього підігріву або наступної термообробки деталі. Для вибору оптимальних параметрів режиму, що забезпечують необхідну якість зварного з'єднання необхідні наступні математичні моделі для конкретного методу зварювання і присадочного матеріалу:

- впливу параметрів режиму зварювання (наплавлення) на глибину (площа) проплавлення чавуну;
- впливу параметрів режиму зварювання (наплавлення) на структури і розміри зон сплаву і ЗТВ;
- впливу параметрів режиму зварювання (наплавлення) на геометричні розміри наплавлених валиків;
- впливу параметрів режиму зварювання (наплавлення) на механічні (міцність, твердість), технологічні (оброблюваність зварного з'єднання і ін.) і службові (рівень залишкових напружень, зносостійкість, наявність залізистих включень в наплавленому сплаві на мідній основі та ін.) властивості зварного з'єднання;
- впливу режимів подальшого поверхневого пластичного деформування (наприклад, карбування) на структуру металу поверхневого шару і межа витривалості зварного з'єднання;
- впливу хімічного складу і структури металу поверхневого шару на механічні, технологічні та службові властивості відновлених деталей;
- впливу експлуатаційних параметрів на довговічність відновлених деталей.

Можливість і якість механічної обробки різанням відновленої деталі визначається структурами і розмірами зон сплаву і ЗТВ (наявністю ледебурита і мартенситу та їх кількістю).

Для зниження рівня залишкових напружень і підвищення межі витривалості деталей, що працюють в умовах дії циклічних напружень доцільно застосовувати зміцнюючу обробку, наприклад, карбування.

Властивості зварного з'єднання визначаються складом присадочного матеріалу, величиною і знаком залишкових напружень, структурами металу поверхневого шару, макро- і мікрогеометричними параметрами поверхневого шару деталі.

Економічний критерій (найбільш часто оцінюється лише вартість відновлення деталі) визначається після проектування ТП і найістотніше від марки присадочного матеріалу, методу зварювання (наплавлення) і наявності термообробки.

Довговічність відновленої деталі визначається експлуатаційними параметрами і властивостями зварного з'єднання. Так як експлуатаційні параметри задані і, як правило, знаходяться в певному діапазоні, необхідну довговічність відновленої деталі можна забезпечити шляхом досягнення певного рівня властивостей зварного з'єднання, які можна варіювати, змінюючи технологічний процес. Економічний критерій є переважно обмежуючим фактором, наприклад вартість відновленої деталі не повинна перевищувати 60% вартості нової.

Перерахований вище набір математичних моделей є багатокритеріальним завданням умовної оптимізації. Вплив параметрів режиму плазмового наплавлення сірого чавуну на формування параметрів матеріалу поверхневого шару і управління ними (вибір оптимальних параметрів) буде розглянуто далі.

### **3.2. Дослідження технологічних можливостей плазмового наплавлення**

Хімічний склад присадочного матеріалу для плазмового наплавлення чавуну без попереднього підігріву розробляли з метою отримання пластичного наплавленого металу при мінімальному вмісті в ньому нікелю. Пластичний метал шва виходить з одного боку, завдяки підбору складу наплавочного матеріалу з невеликим лімітом плинності в порівнянні з

міцністю основного матеріалу, з іншого боку, завдяки зменшенню кількості вуглецю і шкідливих домішок (кремнію, фосфору та ін.) в наплавленому металі підбором методу наплавлення і параметрів режиму, що забезпечують мінімальне проплавлення основного металу і його перемішування з наплавляються.

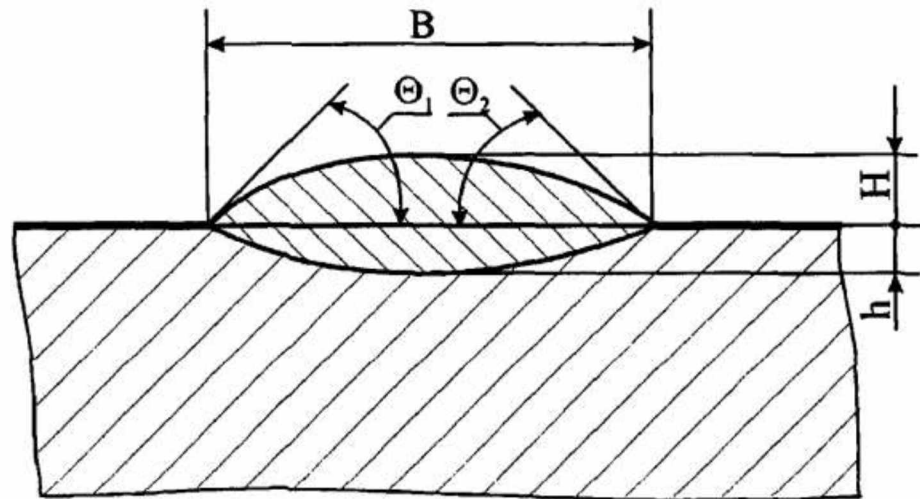
Уникнути попадання елементів з основного металу в наплавлений практично неможливо, тому в якості матеріалу для наплавлення найчастіше застосовують метали і сплави не утворюючих карбідів з вуглецем (мідь, нікель) [24].

Нікель впливає на розпад цементиту з утворенням графітової евтектики і викликає утворення аустенітної структури наплавленого металу [18], що сприятливо позначається на його позитивні властивості. Ступінь метастабільності структури зварного з'єднання знижується з підвищенням вмісту в металі наплавлення нікелю. З наведених причин нікель сприятливо впливає на зменшення відбілювання в зоні сплаву. З боку основного металу спостерігаються невеликі прошарку ледебуритного включень, розміри яких можна звести до мінімуму шляхом застосування методів і режимів, що забезпечують незначне проплавлення [24].

Температура плавлення присадочного залізонікелевого сплаву вище температури плавлення чавуну, тому при плазмовому наплавленні основний метал буде плавитися обов'язково. У цьому випадку з'єднання наплавленого і основного металів відбувається в результаті утворення спільної зварювальної ванни і її подальшої кристалізації.

Зміна масової частки заліза в нікелевому сплаві впливає на змочування чавуну рідким присадним металом, розміри і форму наплавляемого валика, фізико-механічні властивості і металографічні особливості зварного з'єднання.

Основними характеристиками наплавленого валика є: крайовий кут змочування, висота валика і ширина валика (рис. 3.1).



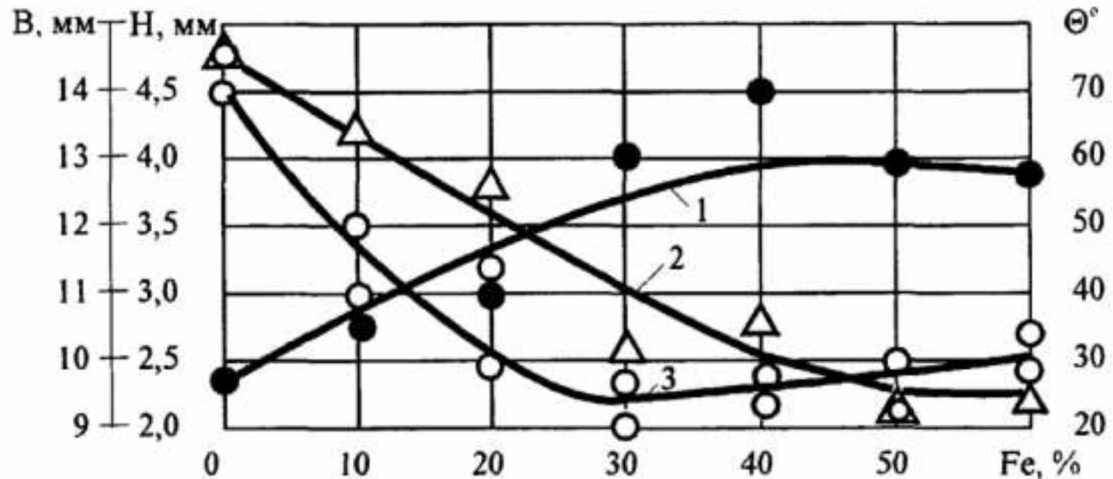
$B$  – ширина валика;  $H$  – висота валика;  $h$  – глибина проплавлення;  $\Theta_1$ ,  $\Theta_2$  – крайові кути змочування

Рисунок 3.1 – Основні розміри наплавленого валика

У міру збільшення вмісту заліза в присадний матеріал від 0,5 до 30% (табл. 3.1, рис. 3.2) змочування чавуну рідким сплавом поліпшується (зменшуються крайовий кут змочування і висота валика, і зростає ширина валика).

Таблиця 3.1 – Вплив хімічного складу присадочного матеріалу на розміри валика (основа – порошок ПГ-10Н-04)

Вміст заліза в сплаві, %	Розміри валика, мм		Крайовий кут змочування, град.
	ширина	висота	
0	9,8	4,8	70-75
10	10,5	4,2	40-50
20	11	3,8	30-45
30	13	2,6	20-25
40	14	2,8	25-27
50	13	2,2	25-30
60	12,8	2,2	30-32



1 – ширина валика; 2 – висота валика; 3 – крайовий кут змочування

Рисунок 3.2 – Залежність ширини та висота валика та кута змочування від кількості заліза в припадочному матеріалі на нікелевій основі

Подальше збільшення масової частки заліза до 50-60% лише призводить до зменшення висоти валика. При вмісті заліза менше 20% валик виходить високим і вузьким, тому наплавка широких шарів затруднена через незадовільне формування подальшого валика і його сплаву з попереднім.

Глибина проплавлення чавуну різко зменшується при збільшенні масової частки заліза в присадочному матеріалі до 10-15%, що пояснюється, мабуть, поліпшенням змочування і розтікання наплавляемого металу по поверхні чавуну і зменшення ймовірності впливу плазмової дуги безпосередньо на основний метал (між дугою і основним металом знаходиться рідкий присадний метал, який і охороняє чавун від впливу дуги). Подальше збільшення вмісту заліза практично не впливає на глибину проплавлення чавуну.

Твердість наплавленого металу (рис. 3.3) у міру збільшення масової частки заліза спочатку плавно зростає і досягає максимального значення близького до твердості чавуну при вмісті 30% заліза в присадний матеріал, потім знижується.

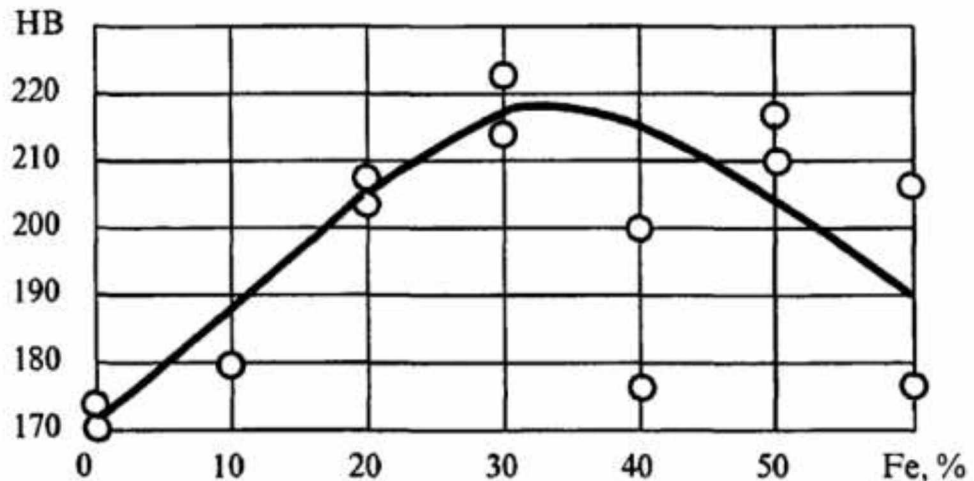


Рисунок 3.3 – Залежність твердості наплавленого металу на нікелевій основі від вмісту заліза в припадочному матеріалі

Безпосередньо до наплавленого металу прилягає зона сплаву. Структура зони не залежить від хімічного складу присадочного матеріалу в даному діапазоні вмісту заліза. Деяке збільшення ширини ледебуритної смуги в зоні зі збільшенням масової частки заліза в присадний матеріал пояснюється зростанням вмісту заліза в зоні сплаву і насиченням його вуглецем в результаті розчинення графіту чавуну.

### 3.3. Розробка математичних моделей впливу режиму зварювання і наплавлення на властивості зварного з'єднання

Досліджень щодо впливу параметрів режиму при плазмовому напавленні чавуну на геометричні і металографічні характеристики зварного з'єднання в літературі недостатньо. Однак відомо про вплив параметрів режиму плазмового напавлення зі струмопровідним присадочним дротом на основні технологічні властивості зварного з'єднання. Відсутність залежностей впливу основних параметрів режиму плазмового порошкового напавлення чавуну на параметри оптимізації (геометричні

розміри шва, металографічні особливості та ін.) ускладнюють розробку і впровадження даної технології для відновлення чавунних деталей.

Засобом вирішення завдання вибору оптимального режиму наплавлення є створення моделей, що встановлюють взаємозв'язок між прийнятими показниками якості і параметрами режиму.

Для визначення впливу параметрів процесу на якість наплавленого металу і з'єднання його з чавуном були розроблені критерії оцінки якості в балах, в залежності від кількості і значущості дефектів (табл. 3.2).

Таблиця 3.2 – Критерії наплавленого металу в залежності від наявності в ньому дефектів

Характеристика дефектів в наплавленому металі	Оцінка в балах
Несплавлення наплавленого валика з чавуном на довжині до 4 мм. Макропори діаметром до 1,2 мм в кількості 10-20 шт. на шліфі.	1
Несплавлення наплавленого валика з чавуном на довжині до 3 мм. Макропори діаметром до 1,2 мм в кількості 5-10 шт. на шліфі.	2
Нерозчинені пластинки графіту в зоні сплавлення наплавленого металу з чавуном. Макропори в кількості 5-10 шт. на шліфі.	3
Нерозчинені пластинки графіту в зоні сплавлення наплавленого металу з чавуном. Макропори не більше 5 шт.	4
Макропори відсутні. Границя сплавлення без дефектів	5

Площа, зайнята ледебуритом в зоні сплаву, величина постійна для даного режиму, так як при наплавленні на малій погонній енергії ледебурит спостерігається у вигляді острівців, а не смуги відбілювання. Однак для оцінки оброблюваності зварного з'єднання зручніше користуватися такою характеристикою, як ширина зони ледебурита.

Визначення коефіцієнтів регресії, перевірку адекватності моделі, однорідності дисперсій і значущості коефіцієнтів рівняння виконували за методиками [29].

Після обробки експериментальних даних отримали рівняння регресії (табл. 3.3 і 3.4):

ширини валика;

$$Y_1 = 14,7 - 0,69X_1 + 0,64X_2 - 1,28X_3 + 0,88X_1X_4; \quad (3.1)$$

висоти валика:

$$Y_2 = 2,46 + 0,16X_1 + 0,09X_3 + 0,14X_4 + 0,11X_1X_2 - 0,16X_1X_3 + 0,14X_1X_4; \quad (3.2)$$

глибини проплавлення чавуна:

$$Y_3 = 0,7 + 0,17X_1 + 0,31X_1X_4; \quad (3.3)$$

якості наплавленого металу:

$$Y_4 = 3,25 + 0,75X_1 - 0,75X_4 + 0,75X_1X_4; \quad (3.4)$$

площі, зайнятою ледебуритом:

$$Y_5 = 1,53 + 0,4X_1 - 0,74X_4 + 0,21X_1X_2; \quad (3.5)$$

вмісту мартенситу в ЗТВ:

$$Y_6 = 29,85 - 23,8X_2 + 14,6X_3 + 9,7X_4 - 10,3X_1X_4; \quad (3.6)$$

ширини ЗТВ:

$$Y_7 = 2,49 + 0,27X_1 - 0,38X_3 - 0,29X_4 + 0,28X_1X_2. \quad (3.7)$$

Відсутність в рівнянні того чи іншого параметра режиму вказує на те, що він статистично незначний.

Аналіз отриманих рівнянь (3.1-3.7) дозволяє встановити ступінь впливу кожного фактора (параметра режиму) на розміри наплавленого валика і металографічні характеристики зварного з'єднання при плазмовому наплавленні чавуну самофлюсуючим сплавом ПГ-10Н-04. Найбільший вплив на вибрані параметри оптимізації надають полярність і величина зварювального струму, а також парні взаємодії величини і полярності струму. Значимість коефіцієнта при факторі «полярність струму» не дозволяє

перейти від кодovаних значень факторів до натуральних. Однак дані рівняння дозволяють встановити ступінь впливу кожного фактора (параметра режиму) на конкретну характеристику зварного з'єднання.

Таблиця 3.3 – Геометричні розміри валика в залежності від режиму наплавки

Номер досліджу	Ширина валика, мм	Висота валика, мм	Глибина проплавлення чавуна, мм
1	13,3	2,6	0,33
2	14,0	2,1	0,41
3	14,6	2,5	0,79
4	12,0	3,0	1,08
5	15,5	2,1	0,74
6	13,5	2,8	1,42
7	18,2	2,0	0,26
8	16,6	2,6	0,58

Таблиця 3.4 – Металографічні характеристики зварного з'єднання в залежності від режиму наплавки

Номер досліджу	Оцінка якості наплавленого металу, бал	Площа зайнята ледебуритом, мм <sup>2</sup>	Ширина зони ледебурита, мм	Ширина ЗТВ, мм	Вміст мартенситу в ЗТВ, %	Структура ЗТВ по наявності «М» і «Т»
1	1	0,48	0,09 (У)	1,74	99,0	М
2	3	2,43	0,17 (У)	1,97	58,2	М+Т
3	4	1,59	0,11 (У)	2,29	0	Т
4	4	1,39	0,16 (У)	2,48	20,6	Т+М
5	4	2,15	0,14 (У)	2,96	22,4	Т+М
6	4	0,97	0,08 (Н)	2,70	35,1	Т+М
7	1	0,31	0,07 (У)	1,90	3,5	Т+М
8	5	2,95	0,18 (Н)	3,92	0	Т

Примітка: М – мартенсит; Т – тростит; (У) – ділянки ледебурита у вигляді островків; (Н) – безперервна смуга ледебурита.

При вирішенні завдання вибору оптимальної області параметрів режиму наплавлення в залежності від вимог, яким повинна задовольняти відновлювана деталь, доцільно мати моделі, що дозволяють визначити необхідний режим по граничним технологічними властивостями зварного з'єднання.

Для виключення з рівнянь (3.1-3.7) фактора «полярність струму», матрицю розділили на дві, в залежності від полярності струму, і отримали дві напіврепліки типу  $2^{3-1}$  з визначальним контрастом  $X_1X_2X_3 = +1$  для прямої полярності та  $X_1X_2X_3 = -1$  для зворотної.

Після обробки даних отримали наступні рівняння регресії (індекс «П» позначає пряму полярність, а «З» – зворотною):

ширини валика:

$$B_{\text{П}} = 14,25 - 1,5X_1 + 0,85X_2 - 1,6X_3; \quad (3.8)$$

$$B_{\text{О}} = 15,17 + 0,425X_2 - 0,875X_3; \quad (3.9)$$

висоти валика:

$$H_{\text{П}} = 2,6 + 0,3X_1 - 0,1X_2 + 1,6X_3; \quad (3.10)$$

$$H_{\text{О}} = 2,3 + 0,22X_2; \quad (3.11)$$

якості наплавленого металу та зони сплавлення:

$$K_{\text{П}} = 2,5 + 1,5X_1; \quad (3.12)$$

$$K_{\text{О}} = 4 + 0,5X_2 - 0,5X_3; \quad (3.13)$$

глибини проплавлення чавуна:

$$h_{\text{П}} = 0,77 + 0,48X_1 - 0,1X_2 - 0,07X_3; \quad (3.14)$$

$$h_{\text{О}} = 0,63 - 0,135X_1 + 0,05X_2; \quad (3.15)$$

площі, зайнятою ледебуритом:

$$S_{\text{П}} = 0,788 + 0,39X_1 + 0,147X_3; \quad (3.16)$$

$$S_{\text{О}} = 2,28 + 0,41X_1 - 0,27X_3; \quad (3.17)$$

ширини ледебуритної зони:

$$B_{\text{П}}^{\text{л}} = 0,1 + 0,02X_1 + 0,015X_2 + 0,025X_3; \quad (3.18)$$

$$B_o^I = 0,15 + 0,025X_1 - 0,01X_3; \quad (3.19)$$

ширини ЗТВ:

$$B_{II}^T = 2,2 + 0,38X_1 - 0,1X_3; \quad (3.20)$$

$$B_o^T = 2,78 + 0,16X_1 + 0,32X_2 - 0,655X_3; \quad (3.21)$$

вмісту мартенситу в ЗТВ:

$$M_{II} = 39,6 - 11,7X_1 - 27,5X_2 + 20,2X_3; \quad (3.22)$$

$$M_o = 20,15 + 8,95X_1 - 20,15X_2 + 8,95X_3; \quad (3.23)$$

Після розкодування рівнянь (3.8-3.23) вони були представлені в натуральних одиницях:

ширини валика:

$$B_{II} = 42,95 - 0,15I + 0,85Q - 1,6V \text{ мм}; \quad (3.24)$$

$$B_o = 18,72 + 0,425Q - 0,875V \text{ мм}; \quad (3.25)$$

висоти валика:

$$H_{II} = 0,03I - 0,1Q + 0,2V - 2,7 \text{ мм}; \quad (3.10)$$

$$H_o = 1,42 + 0,22Q \text{ мм}; \quad (3.11)$$

якості наплавленого металу та зони сплавлення:

$$K_{II} = 0,15I - 20,0; \quad (3.12)$$

$$K_o = 0,5Q - 0,5V + 5,0; \quad (3.13)$$

глибини проплавлення чавуна:

$$h_{II} = 0,048I - 0,1Q - 0,07V - 5,61 \text{ мм}; \quad (3.14)$$

$$h_o = 2,45 - 0,0135I + 0,05Q \text{ мм}; \quad (3.15)$$

площі, зайнятою ледебуритом:

$$S_{II} = 0,039I + 0,147V - 5,94 \text{ мм}^2; \quad (3.16)$$

$$S_o = 0,041I - 0,27V - 2,25 \text{ мм}^2; \quad (3.17)$$

ширини ледебуритної зони:

$$B_{II}^I = 0,002I + 0,015Q + 0,025V - 0,41 \text{ мм}; \quad (3.18)$$

$$B_o^I = 0,0025I - 0,01V - 0,165 \text{ мм}; \quad (3.19)$$

ширини ЗТВ:

$$B_H^T = 0,038I - 0,1V - 2,9 \text{ мм}; \quad (3.20)$$

$$B_O^T = 0,06016I + 0,32Q - 0,655V + 3,03 \text{ мм}; \quad (3.21)$$

вмісту мартенситу в ЗТВ:

$$M_H = 204 - 1,17I - 27,5Q + 20,2V \%; \quad (3.22)$$

$$M_O = 0,895I - 20,15Q + 8,95V - 87,2 \%; \quad (3.23)$$

Аналіз рівнянь (3.8-3.11) показує, що найбільший вплив на геометричні розміри наплавляемого валика при наплавленні на прямий полярності надають: величина зварювального струму і швидкість наплавлення, менше - витрата полуменеутворюючого газу. Причому збільшення сили струму або швидкості наплавлення призводить до зменшення ширини валика і збільшення його висоти. При наплавленні на зворотній полярності величина зварювального струму в досліджуваному інтервалі не впливає, що пояснюється, мабуть, ефектом катодного розпилення, в результаті якого відбувається очищення поверхні основного металу і зварювальної ванни від оксидів і шлаків, що утворюються в процесі наплавлення.

Якість наплавленого металу і зони сплаву визначається в першу чергу полярністю струму (рівняння 3.12-3.13). Наплавлення на зворотній полярності гарантує стабільність якості незалежно від параметрів режиму наплавлення в розглянутому діапазоні варіювання факторів, завдяки ефекту катодного розпилення. Збільшення витрати полуменеутворюючого газу і зменшення швидкості наплавлення сприяє поліпшенню якості (зменшується кількість пор) наплавленого металу внаслідок збільшення тиску плазмової дуги і часу існування зварювальної ванни.

Задовільну якість наплавленого металу і сплав з чавуном при наплавленні на прямий полярності забезпечується при струмі не менше 150 А, а при струмі 160 А якість наплавленого металу досягає 4 балів, що відповідає якості, що отримується при наплавленні на зворотній полярності. Наявність несплавлення наплавленого металу і великої кількості часу в

ньому пояснюється тим, що в процесі наплавлення на малих токах утворюються оксиди і шлаки на поверхні основного металу через малого часу існування зварювальної ванни не встигають спливати в верхню частину наплавленого рідкого металу і погіршують змочуваність чавуну рідким присадним матеріалом. Тому для отримання необхідної якості необхідно збільшувати величину зварювального струму, збільшуючи тим самим тепловкладення в деталь і час існування зварювальної ванни.

## **Висновки**

1. Найбільший вплив на металографічні характеристики зварного з'єднання при плазмовому наплавленні сірого чавуну самофлюсуючим порошковим матеріалом на нікелевій основі надають полярність струму і величина зварювального струму.

2. Плазмова наплавка чавуну дугою зворотної полярності має такі переваги: висока якість наплавленого металу (відсутність пор або їх мінімальна кількість) і відсутність несплавлення наплавленого металу з основним у всьому діапазоні параметрів режиму наплавлення; менший вміст мартенситу в ЗТВ, особливо при застосуванні режиму наплавлення з параметрами в діапазоні від -1 до 0; менша глибина проплавлення чавуну в діапазоні параметрів режиму від 0 до +1. Недоліки: велика ширина ледебуритної зони і ЗТВ.

3. Наплавлення на прямій полярності забезпечує значно меншу ширину відбілювання і ЗТВ. Однак при струмі менш 150 А наплавлений метал має велику кількість пор, і можливе несплавлення наплавленого валика з чавуном до 30% від загальної площі наплавлення. Стабільність якості зварного з'єднання забезпечується при струмах 150-160 А.

4. Міцність зчеплення наплавленого металу з чавуном не залежить від параметрів режиму плазмового наплавлення в досліджуваному діапазоні і полярності струму, а визначається міцністю основного металу.

## РОЗДІЛ 4

### РЕКОМЕНДАЦІЇ ЩОДО ПРАКТИЧНОЇ РЕАЛІЗАЦІЇ РОЗРОБОК

#### 4.1. Екологічна експертиза розробок

Екологічна паспортизація ремонтно-обслуговуючих підприємств є одним з ефективних перспективних засобів охорони навколишнього природного середовища. Екологічний паспорт підприємства належить до його основної проектно-технічної документації. Поряд з технологічним регламентом він повинний бути на кожному підприємстві. У цьому документі наведені дані, що характеризують взаємовідносини підприємства з довкіллям.

У першій частині паспорта наводяться загальні відомості про виробництво: назва підприємства та продукції, що виробляється, район розташування, його потужність, займана площа, кількість працюючих та основні витратні величини споживаної сировини, води, енергії, палива, пари, повітря тощо, а також відомості про споживану сировину, джерела водо- і теплопостачання, короткий опис технологічних схем виробництва основної продукції, технології очищення газо- димових викидів в атмосферне повітря та стічних вод, оборотність, зберігання, транспортування та вилучення твердих відходів (назва, кількість, хімічний склад та деякі основні властивості, технологія відновлення або виготовлення), утримання приміщень і споруд, плани дій в аварійних умовах, небезпечні матеріали, відомості про кращі альтернативні технології, що застосовуються на інших підприємствах країни чи світової практики і завдають меншої шкоди довкіллю.

Характеризується також санітарно-захисна зона підприємства (площа зони, прилеглі об'єкти, її оформлення).

У другій частині паспорта відображені заплановані природоохоронні

заходи із зазначенням конкретних термінів, виконавців, обсягів і витрат, питомих і загальних газо-димових викидів в атмосферне повітря і скидів стічних вод та відходів виробництва до і після впровадження кожного заходу.

Екологічні паспорти дають змогу зробити аналіз екологічного середовища в регіоні, порівняти техніко- і еколого-економічні дані з даними інших підприємств, що характеризуються природоохоронними заходами.

Одночасно можна оцінити й ефективність застосованої технології, повноту використання матеріалів й палива, ефективність технології очищення стічних вод і газо-димових викидів.

Можна також зробити еколого-економічну оцінку збитків взагалі і завданих природі зокрема, ефективність використання палива та енергії.

Оскільки об'єкти підприємства є джерелами забруднення атмосфери і навколишнього середовища, то проводять аналіз забезпеченості технічними засобами контролю за станом навколишнього середовища, викидами забруднюючих речовин в атмосферу і дають оцінку виконання екологічних заходів, приводять дані про використання і охорону земельних і водних ресурсів, описують методи контролю за шкідливими викидами, заходи щодо їх зменшення.

Екологічні порушення (злочини) караються відповідно до вимог Кримінального кодексу України. Вимоги закону передбачають встановлення чіткого причинного зв'язку між зробленим порушенням і погіршенням навколишнього середовища.

До екологічних злочинів відносять: забруднення навколишнього природного середовища (води, повітря, ґрунту); порушення правил обороту небезпечних матеріалів і відходів.

Забруднення, виснаження поверхневих чи підземних вод, джерел питної води або зміна її природних властивостей можуть завдати шкоди сільському господарству. Оцінка завданого збитку здійснюється з урахуванням реальної вартості затрат на відновлювальні роботи та ліквідацію наслідків.

Порушення правил викиду забруднювальних речовин в атмосферу, експлуатації очисних споруд чи інших об'єктів спричиняють забруднення або зміну природних властивостей повітря, що може завдати істотної шкоди здоров'ю людини.

Шкідливий плив на ґрунти чинить забруднення їх відходами господарської діяльності, що може бути небезпечним для здоров'я людей, забруднювати сільськогосподарську продукцію і водойми.

Порушення правил охорони навколишнього середовища полягає у використанні непередбачених правилами методик, відмови від виконання відповідних робіт або в бездіяльності при необхідних обов'язках. Це може бути, зокрема, ігнорування інформації, відмова від проведення екологічної експертизи та будівництва очисних споруд, порушення правил будівництва, експлуатації і ліквідації побудованих споруд тощо.

За скоєні екологічні злочини порушники несуть правову відповідальність. Екологічне законодавство передбачає три рівні покарання: порушення; порушення, що завдали значних збитків; порушення, що спричинили смерть людей (тяжкі наслідки).

Залежно від величини заподіяних збитків це можуть бути штрафи, заборона обіймати певні посади на встановлений термін, виправні роботи та позбавлення волі на визначений законом термін.

Система екологічного менеджменту в країні визначається і регламентується Законом України «Про охорону навколишнього природного середовища» Згідно з цим законом, метою державного управління в галузі охорони довкілля є реалізація законодавства, контроль за дотриманням вимог екологічної безпеки, забезпечення проведення ефективних заходів щодо охорони навколишнього природного середовища. Отже, державний екологічний менеджмент включає чотири основні функції:

- здійснення природоохоронного законодавства;
- контроль за екологічною безпекою;
- забезпечення проведення природоохоронних заходів;

- досягнення узгодженості дій державних і громадських органів.

Ринково орієнтована економіка охоплює такі групи функцій екологічного менеджменту: реструктуризація виробництва, приватизація, створення конкурентного середовища і ринкового ціноутворення.

На рівні підприємства до загальних функцій управління належить:

- формування екологічної політики;
- визначення екологічних цілей та завдань відповідно до екологічної політики;
- розроблення стратегічного плану реалізації екологічної політики;
- розроблення та реалізація програми екологічного управління;
- формування екологічної свідомості та мотивування;
- ведення документації екологічного менеджменту;
- оперативне управління, аналіз та вдосконалення.

Виконання системоутворювальних функцій екологічної політики, визначення екологічних цілей і завдань, розроблення та реалізація екологічної програми здійснюється за допомогою екологічної експертизи. Екологічна експертиза – це науково-практична діяльність спеціально уповноважених державних органів, еколога-експертних формувань та об'єднань громадян, що ґрунтується на міжгалузевому екологічному дослідженні, аналізі та оцінці передпроектних, проектних та інших матеріалів чи об'єктів, дія яких впливає або може негативно впливати на стан довкілля та здоров'я людей.

Основними завданнями екологічної експертизи є визначення ступеня екологічного ризику й безпеки суб'єкта господарської діяльності; встановлення відповідності вимогам екологічного законодавства; оцінка впливу різних об'єктів на довкілля, здоров'я людей та можливих негативних екологічних наслідків.

Основними принципами екологічної експертизи є:

- гарантування безпечного життя довкілля;
- наукова обґрунтованість життя довкілля;

– державне регулювання та законність.

Державну екологічну експертизу об'єктів загальнодержавного і міжобласного значення проводить управління екологічної системи України, об'єктів місцевого значення – відділи екологічної експертизи обласних управлінь екологічної безпеки.

Законом «Про екологічну експертизу», прийнятим Верховною Радою України у 1995 р., передбачено державне регулювання і управління в галузі екологічної експертизи, статус експерта, обов'язки замовників експертизи, порядок проведення експертизи, її фінансування, відповідальність за порушення та міжнародне співробітництво [31].

Висновки громадської експертизи направляють в органи, що здійснюють державну екологічну експертизу, центральні й місцеві влади, замовникам проекту.

## **4.2. Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях**

### **4.2.1. Актуальність проблеми безпеки людини у виробничому середовищі та при надзвичайних ситуаціях**

Охорона праці в нашій країні охоплює заходи по подальшому полегшенні умов праці на основі механізації важких і шкідливих виробничих процесів, широкому впровадженню сучасних засобів охорони праці, усуненню причин, що породжують травматизм і професійні захворювання робітників. Вона тісно пов'язана з умовами праці.

Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях в умовах сільського виробництва – важливе завдання, вирішення якого забезпечить нормальні умови праці працівниками сільського господарства. Це заходи по подальшому поліпшенню і оздоровленню умов праці, широкому впровадженню сучасних засобів безпеки, усуненню причин, що породжують

травматизм, створенню на виробництві необхідних гігієнічних і санітарно-побутових умов.

Кожна людина і, безперечно, людина з вищою освітою повинна усвідомлювати важливість питань уникнення ризиків у житті та праці.

Україна в освітньому плані приєдналася до Європейської програми навчання з ризиків FORM-OSE [32]. Безпека життя та праці сьогодні формується як меганаука, без якої людство приречене на значні втрати.

Умови праці – це складне об'єктивне суспільне явище, що формується в процесі трудової діяльності під впливом взаємопов'язаних факторів соціально-економічного характеру, які впливають на здоров'я, працездатність людини, на її відношення до праці та ступінь задоволення від неї, на ефективність праці та інші економічні результати виробництва. Вони характеризуються оціночними показниками мікроклімату, наявністю в робочій зоні шкідливих та небезпечних виробничих факторів, психофізичним та естетичними елементами діяльності працівників господарства.

Охорона життя та здоров'я громадян у процесі їх трудової діяльності, створення безпечних та нешкідливих умов праці є одним з найважливіших державних завдань. Успішне вирішення цього завдання значною мірою залежить від належної підготовки фахівців усіх освітньо-кваліфікаційних рівнів з питань охорони праці.

З часу виникнення людської цивілізації кожна людина дбала про власну безпеку та безпеку своїх близьких так само, як і людству доводилось дбати про безпеку свого існування. Людська цивілізація досягає все більшої могутності, а проблема безпеки її існування стає все більш гострою. Актуальність проблеми охорони праці та безпеки в надзвичайних ситуаціях в світі значно зросла на початку третього тисячоліття. Сьогодні ця проблема стала пріоритетною для світової цивілізації.

#### 4.2.2. Вимоги безпеки при нанесенні покриттів

При нанесенні покриттів на робочі поверхні робітник має справу з різноманітними пристроями та обладнанням.

Основними технічними засобами охорони праці в цьому випадку є захисні пристрої.

Для запобігання захоплення, удару робочими механізмами всі види передач різних верстатів і установок, які використовуються при відновленні гільз і нанесенні покриттів повинні мати огорожувальні пристрої - кожухи, щити, екрани, козирки, планки, бар'єри (суцільні та сітчасті).

Крім того застосовують: блокувальні пристрої (механічні, електронні, електричні, пневматичні, гідравлічні), пристрої, до яких відносяться системи захисту від ураження електричним струмом, пристрої сигналізації.

Для безпеки експлуатації при нормальному режимі роботи електроустановок необхідно забезпечити захисне заземлення.

При виявленні нагріву тертьових деталей, появи гару або диму верстат потрібно негайно зупинити і приступити до гасіння пожежі наявними засобами, викликати пожежну команду. Двигун, що загорівся, або електропроводку необхідно гасити сухим піском або вогнегасником (вуглекислотним або порошковим). При значному поширенні пожежі, коли його не можна ліквідувати наявними на ділянці засобами, робітники будуть евакуюватися через заздалегідь передбачену необхідну кількість дверей.

Запропоновано пристосування для нанесення покриттів на поверхні зношених деталей. Характерною особливістю є використання різноманітних хімічних речовин.

Робота з такими речовинами створює небезпеку отруєнь, опіків та професійних захворювань. Вдихання шкідливих речовин призводить до ураження верхніх дихальних шляхів і загальнотоксичного впливу. Попадання кислот і лугів на шкіру може викликати подразнення або опік. Тому необхідно працювати в спеціальній захисній формі.

Поряд з хімічними небезпечними і шкідливими факторами технологічний процес характеризується і фізичними факторами: шумом, вібрацією, запиленістю та ін.

Щоб захистити працюючих від запиленості, шуму і вібрації потрібно встановити в приміщенні вентиляцію, кондиціонери, звукоізолюючі кожухи, екрани, стіни, перетинки, які виготовляють із щільного матеріалу.

Також для працівників повинні проводитись всі потрібні інструктажі і навчання з охорони праці, повинен бути журнал з проведення інструктажів, з відповідними замітками.

#### **4.2.3. Аналіз формування травмонебезпечних ситуацій**

Всяке порушення аналітичної цілості організму або його функцій внаслідок дії на людину, дії будь-якого небезпечного фактору визначається як травма.

Аналіз небезпечних умов, які існують чи виникають безпосередньо на виробництві показав, що їх можна поділити на групи, які:

- характеризують стан або рівень безпеки виробничого обладнання або певного робочого місця, конструктивні недоліки конкретного вузла чи машини;
- спонукають працюючого допускати помилки у процесі роботи, низька кваліфікація працюючого та рівень знань з охорони праці;
- створюють можливість проникнення працюючого у небезпечну зону в наслідок відсутності відповідного контролю за дотриманням правил з охорони праці, та інші.

Якщо внаслідок аварії технічної системи виникли травми у людей, то сам випадок травми необхідно розглянути як подію, що є наслідком аварії. Це стосується тих систем, у яких підсистемами одночасно є машина і людина. Якщо при функціонуванні таких систем з ладу вийшла машина, раптово припинивши свої функції внаслідок руйнування окремих деталей або

самої машини, і це привело до значного матеріального збитку, то таке випадкове явище необхідно назвати аварією.

Усі явища, що формують небезпечну ситуацію, мають повну достовірність виникнення, а це означає, що небезпечні умови (НУ), небезпечні дії (НД), небезпечні ситуації (НС) і наслідки таких ситуацій: аварія (А), травма (Т) і сприятлива подія належить до випадкових явищ.

Матеріальні системи поєднують у собі системи неорганічної природи (фізичні, хімічні, геологічні та ін.) і живі системи (клітини, найпростіші і високорозвинені організми, популяції, біологічні види, екологічні системи). Особливим класом матеріальних систем є соціальні системи (сім'я, колектив, державна політична система, суспільно-економічна формація). Ідеальною системою є поняття, гіпотеза, теорії, лінгвістичні і логічні побудови і т. ін. Штучною системою є система управління виробництвом, безпекою життєдіяльності і т. ін.

Оскільки при функціонуванні людино-машинних систем такі явища як травми, аварії мають дуже близькі механізми формування та виникнення, у подальшому ці явища будуть описуватись паралельно (рис.4.1).



Рисунок 4.1 – Блок-схема формування та виникнення травмонебезпечних аварійних ситуацій

Основні небезпеки, які виникають під час нанесення зносостійких покриттів на гільзи автотракторних двигунів приведені в табл. 4.1

Таблиця 4.1 – Аналіз процесів формування травмонебезпечних ситуацій в технологічному процесів нанесення покриттів на зношені деталі

Вид робіт, виробничий підрозділ, робоче місце, виробниче обладнання, склад агрегату	Виробнича безпека			Можливі наслідки	Заходи запобігання небезпечним ситуаціям
	Небезпечна умова НУ	Небезпечна дія НД	Небезпечна ситуація НС		
Приготування розчину для нанесення покриття	Розбризкування, витікання розчину НУ	Працівник доторкнувся до розчину НД	Подразнення, опік хімічними речовинами НС	Травма Т	Провести інструктаж з питань охорони праці. Робота з хімічними речовинами лише у спецодягу.
Нанесення покриття на поверхню деталі	Поява на корпусі верстата електричного струму НУ-1 Робота з рухомими частинами верстата НУ-2	Працівник доторкнувся до корпусу НД-1  Працівник доторкнувся до швидкообертової частини верстата НД-2	Ураження електричним струмом НС-1  Механічна дія рухомої частини верстата на тіло працівника НС-2	Травма Т	Регулярна перевірка стану заземлення установки та ізоляція проводів.  Встановлення захисного обладнання на верстаті.  Проведення інструктажу з питань охорони праці

#### 4.2.4. Аналіз формування умов виникнення і розвитку аварій

Ступенева логіко-імітаційна модель виникнення нещасного випадку наведена на рис. 4.2.



Рисунок 4.2 – Ступенева логіко-імітаційна модель виникнення нещасного випадку

#### 4.2.5. Висновки щодо підвищення стану охорони праці та безпеки в надзвичайних ситуацій

У розділі охорони праці дипломного проекту представлений аналіз загальних питань охорони праці, розглянуто основні шкідливі фактори, що виникають в під час технологічного процесу та їх вплив на організм людини, запропоновано заходи для забезпечення нормальних умов праці:

- 1) для забезпечення безпеки обладнання запропоновані захисні і огорожувальні пристрої;
- 2) для виключення ураження електричним струмом необхідно застосування заземлюючих пристроїв;
- 3) для захисту від небезпечних хімічних речовин – використання спеціального захисного одягу;
- 4) для зменшення запиленості – використання вентиляції, для зменшення шуму і вібрацій – звукоізолюючі засоби;

#### **4.3. Техніко-економічне обґрунтування ефективності відновлення чавунних деталей плазмовою обробкою їх робочих поверхонь**

Техніко-економічна оцінка проведена у відповідності з рекомендаціями щодо визначення економічної ефективності підвищення довговічності сільськогосподарських машин [33].

Річний економічний ефект від впровадження розробленої технології визначали за формулою:

$$E = [(c_1 + E_n k_1) - (c_2 + E_n k_2)] B_r, \quad (4.1)$$

де  $c_1$  і  $c_2$  – собівартість нової та відновленої чавунної деталі плазмовою обробкою їх робочих поверхонь;

$E_n = 0,15$  – нормативний коефіцієнт ефективності капіталовкладень [33];

$B_r$  – річний обсяг відновлених деталей за розробленою технологією, шт.

Затрати  $C_y$  на виготовлення установки для відновлення чавунних деталей плазмовою обробкою їх робочих поверхонь визначали за такою залежністю:

$$C_y = C_k + C_{od} + C_{нд} + C_{сб} + C_{зв}, \quad (4.2)$$

де  $C_k$  – вартість виготовлення корпусних деталей, грн.;

$C_{od}$  – витрати на виготовлення оригінальних деталей, грн.;

$C_{nd}$  – ціна великих покупних деталей і вузлів, грн.;

$C_{сб}$  – заробітна плата виробничих робітників, зайнятих на складанні конструкції, грн.;

$C_{on}$  – загальновиробничі накладні витрати на виготовлення конструкції, грн.

Розраховані за вказаною формулою витрати склали 25250 грн.

Питомі капіталовкладення визначали по залежностях [33]:

$$\kappa_1 = \frac{C_{O1}}{B_{Г1}} \text{ де } C_{O1} \text{ і } C_{O2} \text{ – вартість основних виробничих фондів за діючої}$$

технології виготовлення і розробленої технології відновлення;

$B_{Г1}$  і  $B_{Г2}$  – річна програма виготовлення та відновлення за розробленою технологією.

Питомі капіталовкладення склали  $\kappa_1 = 1,65$  грн.;  $\kappa_2 = 1,32$  грн.

Собівартість відновлення  $C$  деталі визначали по наступній формулі:

$$C = C_{з.п.} + C_m + C_{р.ф.} + C_{н.р.} + C_{i.в.}, \quad (4.3)$$

де  $C_{з.п.}$  – заробітна плата виробничих робітників, зайнятих в процесі відновлення, грн.;

$C_m$  – витрати на використанні при відновленні матеріали, грн.;

$C_{р.ф.}$  – вартість ремонтного фонду з урахування витрат на придбання обладнання, грн.;

$C_{н.р.}$  – накладні витрати, грн.;

$C_{i.в.}$  – інші витрати, грн.

Собівартість однієї чавунної деталі складає  $C_1 = 650$  грн., а відновленої  $C_2 = 220$  грн.

Економічний ефект від впровадження розробленої технології складе:

$$E = [(650 + 0,15 \cdot 1,65) - (220 + 0,15 \cdot 1,32)] \cdot 120 = 51600 \text{ грн.},$$

де 120 – річний обсяг відновлення корпусних деталей різної сільськогосподарської техніки.

Економічний ефект на одиницю продукції становить 430 грн.

Основні показники техніко-економічної ефективності відновлення чавунних деталей наведені в табл. 4.2.

Таблиця 4.2 – Показники техніко-економічної ефективності

Показники економічної ефективності	Значення показників	
	Існуюча технологія виготовлення	Розроблена технологія відновлення
1. Річний обсяг виготовлення і відновлення лап, грн.	120	120
2. Собівартість однієї деталі, грн.	650	220
3. Питомі капітальні вкладення, грн.	1,65	1,32
4. Річний економічний ефект, грн.		51600
5. Економічний ефект на одиницю продукції, грн.		430

### Висновки

1. Вартість однієї чавунної деталі, відновленої по розробленій технології в 2,9 рази нижча ніж вартість нової деталі.

2. Економічний ефект від впровадження розробленої технології склав 51600 грн. при річному обсязі впровадження 120 деталей.

## ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

1. Приведені літературні дані про застосовані технології відновлення свідчать про недостатню їх ефективність для обробки чавунних деталей, внаслідок чого вони не одержали поки широкого застосування; метод підвищення зносостійкості чавунних деталей плазмовою обробкою їх поверхонь, що застосовується в машинобудуванні, не знайшов належного застосування в ремонтному виробництві при їх відновленні через відсутність достатніх даних по його використанні.

2. При плазмовому наплавленні на сірий чавун порошком на нікелевій основі, змінюючи вміст заліза в присадний матеріал від 0 до 60% від маси порошку, можна отримувати необхідні розміри і форму наплавленого валика, глибину проплавлення основного металу, твердість і мікроструктуру наплавленого металу. Утворення структурних складових в зоні сплаву і її розміри не залежать практично від вмісту заліза в присадочному залізонікелевому матеріалі.

3. Плазмове зварювання порошком ПГ-10Н-04 в оброблення глибиною до 6 мм і при куті оброблення не менше  $75^\circ$  дозволяє отримати високоякісне зварне з'єднання на рівні міцності основного металу. Застосування струму зворотної полярності дозволяє отримати зварене з'єднання з меншою кількістю дефектів в наплавленого металу і ледебурита в зоні сплаву.

4. Плазмова наплавка чавуну дугою зворотної полярності дозволяє отримати високу якість наплавленого металу (відсутність макропор і мінімальна кількість мікропор), відсутність несплавлення наплавленого металу з основним, меншу глибину проплавлення чавуну при наплавленні на оптимальному режимі і меншу кількість мартенситу в зоні термічного впливу. Недоліки: велика ширина ледебуритного зони і зони термічного впливу, ніж при наплавленні дугою прямої полярності. Застосування дуги

зворотної полярності переважно в разі відновлення деталей, працездатність яких визначається якістю наплавленого металу.

5. Вартість однієї деталі, відновленої по розробленій технології в 2,9 рази нижча ніж вартість нової деталі. Економічний ефект від впровадження розробленої технології склав 51600 грн. при річному обсязі впровадження 120 деталей.