

**С.О. ЛУЗАН
О.І. СІДАШЕНКО
А.С. ЛУЗАН**

**ОБҐРУНТУВАННЯ ТА
ВДОСКОНАЛЕННЯ
ТЕХНОЛОГІЙ ВІДНОВЛЕННЯ
ДЕТАЛЕЙ**

Курс лекцій

**Харків
2020**

УДК 621.793.7:624.81(075.8)

Л 83

Рекомендовано Вченою радою Харківського національного технічного університету імені Петра Василенка протокол № 5 від 16 січня 2020р як навчальний посібник для студентів вищих навчальних закладів III-IV рівнів акредитації

Рецензенти:

Власовець В. М. – доктор технічних наук, професор Харківського національного технічного університету сільського господарства імені П. Василенка;

Полянський О. С. – доктор технічних наук, професор Харківського національного автомобільно – дорожнього університету;

Аулін В. В. – доктор технічних наук, професор Центральноукраїнського національного технічного університету.

Лузан С.О. Обґрунтування та вдосконалення технологій відновлення деталей. Курс лекцій / С.О. Лузан, О.І. Сідашенко, С.О. Лузан. – Харків: ХНТУСГ, 2020. – 127 с.

Запропановано курс лекцій, що містить у собі базовий матеріал з дисципліни «Обґрунтування та вдосконалення технологій відновлення деталей». Мета дисципліни навчити магістрів застосовувати на практиці комплексний підхід при виборі найбільш раціонального способу вдосконалення методу відновлення деталей машин. Розглянуто характерні види зносу деталей машин, наведені класифікації відновлюваних деталей, СВС-процеси в технологіях зміцнення і відновлення деталей машин. Розглянута методологія вибору способу відновлення деталей з урахуванням їх ресурсу та оцінка витрат по нанесенню покриття. В курсі лекцій представлений внесок ХНТУСГ у розвиток технологій відновлення деталей.

Для студентів, магістрів, аспірантів і викладачів інженерних спеціальностей закладів вищої освіти 3-4 рівнів акредитації, які навчаються за спеціальністю 133 - «Галузеве машинобудування».

Лл. 36. Табл. 15. Бібліограф. 26 назв.

УДК 621.79 : 621.787:621.81.004.67

ISBN 978-617-7645-90-9

© Харківський національний технічний університет сільського господарства імені Петра Василенка, 2020

© Лузан С.О., Сідашенко О.І., Лузан А.С.

ЗМІСТ

<i>ПЕРЕДМОВА</i>	4
<i>Лекція 1. Вступ. Ресурс транспортних засобів та їх основних складових частин після ремонту</i>	6
<i>Лекція 2. Характерні види зносу деталей машин</i>	17
<i>Лекція 3. Вибір способу відновлення деталей машин</i>	27
<i>Лекція 4. Класифікація відновлюваних деталей. Характеристики способів газотермічного напилення</i>	39
<i>Лекція 5. Удосконалення методів газотермічного напилення</i>	65
<i>Лекція 6. СВС-процеси в технологіях зміцнення і відновлення деталей машин наплавленням і газотермічними способами напилення покриттів</i>	93
<i>Лекція 7. СВС-процеси в газотермічних способах напилення і наплавлення покриттів</i>	104
<i>Лекція 8. Економічна ефективність технологічного процесу відновлення деталей</i>	119
Список літератури.....	124

ПЕРЕДМОВА

Якість відремонтованих деталей визначається технологічними можливостями процесу відновлення, в результаті яких формуються фізико-механічні властивості і структурний стан матеріалу, геометрія та інші характеристики поверхні. Також важливі і супутні процеси, такі як поширення теплоти, зміна структури основного металу в зоні термічного впливу, виникнення залишкових напруг і деформацій. Для забезпечення надійної захисної дії покриття на деталі необхідно прагнути послабити вплив залишкових напружень, кисню, дефектності покриття.

У різних галузях народного господарства, в тому числі і при ремонті сільськогосподарських машин і транспортних засобів, застосовується велика кількість методів і способів відновлення деталей.

В даний час на підприємствах агропромислового комплексу найбільш часто вживаними є методи наплавлення, способи газотермічного напилення, електрохімічні процеси та інші.

Ремонт сільськогосподарських машин полягає в економічно обґрунтованому усуненні несправностей і відновленні їх ресурсу після періоду експлуатації, тобто в вторинному виробництві виробів з наявного ремонтного фонду.

Метою викладання навчальної дисципліни «Обґрунтування та вдосконалення технологій відновлення деталей» є – навчити магістрів застосовувати на практиці комплексний підхід при виборі найбільш раціонального способу вдосконалення методу відновлення деталей машин.

Вивчення дисципліни ґрунтується на знаннях загально-технічних та загальнотеоретичних дисциплін, а також повинно проводитись після вивчення студентом курсів «Технологія машинобудування», «Технологічні системи

ремонтного виробництва», «Гертя, мащення та дефектація деталей машин».

В результаті вивчення даної дисципліни магістри одержать знання про методи, які застосовуються для відновлення деталей машин і матеріали, які забезпечують заданий ресурс в результаті відновлення деталей. Зможуть оцінювати трібологічні характеристики відновлювальних покриттів та підвищувати їх трібологічні властивості за рахунок інтегрування способів нанесення покриттів з іншими технологіями, та застосування нових матеріалів. Обирати найбільш оптимальний метод відновлення конкретної деталі.

При підготовці даного курсу лекцій основною метою авторів було підібрати і систематизувати матеріал по роботах, присвячених вдосконаленню методів відновлення деталей машин, модифікації поверхні деталей для отримання спеціальних властивостей, та узагальнити його з вимогами навчальної літератури. Матеріал викладено у відповідності навчальної програми з дисципліни "Обґрунтування та вдосконалення технологій відновлення деталей".

Запропонований курс лекцій складається з 8 лекцій, що містять у собі базовий матеріал з дисциплін навчального плану підготовки фахівців за спеціальністю 133 – «Галузеве машинобудування».

Курс лекцій може бути корисним не тільки для магістрів і викладачів інженерних спеціальностей закладів вищої освіти III-IV рівнів акредитації, а також аспірантів, інженерно-технічних працівників машинобудівних і ремонтних підприємств та майстерень технічного сервісу.

ЛЕКЦІЯ 1

ВСТУП. РЕСУРС ТРАНСПОРТНИХ ЗАСОБІВ ТА ЇХ ОСНОВНИХ СКЛАДОВИХ ЧАСТИН ПІСЛЯ РЕ-МОНТУ

Вступ. 1. Аналіз трудомісткості поточних ремонтів машин. 2. Основні причини відмов машин.

Вступ

Підвищення і забезпечення надійності засобів транспорту є однією з найважливіших передумов їх ефективного використання. Основна властивість, яка характеризує надійність засобів транспорту – довговічність, визначається показниками: термін служби і ресурс. На даний момент ряд засобів транспорту, що експлуатуються в різних областях промисловості, мають недостатній термін служби, що призводить до величезних збитків. Внаслідок тертя і зношування в машинобудуванні матеріальні втрати розвинених держав досягають 4-5% національного доходу. Опір тертя поглинає в усьому світі 30-40% вироблюваної енергії. Витрати на ремонт і технічне обслуговування машин найчастіше в кілька разів перевищують їх вартість.

Рішення завдання підвищення ресурсу деталей машин і обладнання за рахунок застосування високоміцних нержавіючих сталей і сплавів призводить до великих витрат, як на дорогі матеріали, так і на металорізальний і штамповий інструмент. Причому, незважаючи на те, що зі збільшенням вмісту легуючих елементів міцність, твердість і зносостійкість зростають, в той же час ймовірність крихкого руйнування підвищується. Для запобігання цьому необхідно застосування нових конструкційних матеріалів, що поєднують міцну, зносостійку і тверду поверхню з пластичною, вузькою і тріщиностійкою основою. Цим пояснюється зростаючий в даний час інтерес до покриттів.

Збільшення застосування покриттів обумовлюється ще й тим, що оскільки руйнування деталі, як правило, починається з поверхні, з'являється можливість відновлення розмірів і властивостей деталей методами нанесення покриттів.

В умовах ринкової економіки перед авторемонтними підприємствами стоять наступні завдання: забезпечення транспортних засобів запасними деталями в необхідній кількості і заданої якості, скорочення часу ремонту автомобіля, зниження матеріальних і енергетичних витрат на ремонт. Ці завдання можливо вирішити при використанні ресурсозберігаючих технологій.

1. Аналіз трудомісткості поточних ремонтів машин

Практика експлуатації машин і устаткування підтверджує, що найбільш поширеною причиною їх виходу з ладу, в 80 випадках з 100, є не поломка, а знос і пошкодження робочих поверхонь.

Розвиток конструкцій машин відбувається при постійному прагненні до збільшення їх продуктивності, що майже завжди супроводжується підвищенням механічної і теплової напруженості рухливих сполучень деталей. При цьому ставляться завдання досягнення високої надійності і довговічності машини, зниження її маси, скорочення витрат дефіцитних матеріалів. Відомо, що підвищення довговічності машини навіть в невеликому ступені веде до значної економії металу, зменшення витрат на виробництво запасних деталей; скорочується кількість і обсяг ремонтів, а отже, збільшується кількість фактично працюючих машин.

Оскільки при конструюванні машин враховуються і економічні чинники виробництва і експлуатації, конструктору необхідно проводити перспективний прогноз тривалості використання даної машини з урахуванням тривалос-

ті експлуатації машин попередніх моделей. У ряді випадків цей термін становить 25 років, а іноді і більше, наприклад, для автомобілів, тракторів, транспортних літаків, металообробних верстатів. При виборі конструктивного рішення необхідно враховувати майбутні витрати не тільки на виготовлення машини і її окремих вузлів, але і на обслуговування і ремонт. Останні витрати при тривалій експлуатації машини в кілька разів перевищують їх вартість.

Як приклад розглянемо дані Р.В. Кугеля про трудомісткість поточних ремонтів вузлів, агрегатів і систем двох моделей вантажних автомобілів масового виробництва (в частках від загальної суми витрат праці, коштів і матеріалів), дивись табл. 1.1.

Таблиця 1.1 – Трудомісткість поточних ремонтів вузлів, агрегатів і систем двох моделей вантажних автомобілів

Вузол, агрегат, система	Трудомісткість, год	
	Модель А	Модель Б
Двигун з системою охолодження і мастильною системою	36,5	41,4
Гальма	10,9	8,6
Електрообладнання	8,6	7,6
Коробка передач	6,1	5,9
Задній міст	5,4	5,1
Зчеплення	5,7	4,8
Підвіска автомобіля	8,3	7,3
Карданна передача	3,2	3,2
Рульове управління і передня вісь	3,0	3,5
Система живлення двигуна	2,9	2,9
Рама, кабіна, платформа, система випуску газів мають показники 2 і менше		

З наведених в таблиці даних видно, що двигун, вузли і агрегати трансмісії і ходової частини автомобіля поглинають більше 70% трудомісткості поточних ремонтів.

Основні техніко-економічні показники двигунів транспортних засобів, що експлуатуються в Україні, на рівні більшості зарубіжних аналогів. Ресурс до першого капітального ремонту, встановлений заводом-виробником, повинен становити 8000-9000 год, тобто при середньорічному напрацюванні 1000 год двигун повинен працювати без капітального ремонту 8-9 років – термін, практично рівний амортизаційному терміну служби транспортної техніки і їх нормативам надійності.

Насправді, в процесі реальної експлуатації відбувається значне зниження потужностно-економічних показників двигунів.

Так за наявними даними, фактичні середні напрацювання до ремонту для двигунів КамАЗ-740 становлять 110-160 тис. км, а між ремонтами 50-70 тис. км для різних умов експлуатації та термінів випуску двигунів, хоча повинен бути до капітального ремонту не менше 350 тис. км – для двигунів з робочим об'ємом до 11 л. і 200 тис. км – для двигунів сільськогосподарського призначення того ж обсягу, тобто фактичні напрацювання двигунів до ремонту істотно нижче нормативного.

2. Основні причини відмов машин

Характер розподілу відмов (поломок) нових і відремонтованих двигунів у міру збільшення напрацювання показує, що найбільша їх інтенсивність проявляється в початковий період експлуатації. Встановлено, що збільшення відмов відбувається при напрацюваннях 100-300 год і надалі число відмов знижується.

Для нових двигунів таке явище можна пояснити недосконалістю технологічного процесу їх виготовлення, зокрема неправильним підбором зміцнюючих способів обробки, порушенням підробітки деталей.

Причинами малого ресурсу двигунів після ремонту є:

- низька культура виробництва ремонтних робіт;
- вибір неефективної технології ремонту деталей;
- низька якість обробки поверхонь деталей, що труться;
- відсутність технологій і обладнання, що забезпечують необхідний рівень фізико-механічних властивостей матеріалу відремонтованих деталей;
- недостатня спеціалізація виробництва на ремонтних підприємствах з метою забезпечення якості відновлених деталей на рівні заводу-виготовлювача двигунів транспортної техніки.

В цілому сучасне ремонтне підприємство за рівнем організації та технічного оснащення ще не в повній мірі відповідає вимогам, які дозволяють забезпечити необхідні показники якості ремонту деталей двигунів. Показник безвідмовності і ресурсу капітально відремонтованих двигунів становить 50-60% від відповідних значень нових (хоча згідно ГОСТ 18523-79 повинен бути не менше 80%).

Аналіз причин відмов машин показав, що найбільш часто зустрічається ресурсна відмова і вихід з ладу через знос і руйнування деталей пари тертя шийка колінчатого вала - вкладиш підшипника ковзання, табл. 1.2.

Аналіз динаміки зміни зазорів в трибосистемі двигунів транспортних засобів також показав, що найбільш інтенсивний характер збільшення зазору поряд з циліндропоршневою групою (ЦПГ) має сполучення кривошипношатунного механізму (КМШ), тобто шийка колінчатого вала - вкладиш підшипника ковзання. Залежність зміни зазору в КМШ від напруцювання представлені на рис. 1.1.

Проаналізувавши графічні залежності, представлені на рис. 1.1 можна зробити висновок, що характер кривих змін зазорів в з'єднанні вкладиш - шийка колінчатого вала двигуна у нового і відремонтованого двигунів аналогічний,

Таблиця 1.2 – Кількісна оцінка ресурсних відмов двигунів

Найменування	Кількість відмов,%				
	СМД-62	ЯМЗ - 238НБ	ЯМЗ - 240Б	Д-240	КамАЗ - 740
Вихід з ладу групи шийка колінчатого вала - вкладиш підшипника ковзання (КШМ)	67	55	45	40	56
Знос циліндро - поршневої групи (ЦПГ)	14	20	35	44	24
Обрив поршня	14	15	15	10	8
Обрив шатунa і його болтів	1	10	5	6	9
Обрив болтів кріплення маховика	–	–	–	–	3

h, мкм

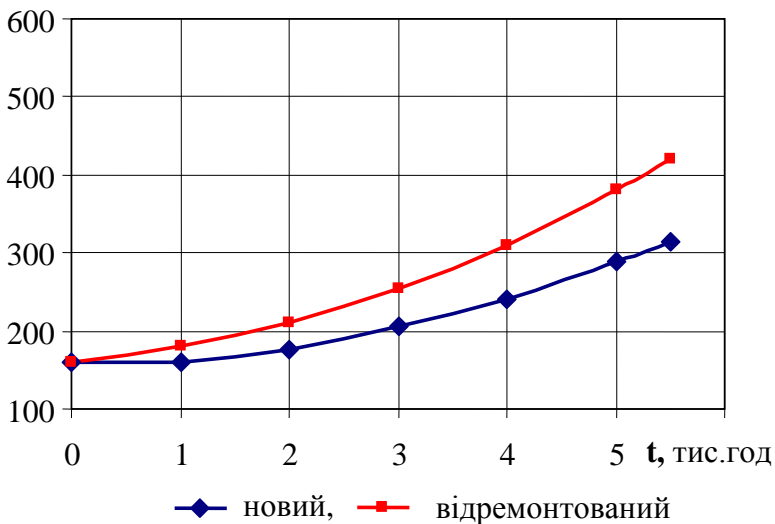


Рисунок 1.1 – Зміни зазорів в з'єднанні вкладиш - шийка колінчастого вала двигуна від часу напрацювання

причому швидкість зношування сполучень у двигунів після ремонту вище, ніж у нових.

Порівняння параметрів зносів деталей в міжремонтний і доремонтний період двигунів ЯМЗ-238НБ і ЯМЗ-240 свідчить про більш інтенсивну зміну технічного стану після ремонту. Відношення швидкостей зношування деталей, що визначають ресурс, становить 1,28-1,32.

Однією з основних причин передчасного виходу з ладу деталей двигунів після капітального ремонту є якість відновлених деталей, яке визначається застосовуваною технологією ремонту і правильністю вибору способу відновлення і зміцнення зношених поверхонь деталі.

Статистичні дані величини зносу корінних і шатунних шийок для вантажних і легкових автомобілів наведені на рис. 1.2.

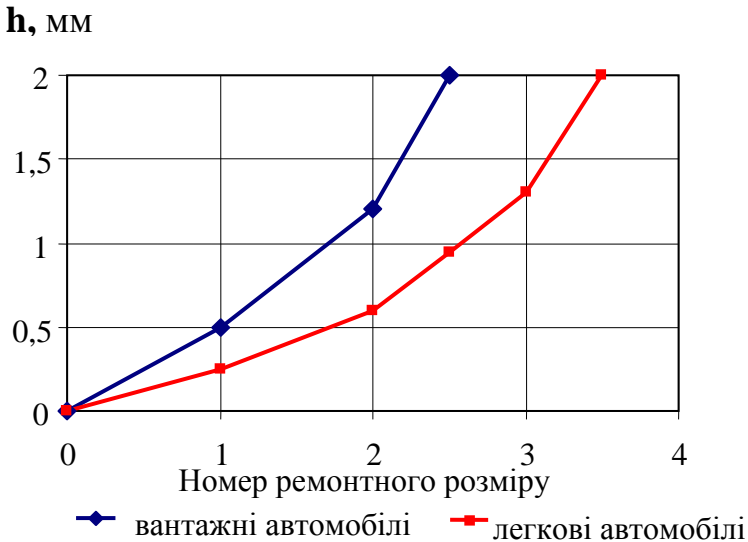


Рисунок 1.2 – Залежність зношування шийок колінчастого вала від кількості ремонтів

З отриманих залежностей видно, що знос корінних і шатунних шийок колінчастого вала, як для легкових, так і для вантажних автомобілів з кожним ремонтом зростає і, як наслідок, двигун виходить з ладу значно раніше встановленого часу. Причиною цього є неефективність технології зміцнення шийок колінчастого вала в процесі відновлення (ремонту). Як приклад розглянемо колінчаті вали двигунів КамАЗ-740 і 5Д49. Згідно конструкторської документації колінчаті вали (креслення № 740.1005020 і № 2-9ДГ.8.01-1) виготовляються зі сталей 42ХМФА і 38ХНЗМА відповідно.

Після механічної обробки зміцнюються азотуванням на глибину $h = 0,25-0,4$ мм. Згідно з вимогами на ремонтні розміри (р.р.) для цих деталей різниця між номінальною і останнім ремонтним розміром (КамАЗ-740 – 4 р.р., 5Д49 – 12 р.р.) складає 1-3 мм, що значно перевищує товщину зміцненого шару.

В той самий час, відповідно до прийнятої технології ремонту колінчастих валів, не передбачається до кожного ремонтного розміру шийок виконувати операцію азотування. Це пов'язано з тим, що організація технології азотування в умовах ремонтних підприємств вимагає значних капітальних витрат і наявності відповідних фахівців в області хіміко-термічної обробки.

Поряд з проблемою підвищення ресурсу пари шийка колінчастого вала - вкладиш підшипника ковзання також велике значення має зниження втрат потужністю на подолання тертя в самій парі, оскільки при експлуатації двигуна частина потужності витрачається на внутрішні (механічні) втрати. В даному сполученні втрачається 16-19% потужності двигуна.

Відомо, що на підтримку працездатності тракторів за термін їх служби витрачається коштів в 3-4 рази більше, ніж на їх виготовлення. При цьому 60-80% цих коштів ви-

трачається на усунення відмов і несправностей. На ремонт тракторів задіяно в 4 рази більше виробничих потужностей, ніж на їх виготовлення. Легковий автомобіль, що має масу 1000 кг, стає непридатним для ремонту, якщо втрата його маси від зносу складе 1 кг, а також підраховано, що до списання трактора Т-130 на запчастини для ремонту і технічного обслуговування потрібно витратити стільки ж металу, скільки він важить сам – 12000 кг. У нормативах надійності, для оцінки довговічності тракторів і їх основних складових частин використовується ресурс до першого капітального ремонту (ГОСТ 26817-86) із заданою гарантованою ймовірністю безвідмовної роботи. Дані про ресурси деяких моделей сільськогосподарських тракторів, що випускаються в СНД, наведені в табл. 1.3.

Таблиця 1.3 – Нормативи довговічності тракторів і їх основних складових частин

Клас і тип трактора	90-відсотковий ресурс до першого капітального ремонту тис. мото- год., не менше		
	трактор	двигун	трансмісія
Колісні			
0,6	10	10	10
0,9	10	10	10
1,4*	10/12	10/12	10/12
2,0	1 2	12	1 2
3,0; 5,0	1 0	10	1 0
Гусеничні			
2,0**	9/10	9/10	9/10
3,0; 4,0	10	10	10
* У чисельнику - для тракторів з двигунами потужністю більше 55 кВт, в знаменнику з потужністю 55 кВт і менше.			
** У чисельнику з потужністю двигуна 51 кВт.			

В ідеалі ресурс деталей має дорівнювати ресурсу машини в цілому. Але ця умова на сьогоднішній день не виконується. Реальний же ресурс відремонтованої техніки в

порівнянні з новою становить не більше 50% (хоча згідно ГОСТ 18524-85 повинен бути не нижче 80%), швидкість зношування деталей після ремонту зростає в 1,6-2,0 рази. Положення значно посилюється внаслідок зростання дефіциту і вартості запасних частин.

До 1990 року Україна щорічно отримувала близько 52 тисяч тракторів і парк тракторів становив 495 тисяч машин. У зв'язку зі спадом виробництва вже в 2005 році в сільськогосподарських підприємствах України було 194,92 тисячі тракторів усіх марок. Таким чином за 15 років випуск тракторів скоротився більше ніж у 30 разів, а в 2009 році більш ніж в 100 разів. Відсоток використання виробничих потужностей тракторних заводів також знизився з 93% в 1985 році до 5,2% в 1997 році. А в 2009 році виробничі потужності підприємств були завантажені до 2%.

У зв'язку з цим в даний час в експлуатації питома вага тракторів випущених до 1985 року досягає 25%, випущених в 1986-1990 роках - 42%. Більше половини тракторів, які є в наявності, були випущені близько 20 років тому.

Так, наприклад, кількість тракторів марки «ІМЗ», які знаходяться в господарствах України становить близько 50 тисяч штук. З них більше половини потребує капітального ремонту. І якщо не вжити відповідних заходів, то до 2020 року вони залишаться в одиничних екземплярах в господарствах України. З огляду на сформовану економічну ситуацію потрібні нові системні підходи до збільшення ресурсу машин шляхом відновлення деталей визначають їх ресурс.

Як показує досвід виробництва тракторів на провідних заводах СНД, спочатку створювати конструкцію з високим рівнем надійності досить складно.

Відповідно ДСТУ 2863-94 програма по забезпеченню надійності повинна містити етап розробки нормативів дов-

говічності, безвідмовності, ремонтпридатності. Це основа управління процесом забезпечення необхідної надійності. На основі аналізу впливу ряду факторів: навантаження, частоти обертання, ступеня забруднення мастильного середовища, конструктивних особливостей вузлів, сполучень на інтенсивність зношування і динаміку накопичення вторинних пошкоджень, а також з урахуванням накопиченого досвіду підвищення працездатності деталей і вузлів на Харківському тракторному заводі була визначена номенклатура деталей шасі колісних тракторів типу Т-150К, що вимагають підвищення довговічності. Номенклатура містить 36 деталей. Переважаючі види пошкоджень: знос – 33 деталі, пітінг зубів – 2 деталі, спікання втулки з валом – 1 деталь. Якщо проаналізувати вибрані можливі шляхи підвищення довговічності, то на частку зміцнюючих технологій припадає 9 деталей (плазмового напилення – 3 дет., хіміко-термічне зміцнення – 3 дет., лазерне зміцнення – 3 дет.), що становить понад 27%, а серед них плазмове напилення і лазерне зміцнення займають обсяг 67%.

Ресурс більшості машин залежить від відносно невеликої кількості деталей. Це дозволяє планувати обсяги їх відновлення, розробляти, випускати і впроваджувати спеціальне обладнання, створювати і розвивати спеціалізовані виробництва, нарощувати обсяги і розширювати номенклатуру відновлення зношених деталей.

Агрегати і вузли автомобілів, тракторів і сільськогосподарських машин являють собою сукупність безлічі деталей типу: вал, втулка, важіль, корпус, шестерня, що піддаються в процесі експлуатації дії різного роду навантажень і середовищ, що призводять до незворотних процесів зносу їх робочих поверхонь.

При обробці статистичних даних по відмовах деталей автомобілів встановлено наступний їх розподіл: знос – 53,4%; руйнування (тріщини, поломка, обрив частини де-

талі) – 18,9%; деформація (розтягнення, скручування, вигин) – 10,4%, інші види дефектів – 17,3%. Аналізуючи дефекти деталей, що виникають при експлуатації, слід мати на увазі, що кожна окрема деталь піддається різному навантаженню, виду деформацій і умовам змащення.

Контрольні питання

1. Що є найбільш поширеною причиною виходу з ладу деталей машин?
2. Яка частка від загальної суми витрат праці, коштів і матеріалів поточних ремонтів двигунів вантажних автомобілів?
3. Які причини малого ресурсу двигунів після ремонту?
4. Яка причина найбільш часто зустрічається при ресурсній відмові машин?
5. Назвіть основні нормативи довговічності тракторів і їх основних складових частин?
6. Який ресурс відремонтованої техніки в порівнянні з новою повинен бути у відремонтованої техніки відповідно ГОСТ 18524-85?
7. Який вид дефекту деталей, що виникає при експлуатації, найбільш поширений?

ЛЕКЦІЯ 2

ХАРАКТЕРНІ ВИДИ ЗНОСУ ДЕТАЛЕЙ МАШИН

1. *Аналіз видів зносу деталей машин.*
2. *Структурна схема і типові сполучення засобів транспорту.*

1. Аналіз видів зносу деталей машин

Дослідження показали, що значна кількість деталей автомобілів замінюється в експлуатації через знос. При дослідженні зношування машин в реальних умовах экс-

платуації виділяються два головні напрямки: встановлення якісних і кількісних закономірностей. В результаті якісного аналізу зношених поверхонь деталей визначаються причини низької опірності зношування і намічаються шляхи підвищення зносостійкості. Для всебічних досліджень якісних закономірностей зношування на підставі ймовірно-статистичного методу підбираються ті деталі, інтенсивність відмов яких була найбільшою. Так як деталі відмовляють з різних причин, то в цілях відбору деталей для досліджень з найбільш типовими дефектами визначають ймовірність повторення кожного дефекту, систематизують види зносу і поломок деталей по кожній машині.

При узагальненні видів зносу деталей, які виникають в експлуатації машин, виготовлених на різних заводах, встановлюються характерні дефекти, властиві машинам різного призначення. У поламаних деталях машин спостерігається абразивний знос, втомне руйнування поверхневого шару, контактне схоплювання, зминання і корозія. У числі дефектів зустрічаються тріщини, сколювання і викришування зубів, поломка зубів, скручування шліців і валів.

Абразивний знос превалює над усіма іншими: близько 40% деталей мають чисто абразивний знос і 50% – абразивний знос в поєднанні з іншими видами зносу і руйнувань поверхневого шару.

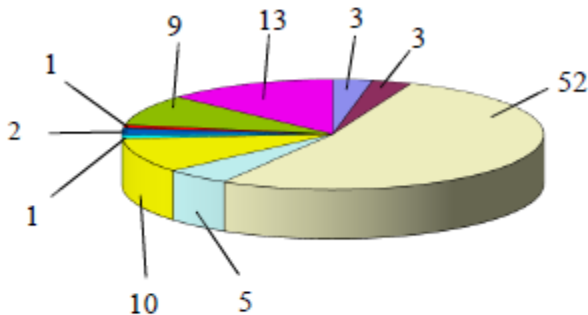
Дуже часто, на одній деталі і навіть на одній і тій же поверхні тертя спостерігається кілька видів зносу і руйнування (табл. 2.1).

Знос поверхонь деталей тракторів, автомобілів і сільськогосподарських машин розподіляється приблизно таким чином, рис. 2.1.

При цьому 40% найбільш часто зустрічаючогося дефекту – знос циліндричної поверхні, становить знос зовнішньої циліндричної поверхні, 60% – внутрішньої, рис. 2.2.

Таблиця 2.1 – Характерні види зносу і руйнувань деталей машин

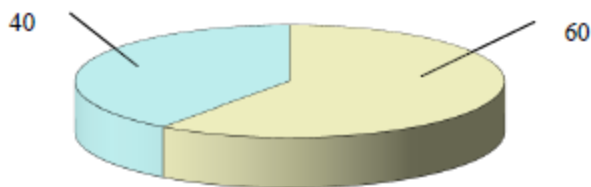
Вид зносу і руйнування	Можливість повторення,%
Змінання і абразивний знос зубів і шліців з'єднувальних муфт	14,8
Втомне руйнування поверхневого шару і абразивний знос зубів шестерень	15,8
Відколи і абразивний знос зубів шестерень	20,1
Абразивний знос деталей	38,8
Контактна схоплювання деталей	10,5
Корозія деяких деталей в поєднанні з різними видами зносу і руйнуваннями поверхневого шару	3,5–10



Циліндричні – 52%; конічні і сферичні – 3%; шліци – 3%; пази, канавки, лиски – 5%; різблення – 10%; лоскі поверхні – 1%; зуби шестерень – 2%; профільні, фасонні поверхні – 1%; тріщини і злами – 9%; порушення геометричної форми – 13%.

Рисунок 2.1 – Знос поверхонь деталей автомобілів, тракторів і сільськогосподарських машин

Таким чином, в цій сукупності 21% зношених деталей припадає на деталі типу «вал». Це деталі типу тіл обертання з гладкою або ступінчастою зовнішньою поверхнею. Кількість і конструктивна значимість деталей типу «вал» є визначальними у забезпеченні працездатності техніки. До деталей типу «вал» в агрегатах і вузлах відносяться як власне вали (колінчастий, розподільний, вал генератора, приводу, передавальної коробки і т.д.), так і деталі, які мають конструктивні поверхні, характерні для валів (осі, шків, втулки і ін.), і також ця група включає до 7% деталей з фланцями.



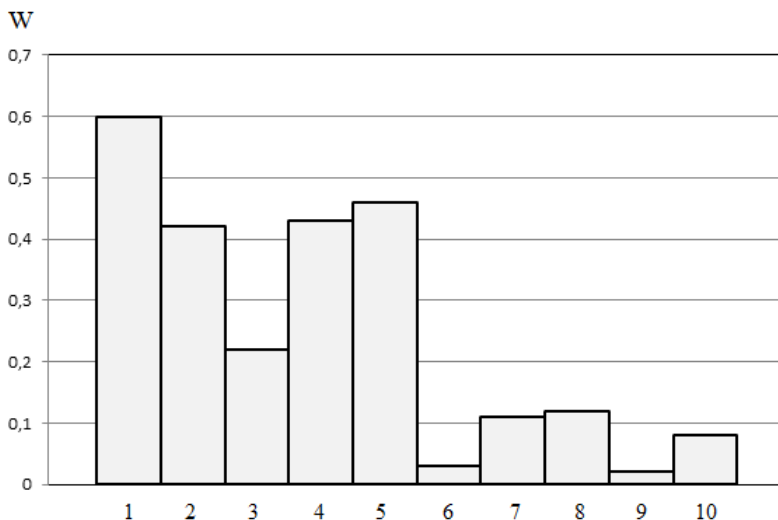
40% – знос зовнішньої циліндричної поверхні;
60% – внутрішньої

Рисунок 2.2 – Знос циліндричних поверхонь деталей автомобілів, тракторів, і сільськогосподарських машин

Широке застосування деталі типу «вал» в вузлах автотракторної техніки, різноманітність діючих сил і умов експлуатації визначають великий розкид в значеннях зносу їх робочих поверхонь (0,1 - 3,0 мм).

Порядку 70% валів виготовляються з вуглецевих якісних сталей (Сталь 45, 35, 50), близько 20% деталей типу "вал" з легованих сталей (40Х, 25ХГТ, 50Г, 18ХГТ), і 4% з вуглецевих марок сталей звичайної якості (переважно деталі комбайнів), 6% з чавунів. Основні розмірно-точності характеристики деталей представлені на рис. 2.3.

Як видно з рис. 2.3, найбільша повторюваність зносу характерна для зовнішніх ділянок, причому в 60% випадків деталі підлягають відновленню.



- 1 – посадочні поверхні під підшипники кочення;
- 2 – посадочні поверхні під підшипники ковзання;
- 3 – поверхні нерухомих сполучень; 4 – шпонкові пази;
- 5 – зовнішня різьба; 6 – фланці; 7 – осьові отвори;
- 8 – допоміжні отвори; 9 – фасонні поверхні; 10 – лиски

Рисунок 2.3 – Розподіл відновлюваних конструктивних елементів по деталях з зовнішніми циліндричними поверхнями

Проведений аналіз літературних джерел дозволив скласти перелік деталей типу «вал», відновлюваних газополумєневим напильням в даний час, табл. 2.2.

Технологія газополумєневого напильня при відновленні деталей розробляється відповідно до їх характерис-

тик і вимог до експлуатації.

Таблиця 2.2 – Номенклатура основних деталей типу «вал», рекомендованих для відновлення і зміцнення газополумєним методом

Номенклатура деталей	Причина виходу з ладу, необхідність зміцнення	Спосіб відновлення, зміцнення
Вали насосів і ін. машин	Знос посадкового місця під сальник. Знос більше 0,3 мм	Напилення з опаленням ПГ-12Н-02
Колінчастий вал (шийки)	Знос, зміцнення	Газополум'яне напилення
Розподільний вал	Знос кулачків і опорних шийок	Напилення ПГ-12Н-02
Ротор електродвигуна або генератора, якор стартера (пос. місця під подшип.)	Знос, зміцнення	Напилення ПГ-10Н-01
Кільця торцевих ущільнювачів насосів	Знос, зміцнення	Напилення ПГ-10Н-01, ПГ-12Н-02
Ось колодки переднього і заднього гальма	Знос, зміцнення	Напилення ПГ-10Н-01
Кулак разжимной заднього гальма (шийки)	Знос, зміцнення	Напилення ПГ-12Н-02
Шкворень поворотного кулака	Знос, зміцнення	Напилення ПГ-10Н-01
Валик педалей зчеплення і гальма	Знос, зміцнення	Напилення ПГ -10Н-01, ПГ-12-Н-02
Валик важелів	Знос, зміцнення	Напилення ПГ-10Н-01,
Вал ведений шестерні	Знос, зміцнення	Напилення ПГ-12Н-02
Приводу паливного насоса	Знос, зміцнення	Напилення ПГ-10Н-01
Ось масляного насоса коробки змінні передач	Знос, зміцнення	Напилення ПГ-10Н-01, ПГ-12Н-02

Перш за все, необхідно володіти інформацією про вихідний стан деталей і типи ушкоджень при експлуатації (дефектах і їх повторюваності, величину зносу, поведінку матеріалу на поверхні тертя), конструктивних параметрах деталей, що визначають типорозміри і можливість їх використання в сполученні, а також обладнання, що застосовується.

Важливими є і вихідні показники якості, якими повинні володіти деталі (твердість, міцність, зносостійкість, шорсткість поверхні).

Необхідно відзначити, що найбільше число деталей (близько 83%) має знос до 0,6 мм. З них знос до 0,1 мм – 52%, до 0,2 – 12%, до 0,3 – 10%, до 0,4 – 1%, до 0,5 – 5% і до 0,6 – 3 %, що відповідає технологічним можливостям газополуменевого способу нанесення покриттів.

2. Структурна схема і типові сполучення засобів транспорту

Для розробки технології відновного ремонту засобів транспорту представимо його структурну схему в наступному вигляді, рис. 2.4.

На рис. 2.5 приведена схема типових сполучень транспортних засобів. Типові сполучення являють собою не що інше, як створені в процесі розробки конструкції трибологічні системи, від довговічності роботи яких залежить ресурс транспортної техніки. З аналізу рис. 2.5 видно, що вузлами тертя, що визначають ресурс машини, є вузли, що містять пари тертя ковзання і кочення, а також рухливі нероз'ємні фрикційні з'єднання.

Серед стратегій експлуатації машин і устаткування найбільш прогресивною вважається експлуатація техніки по поточному стану, при якій ремонтний вплив на працюючий виріб формується на базі накопиченої інформації, отриманої в результаті моніторингу його поточного стану.

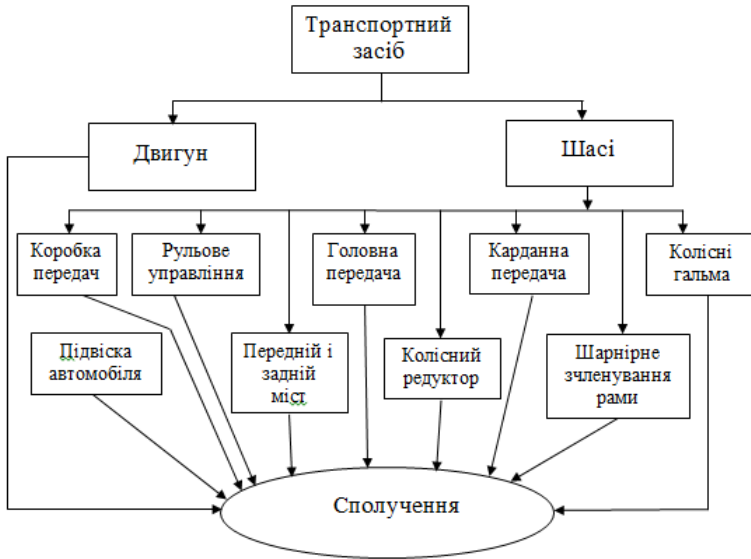


Рисунок 2.4 – Структурна схема засобу транспорту поточного стану

Допускається тривала експлуатація транспортної техніки, в зв'язку з економією коштів, без своєчасного ремонту, яка призводить до того, що деталі, що визначають ресурс роботи машин, часто мають величини зносів близькі до критичних.

Під управлінням якістю відновлюваних деталей в процесі ремонту розуміється функція логістично організованих систем, структурно об'єднаних для забезпечення розроблених програм та поставлених завдань збільшення життєвого циклу транспортної техніки.

Управління як система складається з підсистем:

- обґрунтування мети;
- технології, що забезпечують досягнення мети;
- принципи визначення технологій для оптимального досягнення мети.



Рисунок 2.5 – Схема типових сполучень засобів транспорту

Етапи управління якістю відновлюваних деталей при ремонті:

- накопичення інформації про динаміку зношування, характер пошкоджень, визначення номенклатури ушкоджуваних деталей;

- систематизація видів сполучень, їх конструктивних особливостей і умов експлуатації;

- визначення способу відновлення зношених поверхонь деталей, розробка технології відновлення;

- організація виконання робіт по відновленню деталей;

- збір і обробка інформації про результати роботи відновлених деталей;

- коригування технології відновлення за результатами їх роботи в експлуатації.

В даний час при ремонті транспортних засобів застосовується досить велика кількість способів відновлення зношених деталей. Кожен метод характеризується певними перевагами і недоліками, має свою сферу застосування. Відновлювальні технології часто вимагають застосування спеціального обладнання та матеріалів. Наприклад, для газополуменевого напилення покриттів необхідно мати спеціальну установку і матеріали у вигляді порошку або дроту.

У загальному вигляді будь-яка технологія відновлення складається з наступних операцій: підготовка деталі, підготовка відновлюваної поверхні, підготовка матеріалів покриття, нанесення покриття, механічна обробка.

Контрольні питання

1. Який знос деталей машин переважає над усіма іншими?

2. Як розподіляється знос поверхонь деталей тракторів, автомобілів і сільськогосподарських машин?

3. Перерахуйте типові сполучення засобів транспорту?

4. Які загальні операції містить будь-яка технологія відновлення деталей машин?

ЛЕКЦІЯ 3

ВИБІР СПОСОБУ ВІДНОВЛЕННЯ ДЕТАЛЕЙ МАШИН

1. Критерії вибору способу відновлення.

2. Застосування газотермічних методів напилення.

3. Електрохімічні покриття.

1. Критерії вибору способу відновлення

Вибір раціонального способу відновлення деталей машин, що визначають їх ресурс, актуальна проблема для різних галузей народного господарства.

Перші роботи в цій області були виконані Шадрічевим В.А. Ним розроблені критерії та метод вибору оптимального способу відновлення деталей автомобільного транспорту. Суть методу полягає у використанні 3-х критеріїв: 2-х технічних (технологічний критерій або критерій застосовності і критерій довговічності) і 1-го економічного.

Технологічний критерій враховує технологічні можливості способу відновлення зношеної поверхні конкретної деталі. Він не має чисельного значення і встановлюється на основі накопиченого досвіду.

Критерій довговічності має чисельне значення, яке визначається за формулою:

$$K_{\partial} = \frac{T_e}{T_n} \quad (3.1)$$

де K_{∂} – критерій довговічності;

T_e – термін служби відновленої деталі, год;

T_n – термін служби нової деталі, год.

Економічний критерій характеризує витрати на відновлення деталі.

Вибір способу відновлення деталі проводиться за техніко-економічним критерієм, оцінюваного за виразом:

$$C_e < K_o \cdot C_n \quad (3.2)$$

де C_e – собівартість відновлення деталі;

C_n – собівартість нової деталі.

Дана методика вимагає наявності достовірної інформації про терміни служби відновлених і нових деталей. Для отримання цих відомостей необхідно провести порівняльні стендові або експлуатаційні випробування деталей, що є трудомістким і дорогим процесом.

У той же час методика професора Шадрічева В.А. можна розглядати як основоположну в удосконаленні методології по вибору і прийняттю оптимальних рішень у виборі технології ремонту деталей відновленням.

У роботах Курчаткіна В.В., Никифорова В.Г., Сумеркіной Ю.В. рекомендується використовувати ці ж критерії для орієнтовного вибору найбільш ефективного способу відновлення деталей механічного обладнання сільськогосподарської та судоремонтної техніки.

Для відновлення зношених деталей суднових механізмів Молодцов Н.С. пропонує методику вибору оптимального способу відновлення і зміцнення. Вибір оптимального варіанту здійснюється за узагальненим комплексним критерієм, який включає наступні показники: коефіцієнт довговічності, середній ресурс відновленої деталі, рівень механізації технологічного процесу, вартість матеріалів, трудомісткість робіт, забезпеченість матеріалами та обладнанням, ступінь шкідливості умов праці та інші чинники. Об'єднання показників в єдиний мультиплікативний кри-

терій проводиться шкалювання по функції бажаності Харрінгтона. Неметричні показники порівнюються за 10-бальною шкалою. Максимальне значення узагальненого комплексного критерію відповідає оптимальному варіанту технології відновлення.

До недоліків цієї методики, як вважає автор, можна віднести наступне:

- правильність вибору в значній мірі обумовлюється досвідом і інтуїцією експертів, так як неметричні показники, розташування координатних осей і їх ціна ділення при масштабуванні всіх приватних показників визначаються експертним шляхом;

- відсутність вагових коефіцієнтів для приватних показників, особливо в разі значного розсіювання їх значень, при формальній згортці підвищує ймовірність необ'єктивності вибору.

Оптимізація технологічних параметрів є необхідною складовою концепції відновного ремонту. Оптимізації технологій відновлення деталей завжди приділялася велика увага в роботах дослідників. Так, проблема оптимізації технологій при відновленні і зміцненні деталей суднової техніки розглядається в роботах Седих В.І. Він, використовуючи системний підхід, розробив технологічні основи створення оптимальних властивостей матеріалу поверхнього шару при відновленні деталей. Технологічні процеси відновлення і зміцнення представляються в системі «Т-М-Е» (технологія - матеріал - експлуатація). Поверхневий шар відновлюваних деталей, вважає автор, утворюється за рахунок сумарного об'єднання двох випадкових процесів: конструктивно-технологічного формування параметрів (КТФП) при ремонті і експлуатаційного формування параметрів (ЕФП). Завдання формування параметрів матеріалу в системі «Т-М-Е» вирішуються поетапно:

- обирається технологічна схема формування власти-

востей матеріалу відновлюваних деталей з урахуванням умов експлуатації;

– проводиться ремонт деталі з наступним вивченням характеристик матеріалу поверхневого шару з метою визначення технологічних можливостей обраної схеми і комплексної оцінки на основі критерію W_t змін структурно-механічних, геометричних і техніко-економічних параметрів в процесі КТФП, по якій визначаються області властивостей матеріалу поверхневого шару.

Параметри працездатності матеріалу деталей в процесі ЕФП оцінюються за узагальненим показником працездатності W_e , швидкість зміни якого дозволяє встановити області значень фізико-механічних властивостей і геометрії поверхні відновлюваних деталей, а також уточнити межі змін W_t .

Узагальнена взаємодія процесів КТФП, ЕФП і об'єкта ремонту характеризується експлуатаційно-технологічних показником Q_{et} , який є безліччю критеріїв технологічних можливостей процесу формування і являє собою композицію функцій W_t та W_e . Для забезпечення надійної роботи деталей все зміни Q_{et} повинні знаходитися в межах заданого допуску ΔQ_{et} .

Процес формування параметрів матеріалу поверхневого шару відновлюваних деталей включає оптимізацію узагальненого параметра W_t , відбір за критерієм заданої працездатності W_e варіантів формування експлуатаційно-технологічних показників деталей Q_{et} , визначення показників експлуатаційної надійності в залежності від зміни Q_{et} . При цьому комплексні показники W_t , W_e и Q_{et} розглядаються як випадкові величини. Вибір оптимальних значень факторів процесу формування з області допустимих варіантів повинен забезпечити отримання параметрів матеріалу в заданих межах і з заданою вірогідністю. Для різних груп деталей наводиться приблизний перелік парамет-

рів матеріалу поверхневого шару в процесах КТФП і ЕФП. Ця методологія дозволяє оптимізувати процеси КТФП і ЕФП як незалежно один від одного, так і у взаємозв'язку. У той же час необхідно відзначити, що оптимізація параметрів матеріалу поверхневого шару відновлюваної деталі і технологічних впливів на неї здійснюється в рамках обраної технології. Завдання вибору самої технологічної схеми відновлення вона не вирішує. Визначення комплексних показників W_t , W_e и Q_{et} є складним завданням.

Харламов Ю.О., розглядаючи питання оптимізації технологічних процесів газотермічного напилення, призводить структурну схему проектування зазначених процесів, яка складається з 7 етапів: збір інформації та підготовка вихідних даних для проектування з урахуванням конструктивних, організаційно-технічних і експлуатаційних факторів; виконання лабораторно-дослідних робіт та уточнення вимог до конструкції покриттів; розробка варіантів маршруту технологічного процесу із застосуванням морфологічної матриці, яка складається з етапів, а також способів обробки і нанесення покриттів газотермічним способом; логічну оцінку варіантів за критеріями економічності та надійності, оформлення остаточного варіанта. Стратегія робіт з технологічного проектування передбачає при необхідності повернення до попередніх етапів, а також паралельним їх виконанням. Розглядаються питання створення різноманітних таблиць технологічних маршрутів отримання покриттів на типових поверхнях і систем автоматизації проектування технологічних процесів.

Пропонована стратегія проектування технологічних процесів газотермічного напилення покриттів є цілком узагальненою для знову виготовлених деталей, але в той же час недостатньо формалізованої. У той же час теоретичні основи цієї стратегії можуть використовуватися і при оптимізації технологічних процесів відновного ремонту

деталей транспортних засобів газополюменевим напиленням.

В роботі Кулика Ю.Г. наводиться, розроблений на основі функціонального підходу і принципів логістики метод функціональних моделей технології ремонту для визначення комплексної техніко-економічної оцінки технічних рішень при виборі і проектуванні засобів технічного оснащення.

Баженовою Н.Д. розроблена методика оптимізації засобів технологічного оснащення і технологічних процесів по продуктивності праці і за рівнем механізації. За основний критерій оптимальності пропонує показник річного економічного ефекту.

Бурмістрова Є.Г. пропонує оптимізацію технологічних процесів проводити за екологічними показниками. В якості критерію оптимальності приймається рівень екологічної безпеки U_e , що характеризує ступінь насиченості виробництва екозахисною технікою і технологіями, а також ефективність їх використання.

Способи відновлення деталей машин передбачають компенсацію втрачених в процесі експлуатації поверхневих шарів основного конструкційного матеріалу (відновлення номінальних креслярських розмірів і експлуатаційних властивостей) шляхом нанесення на зношені ділянки нових мас (шарів) матеріалу тієїж або іншої марки. У ряді випадків при відновленні використовують метод розточування на наступний ремонтний розмір, при цьому змінюють сполучаєму деталь. Також потрібне проведення спеціальних обробок – відпалу для зняття напружень, зміцнення для підвищення зносостійкості.

У різних галузях народного господарства, в тому числі і при ремонті транспортних засобів, застосовується велика кількість методів і способів відновлення деталей. Основні з них наведені на рис. 3.1.

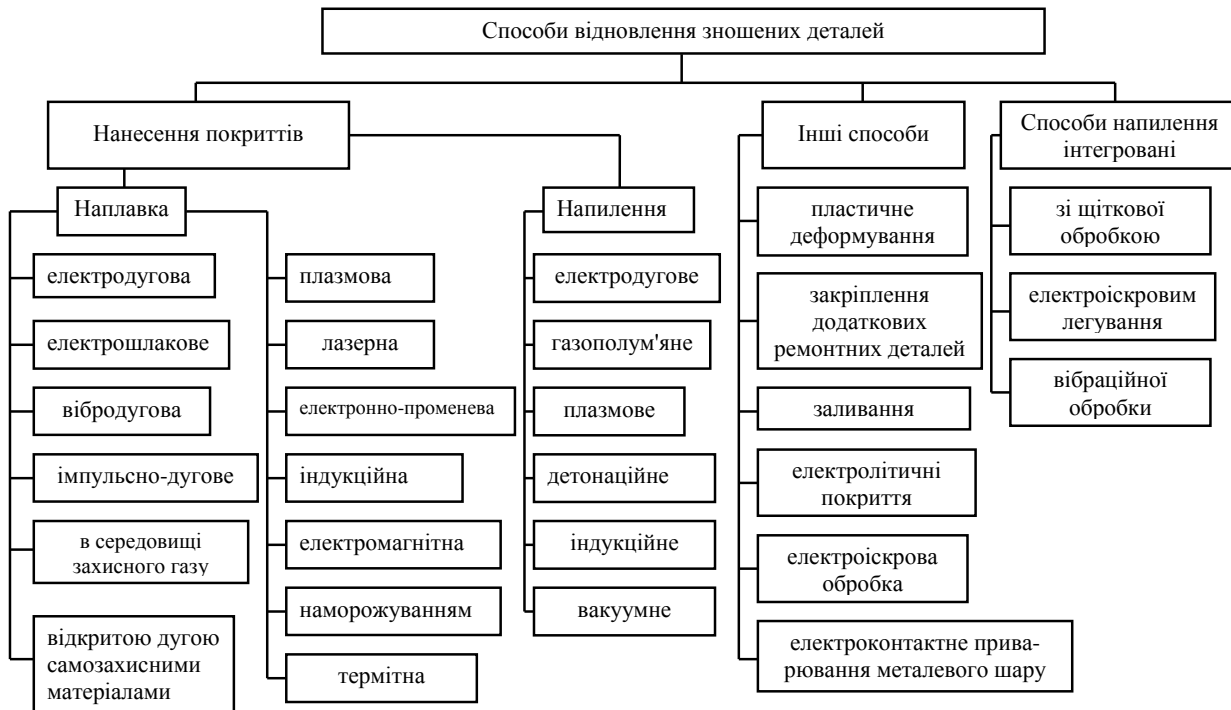


Рисунок 3.1 – Способи відновлення зношених деталей

Частка деталей, відновлюваних на підприємствах агропромислового комплексу наплавленням, газотермічним, електро-хімічними та іншими, найбільш часто вживаними методами, становить:

- методами наплавлення 34,4%;
- способами газотермічного напилення 26,1%;
- електрохімічними покриттями 20,4%;
- іншими методами 19,1%.

Нанесення покриттів методами наплавлення займає перше місце серед використовуваних технологій.

Способи газотермічного напилення, що займають в даний час за обсягом відновлюваних деталей 2 місце, використовуються на підприємствах з середини 70 років. Слід зазначити, що основна частка деталей, відновлюваних газотермічним покриттями (94%), припадає на газополуменеve напилювання (ГПН).

Якість відремонтованих деталей визначається технологічними можливостями процесу відновлення, в результаті яких формуються фізико-механічні властивості і структурний стан матеріалу, геометрія і інші характеристики поверхні.

Також важливі і супутні процеси, такі як поширення теплоти, зміна структури основного металу в зоні термічного впливу, виникнення залишкових напруг і деформацій. Для забезпечення надійної захисної дії покриття на основу необхідно послабити вплив залишкових напружень, кисню, дефектності покриття.

Найбільш поширеним способом відновлення зношених деталей вважається наплавка. В процесі експлуатації на важко навантажених ділянках деталей під дією високих питомих навантажень часто відбувається наклеп і зміцнення поверхневого шару, що призводять до підвищення твердості. Наплавлення дозволяє відновити геометричні розміри, отримати необхідну твердість. Зазвичай, при цьому

способі відновлення необхідний попередній нагрів деталі. Температура підігріву обирається залежно від хімічного складу і розмірів деталі. Так, для вуглецевих сталей в залежності від масової частки вуглецю температура підігріву становить від 100 до 400 °С. У всіх випадках попередній нагрів, що входить в процес наплавлення, викликає появу залишкових напружень розтягу, які негативно впливають на міцність від втоми металу.

2. Застосування газотермічних методів напилення

Для зміцнення і відновлення деталей машин і обладнання у нас в країні і за кордоном накопичений великий досвід по застосуванню газотермічних методів напилення, які за обсягом застосування для відновлення деталей знаходяться на другому місці після наплавлення.

За даними компанії "Arcos" (Брюсель) бурові коронки, напилені сумішшю порошків карбїду вольфраму з хромистих нікелем дозволили підвищити продуктивність буріння на 100%. Додавання 15-20% Сг в наносиме покриття забезпечує утворення захисного шару з гарним зчепленням при високих температурах.

Фірма «Metco» (Італія) широко застосовує плазмове напилення з метою захисту від зносу, корозії, а також для відновлення зношених деталей машин.

Фірма «Plasma - Technic» (Швейцарія) виробляє напилення сплавом OT3 ($Al_2O_3+3\%TiO_2$) або OT13 ($Al_2O_3+13\%TiO_2$) деталей текстильного обладнання, що значно підвищує їх стійкість проти зносу.

Широке застосування для газотермічного напилення отримали самофлюсуючі сплави системи Ni-Cr-B-Si.

Сплави системи Ni-Cr-B-Si успішно застосовують для збільшення зносостійкості пресового інструменту, деталей прокатного і волочильного обладнання.

У США і Бельгії фірма «OMSO» для підвищення ко-

розійної стійкості та зносостійкості деталей широко застосовує сплави типу «СоІмопоу» з широким діапазоном температур кристалізації і неявно вираженою точкою плавлення. Фірма «Metco» застосовує процес «Thermospray», що полягає в напиленні самофлюсуючих сплавів типу Ni-Cr-B-Si з подальшим оплавленням газополуменевим пальником. У Франції для відновлення деталей машин використовують самофлюсуючі сплави А1 і А2. У Німеччині Ni-Cr-B-Si самофлюсуючі тверді покриття наносять на різну номенклатуру деталей (насосів, поршнів, систем важелів, поршневих кілець, клапанів та ін.) з метою підвищення зносостійкості.

Аналогічні сплави були розроблені в інституті електродварювання ім. Є.О. Патона і ВНІТС в Україні, а також організовано виробництво ряду порошків за ліцензією фірми «Castolin» (Швейцарія) на ВАТ «Торезтврдосплав». На Мінському автомобільному заводі впроваджено комплексний технологічний процес виготовлення кульових пальців рульового управління з зносостійким покриттям. Результати експлуатаційних випробувань двигунів з зміцненими гільзами показали наступне: знос гільз, зміцнених сплавів ПГ-СР2 і ПГ-СР4, в 4-5,5 рази менше в порівнянні з зносом серійних гільз. При цьому знос поршневих кілець і поршнів, що працюють в парі з зміцненими гільзами, в 1,6-2 рази менше в порівнянні з серійно випущеними заводом. Зносостійкість клапанів, зміцнених Ni-Cr-B-Si твердими сплавами, в 3-5 разів вище серійно виготовлених з високолегованих сталей. На Одеському заводі поршневих кілець впроваджено технологічний процес виготовлення компресійних поршневих кілець з плазмовим молібденовим покриттям. На ВАТ "Харківський тракторний завод" виконані роботи по газотермічному напиленню ряду деталей тракторів типу Т-150, технологічної оснастки і обладнання. Для реалізації розробленої технології плазмового

напилення деталей тракторів із застосуванням повітря в якості плазмоутворюючого газу на ВАТ «ХТЗ» було організовано спеціалізовану ділянку плазмового напилення, оснащену обладнанням НВО «Комплекс» м. Черкаси. Також плазмове напилення успішно застосовується для підвищення жаростійкості, опору приварювання прес-форм лиття під тиском і форм відливання великих деталей, з метою теплоізоляції рознімних матриць для пресування, підвищення довговічності вимірювального, ріжучого і абразивного інструментів, для збільшення зносостійкості напрямних верстатів і вузлів тертя, ерозійної стійкості електродів іскрових розрядників і ін.

3. Електрохімічні покриття

На третьому місці, після газотермічних способів напилення покриттів, знаходяться електрохімічні покриття (20,4%). Найбільш поширеним способом відновлення є хромування поверхні. Для відновлення ділянок вала під деталі, що встановлюються з натягом або зі шпонковими сполуками, використовується тверде хромування з твердістю HV 800-1000. Хромування дозволяє виключити процес схоплювання металів, значно підвищити зносостійкість і стійкість до фреттинг-корозії, але майже в 3 рази знижує опір втоми сталей. Товщина хромового покриття повинна бути тільки в межах 0,5 мм на сторону, а при більшій товщині осад стає неміцним і менш зносостійким. Це обмежує можливість застосування хромування при наявності зносів більше 0,5 мм. Гальванічне хромування зазвичай використовується для сталі з твердістю більше 52 HRC, що значно знижує область його застосування. Агресивність застосовуваних електролітів вимагає організації процесу нейтралізації відпрацьованих розчинів, наявності навченого персоналу і лабораторного контролю, що важко і є складним для ремонтних підприємств.

Також набуло поширення відновлення зношених деталей методом остальювання. На відміну від хромування за допомогою остальювання виходять покриття практично будь-якої товщини з твердістю до 650 НВ. Крім того, остальювання є більш продуктивним процесом відновлення. До недоліків методу слід віднести освіту напружень розтягу, що знижують втомну витривалість металу, а також необхідність установки електролітичних ванн великого обсягу і агресивність застосовуваних електролітів, що вимагають подальшої нейтралізації.

Порівняльний аналіз переваг і недоліків наведених технологій відновлення деталей засобів транспорту, показав, що великий науковий інтерес представляє подальше вивчення і вдосконалення газотермічних методів нанесення покриттів.

Контрольні питання

1. Що враховує технологічний критерій?
2. Напишіть вираз для визначення критерію довговічності.
3. Напишіть вираз, за яким оцінюється вибір способу по техніко-економічному критерію.
4. Яка частина (%) деталей відновлюється на підприємствах агропромислового комплексу наплавленням, способами газотермічного напилення та електрохімічними методами?
5. Назвіть найбільш поширений спосіб відновлення зношених деталей машин?
6. З якою метою застосовуються самофлюсуючі сплави системи Ni-Cr-B-Si при відновленні деталей машин?

ЛЕКЦІЯ 4

КЛАСИФІКАЦІЯ ВІДНОВЛЮВАНИХ ДЕТАЛЕЙ. ХАРАКТЕРИСТИКИ СПОСОБІВ ГАЗОТЕРМІЧНОГО НАПИЛЕННЯ

1. Основні способи класифікації деталей. 2. Способи газотермічного напилення. 3. Класифікація матеріалів для нанесення покриттів.

1. Основні способи класифікації деталей

Для проектування технологічного процесу відновлення деталей по маршрутній технології необхідно мати відомості про поєднання дефектів і способи їх усунення, а при груповому методі ще й класифікацію деталей по конструктивно-технологічній однорідності і дефектів. Класифікація відновлюваних деталей має на меті скорочення обсягу робіт при організації відновного виробництва шляхом приведення його до типового або модульного виду як найбільш прогресивного в техніко-економічному відношенні.

Ідеї типізації технологічних процесів заклав А.П. Соколовський. Під типізацією розуміють створення процесів обробки груп конструктивно подібних деталей. Для їх виготовлення обирають оптимальні маршрути, способи технологічного оснащення і форми організації виробництва. Метод ґрунтується на класифікації процесів, в основі якого лежить класифікація деталей. Клас об'єднує деталі, пов'язані спільністю технологічних задач.

Однотипні одноманітністю змісту і послідовності виконання більшості технологічних операцій та переходів для груп деталей із загальними конструктивними ознаками. Технологічна типізація в відновному виробництві набула широкого поширення у вигляді типових технологічних процесів з нанесення покриттів деталі обробляють за типовими технологічними процесами, які характеризуються.

Метод групової обробки металів, був розроблений С.П. Мітрофановим на основі класифікації деталей. Метод встановлює однотипні способи обробки з використанням швидко переналагоджуваних засобів технологічного оснащення для груп однорідних за конструктивно-технологічними ознаками деталей. Принципова відмінність типової технології від групової в тому, що перша характеризується спільністю послідовності і змісту операцій при обробці типової групи деталей, а друга – спільністю обладнання і технологічної оснастки при виконанні окремих операцій або при повному виготовленні групи різнорідних деталей.

І.І. Луневським розроблена укрупнена класифікація деталей важких гусеничних тракторів. Стосовно до авторемонтного виробництва відома класифікація автомобільних деталей запропонована В.А. Шадрічевим. До гідності цієї класифікації слід віднести поділ деталей не тільки по класах, але і групам з метою систематизації та наукового обґрунтування застосовуваних способів відновлення.

Класифікація включає 11 класів з різним числом груп в кожному класі залежно від різноманітності структурних характеристик деталей і способів відновлення. Деталі розподілені на класи і групи з урахуванням спільності габаритів, геометричної форми, матеріалу і термообробки, дефектів різних робочих поверхонь, застосовуваних способів відновлення, механічної обробки і ін.

Результати досліджень за класифікацією деталей автомобілів, тракторів і сільгоспмашин представлені в роботах Е.Л. Воловика, А.С. Зенкина, Н.В. Молодика, Г.А. Малишева та інших вчених.

Всі поверхні деталей, які підлягають відновленню, підрозділяються на виконавчі, основні, допоміжні, технологічні і вільні.

Виконавчі поверхні призначені для виконання служ-

бового призначення, наприклад, поверхні лемешів, відвалів, дискових ножів та інших робочих органів сільськогосподарських, землерийних і меліоративних машин.

Основними поверхнями деталі спираються на поверхні інших деталей і займають в механізмах цілком певне положення, передбачене конструкцією.

Допоміжні поверхні служать опорою для інших деталей і визначають їх положення в механізмі.

Технологічні поверхні призначені для базування деталей при виготовленні і відновленні.

Вільні поверхні з'єднують всі поверхні в одне ціле і не стикаються з поверхнями інших деталей.

Деталі характеризуються формою, розмірами, матеріалами, масою, збалансованістю, а також допусками (форми і розташування поверхонь): прямолінійності, площинності, круглості, циліндричності, паралельності, перпендикулярності, співвісності, симетричності, позиційного відхилення, перетину осей, радіального і торцевого биття, нахилу, форми заданого профілю. В процесі експлуатації крім зміни форми, розмірів, маси і розташування поверхонь виникають тріщини, обломи, відколи, забоїни, порушується балансування.

З усіх відновлюваних поверхонь зовнішні і внутрішні циліндричні поверхні складають – 53,3%, різьбові – 12,7%, шліцьові – 10,4%, зубчасті – 10,2%, плоскі – 6,5%, всі інші – 6,9%.

Крім параметрів відновлюваних поверхонь (форма, розміри, фізико-механічні властивості, точність, шорсткість, цілість, вид термічної або хіміко-термічної обробки, наявність і матеріал покриття) для вибору способу відновлення дуже важливими факторами є: тип сполучення, види тертя і відносного переміщення поверхонь в процесі експлуатації машин. Ці чинники об'єднуються загальним поняттям – показники умов робіт

$$K_{n,d} = n_d / n_o \quad (4.1)$$

де $K_{n,d}$ – коефіцієнт повторюваності дефекту; n_d – число деталей з даним дефектом із загальної кількості продефектованих; n_o – загальне число продефектованих ремонтпридатних деталей.

На основі вищевикладеного можна зробити висновок, що відомі класифікації враховують технологічну спільність деталей і механічної обробки, класифікації підрозділяють деталі на класи і групи з урахуванням спільності габаритів, геометричної форми, матеріалу і термообробки, дефектів різних робочих поверхонь, застосовуваних способів відновлення, механічної обробки. Однак відомі класифікації не розглядають сполучення, як взаємодію деталей з різних матеріалів і обробкою поверхонь, не враховують інтенсивність зносу. Цим ускладнюється вибір найбільш ефективної технології відновлення конкретної деталі з техніко-економічних позицій.

Найбільше скорочення видів відновлюваних об'єктів дає перехід від деталей до їхніх елементів і розробки відповідної класифікації. Елементом деталей відповідають характерні види зносів, що сполучаються елементи деталей, види навантажень і ін.

Організація процесів відновлення деталей, заснована на використанні класифікації елементів деталей, що сполучаються, є найбільш економічно ефективною. Оскільки передбачає розробку технологічних модулів відновлення елементів різнотипних деталей, з яких формуються технології відновлення конкретних деталей. Основний методологічний принцип полягає в застосуванні обмеженого числа типових модульних технологічних операцій відновлення елементів деталей до відновлення деталей різних класів і груп.

Пропонується класифікація сполучень, що складається з 10 класів модулів і 8 підкласів, які враховують крім

перерахованих вище факторів також вид навантаження, швидкість і величину зносу деталей (табл. 4.1). Запропонована класифікація дозволяє групувати модулі сполучених деталей по 10 класам і 8 підкласам і для них розробляти модульні технологічні процеси відновлення. Формування модульного технологічного процесу відновлення деталей є компоновкою типових модульних технологічних процесів відновлення модулів поверхні. Кожен блок процесів забезпечений відповідним типовим устаткуванням, інструментом і контрольно-вимірювальними засобами. Модульний процес об'єднує в собі переваги одиничного процесу, тому що враховує особливості конкретної деталі; типового процесу, оскільки зберігає ідею типізації на рівні відновлення модуля поверхонь; групового процесу, тому що об'єднує різні деталі в групи навіть в одиничному виробництві, і надає процесу гнучкість. Модульна технологія дозволяє звести до мінімуму різноманітність технологічних процесів і засобів технологічного оснащення, виключити дублювання робіт у області технологічної підготовки виробництва, впровадити потокову організацію відновлення деталей в дрібносерійному і одиничному виробництві.

Виробництво з відновлення деталей, організоване на модульному принципі характеризується гнучкістю, мобільністю, здатністю швидко і з мінімальними витратами переходити на випуск нових виробів. Застосування модульних технологій найефективніше при підготовці відновного виробництва для великої номенклатури деталей.

В процесі розробки модульного технологічного процесу описуються окремі оптимізовані технології відновлення окремих елементів деталей типових модульних сполучень у часовій послідовності, з яких формується модуль.

Таблиця 4.1 – Класифікація типових модульних сполучень деталей засобів транспорту

Клас		Характеристика сполучення і коди підкласів							
Код	Сполучення	Матеріал деталі	Обробка поверхні	Матеріал сопрягаемой деталі	Обробка поверхні	Середовище	Вид навантаження	Основний вид зношування	Швидкість (мкм / год) / величина зносу деталі (мм)
		1	2	3	4	5	6	7	8
1	Шийка вала – внутрішнє кільце підшипника кочення	Сталь 45, 30X, 40X, 38XC, 20XГНМ, 40XНМА, 35XГС	Хіміко-термічна обробка, гартування, низькотемпературний відпуск	Сталь ШХ15	HRC ≥ 60	–	Циклічні нормальні сили до циліндричних поверхонь	Окислювальний	$\leq 0,003$ $\leq 0,1$
2	Вал – підшипник ковзання	Сталь 45, 30X, 40X, 38XC, 20XГНМ, 40XНМА, 35XГС	Хіміко-термічна обробка, гартування, низькотемпературний відпуск	Бабіт, АСМ, Бронза КСМц, ОЦС, Чавун, сталь	– – – – – Без ТО	Олія	Циклічні нормальні сили до циліндричних поверхонь	Окислювальний	$\leq 0,04$ $\leq 0,15$
3	Ось – втулка	Сталь 45, 40X	Гартування при T = 830-840 ⁰ C і відпуск при T = 540-600 ⁰ C	Сталь 45	Закалка ТВЧ HRC ≥ 50	Олія	Поперечні сили, згинальні моменти	Абразивний, корозійно-механічний	$\leq 0,032$ $\leq 0,13$
4	Гніздо такана, корпусу – зовнішнє кільце підшипника кочення	КЧ35-10, КЧ37-12, сталь 45, 40X	НВ 163–241 НВ 241–285	Сталь ШХ15	HRC ≥ 60	–	Циклічні нормальні сили до циліндричних поверхонь	Окислювальний	$\leq 0,01$ $\leq 0,07$

Продовження таблиці 4.1

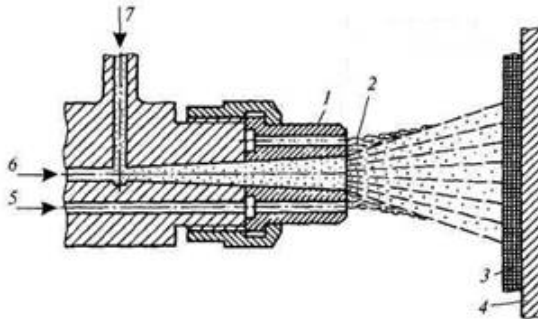
		1	2	3	4	5	6	7	8
5	Стакан-корпус	КЧ35-10, КЧ37-12, сталь 45, 40Х	НВ 163–241 НВ 241–285	КЧ35-10, КЧ37-12, сталь 45, 40Х	НВ 163–241 НВ 241–285	–	Передача навантаження при переміщенні в межах зазору	Смятие поверхонь контакту	$\leq 0,005$ $\leq 0,06$
6	Шип хрестовини - голчастий підшипник	Сталь 20Х, 20ХГНТР, 12Х2Н4А	Цементация на глибину 0,8-1,9 мм, гартування і відпуск, HRC 56-65	Сталь ШХ15	HRC 58–65	Консистентне масло	Контактні навантаження	Окислювальний	$\leq 0,011$ $\leq 0,26$
7	Шлицеве з'єднання	Сталь 45, 30Х, 40Х, 45Х, 45Г2	Гартування і відпуск, HRC 45-55	Сталь 45, 40Х, 18ХГТ, 30ХГТ, 20ХНМ	Цементация на глибину 1,0-1,8 мм, гартування і відпуск, HRC 56-65	Олія	Динамічне навантаження	Окислювальний	$\leq 0,2$ $\leq 0,6$
8	Поверхня валу - кромка манжети ущільнювальної	Сталь 45, 40Х, 40 ХГТР, 40ХНМА, 35ХГС	Гартування і відпуск, HRC 42-55	Гума марки 7-ІРП, 1068-3с, 7-ІРП- 1068-24, 51-1455	Твердість по Шор А 65-86 ум.од.	Олія	Моменти і поперечні сили, змінні за величиною	Окислювальний і абразивний	$\leq 0,02$ $\leq 0,75$
9	Зубчасті колеса	Сталь 40Х, 30ХГТ, 20ХНМ, 18ХГТ, 12ХН3А	Цементация на глибину 0,9-1,5 мм, гартування і відпуск, HRC 56-65	Сталь 40Х, 30ХГТ, 20ХНМ, 18ХГТ, 12ХН3А	Цементация на глибину 0,9-1,5 мм, гартування і відпуск, HRC 56-65	Олія	Контактні навантаження	Молекулярно-механічний	$0,015-$ $0,061$ $\leq 0,5$
10	Деталь - робоче середовище	Сплав Л53, сталь ШХ15, 65Г, 60ХГ, 40Г2Р	Хіміко-термічна обробка, гартування, низькотемпературний відпуск	Грунт	–	Абразивне	Нормальні і дотичні сили	Абразивний	$\leq 0,16$ 1,3 для дотична культива тора

Всі розроблені технологічні модулі відновлення елементів деталі вписують у відповідні блоки операцій відновлення деталей.

2. Способи газотермічного напилення

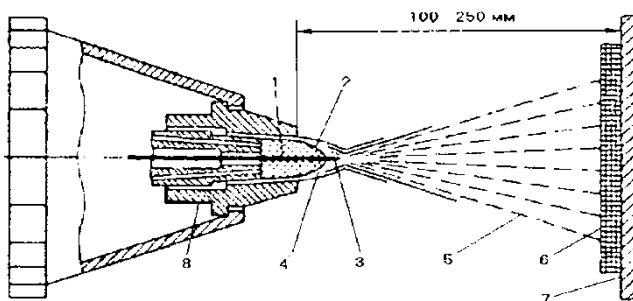
Сутність процесів газотермічного напилення покриттів полягає в утворюванні спрямованого потоку дисперсних частинок напилюваного матеріалу, що забезпечує перенесення їх на поверхню виробу при оптимальних для формування шару покриття значеннях температури і швидкості.

Газополуменеве напилення. Спосіб газополуменевого напилення покриттів відрізняється компактністю, простотою використовуваного обладнання та його мобільністю, що дозволяє проводити роботи по відновленню деталей безпосередньо у замовника. Він рекомендується для напилення порошкових матеріалів: металів, сплавів, композицій і оксидів (рис. 4.1), а також покриттів з металевого дроту, гнучких шнурів, дроту (рис. 4.2).



- 1 – сопло; 2 – факел; 3 – покриття; 4 – основа;
5 – кисень і горючий газ; 6 – транспортуючий газ;
7 – напилюваний матеріал

Рисунок 4.1 – Газополуменеве напилення порошкового матеріалу



1 – дріт; 2 – полум'я; 3 – кінець дроту, який оплавляється; 4 – повітряний струмінь; 5 – частинки металу; 6 – покриття; 7 – основа; 8 – насадка

Рисунок 4.2 – Газополуменеве напилення дротом

При газополуменевому напилюванні покриттів ацетилен і його замінники: пропан, водень, а також рідке пальне можуть використовуватися в якості пального газу.

Окислювачем є кисень або повітря. Температура полум'я продуктів згоряння залежить від складу суміші. Основні властивості горючих газів наведені в табл. 4.2.

Таблиця 4.2 – Основні властивості горючих газів, що застосовуються для газополуменевого напилення покриттів

Газ	Щільність, кг/м ³	Температура, °С			Нижча температура згоряння, Мдж/м ³	Температура полум'я в суміші з киснем, °С
		Плавлення	Кипіння	Критична		
1	2	3	4	5	6	7
Ацетилен	1,09	-81	-83,6	35,7	100,8	3100–3200

Продовження таблиці 4.2

1	2	3	4	5	6	7
Н-бутан	2,54	-139	-0,6	152	111,2	2700– 2900
Водень	0,084	-259,2	-252,8	-239,9	19,2	2400– 2600
Метан	0,67	-182,5	-161,7	82,1	32,0	2400– 2700
Оксид вуглецю	1,16	-205	-191,5	-140,2	12,2	2600– 2800
Пропан	1,88	-189,9	-42,6	96,8	83,2	2700– 2850
МАПП (метил- ацети- лен- пропан)	1,78	–	–	120	83,2	2800– 2900

Швидкість частинок напилюваного матеріалу залежить від співвідношення кисню і пального газу в суміші, кількості газу, який обдуває полум'я, віддалі від зрізу сопла, кількості порошку, який вдувається в полум'я, його щільності, гранулометричного складу і інших компонентів, і знаходиться в межах 20-80 м/с.

Детонаційне напилення. Метод детонаційного напилення покриттів використовує енергію вибуху газових сумішей. Цим способом можна наносити покриття будь-якого типу з низькою пористістю. Схема процесу детонаційного напилення представлена на рис. 4.3.

В камеру 3 водоохолоджуваного стовбура 2 діаметром 25 мм подають кисень і ацетилен в строго певних кількостях; стовбур направляють на оброблювану деталь 1 (рис. 4.3, а). Потім через спеціальний отвір в камері подають порошок напилюваного матеріала, наприклад карбіду вольфраму, з розміром частинок 44 мкм (рис. 4.3, б). Газову суміш, в якій в підвішеному стані знаходиться напилюваний порошок, підпалюють електричної іскрою від запалу 4 (рис. 4.3, в).

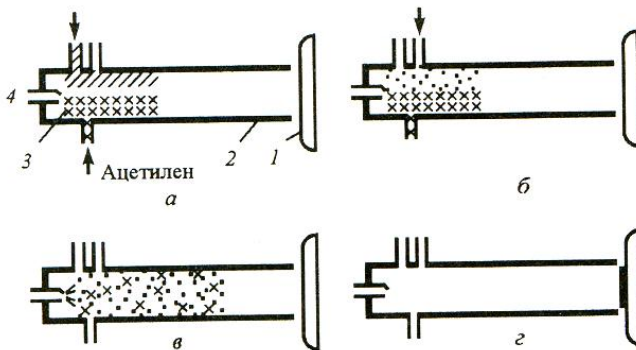


Рисунок 4.3 - Схема процесу детонаційного напилення

В результаті вибуху суміші відбувається виділення теплоти і утворюється ударна хвиля, яка розігріває і розганяє частки порошку. Їх швидкість на відстані 75 мм від зрізу стовбура може досягати 820 м/с. Якщо на цій відстані помістити оброблювану деталь 1, то при попаданні на неї частинок буде виділятися велика кількість теплової енергії, і температура напилюваного порошку може збільшитися до 4000 °С. В результаті цього на деталі 1 утворюється покриття (рис. 4.3, г).

Після вибуху суміші горючих газів для видалення продуктів горіння здійснюють продувку стовбура азотом. Процес відрегульований таким чином, що він повторюється з частотою 3 - 4 рази на секунду.

Детонаційне напилення використовують в основному для отримання твердих зносостійких покриттів з карбідів, що містять невеликі кількості металевих сполучних, а також різних оксидів і їх сумішей. За один цикл напилення товщина покриття приблизно становить 6 мкм. Установка працює до досягнення необхідної товщини покриття, яка на практиці зазвичай дорівнює 0,25 - 0,3 мм. Покриття, отримані детонаційними напиленням, відрізняються вели-

кою щільністю і високою міцністю зчеплення з основою.

Оскільки на кордоні між покриттям і підкладкою спостерігається зварювальний ефект, вони мають міцне зчеплення. Однак робота детонаційних установок супроводжується сильним шумом, і вартість покриттів дуже висока.

Плазмове напилення. При виготовленні виробів спеціальної техніки широке застосування отримав метод плазмового напилення покриттів. Останнім часом цей метод, що відрізняється високими техніко-економічними показниками, використовується в машинобудуванні, енергетиці, хімічній, нафтогазовій, дорожньо-будівельній, сільськогосподарській техніці, а також на підприємствах міського та комунального господарства.

Плазмовий розпилювач був розроблений в 1956 р. фірмами Gianini Corp. і UC на основі робіт Сміта (пат. 2157498, 1939 г.), який запропонував пристрій для нанесення покриттів, що містить катод у формі стержня і анод у формі сопла.

Плазмове напилення здійснюється за допомогою плазмового струменя. Потік плазми характеризується наступними показниками: температура в ядрі – 20000-30000 °С, швидкість струменя – 300-2000 м/с.

Процес плазмового напилення здійснюють за схемою, представленою на рис. 4.4, де h_1 – відстань від зрізу сопла до напилюваної поверхні; $T_ч$ – температура частинки; $T_п$ – температура підкладки; q – тепловий потік, що надходить в підкладку.

Між водоохолоджуваними катодом і анодом від джерела електроживлення запалюється електрична потужнострумова дуга. Залежно від конструкції плазмотрона величину струму можна регулювати від 80 до 600 А. У дуговий проміжок подають плазмоутворюючий газ (аргон, азот, суміш Аг - N₂, повітря і т. д.). При контакті з дугою газ нагрівається і, прискорюючись, виходить з сопла у вигляді

струменя низькотемпературної плазми. Температуру струменя можна регулювати від $2 \cdot 10^3$ до $15 \cdot 10^3$ К. Швидкість струменя в залежності від режиму проведення процесу може змінюватися від 200 до $2 - 3 \cdot 10^3$ м/с.

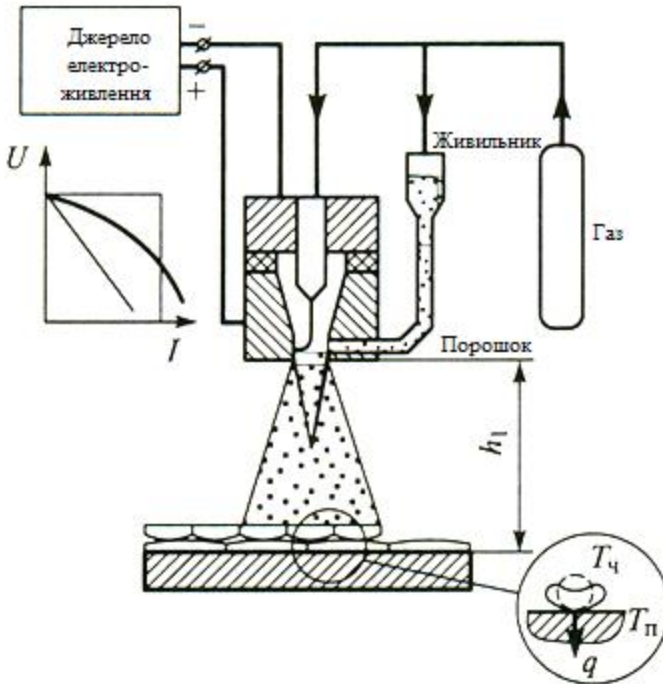
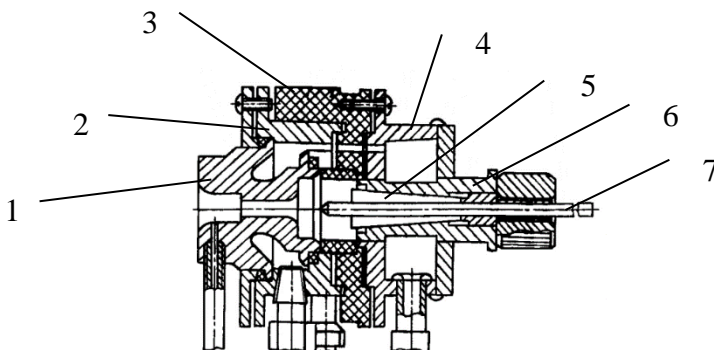


Рисунок 4.4 – Схема процесу плазмового напилення

В струмінь від спеціального живильника подають порошок, який прискорюється, розплавляється і осідає на підкладці, утворюючи покриття. Варіюючи параметрами напилювання (величина струму, витрата і склад плазмоутворюючого газу, розмір часток і їх витрата, дистанція напилення і т. д.), Можна в досить широких межах змінювати властивості покриттів. На рис. 4.5 приведена схема плазмового розпилювача.



1 – сопло; 2 – стакан; 3 – корпус; 4 – кришка; 5 – цанга;
6 – втулка; 7 – катод

Рисунок 4.5 – Схема плазмового розпилювача

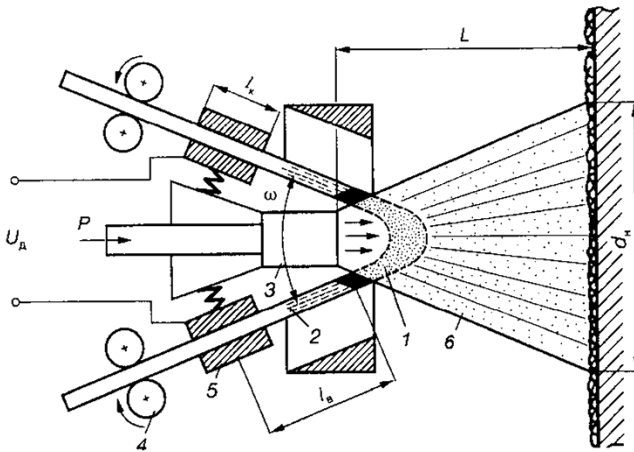
Процес плазмового напilenня від газопламенного відрізняється вищими температурою в плазмовому струмені і швидкостями частинок, а також інертністю середовища.

Електродугове напilenня. При електродуговій металізації утворення потоку напильованих частинок відбувається за рахунок плавлення матеріалу, що розпилюється багатоамперною дугою, і диспергування його швидкісним струменем газу (рис. 4.6).

Цей процес зазвичай використовується для напilenня корозійностійких і зносостійких покриттів з металів. Можливе отримання біметалевих покриттів псевдосплавів, а також покриттів зі спеціальними властивостями при використанні дроту з різних матеріалів або порошкового дроту, яка складається з металевої оболонки і порошкової серцевини.

При електродуговій металізації площа активних плям на електродах обмежена невеликим діаметром дроту, яка використовується для напilenня. Горіння відбувається в умовах дії потужної швидкості струменя газів. Це призво-

дить до стискання стовпа дуги. Особливістю горіння дуги є мінливість її довжини.



1 – електрична дуга; 2 – дріт; 3 – сопло; 4 – механізм подачі дроту; 5 – контактні пристрої; 6 – струмінь напилюваного матеріалу; $l_в$ – довжина вильоту дроту; $U_д$ – електрична напруга

Рисунок 4.6 – Схема електродугового напилення

Основними характеристиками електродугового напилення є висока продуктивність процесу, яка може досягати 50 кг/год і високий енергетичний ККД розпилення, який може бути 0,7-0,9.

До недоліків можна віднести необхідність використання для напилення тільки дрові матеріали.

У табл. 4.3 наведені характеристики і основні параметри методів газотермічного напилення.

Аналіз літератури показав, що найбільш доступним і широко використовуваним способом в практиці машинобудівних і сільськогосподарських підприємств різного масштабу є газополуменеве напилювання.

Таблиця 4.3 – Характеристика і основні параметри методів газотермічного напилення

Параметр	Спосіб напилення			
	Газополу- меневий	Плазмовий	Детона- ційний	Електро- дугова ме- талізація
1	2	3	4	5
Продуктив- ність проце- су, кг/год	8...10	3...50	0,1...6,0	12..14
Вартість 1 год. роботи установки, у.о.	2,60	9,06	8,71	4,24
Коефіцієнт використан- ня напилюва- ного матері- алу	0,8–0,95	0,7–0,9	0,3–0,8	0,8–0,95
Площа пок- риття зразка, напиляного за 1 год ро- боти, м ²	0,45–1,00	0,20–0,50	0,10–0,30	6,00–8,00
Температура частинок матеріалу, °С	До 2000	До 3000	До 3000	До 2000
Швидкість частинок матеріалу, м / с	20–80	50–200	600–1000	50–240
Товщина покриття, мм	0,1–2,5	0,1–50	0,05–0,5	0,5–2,5
Міцність зчеплення $\sigma_{\text{сц}}$, МПа	10–25	10–50	75–150	5–15
Пористість, %	16,0–35,0	2,0–15,0	0,5–1,0	10,0–30,0
Вид покрит- тя*	1, 2	2, 3, 4	3, 4, 5	1, 2, 3

Продовження таблиці 4.3

1	2	3	4	5
Недоліки	1. Низька міцність зчеплення покриття та основи. 2. Висока пористість покриття.	1. Шум. 2. Інтенсивне ультрафіолетове випромінення. 3. Висока вартість обладнання 4. Великі експлуатаційні витрати.	1. Може виникнути залишко-ва деформація від дії імпульсної хвилі. 2. Великий до (140 ДБ) шум. 3. Висока вартість обладнання.	1. Небезпека перегріву і окислення напилюваного матеріалу при малих швидкостях подачі дроту. 2. Значне вигорання легуючих елементів, що входять в напилюваний сплав.

* 1 – антифрикційні для роботи в умовах змащення; 2 – ущільнювальні; 3 – зносостійкі при високотемпературному сухому терті; 4 – теплоізоляційні; 5 – зносостійкі при особливо жорстких умовах експлуатації покриттів.

Фахівці фірми «Metco» вважають газополуменеве напилювання дуже перспективним методом зміцнення і відновлення деталей, який дозволяє продовжити термін їх служби в 2–20 разів (в залежності від призначення деталі).

Газополуменеві покриття задовольняють запити багатьох ремонтних виробництв. Перевага його полягає в простоті технології та доступності обладнання, технологічній гнучкості застосування до різних типорозмірів деталей, забезпеченні необхідної продуктивності нанесення покриттів при відносно невеликій трудомісткості, можливості регулювання середовища полум'я (окисне, відновне, нейтральне), відносно низький рівень шуму і світлових випромінювань, що дозволяють працювати оператору без

додаткових засобів захисту.

Також з порівняльного аналізу газотермічних методів напилення покриттів можна зробити висновки, що газополуменевий спосіб напилення має такі переваги:

- температура нагріву напилюваних частинок матеріалу не перевищує 2000°C (при детонаційному напиленні – 3000°C , плазмовому напиленні – 3000°C , електродуговій металізації – 2000°C), що дозволяє напилювати матеріали з низькою температурою плавлення, в тому числі і полімери;

- швидкість частинок менше, ніж при детонаційному і плазмовому методах, що призводить до зниження втрат напилюваного матеріалу за рахунок диспергування при ударі о напилювану поверхню;

- інжекція повітря в струмінь мінімальна в порівнянні з іншими способами, що позитивно позначається на сплаві напилюваних частинок;

- серед методів газотермічного напилення покриттів газополуменеве є найбільш низьковартісне;

- обладнання, що застосовується компактне, мобільне, не складне в експлуатації.

Крім того, з огляду на високий відсоток деталей, відновлюваних газополуменевим напиленням, стає актуальним проведення робіт по його вдосконаленню шляхом інтегрування з іншими технологіями з метою підвищення якості напилених покриттів. Найважливішим критерієм якості газополуменевих покриття є його міцність зчеплення з основою. На сьогоднішній день застосовується ряд методів, які підвищують міцність зчеплення і щільність напилюваного покриття, проте, вони не завжди прийнятні для відновлення зношених деталей і не можуть забезпечити задану якість відновленої поверхні за такими критеріями, як зносостійкість, пористість, рівень залишкових напружень, рис. 4.7.



Рисунок 4.7 – Способи підвищення міцності зчеплення покриття з основою

Тому напрямок вдосконалення методу газополуменевого напилення шляхом інтегрування з іншими технологіями є актуальним і вимагає подальшого вивчення.

Техніко-економічні показники способів нанесення покриттів і їх застосовність при відновленні деталей машин. Орієнтовні техніко-економічні показники способів нанесення покриттів і їх застосовність при відновленні з'єднань деталей машин представлені в таблицях 4.4, 4.5.

Коефіцієнт продуктивності ($K_{\text{п}}$) розрахований як відношення основного часу, витраченого ручним способом ($t_{\text{рн}}$), до основного часу відновлення умовної деталі порівнюваним способом (t_i):

$$K_{\text{п}} = t_{\text{рн}}/t_i \dots \dots \dots (4.1)$$

За основний час відновлення умовної деталі прийняті витрати часу, що включають попередню підготовку, нанесення покриття і наступну механічну обробку.

Коефіцієнт техніко-економічної ефективності (K_e) оцінювали з урахуванням продуктивності відновлення умовної деталі за такою формулою:

$$K_e = K_{\text{п}} e_a / 100, \dots \dots \dots (4.2)$$

де e_a - економія при відновленні умовної деталі, %.

На відміну від способів нанесення гальванічних покриттів при напиленні і для способів наплавлення необхідно передбачати допуски на механічну обробку (0,4-1,5 мм на сторону) і, як наслідок, враховувати неминучість суттєвих втрат металу наплавлення.

Всі способи наплавлення, за винятком електродотного, роблять значний термічне вплив на деталь, що призводить до виникнення напружень і деформацій. Також всі способи нанесення покриттів знижують опір втоми, тому з метою його підвищення, особливо для деталей, що працюють в умовах циклічних навантажень, слід передбачити такі технологічні операції: термообробку, віброобробку, зміцнення і ін.

Таблиця 4.4 – Техніко-економічні показники методів нанесення покриттів на деталі

машин

Методи нанесення покриттів	Продуктивність кисть методу*, кг/год	Товщина покриття, що наноситься, мм	Припуск на механічну обробку, мм	Частка основного металу в наплавленому, %	Міцність зчеплення, МПа	Деформація деталі після нарощування	Мінімальний діаметр деталі, мм	Зниження опору втоми, %	Коефіцієнт продуктивності Кл*	Коефіцієнт техніко-економічної ефективності Ке
Нашивка:										
під шаром флюсу	2-15	0,8-10	0,8-1,5	27-60	27-60	акачна	45	15	1,45-1,62	0,436
вібродугова	0,5-4	0,3-3	0,7-1,3	8-20	500	неаначна	10	35	0,85-0,72	0,25
у середовищі CO ₂	1,5-4,5	0,5-3,5	0,7-1,3	12-45	550	аначна	15	15	1,85-1,77	0,403
елесроконтатна	1-2,8	0,2-1,5	0,2-0,5	Відсутнє	303	неаначна	15	25	23-2,1	0,66
порошковими дротами	2-9	1-8	0,6-1,2	12-35	600	акачна	20	15	1,75-1,34	0,4
ручна гааова	0,15-2	0,4-3,5	0,4-0,8	5-30	480	—		25	0,73-0,38	0,138
плазмова	1-12	0,2-5	0,4-0,9	5-30	490	неаначна	12	12	22-1P	0,56
ручна дугова	0,4-4	0,5-4	1,1-1,7	20-40	500	аначна		30	1	0,314
аргонодугова	0,3-3,6	0,2-2,5	0,4-0,9	6-25	450	неаначна	12	25	2Д-1,7	0,171
Напилення:										
газополуменева	0,4-4	30-80	0,30,7	Відсутнє	25	Відсутнє		30	1,68-1,47	0,39
плазмова	0,8-12	40-90	0,03-0,06	То же	45	те ж	10	25	1,76-1,68	0,4
Гальванічні покриття										
хромування	0,007-0,085	0,3-0,06	—	450		—	5	20	0,32-0,22	0,087
залізнення	0,011-0,9	0,15-0,2	—	400		—	12	25	1,93-1,77	0,637

* Показники наведені для покриттів товщиною до 1 мм

Таблиця 4.5 - Вживання різноманітних методів відновлення для типових з'єднань деталей машин

Метод відновлення	Типи з'єднань деталей						
	Вал- підшипник ковзання	Вал- підшипник кочення	Вал- ущільнення	Шліцьове з'єднання	Цапа- втулка	Шків - гальмівна колодка	Каток - ланка гусені
1	2	3	4	5	6	7	8
Наплавлення:							
під шаром флюса	+	(+)	(+)	(+)	(+)	+	+
в захисних газах	+	+	+	+	+	+	(+)
порошковими д्रो- тами	+	+	+	(+)	+	+	+
вібруючим елект- родом в рідині	-	+	+	-	(+)	-	-
плазмова	(+)	+	+	-	+	-	-
електроконтактна	(+)	(+)	(+)	-	(+)	-	-
електродними стрі- чками	-	-	-	-	-	(+)	+
електрошлакове	-	-	-	-	-	(+)	+

Продовження таблиці 4.5

1	2	3	4	5	6	7	8
хромування	(+)	(+)	(+)	-	(+)	-	-
Залізнення	(+)	(+)	(+)	-	(+)	-	-
Металізація напиленням	(+)	+	+	(+)	-	-	-
Електроіскрове нарощування	(+)	(+)	(+)	-	-	-	-
Електромеханічна обробка	-	+	-	-	-	-	-
Заливка рідким металом	-	-	-	-	-	(+)	-
Застосування додаткових ремонтних деталей	-	(+)	-	-	-	-	-
Застосування полімерів	-	(+)	-	-	-	-	-

Примітка. Знак «+» означає широке застосування способу, знак «(+))» - обмежене застосування, знак «-» - застосування способу не рекомендується.

Таким чином, при виборі оптимальної технології відновлення конкретної номенклатури деталей необхідно враховувати технологічні можливості підприємства, наявність відповідного кадрового забезпечення виконання відновлювальних робіт.

Обрана технологія і матеріал покриття повинні забезпечувати необхідний ресурс відновлених деталей і бути економічно доцільною.

3. Класифікація матеріалів для нанесення покриттів

Матеріал напилюваного покриття визначається виходячи з умов експлуатації виробів. В даний час розроблено і випускається промисловістю велику кількість різних матеріалів для нанесення покриттів.

Класифікація матеріалів для нанесення газотермічних покриттів представлена на рис. 4.8.

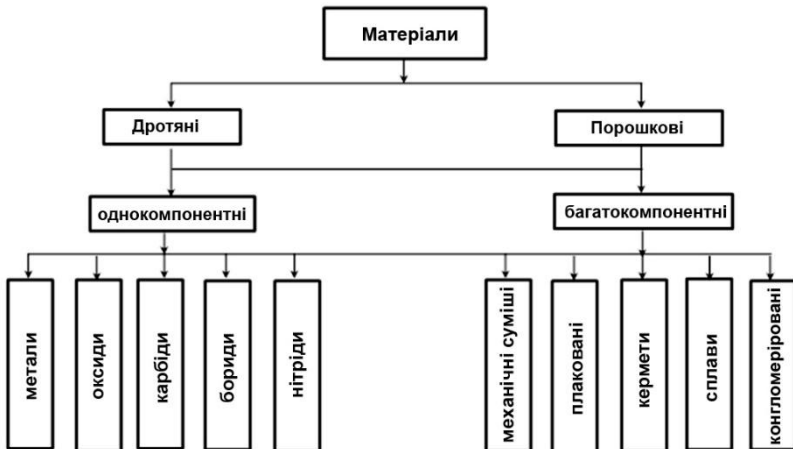


Рисунок 4.8 – Класифікація матеріалів для нанесення газотермічних покриттів

Спеціалізовані порошки часто випускають трьох класів: ОМ – особливо дрібні; М – дрібні і С – середні. Фрак-

ційний склад частинок в межах одного класу для різних матеріалів неоднаковий. Як правило, клас ОМ включає в себе частинки діаметром 40-100 мкм, клас М – 100-280 мкм, клас С – 280-630 мкм.

Для підвищення зносостійкості деталей найбільш часто застосовують порошки на основі нікелю і кобальту. Є кілька міднофосфористих сплавів, що володіють самофлюсуючими властивостями, які проявляються лише на чистій міді і бронзі. З огляду на меншу схильність до утворення холодних і гарячих тріщин, нижчу температуру плавлення і сприятливе поєднання ряду фізико-механічних і експлуатаційних характеристик самофлюсуючі сплави системи Ni-Cr-B-Si при більш низькій вартості можна вважати їх застосування для зміцнення і відновлення в багатьох випадках більш раціональним, ніж сплавів на основі кобальту.

Перші самофлюсуючі матеріали були розроблені фірмою «Well colmonoy corporation» (США) в результаті додаткового легування ніхрому бором і кремнієм. Температура плавлення отриманих при цьому сплавів склала 1000–1100 °С, що значно розширило області їх використання в якості покриттів на різних матеріалах. Істотний вплив змісту легуючих елементів на структуру та властивості сплаву дає можливість досить в широкому інтервалі регулювати твердість, зносо- і корозійну стійкість, а також деякі інші характеристики. В даний час в промислово розвинених країнах розроблено близько 50 самофлюсуючих сплавів системи Ni-Cr-B-Si.

В Україні аналогічні сплави були розроблені в інституті електрозварювання ім. Є.О. Патона і ВНІІТС, а також організовано виробництво ряду порошоків за ліцензією фірми «Castolin» (Швейцарія) на ВАТ «Торезтвердосплав», табл. 4.6.

Таблиця 4.6 – Хімічний склад порошкових матеріалів виробництва ВАТ «Горезтвёрдо-сплав»

Марка порошку	Склад компонентів % за масою									
	Cr	B	Si	Fe	C	Ni	Co	Cu	W	Al
ПГ-10Н-01	14,0–20,0	2,8–4,2	4,0–4,5	3,0–7,0	0,6–1,0	Ост.	–	–	–	–
ПГ-10Н-04	–	1,2–1,8	2,3–2,8	До 2,0	До 0,2	Ост.	–	–	–	–
ПГ-10К-01	21,0–25,0	1,2–1,8	0,8–1,3	До 2,0	1,3–1,7	28,0-32,0	Ост.	–	3,5–4,5	–
ПГ-12Н-01	8,0–14,0	1,7–2,8	1,2–3,2	2,0–5,0	0,3–0,6	Ост.	–	–	–	–
ПГ-10Н-02	10,0–16,0	2,0–4,0	3,0–5,0	3,0–6,0	0,4–0,8	Ост.	–	–	–	–
ПГ-19М-01	–	–	–	До 4,0	–	–	–	Ост.	–	8,5–10,5
ПТ-НА-01	–	–	–	–	–	Ост.	–	–	–	4,0–5,5
ПТ-19Н-01	8,0–14,0	1,7–2,8	1,2–3,2	2,0–5,0	0,3–0,6	Ост.	–	–	–	0,8–1,3

Контрольні питання

1. Що слід розуміти під типизацією технологічних процесів?
2. У чому суть методу групової обробки?
3. У чому принципова відмінність типової від групової технології?
4. Що називається дефектом?
5. У чому перевага модульної технології?
6. Сутність процесу газопламенного напилення, його переваги і недоліки?
7. Сутність процесу детонаційного напилення, його переваги і недоліки?
8. Сутність процесу плазмового напилення, його переваги і недоліки?
9. Сутність процесу електродугового напилення, його переваги і недоліки?
10. Назвіть основні способи підвищення міцності зчеплення покриття з основою?
11. Класифікація матеріалів для нанесення газотермічних покриттів.

ЛЕКЦІЯ 5 УДОСКОНАЛЕННЯ МЕТОДІВ ГАЗОТЕРМІЧНОГО НАПИЛЕННЯ

1. *Газополуменеве напилення, інтегроване з щітковою обробкою.*
2. *Високошвидкісне напилення.*

1. Газополуменеве напилення, інтегроване з щітковою обробкою

Зменшити або усунути недоліки газотермічних методів напилення (недостатня міцність зчеплення покриття з основою, пористість покриття, зниження втомної міцності виробів та ін.) можна як технологічними заходами – засто-

суванням дискретних покриттів, створенням нових композиційних матеріалів і ін. Так і інтеграцією газотермічного напилення з іншими методами обробки поверхні: металевими щітками, електроерозійною обробкою, накладенням коливань на заготовку, СВС процесом, лазерною обробкою, епіламіруванням і ін. (рис. 5.1).

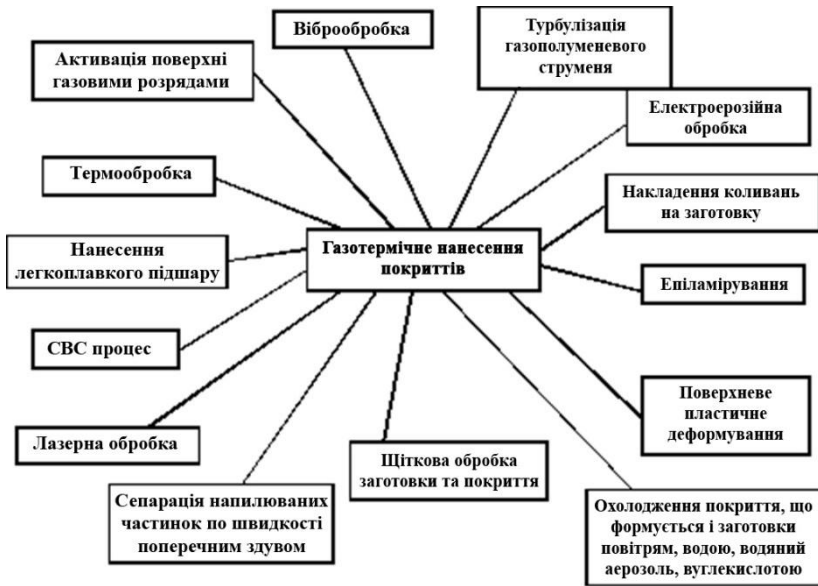


Рисунок 5.1 – Схема інтегрування газотермічного напилення покриттів з іншими методами обробки поверхні

Одним з перспективних методів, є процес обробки поверхні металевими щітками, який пропонується застосовувати замість струменево-абразивної обробки напилюємої поверхні і в процесі напилення для активування напилюваних шарів відновного покриття. Щіточну обробку можна розглядати як суму елементарних процесів дряпання. У свою чергу процес дряпання можна вважати подібним процесу різання з негативним переднім кутом.

Металева щітка являє собою дротяний інструмент з високою щільністю (70-80%) набивання ворсу. Ворсинки виготовляються з кордового дроту по ГОСТ 3875-83 або сталевого пружинного дроту з вмістом вуглецю не більше 0,7% і міцністю близько 2 ГПа. Діаметр ворсинок вибирається залежно від необхідної шорсткості поверхні.

Шорсткість оцінювалася параметрами R_a , R_{max} , S_m , S , t_p (ГОСТ 2789-73), а також R_p , $R_{вист}$, $R_{вп}$, θ , V , y_1 . Параметри R_a , R_{max} , t_p визначаються за допомогою профілографо-профілометра, параметри S_m , S оцінюються по профілограмі поверхні, параметри R_p , $R_{вист}$, $R_{вп}$, θ , V , y_1 обчислюються за методиками.

Висота згладжування R_p визначається як відстань від лінії виступів до середньої лінії. Середні радіуси виступів $R_{вист}$ і впадин $R_{вп}$ визначаються за формулами:

$$R_{вист} = \frac{9R_a^2 S_m^2}{128(R_p - 0,5R_a)^3}, \quad (5.1)$$

$$R_{вп} = \frac{9R_a^2 S_m^2}{128(0,5R_a - R_p)^3}, \quad (5.2)$$

де R_a – середнє арифметичне відхилення від профілю;
 S_m – середній крок нерівностей профілю.

Середній кут нахилу бічної стінки профілю можна вирахувати за формулою:

$$\theta = \arctan \frac{2R_{max}}{S}, \quad (5.3)$$

де R_{max} – найбільша висота профілю;
 S – середній крок виступів профілю щодо опорної довжини.

Параметри опорної кривої V , b_1 обчислюються за формулами:

$$V = 2t_{cp} \frac{R_p}{R_a} - 1; \quad b_1 = t_{cp} \left(\frac{R_{max}}{R_p} \right)^V, \quad (5.4)$$

де t_{cp} – відносна опорна довжина профілю на рівні середньої лінії.

Експериментальні дослідження можливості застосування щіточної обробки в якості підготовки поверхні під напилення покриттів здійснювалися на зразках зі сталі 10, на поверхні яких була окалина після прокатки. Як інструмент застосовували циліндричну металеву щітку зовнішнім діаметром 160 мм, шириною робочої частини 60 мм, з діаметром ворсинок 0,45 мм і вільною їх довжиною 30 мм. Шорсткість поверхні R_z становила 5-22 мкм в залежності від режимів щіточної обробки. Результати визначення міцності зчеплення випробуванням на відрив алюмінієвого покриття, нанесеного за допомогою металізатора ЕМ-12М, показали збільшення міцності зчеплення на 20-32% при щіточній обробці по порівнянні з дрібоструминною.

На основі вищевикладеного можна припустити, що інтегрування щіточної обробки з газополуменевим напиленням забезпечить отримання необхідної шорсткості оброблюваної поверхні в широких межах і дозволить підвищити міцність зчеплення покриття з основою, знизити його пористість і рівень залишкових напружень.

Застосування технології щіточної обробки напиляємої поверхні і нанесення шарів дозволяє істотно скоротити час надходження обробленої ділянки в зону напилення шляхом поєднання процесів щіточної обробки і напилення. При діаметральному розташуванні щітки і газополуменевого пального зазначений час можна розрахувати за виразом

$$t = \frac{30}{n_o}, \quad (5.5)$$

де t – час, через який оброблений щіткою ділянку на-

дійде в зону напилення, с;

n_0 – кількість обертів напилюваної деталі в хв.

При напиленні, наприклад, деталей діаметром від 20 до 200 мм n_0 повинні складати 287-29 об/хв, для забезпечення швидкості поверхні в зоні напилення 300 мм/с. Тоді час, через який оброблена поверхня надійде в зону напилення, розраховане за формулою (5.5), становитиме лише 0,1 - 1,0 с. Відомо, що товщина оксидної плівки на залізі і його сплавах становить 50-100Å, час утворення оксидної плівки становить $2,4 \cdot 10^{-9}$ секунди при тиску 760 мм. рт. ст.

Застосування щіточної обробки замість традиційної струменевої обробки абразивом дозволяє висунути гіпотезу про зменшення товщини окисної плівки на поверхні основи через короткий проміжок часу між обробкою і надходженням її в зону напилення, що в свою чергу полегшує процес очищення поверхні за рахунок ударного тиску p_u напилюваних частинок і покращує фізичний контакт матеріалів частинки і основи. В результаті цього міцність зчеплення напилюваного покриття з основою повинна підвищитися.

Різання металів є складним процесом, що включає ряд фізико-хімічних явищ: механічних, теплових, адгезійних, дифузійних і ін., які супроводжують взаємодію інструменту з матеріалом оброблюваної деталі в умовах великих контактних тисків і температур.

В енергетичному балансі процесу різання 90% і більше доводиться на роботу пластичної деформації матеріалу оброблюваної деталі. Тому прийнято вважати процес різання – процес переважаючого пластичного деформування. Від характеру протікання пластичної деформації і механізму деформаційного зміцнення залежать точність, шорсткість і якість поверхневого шару оброблюваної деталі.

Тому основним теоретичним напрямком, що визначає

рішення задачі вибору оптимальних умов взаємодії ріжучого інструменту і матеріалу оброблюваної деталі, є механіка процесу різання матеріалів.

Відомо, що додавання до металу зовнішніх сил викликає рух дислокацій. Причому, першими починають рухатися дислокації тієї системи ковзання, в якій дотичні напруження максимальні. Пластичне деформування відбувається, коли дотичні напруження досягають критичної сдвигової напруги близької до границі текучості.

Теоретично напруга, необхідна для руху дислокацій в ідеальній решітці, яке називають напругою Пайерлса, в залежності від ширини дислокації W обчислюється за формулою

$$\tau_0 = G \frac{2b}{W} e^{-2\pi \frac{W}{b}}, \quad (5.6)$$

де G – модуль зсуву;

b – вектор Бюргерса.

Розрахунки і експерименти показали, що для чистих металів з гранецентрованими кубічними (ГЦК) гратами напруга Пайерлса дуже мала. Отже, рух дислокацій не обмежуватимуть тертям об грати, а взаємодією з полями пружних напружень інших дислокацій і дефектів кристалічної будови.

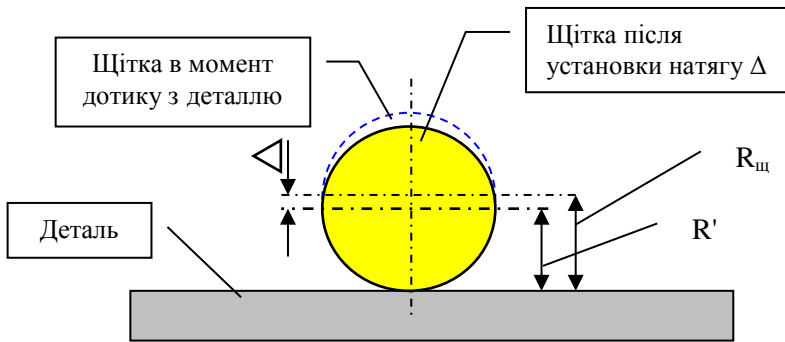
Різання являє собою пластичну деформацію з високою швидкістю (10^3 – 10^6 с⁻¹) і великими тисками на поверхню оброблюваного металу (до 200 кгс/мм²), високою температурою, градієнтом напружень і деформацій в зоні обробки.

Механізм гальмування дислокацій залежить від швидкості їх руху і чинної напруги. При низьких швидкостях (до 10^2 – 10^3 см/с) рух дислокацій має термічно активований характер. Напруга пластичної течії визначається взаємодією дислокацій зі стопорами – перешкодами їх руху, напри-

клад, за механізмом Орована. При більш високих швидкостях руху дислокацій їх гальмування, а отже, і зміцнення деформованого матеріалу визначається взаємодією рухомих дислокацій з кристалічною решіткою.

Процес обробки поверхні металевими щітками можна розглядати як суму елементарних процесів дряпання. У свою чергу процес дряпання можна вважати подібним процесу різання з негативним переднім кутом.

До початку обертання щітки ворсинка знаходиться під дією натягу Δ , рівень якого залежить від величини переміщення щітки до оброблюваної поверхні, рис. 5.2.



$R_{щ}$ - радіус щітки; $R'_{щ}$ - радіус щітки в місці контакту з деталлю після установки натягу Δ .

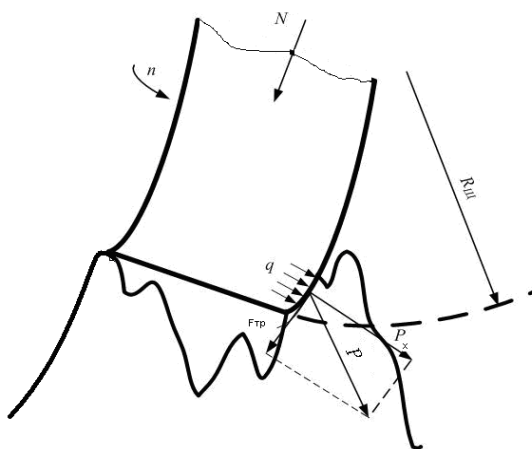
Рисунок 5.2 - Схема установки щітки з натягом Δ

При обертанні з'являється сила P , яка є рівнодіючою сил, що виникають в результаті контакту бічної поверхні ворсинки з мікровиступами. Далі ця сила зростає до величини сили тертя $F_{тр}$ ворсинки о мікровиступ, після чого починає ковзати по напрямку до вершини, рис. 5.3.

Просування кінця ворсинки уздовж оброблюваної поверхні деталі стане можливим, коли сколювальні напру-

ги P_x досягнуть межі міцності металу, і тоді ворсинка почне свою дряпаючу дію. Одночасно з підняттям вгору ворсинка переміщається вперед, пластично деформуючи метал і витісняючи його вгору, вперед і в сторони. Її підняття вгору обумовлено зростанням опору деформованого об'єму внаслідок зміцнення. Ворсинка перестане підніматися і почне наносити подряпину, коли в деформуємому обсязі буде досягнута максимальна ступінь деформації. В процесі дряпання може виникнути на кінці ворсинки наріст. Від наросту режим дряпання змінюється, глибина подряпини різко зменшується. Потім в подряпину потрапляє наступна ворсинка металевій щітки і процес повторюється.

Теоретичне обґрунтування обробки (активізації) поверхні металу металевими щітками підтверджується дис-



N – навантаження, яке діє на голку; $R_{щ}$ – радіус щітки;
 n – обороти щітки; q - питоме навантаження, що діє в зоні контакту голки і мікрорівня;
 $F_{тр}$ – сила тертя ворсинки о мікрорівень; P_x – сколююча напруга

Рисунок 5.3 - Схема утворення подряпини

локаційними уявленнями про різанні металів. Навантаження, що діє на деталь, досягає найбільшої величини на поверхнях в місцях контакту з ріжучим інструментом. Отже, можна припустити, що перші дислокації почнуть зароджуватися з поверхневих джерел типу Франка-Ріда або Фішера, оскільки на поверхневих джерелах дислокації зароджуються набагато легше, ніж на джерелах, розташованих в обсязі деформованого матеріалу. Наприклад, при дряпанні кременистого заліза смуги ковзання починаються від поверхні подряпини і мають велику протяжність вглиб металу. Іншим експериментальним підтвердженням переважачого впливу поверхневих джерел може служити картина розподілу смуг ковзання в жароміцних сплавах ХН55ВМТФКЮ, ХН56ВМКЮ, ЖС6КП і електротехнічної сталі 3414 після їх обробки різанням. У цих матеріалах розміри зерен рівні 0,32-0,45 мм і більше глибини зміцнення, тобто глибини проникнення дислокацій в поверхневий шар. Отже, межі зерен, які також є потенційними джерелами дислокацій в об'ємі деформованого металу, що не беруть активної участі в генеруванні нових дислокацій.

Утворені нові дислокації зміцнюють матеріал і змінюють його фізико-механічні характеристики. Збільшення щільності дислокацій в металі приводить до збільшення його твердості, а твердість деформованого тіла пропорційна середній напрузі, що діяла в процесі деформації. У свою чергу, з теорії дислокацій слідує, що напруга деформування при різних механізмах зміцнення пропорційна квадратному кореню з щільності дислокацій:

$$\sigma = \frac{Gb}{k} \sqrt{\rho}, \quad (5.7)$$

где G – модуль зсуву;

b – вектор Бюргерса;

$k = 3-5$ – чисельний множник;

ρ – щільність дислокацій.

Відповідно твердість зміцненого металу HV і ступінь наклепу N можуть бути безпосередньо пов'язані з щільністю дислокацій

$$HV = \frac{Gb}{K} \sqrt{\rho}, \quad (5.8)$$

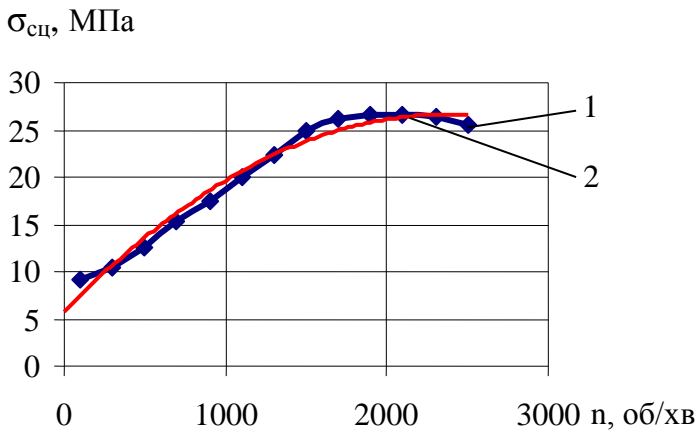
$$N = \frac{HV - HV_{ucx}}{HV_{ucx}} = \frac{K_{ucx}}{K} \sqrt{\frac{\rho}{\rho_{ucx}}} - 1, \quad (5.9)$$

де K - коефіцієнт, що залежить від модулів пружності і зсуву, характеристика розподілу зсувів форми ліній і величини кристалів.

Експериментальні вимірювання підтвердили існування параболічного зв'язку між щільністю дислокацій і мікротвердістю, близькою до виразу (5.8), для міді та алюмінію, оброблених різанням. Від щільності та характеру розподілу дислокацій залежить рівень залишкових напружень, величина прихованої енергії в обробленому матеріалі і інші характеристики якості поверхневого шару.

На рис. 5.4 представлена залежність міцності зчеплення газополуменевого покриття ПГ-10Н-01, напиляного на основу зі сталі 45, від швидкості обертання металевої щітки.

Зі збільшенням швидкості обертання щітки міцність зчеплення збільшується, причому в інтервалі швидкостей обертання від 200 до 1500 об / хв інтенсивніше і при оборотах 1900-2000 об / хв досягає максимуму, після чого починає незначно знижуватися. В результаті апроксимації експериментальної залежності отримуємо поліноміальну функцію і коефіцієнт кореляції $R = 0,9793$. Отриману залежність (5.10) назвемо рівнянням прогнозування міцності зчеплення напиляного покриття з основою в залежності від оборотів металевої щітки.

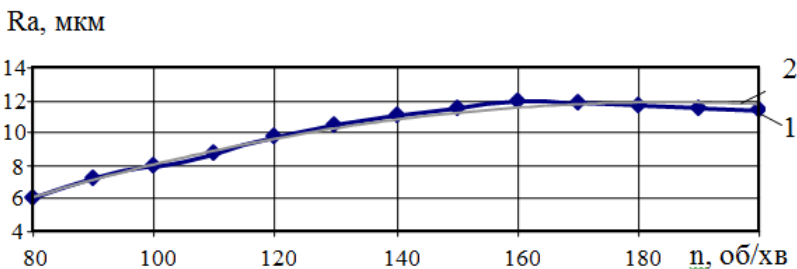


1 – експериментальна; 2 – апроксимуюча криві

Рисунок 5.4 – Залежність міцності зчеплення газополуменевого покриття ПГ-10Н-01 з основою зі сталі 45 від швидкості обертання щітки

$$\sigma_{сц} = 4 \cdot 10^{-6} \cdot n^2 + 0,018n + 5,73 \quad (5.10)$$

У свою чергу шорсткість напилюваної поверхні також залежить від швидкості обертання щітки. Результати експериментальних досліджень представлені на рис. 5.5.



1 – експериментальна; 2 – апроксимуюча крива

Рисунок 5.5 – Залежність шорсткості напилюваної поверхні сталі 45 від швидкості обертання металевої щітки

З аналізу експериментальної кривої видно, що зі збільшенням швидкості обертання щітки шорсткість оброблюваної поверхні підвищується до $R_a = 10-12$ мкм (при струменево-абразивній обробці $R_a = 6-8$ мкм) при оборотах 150-160 об/хв і встановленому натязі $N = 3$ мм. Потім знижується, що можна пояснити зменшенням глибини проникнення голок. Апроксимуємо експериментальну криву, отримуємо рівняння 2-го ступеня:

$$R_a = -7 \cdot 10^{-4} \cdot n^2 + 0,2287n - 8,2308. \quad (5.11)$$

Коефіцієнт кореляції дорівнює $R = 0,9934$.

На рис. 5.6 представлена залежність міцності зчеплення напиленого покриття від шорсткості поверхні основи.

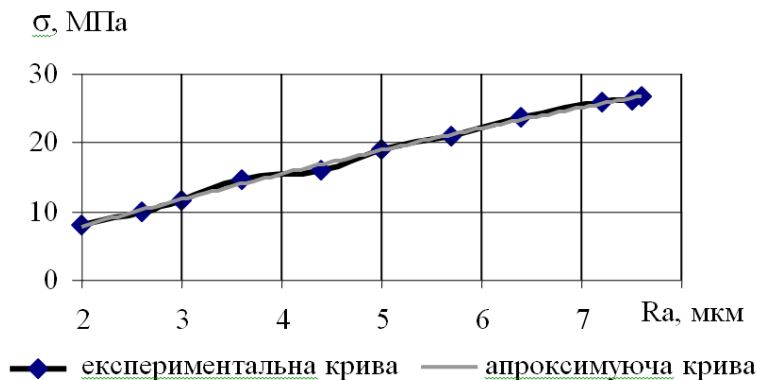


Рисунок 5.6 – Залежність міцності зчеплення напиленого покриття з основою від шорсткості поверхні

Рівняння апроксимуючої кривої

$$\sigma_{сч} = -0,1447R_a^2 + 4,8219R_a - 1,5813, \quad (5.12)$$

Величина коефіцієнта кореляції $R = 0,9953$. З рис. 5.6 видно, що зі збільшенням шорсткості напилюваної поверхні міцність зчеплення покриття з основою збільшується. Можна припустити, що максимальна міцність зчеплення буде обмежуватися міцністю газополум'яного покриття.

Оцінка мікротопографії поверхні проводилася за двома граничними режимами щіточної обробки, що охоплюють весь можливий діапазон зміни вихідних параметрів (табл. 5.1).

Таблиця 5.1 – Режимы щіточної обробки поверхні

Вид обробки	$d_{ш}$, мм	N, мм	D, мм	$l_{ш}$, мм	n, об/хв	P, шт/см ²	$V_{под}$, м/с
«М'який» режим	0,35	0,5	150	60	60	20	0,1
«Жорсткий» режим	0,8	3,00	150	30	150	40	0,1

Обробка по «м'якому» режиму забезпечила отримання мінімального рівня шорсткості, по «жорсткому» – максимального. Шорсткість оцінювалася параметрами R_a , R_t , RS_m , R_z , R_{mr} (ГОСТ 2789-73 і стандарт ISO 4287-1997), які визначалися на профілографі–профілометрі «Taylor/ Hobson» (рис. 5.7 - 5.8), де R_a – середнє арифметичне відхилення профілю, R_t – середнє квадратичне відхилення профілю, R_z - висота нерівностей по десяти точках, RS_m – середній крок нерівностей, R_{mr} – крок профілю по вершинах. Профілі поверхні вимірювалися уздовж осі зразка. Відносна опорна довжина (L) - 20 мм, базова довжина – 8 мм.

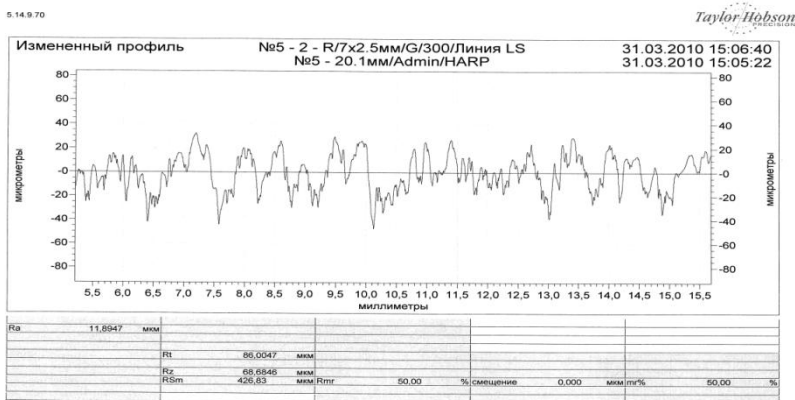
З рис. 5.7-5.8 видно, що при «жорсткій» обробці відбувається відповідне збільшення параметрів R_a , R_t , R_z , а параметри Q_a – середнє арифметичне значення кута нахилу профілю та Q_q – середнє квадратичне значення кута нахилу

профілю залишаються незмінними. Значення S_m вказують на те, що при незмінних Q_a , Q_q нерівності стають більшими і більш протяжними.

Особливо цікавим є фіксація ефекту відтискування матеріалу при жорсткій обробці. Цей ефект характеризується зростанням параметрів R_a , R_t , R_z в зоні контакту у напрямку руху щітки.

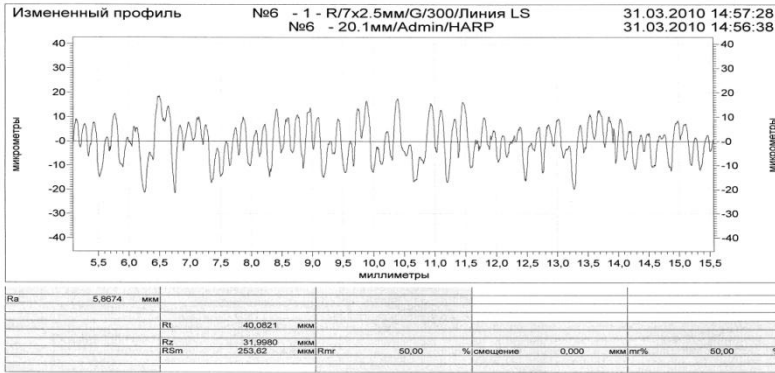
Дані дослідження дозволяють сформулювати наступну методичку дослідження мікротопографії поверхні, залежність її параметрів від обробки поверхні щітками зі змінними параметрами $d_{и}$, N , $l_{и}$, n , P :

- мікротопографії поверхні характеризується параметрами R_a , R_z , R_t , Q_a , Q_q ;
- для характеристики висотних параметрів профілю необхідно використовувати параметри R_a , R_z , R_t ;



Параметри висотні, мкм: $R_a = 11,89$; $R_z = 68,7$; $R_t = 86,0$;
 крокові, мкм: $S_m = 426,83$; змішані: $R_{mr}=50$

Рисунок 5.7 - Профілограми обробленої поверхні при «жорсткій» обробці щітковим інструментом



Параметри висотні, мкм: $R_a = 5,9$; $R_z = 31,0$; $R_t = 40,1$;
крокові, мкм: $S_m = 253,6$; змішані: $R_{mr}=50$

Рисунок 5.8 - профілограми обробленої поверхні при «м'якій» обробці щітковим інструментом

– для характеристики мікрорельєфу профілю та опосередкованої характеристики крокових параметрів профілю слід використовувати параметри Q_a , Q_q .

Результати даного дослідження можна використовувати при розробці технології отримання регламентованої мікротопографії поверхні деталей. Параметри R_p , $R_{вист}$, $R_{вп}$, θ , V розраховувалися за методиками. Висота згладжування R_p визначалася як відстань від лінії виступів до середньої лінії. Середні радіуси виступів $R_{вист}$ і впадин $R_{вп}$ визначалися за формулами 5.13:

$$R_{вист} = \frac{9R_a^2 S_m^2}{128 \left(R_p - 0,5R_a \right)^3}, R_{вп} = \frac{9R_a^2 S_m^2}{128 \left(0,5R_a - R_p \right)^3} \quad (5.13)$$

Середній кут нахилу бічної стінки профілю розраховували за формулою 5.14:

$$\theta = \arct \frac{2R_{\max}}{S}, \quad (5.14)$$

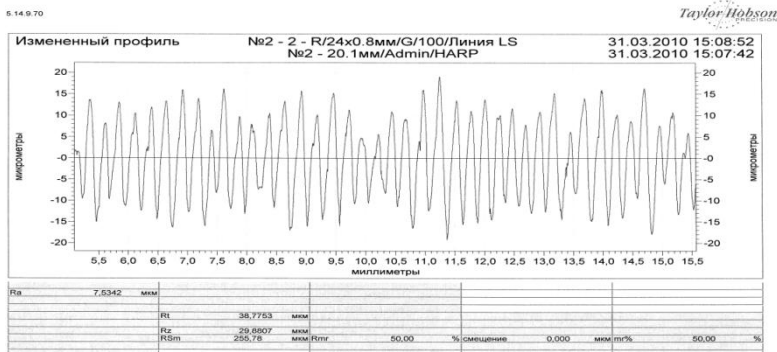
де R_{\max} – найбільша висота профілю;
 S – середній крок виступів профілю щодо опорної довжини.

Параметри опорної кривої v , b_1 вираховували за формулою 5.15:

$$v = 2t_{cp} \frac{R_p}{R_a} - 1; \quad b_1 = t_{cp} \left(\frac{R_{\max}}{R_p} \right)^V, \quad (5.15)$$

де t_{cp} – відносна опорна довжина профілю на рівні середньої лінії.

Для порівняння якості підготовки поверхні під наплення представлена мікротопографія поверхні (рис.5.9) після струменево-абразивної обробки (розмір часток електрокорунду 0,5-0,8 мм, тиск стисненого повітря 0,5 МПа).



Параметри висотні, мкм: $R_a = 7,53$; $R_z = 29,88$; $R_t = 38,77$;
 крокові, мкм: $S_m = 255,78$; змішані: $R_{mr} = 50$

Рисунок 5.9 – профілограми поверхні після абразивоструменної обробки

Встановлено, що збільшення $d_{и}$ (при $l_{и}=\text{const}$) призводить до зростання шорсткості оброблюваної поверхні, однак зі збільшенням натягу шорсткість поверхонь, оброблених інструментами з різним діаметром голок, зменшується (рис. 5.10). Це пояснюється зростанням пластичних деформацій. Вибір вільної довжини голок впливає на вибір натягу. Встановлено, що збільшення натягу при збільшенні довжини голок знижує ефективність обробки поверхні і призводить до зростання напруги вигину в голках. Поряд з цим, при рівних натягах (рис. 5.10, криві 1 і 2) щітка з більшою довжиною голок забезпечує отримання меншої шорсткості поверхні, що пояснюється зменшенням глибини проникнення в результаті збільшення довжини голок.

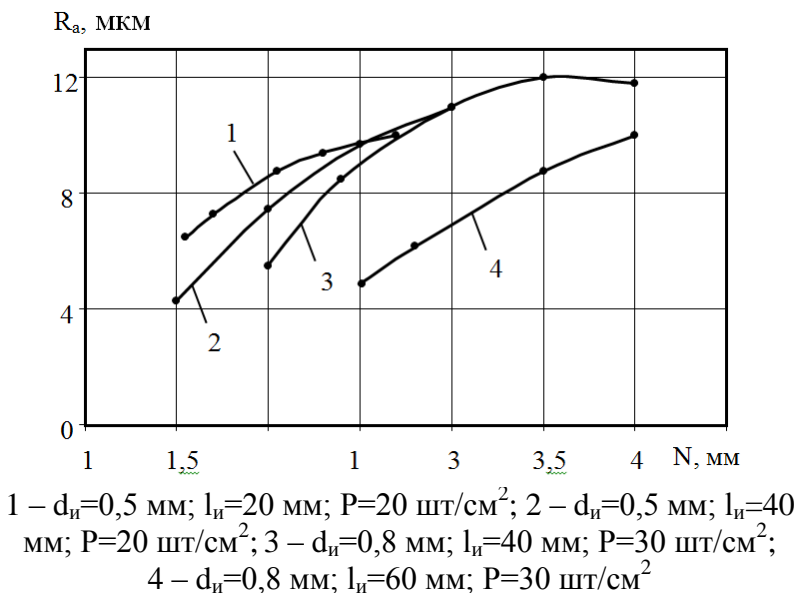


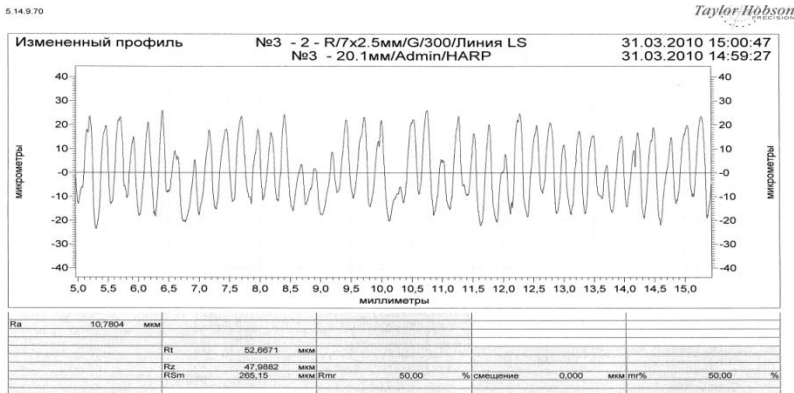
Рисунок 5.10 – Вплив натягу на висоту мікронерівностей R_a при різних $d_{и}$ и $l_{и}$ голок ($n=150$ об / хв)

Зменшення шорсткості спостерігається при досягненні швидкості щітки $n > 150-160$ об / хв. Це пояснюється тим, що з ростом швидкості обробки збільшується віджаття голок, що призводить до зменшення їх впровадження в оброблювану поверхню і зниження шорсткості.

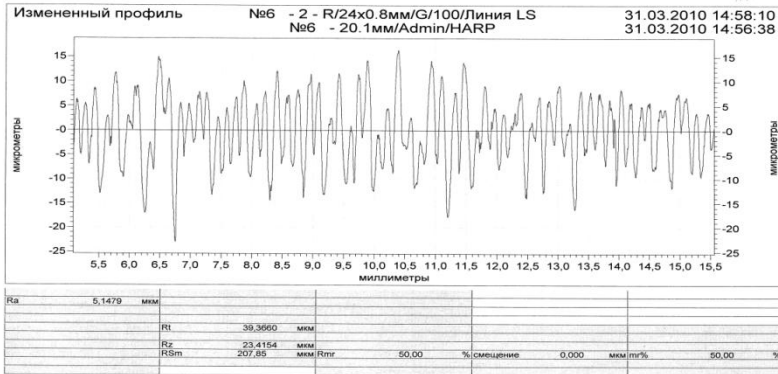
Збільшення щільності розташування голок (P) істотного впливу на шорсткість оброблюваної поверхні не здійснює.

Зі збільшенням натягу шорсткість поверхні зростає в результаті збільшення глибини впровадження голок. Збільшення натягу понад оптимальних значень призводить до зменшення глибини впровадження голок. Аналіз отриманих профілограм (рис. 5.11) показав, що максимальна величина $R_z=48$ мкм отримана при швидкості обертання щітки 150 об/хв, а мінімальна величина $R_z=23,4$ мкм отримана при швидкості обертання щітки 200 об/хв.

З огляду на те, що характер мікрорельєфу, отриманий щітковою обробкою, залишається одним і тим же при зміні параметрів процесу, можна вважати, що якісно картина формування шорсткості поверхні відображена правильно.



а



б

Швидкість обертання: а – $n = 150$ об/хв; б – $n = 200$ об/хв.

Рисунок 5.11 – Профілограми поверхні основи після щіткової обробки ($d_{ш}=0,8$ мм; $S_{щ}=1,2$ м/хв; $N_{щ}=3$ мм)

Порівняння значень міцності зчеплення покриттів, нанесених газополуменевим напиленням на поверхні, підготовлені струменево-абразивним методом (17-20 МПа) і щітковою обробкою (26-28 МПа), виконані випробуванням на зрушення, показали можливість використання останньої в технології відновлення циліндричних поверхонь деталей. Оскільки для щіткової обробки можна використовувати ручний електричний або пневматичний інструмент цей метод може знайти широке застосування в ремонтному виробництві. Промисловістю випускається досить велика номенклатура металевих щіток.

2. Високошвидкісне напилення

На рис. 5.12 представлена схема розташування різних способів газотермічного напилення залежно від швидкості напилюваних частинок на основу.

Аналізуючи представлені дані видно, що в останні

роки з'явилися і отримують свій розвиток нові способи газотермічного напилення: надзвукове газополуменеве напилення, надзвукове плазмове напилення, надзвукове газодинамічне напилення.

При використанні спеціальних плазмотронів із профільованими каналами сопел або при плазмовому напиленні в динамічному вакуумі (способи VPS (Vacuum Plasma Spray) та LP PS (Low Pressure Plasma Spray)) можна отримати надзвукові швидкості плазмового струменя.



Рисунок 5.12 – Хронологічна залежність швидкості частинок порошку для деяких способів газотермічного напилення

При контакті прискорених частинок матеріалу, що напилюється, з поверхнею вони зчеплюються з нею внаслідок металургійної, механічної та інших видів взаємодій.

Найбільш характерні показники якості покриття

для плазмового напилення наведені в табл. 5.2.

Таблиця 5.2 – Характерні показники якості покриття, отриманого при плазмовому напиленні (за даними фірми «Sulzer Metco»)

Параметр	Матеріал покриття	Дозвукове плазмоне напилення	Напилення в динамічному вакуумі (способи VPS/LPPS)
Температура плазмового струменя, °С		12 000-16 000	10 000-80 000
Міцність зчеплення, МПа	Чорні метали	21-34	400-750
	Кольорові метали	14-48	
	Керамічні матеріали	21-41	25-55
	Карбіди	55-69	60-100
Пористість, %	Чорні метали	5-10	1-3
	Кольорові метали	5-10	1-3
	Керамічні матеріали	5-10	2-5
	Карбіди	5-10	2-5
Рекомендовані товщини шару покриття, мм	Чорні метали	0,4-2,5	0,05-10
	Кольорові метали	0,4-5,0	0,05-10
	Керамічні матеріали	0,4-5,0	0,05-5
	Карбіди	0,4-5,0	0,05-10

Одним із засобів, що дозволяє підвищити якість покриття, особливо з матеріалів, які можуть розкладатися, окиснюватися, азотуватися, є плазмове нанесення покриття в камері з контрольованою за складом і тиском атмосферою.

З цією метою використовують також захисні соплові насадки, що утворюють закритий простір між розпилювачем та виробом, заповнений плазмоутворювальним або захисним газом. Найдосконалішим є плазмове нанесення покриття в динамічному вакуумі – методи VPS та LPPS. Витікання плазмового струменя відбувається у вакуумну камеру, з якої безперервно відкачуються робочі гази. Шви-

дкість витікання плазмового струменя перевищує швидкість звуку в два-три рази, збільшується швидкість частинок, що напилюються, до 800 м/с. Отримане покриття має міцне зчеплення з основним матеріалом деталі.

Новим у розвитку газополуменевого напилення є створення установок для високошвидкісного напилення.

Спосіб отримання газополуменевого покриття з використанням струменя надзвукової швидкості в світовій практиці отримав назву "High Velocity Oxygen Fuel" (HVOF) або "Високошвидкісне киснево-паливне напилення".

Для напилення використовують надзвуковий газовий струмінь, який генерується спеціальним пальником з камерою прискорення ракетного типу при спаленні ацетилену, пропану, водню, пропілену або метил-ацетиленпропану при тиску 0,6- 0,8 МПа у суміші з киснем під тиском до 1,2 МПа.

Швидкість струменя продуктів згоряння при використанні способу HVOF сягає від 1350 до 2880 м/с, швидкість частинок матеріалу, що напилюється – від 300 до 1000 м/с, а температура горіння – 3100 °С.

Для надзвукового напилення, в якому замість кисню як окисник використовується стиснуте повітря, застосовується спосіб за аналогією до HVOF, що має назву "Високошвидкісне повітряно-паливне напилення" або HVOF (High Velocity Air Fuel).

Показники якості покриття, які можна отримати при газополуменовому напиленні, наведені в табл. 5.3.

Паливо при високошвидкісному газополуменовому напилюванні спалюють в пальниках при підвищеному тиску, що забезпечують критичний перепад тисків на надзвукових соплах (рис. 5.13 а). Цей метод відрізняється від традиційного газополум'яного напилення, при якому паливо спалюється в зовнішньому факелі при атмосферному

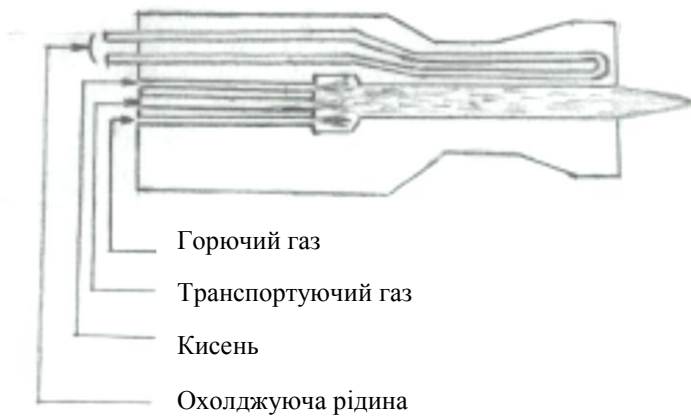
тиску (рис. 5.13 б).

Таблиця 5.3 – Характерні показники якості покриття, отриманого при газополуменовому напиленні (за даними фірми «Sulzer Metco»)

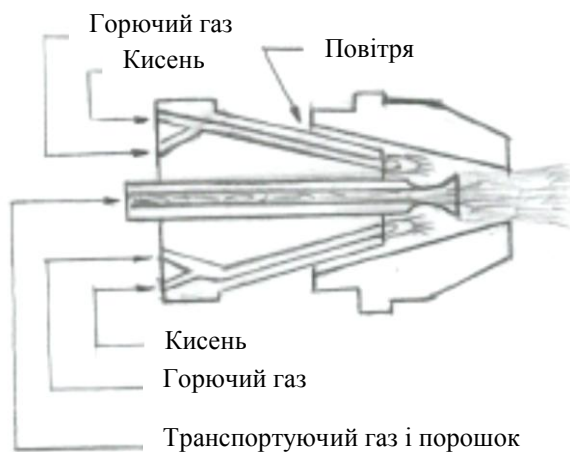
Параметр	Матеріал покриття	Дозвукове напилення		Надзвукове напилення (HVOF)
		дротяного матеріалу	порошкового матеріалу	
Температура полум'я, °С		3000	3000	2000-3000
Міцність зчеплення, МПа	Чорні метали	14-28	14-21	48-62
	Кольорові метали	7-34	7-34	48-62
	Самофлюсівні сплави	-	До 83	до 62
	Керамічні матеріали	-	14-34	-
Пористість, %	Керміди	-	34-48	до 83
	Чорні метали	10-15	10-15	2-5
	Кольорові метали	10-15	10-15	2-5
	Самофлюсівні сплави	-	-	до 2*
Рекомендована товщина шару покриття, мм	Керамічні матеріали	-	5-Ю	-
	Керміди	-	10-15	2-5
	Чорні метали	0,5-5,0	0,5 -2,0	0,6-2,5
	Кольорові метали	0,5-5,0	0,5-5,0	0,6-2,5
	Самофлюсівні сплави	-	0,4-2,5	0,4 -3,8
	Керамічні матеріали	-	0,4-0,8	-
	Керміди	-	0,4-0,8	0,4-5,0

* – неоплавлене покриття

Високошвидкісне газополум'яне напилення по праву вважається найбільш сучасним з технологій напилення. У країнах Європи і Північної Америки високошвидкісне напилення практично витіснило гальваніку і методи вакуумного напилення в багатьох галузях. Твердосплавні покриття, нанесені методами високошвидкісного напилення, за всіма статтями перевершують гальванічні покриття, процес створення яких визнаний надзвичайно канцерогенним.



а



б

Рисунок 5.13 – Конструктивні особливості пальників при різних способах газотермічного напильвання:
 а) при надзвуковому газополуменовому напильванні;
 б) при традиційному газополуменовев напильванні

У табл. 5.4 приведена скорочена характеристика деяких зарубіжних установок для високошвидкісного газополуменевого напилення.

Таблиця 5.4 – Характеристики установок для високошвидкісного газополуменевого напилення

Матеріали		Intelli-Jet	JP -5000	DJ2700	Top Gun
Кислород, м ³		-	60	18	21
Сжатый воздух, м ³		300	-	23	-
Паливо	Вид	Пропілен	Гас	Пропілен	Пропілен
	Витрата, кг	30	21	17	16
Азот, м ³		0,96	1,2	1,08	1,02
Вода на охолодження, м ³		-	1	0,72	0,72

Високошвидкісне газополуменеве напилення вважається найбільш сучасним з технологій напилення. У країнах Європи і Північної Америки високошвидкісне напилення практично витіснило гальваніки і методи вакуумного напилення в багатьох галузях. Твердосплавні покриття, нанесені методами високошвидкісного напилення, за всіма статтями перевершують гальванічні покриття, процес створення яких визнаний надзвичайно канцерогенним.

Надзвукове плазмове напилення підрозділяється на струменеве і каналове. При струменевому високошвидкісному надзвуковому напиленні частки порошку подаються в струмінь надзвукового потоку на виході з каналу і при підльоті до основи мають розкид за швидкостями від нуля до максимальної швидкості на осі струменя. У покритті, при багаторазових проходах, досягається шарувата структура – від щільної (пористість менше 1%) до звичайної (порис-

тість від 1% до 6%).

Значно кращі результати по щільності і міцності зчеплення з основою досягаються при «каналовому» надзвуковому плазмовому напиленні. В цьому випадку частинки порошку вводяться в потік до зрізу сопла і рухаючись по каналу нагріваються, а потім виходять в струмінь. Низька швидкість частинок порошку при такому покритті практично не реалізується, і швидкості польоту частинок порошку приймають тільки близькі до максимальних значення.

Відомий також метод багатодугового плазмового напилення, що володіє певними перевагами перед наведеними вище способами, з точки зору вигідності електроживлення плазматронів.

Газодинамічне напилення покриття. Формування металевого покриття газодинамічним способом засновано на закріпленні твердих металевих частинок, які мають велику кінетичну енергію, на поверхні, що напилюється, в процесі високошвидкісного удару. Для нанесення покриття цим способом використовується обладнання, конструкція якого забезпечує створення надзвукового газового струменя і введення в нього частинок порошкового матеріалу і їх прискорення до швидкості, необхідної для формування покриття.

Відсутність високих температур, характерних для наведених вище газотермічних методів нанесення покриття, дала підставу авторам цього методу назвати метод "холодне газодинамічне напилення" (ХГН). Термін "холодне" введено для того, щоб підкреслити, що температура частинок значно менша за їх температуру плавлення, а термін "газодинамічне" вказує на першорядну роль високої швидкості частинок при формуванні покриттів.

На рис. 5.14 наведено схему установки для ХГН, розробленої Інститутом теоретичної та прикладної механіки (м. Новосибірськ) та фірмою "Ktech Corp".

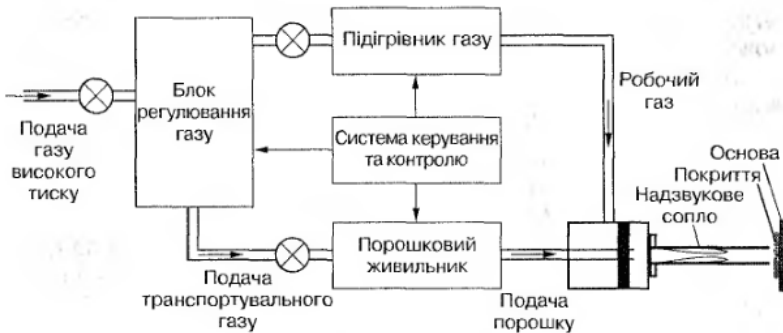


Рисунок 5.14 - Схема установки для холодного газодинамічного напilenня

Метод ХГН реалізують за допомогою надзвукового сопла (сопла Лаваля), яке дозволяє отримати швидкість струменя з числом Маха $M \approx 2-4$. Як прискорювальний газ використовується суміш повітря з гелієм при загальному тиску у форкамері $P_3 = 2,0$ МПа. Змінюючи склад суміші від чистого повітря до чистого гелію, можна збільшувати швидкість частинок від 200 до 1200 м/с. Температура підігрівання газу становить 100–600 °С.

Практика використання газодинамічного способу нанесення покриття показала, що, використовуючи надзвуковий струмінь газу, який має температуру 100–600 °С, можна отримати покриття з більшості металів.

Частинки порошкового матеріалу в процесі їх прискорення не нагріваються вище, ніж 200–300 °С і перебувають в твердому стані та практично не окислюються при нанесенні покриття.

Формування покриття з твердих частинок не викликає високотемпературного нагрівання основи, що забезпечує низький рівень залишкових напружень у покриттях, високу адгезію покриття і можливість нарощувати досить великі товщини, причому матеріал основи, як і матеріал частинок, практично не окислюється.

Продуктивність способу досягає рівня 3–15 кг/год, товщина покриття – 250 мкм за один прохід.

Розглянуті вище нові високошвидкісні способи дозволяють значно розширити можливості традиційного газотермічного напилення покриттів, використововуваного при відновленні деталей. Отримані покриття характеризуються більш високою адгезією, низькою пористістю, можуть наноситися на вироби складної форми, виготовлені практично з будь-яких металів, а також на кераміку і скло.

Контрольні питання

1. Яка мета інтегрування газотермічних методів напилення з іншими методами обробки поверхні?
2. Що являє собою металева щітка, застосовувана при газополуменеве напилювання?
3. Що дає застосування щіткової обробки замість традиційної струменевої обробки абразивом?
4. Який характер має залежність міцності зчеплення газопламенного покриття з основою від швидкості обертання щітки?
5. Який характер має залежність шорсткості напиляємий поверхні від швидкості обертання щітки?
6. Яку висоту нерівностей Rz забезпечує щіткова і абразивоструйна обробки?
7. Який вплив робить величина натягу на висоту мікронерівностей?
8. Суть надзвукового плазмового напилення
9. Суть способу отримання покриття з використанням струменя надзвукової швидкості?
10. У чому відмінність способів "High Velocity Oxygen Fuel" (HVOF) і «High Velocity Air Fuel» (HVOF)?
11. Яка суть процесу холодного газодінамічного напилення?

ЛЕКЦІЯ 6

СВС-ПРОЦЕСИ В ТЕХНОЛОГІЯХ ЗМІЩЕННЯ І ВІДНОВЛЕННЯ ДЕТАЛЕЙ МАШИН НАПЛАВ- ЛЕННЯМ І ГАЗОТЕРМІЧНИМИ СПОСОБАМИ НА- ПИЛЕННЯ ПОКРИТТІВ

- 1. Історія відкриття і розвитку СВС-процесів.*
- 2. Технології і матеріали, що застосовуються для СВС-процесів.*

1. Історія відкриття і розвитку СВС-процесів

У 1967 році група вчених (Мержанов О.Г., Боровинська І.П. і Шкіря В.М.) Наукового Центру Академії наук СРСР в м. Чернооголовка, Московської області, досліджуючи експериментальні моделі горіння конденсованих систем, відкрила нове явище, що отримало назву «твердого полум'я» (офіційна назва «Явище хвильової локалізації автотогоальмуючих твердофазних реакцій»). Тверде полум'я, яке було для того часу досить незвичайним явищем, являє собою процес, в якому вихідні реагенти, проміжні і кінцеві продукти залишаються в твердому стані протягом всього процесу перетворення. Тверде полум'я дозволило отримувати цінні тугоплавкі матеріали. Ця обставина привела до створення нового високоефективного методу їх виробництва – високотемпературного синтезу (СВС). Дослідження СВС-процесів відкрили нові горизонти пізнання і практичних застосувань.

Можна виділити наступні основні етапи розвитку СВС-технологій: 1967-1972 р.р. первинні дослідження, які вивчають механізми процесів, проводилися невеликою групою вчених, що працюють у відділі макроскопічної кінетики Відділення Інституту хімічної фізики АН СРСР;

1972-1980 р.р. ініціативні дослідницькі роботи. Виникнення творчих груп в Томську, Єревані, Києві та інших

містах СРСР. Проведення в Відділенні ІХФ АН СРСР перших технологічних робіт з отримання порошків, компактних матеріалів і виробів, нанесення покриттів, з'єднання деталей. Перша промислова реалізація СВС-технології на Кировоканском заводі високотемпературних нагрівачів;

1980-1992 р.р. відповідно до Постанови Ради Міністрів СРСР про прискорення впровадження СВС-технологій в народне господарство країни, був створений Міжгалузевий науково-технічний комплекс «Термосінтез» та Інститут макрокінетики РАН як головна організація. На 15 підприємствах країни створені дослідно-промислові ділянки. Організовано проведення досліджень з технічної та економічної ефективності.

З 1980 р починаються роботи по СВС за кордоном: в США, Японії, Польщі, Китаї і ряді інших країн, так за даними Ісмаїл-ІНФОРМ, в даний час роботи по СВС ведуться в 47 країнах, в тому числі і Україна. У США – це створення енергетично стимульованих СВС процесів з використанням джоулеа і СВЧ-нагрівання, постановка і вирішення низки завдань математичного моделювання процесів зі складним фізико-хімічним механізмом; в Японії – створення функціонально-градієнтних СВС-матеріалів, вирощування монокристалів з тугоплавких безкисневих СВС-продуктів, відцентрова технологія виробництва труб великого діаметру, газостатичне ущільнення СВС-продуктів; в Польщі – розробка пластичної СВС-кераміки. У Китаї на 10 підприємствах із застосуванням СВС-технологій виробляють труби зі зносостійкими покриттями для транспортування абразивних середовищ в гірничодобувній і цементній промисловості, а в Іспанії запущено перше в світі автоматизоване виробництво керамічних СВС-порошків.

З 1992 р в зв'язку з розпадом системи МНТК "Термосінтез" централізованого керівництва роботами не стало.

Організації стали працювати в умовах ринкових відносин за спеціальними замовленнями, контрактами, грантам, з ініціативи Ісмаїл регулярно проводяться Міжнародні симпозиуми «високотемпературний синтез», видається Міжнародний журнал з такою ж назвою (Allerton Press, N-Y, USA). В даний час на території колишнього СРСР найбільш активно діють: Інститут структурної макрокінетики і проблем матеріалознавства (Ісмаїл), РАН, м. Черноголовка, Росія, Відділ Структурної Макрокінетики, Томський науковий центр, Сибірське Відділення РАН, Томськ, Росія, Інженерний центр СВС, м. Самара, Росія, Інститут проблем матеріалознавства, м. Київ, Україна, Інститут порошкової металургії, м. Мінськ, Білорусь, Інститут проблем горіння, м. Алма-Ата, Казахстан, Інститут хімічної фізики в Вірменії та Інститут металургії в Грузії.

2. Технології і матеріали, що застосовуються для СВС-процесів.

Метод СВС дозволяє синтезувати матеріали необхідного хімічного, фазового складів і їх властивостей. Крім цього метод дозволяє здійснювати прямий синтез виробів із заданими розмірами і формою. Для вирішення цих завдань розроблено понад 30 технологічних різновидів СВС, які об'єднані в шість основних технологічних типів – ТТ [9].

ТТ-1 (хімічний синтез). Процес проводиться в герметичних СВС-реакторах, в атмосфері повітря або інертного, або реакційного (азоту, водню, кисню) газу. Продукти мають вигляд спіков, які можуть використовуватися в якості напівфабрикатів або перероблятися в порошки для порошкової металургії і газотермічних способів нанесення покриттів.

ТТ-2 (СВС-спікання). При цьому типі технології з реакційної шихти попередньо виготовляють виріб заданої

форми і СВС-процес проводять так, щоб зберегти цю форму і розміри. Два різновиди процесу отримали застосування: синтез нитридної кераміки при високих газових тисках і синтез карбідних, боридних, силіцидних і інтерметалевих матеріалів у вакуумі з попередньою термічною обробкою шихти.

ТТ-3 (силове СВС-компактування). Процес СВС проводять в спеціальній прес-формі, і гарячий продукт горіння ущільнюють до безпористого стану. Варіанти різняться способами механічного впливу. Створена серія нових марок твердих сплавів групи синтетичних твердих інструментальних матеріалів з різним поєднанням твердості і міцності.

ТТ-4 (СВС-лиття). У цьому технологічному типі використовують висококалорійну шихту (алюмотермічну суміш), в результаті горіння якої досягаються температури вище температури плавлення продуктів. Продукт утворюється у вигляді розплаву, до якого застосовують відомі металургійні операції: лиття в форму, відцентрове лиття, кристалізацію злитків, наплавку і ін. Литі однорідні і неоднорідні СВС-матеріали знаходять широке застосування в вигляді литих порошків, деталей з твердосплавними наплавками, а також метало - і мінералокерамічні труби. Найбільш поширені керметні фази – карбіди, бориди і силіциди Cr, W, Mo і Nb; керамічні – оксид алюмінію. Технологія дозволяє здійснювати лиття тугоплавких матеріалів при температурах 3300-3800 К.

ТТ-5 (СВС-зварювання). Зварювання СВС застосовується для з'єднання деталей з тугоплавких матеріалів: ніобій, вольфрам, молібден, тантал, графіт і композитів на їх основі між собою і з іншими (більш легкоплавкими) сплавами. Реакційна суміш розташовується в проміжку між сполучними деталями, ініціювання реакції відбувається за рахунок пропускання електричного струму через зварюва-

ні деталі.

ТТ-6 (газотранспортна СВС-технологія). Використовується: при отриманні тонких (5-100 мкм) осаджених покриттів. Оброблювані деталі і газотранспортний агент (йод) вводяться в шихту, що отримується за способом ТТ-1. В результаті газотранспортного процесу, після проходження хвилі горіння, деталь покривається тонким шаром кінцевого продукту. Відпрацьовано деякі процеси нанесення покриттів з хрому або боридів хрому на сталеві деталі, з нітриду титану – на тверді сплави.

Всі шість технологічних типів СВС-технологій побудовані за єдиним принципом. Узагальнена система СВС-технологій представлена на рис. 6.1.



Рисунок 6.1 – Узагальнена схема СВС-технологій

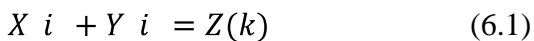
На основі аналізу узагальненої схеми можна зробити висновок: головна особливість полягає в тім, що основна

стадія проводиться в режимі СВС. Технології СВС розрізняються видами вихідної сировини, структури шихти, типами хімічних реакцій і процесів, зовнішніми впливами, морфологією продуктів і способами їх обробки або переробки, призначенням кінцевої продукції.

Необхідно відзначити, що СВС не тільки нова технологія застосування відомих матеріалів, але і можливість створення нових типів матеріалів. Як приклад можна відзначити позитивні результати експериментів з отримання складних оксидних нанопорошків, ниткоподібних кристалів безкисневої кераміки, анізотропної оксидної кераміки, функціонально-градієнтних матеріалів, безкисневих монокристалів та ін.

Технологія СВС є ефективним енерго- і ресурсозберігаючим методом отримання композиційних порошків. Метод заснований на використанні екзотермічного ефекту реакцій взаємодії металів з вуглецем, кремнієм, бором, азотом та ін. Сутність процесу полягає в тому, що після локального ініціювання реакція протікає у вузькій зоні – хвилі горіння, яка переміщається по виробу за рахунок теплопередачі. В якості реагентів застосовуються суміші наступних елементів: металів з неметалами, металів з металами, неметалів з неметалами або їх з'єднань, що виділяють при взаємодії велику кількість тепла.

Загальну схему процесу можна представити в наступному виді:



де $X(i)$ – реагент в твердому стані;

$Y(i)$ – реагент в твердому, рідкому або газоподібному стані;

$Z(k)$ – продукт синтезу (карбіди, бориди, силіциди, нітриди, інтерметаліди і ін.) в конденсованій фазі.

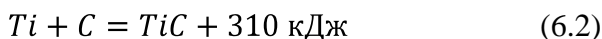
СВС-процес дозволяє синтезувати композиції, отримання яких іншими відомими способами вимагає великих

витрат, складного і дорогого обладнання або взагалі неможливо. Крім того СВС дозволяє отримати багатокомпонентні продукти в одну стадію навіть в системах матеріалів, що значно відрізняються за властивостями.

В інституті порошкової металургії, м. Мінськ більше 25 років ведуться інтенсивні дослідження і розробка технологічних процесів високотемпературного синтезу композиційних порошків. Результати досліджень і створені термодинамічні і фізичні моделі дозволили розробити технології отримання широкого спектру композиційних СВС-порошків типу «металева зв'язка - тугоплавкое з'єднання», в тому числі які не мають аналогів в світі. Як зв'язок використовуються метали, металеві сплави на основі заліза, нікелю, алюмінію і інтерметалідів - Ni_3Al , Fe_3Al , Ti_3Ni , Ti_3Al . Як тугоплавкі сполуки використовують карбіди титану, хрому, кремнію та їх комбінації, а також оксиди алюмінію, титану і хрому.

Основні етапи типової технологічної схеми процесу отримання СВС-порошків: підготовка порошкової шихти, синтез, розмелювання і розсівання по фракціям. При необхідності застосовують механічну активацію реакційної суміші в аттриторі. Дана операція дозволяє зробити взаємодрібнення вихідних порошків і сформувати композиційні частинки з рівномірним розподілом вихідних реагентів за обсягом, а також знижує тепловтрати при синтезі, підвищує активність системи і гомогенність продукту горіння. Синтез в системах з низьким тепловмістом здійснюють із застосуванням попереднього підігріву в печі.

Найбільш популярними є композиції на основі карбіду титану. Це пов'язано з високим екзотермічним ефектом реакції утворення карбіду титану з елементів (6.2), що забезпечує широкий вибір матеріалу зв'язки:



В результаті виділення тепла температура твердих і розплавлених продуктів реакції досягає 2500-3500 К, тому реакція не залежить від зовнішніх джерел нагріву і може поширюватися як хвиля горіння, яка сама виробляє енергію для свого поширення. Незважаючи на високу температуру, перехід будь-якого з компонентів суміші в газову фазу незначний, і їм можна знехтувати.

Синтез композиційних порошків на основі карбідів хрому з елементів через низький екзотермічний ефект проводиться із застосуванням попереднього підігріву шихти до температури 723-873 К.

СВС-технологія дозволяє синтезувати композиції на основі складних карбідів в одну стадію для металів IV і VI груп періодичної системи хімічних елементів Д.І. Менделєєва, що володіють більш високими фізико-механічними характеристиками в порівнянні з утворюючими їх карбидами. Типовим представником таких матеріалів є композиційні порошки системи $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-TiC/NiCr}$. Інший підхід до підвищення властивостей композиційних металокерамічних композиційних порошків на основі карбідів – розробка матеріалу зв'язки. Позитивні результати були отримані при створенні композиційних порошків на основі карбіду титану зі складними легованими зв'язками, які вводяться в шихту у вигляді готових порошків-сплавів, або формуються в процесі СВС в результаті плавлення і хімічної взаємодії простих реагентів.

Перспективним напрямком є розробка антифрикційних композиційних порошкових матеріалів, що містять в своєму складі тверді мастила, такі як графіт, дисилицид молібдену і фторид кальцію. Порошок отримують методом СВС шляхом введення в реакційну шихту порошків твердих мастил, наприклад: TiC/NiCr/MoS_2 , TiC/NiCr/CaF_2 , TiC/FeCr/графіт , TiC/FeCrMo/графіт та $\text{Cr}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2/\text{CaF}_2$, які забезпечують високу працездатність покриттів в умо-

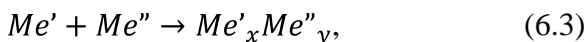
вах сухого тертя або тертя при граничному змазуванні, а також в при високих температурах.

Ще одним класом перспективних матеріалів є композиційні порошки типу «інтерметаліди-оксид» на основі алюмінідів нікелю, заліза і титану, що забезпечують значне зменшення маси за рахунок невисокої щільності алюмінідів в порівнянні з традиційно використовуваними сплавами при збереженні високих механічних та корозійних властивостей композицій. Ці композиції можуть бути отримані двома способами: 1 – синтезом інтерметалічних сполук з елементів в присутності дисперсних частинок оксидів і 2 – формуванням необхідних композицій з використанням алюмінотермічних реакцій. Обидва способи мають обмеження, обумовлені невисоким по 1-му способу або навпаки, занадто високим по 2-му способу теплосмістом реакційних систем. Використання попередньої механічної активації дозволяє активувати процес синтезу в низькоєнтермічних системах і формувати однорідну тонкозернисту структуру композицій з рівномірним розподілом оксидних частинок в обсязі матеріалу. Перебіг механохімічної реакцій в обмежених обсягах на етапі механоактивації дозволяє знизити теплосміст реакційних сумішей і отримувати ультрадисперсні композити та навіть наноконпозиційні порошки в системах з алюмінотермічними реакціями. Такий підхід був реалізований в системах Fe-Al-Fe₂O₃ і Fe-Al-Cr₂O₃. Були отримані наноконпозиційні порошки на основі моноалюмініда заліза FeAl/Al₂O₃ і FeAl(Cr)/Al₂O₃, що повністю успадковують структурну морфологію прекурсорів.

Розроблені композиційні порошки застосовуються для наплення зносо- і корозійностійких покриттів плазмовим, детонаційними і високошвидкісним газополуменим способами. У порівнянні з традиційно застосовуваними для газотермічного наплення механічними сумішами і

конгломерованими порошками синтезовані порошки забезпечують збереження фазового складу композиції в процесі напилення, рівномірний розподіл твердої фази в об'ємі покриття, збільшення коефіцієнта використання матеріалу на 10-30%, а також більш високу зносостійкість покриттів. Особливо перспективними представляються композити $\text{Cr}_3\text{C}_2/\text{Me}$, TiC/Me та $\text{Cr}_3\text{C}_2/\text{TiC}/\text{Me}$, з яких отримують високоякісні зносостійкі покриття, які не поступаються зносостійким покриттям з композитів на основі карбіду вольфраму.

Завдяки своїм особливостям, метод СВС дозволяє отримувати порошки на основі інтерметалевих сплавів з унікальною структурою і властивостями. Загальна хімічне рівняння синтезу інтерметаллідів методом СВС можна записати в такий спосіб:



Оскільки екзотермічний ефект утворення інтерметаллідів з елементів недостатньо високий для забезпечення формування порошків інтерметаллідів застосовується попередній підігрів. Завдяки малій щільності і високим питомими механічним властивостями найбільш перспективні порошки на основі алюмінідів нікелю, заліза і титану.

Високі властивості газотермічних покриттів з розроблених СВС-порошків поставили завдання промислового освоєння розроблених технологій. Так, наприклад, в Інституті порошкової металургії вперше була розроблена безреакторная технологія процесу синтезу композиційних порошків в режимі горіння в середовищі повітря, що забезпечує можливість синтезу композицій типу «карбід-метал», «інтерметаліди-оксид» і ін. В умовах будь-якої термічної ділянки підприємства. В даний час на базі інституту порошкової металургії створено дослідно-промислове виробництво композиційних порошків потужністю 10 т/рік з

можливістю випуску порошків для напилювання вузького гранулометричного складу. Основні споживачі СВС-порошків такі фірми: Metalspray (США), Union Technology (США), РАФАКО (Польща).

Контрольні питання

1. У чому суть явища, що отримало назву «твердого полум'я»?
2. Суть СВС-процесів і основні етапи розвитку СВС-технологій.
3. Які застосовуються основні технологічні типи СВС-процесів?
4. Опишіть узагальнену схему СВС-технологій?
5. Які матеріали застосовуються для синтезу композиційних порошків?
6. У чому перевага синтезованих порошків в порівнянні з традиційно застосовуваними для газотермічного напилення механічними сумішами і конгломерірованими порошками?

ЛЕКЦІЯ 7

СВС-ПРОЦЕСИ В ГАЗОТЕРМИЧЕСКИХ СПОСОБАХ НАПИЛЕННЯ І НАПЛАВЛЕННЯ ПОКРИТТІВ

1. Застосування СВС-процесу для синтезу композиційних матеріалів, що застосовуються в газотермічних покриттях і процесах дугового наплавлення. 2. Властивості покриттів з композиційних механоактивованих СВС-матеріалів, наплавлених електродуговим способом. 3. Наноструктурні покриття.

1. Застосування СВС-процесу для синтезу композиційних матеріалів, що застосовуються в газотермічних покриттях і процесах дугового наплавлення

Одним з нових напрямків в отриманні захисних покриттів є застосування попередньо механоактивованих композиційних матеріалів в процесах високо-температурного синтезу, а також застосування композитів, що містять в обсязі матриці нанорозмірні синтезовані включення, в процесах детонаційного напилення. Об'єднання СВС, детонаційного напилення та механохімії в єдину інтегральну технологію має певні перспективи в плані розвитку нанотехнологій. Результати досліджень В.І. Яковлева дозволили встановити, що для більшості технологічних параметрів (гранулометричний склад порошку 40-63 мкм., товщина покриття за один постріл 10-20 мкм., витрати газів горючої суміші – стехіометричне співвідношення, дистанція напилення 50-100 мм., і т.п .) є вузький діапазон, при яких формуються покриття з досить високими властивостями міцності.

Розроблено двоступенева технологія, що поєднує процеси механічної активації порошкових сумішей і СВС, призначених для виготовлення та відновлення деталей сільськогосподарської техніки, схильних до інтенсивного

зношування. Створено багатокарбідні СВС-механокомпозити, що представляють собою нові композиційні матеріали зі структурою типу «зміцнююча фаза - матриця». Застосування складів типу «TiC + (Ni-Cr)», «TiC + SiC + (Ni-Cr)», «TiC + WC + (Ni-Cr)», «TiC + SiC + WC + (Ni-Cr)» дозволяє за допомогою порошкового електрода сформувавши зносостійке покриття на деталях сільськогосподарського машинобудування.

Розроблено композиційні СВС-матеріали системи Р6М5 + TiC і NiCr-сталь + TiC, призначені для зміцнення деталей методами електродугової наплавки і детонаційного напилення, застосовуються для підвищення ресурсу стрілочастих лоп культиваторів і сівалок. Можна зробити висновок про перспективність інтегрування СВС-процесів з газотермічними способами напилення покриттів.

Підприємства Міжгалузевий науково-виробничий центр «Елісон ЛТД», м Івано-Франківськ інформує про розробку електродів СВС-класу, що дозволяють наплавляти захисне покриття з твердістю 63-70 HRC, зносостійкість якого в 1,2 - 1,5 рази вище зносостійкості твердих сплавів типу ВК в абразивному середовищі.

Необхідно відзначити основний недолік СВС-технології, який полягає в тому, що вона не універсальна. Не кожен реакцію можна провести в режимі СВС, оскільки для цього вона повинна виділяти достатню кількість тепла. Це накладає обмеження на вибір матеріалів для синтезу.

В даний час в області СВС ведуться перспективні роботи по синтезу нанопорошків і наноматеріалів, створення композиційних матеріалів типу полімер-кераміка, синтезу надтвердих матеріалів. У частині методів наплавлення – завдання створення електродів на основі СВС-продукту неповного перетворення. Дореагування електрода в процесі наплавлення з виділенням тепла підвищує температуру наплавлення і забезпечує зниження енергоємності процесу.

2. Властивості покриттів з композиційних механоактивованих СВС-матеріалів, наплавлених електродуговим способом

У сільськогосподарському машинобудуванні робочі органи ґрунтооброблювальних машин і знарядь: лемеші плугів, стрілочасті лапи культиваторів, диски луцильників і інші для забезпечення достатнього рівня міцності і в'язкості виготовляють з вуглецевої або низьколегованої конструкційної сталі із змістом вуглецю від 0,45 до 0,75% з подальшою зміцнюючою термообробкою. Така термообробка не забезпечує достатнього рівня абразивної зносостійкості в роботі при контакті леза з ґрунтом, тому на нього наноситься, найчастіше за допомогою наплавлення, певний шар більш зносостійкого, але дорогого матеріалу.

Відомі порошки на основі нікелю (ГОСТ 21448-75, ТУУ 322-19-004-96, ТУ ІЕЗ 374-83), що самофлюсуються, покриття з яких після напилення і оплавлення володіють високою міцністю і твердістю. Проте їх зносостійкість в умовах сухого тертя також недостатньо висока.

В даний час досить активно розвивається метод отримання порошкових матеріалів шляхом саморозповсюджуючого високотемпературного синтезу (СВС), з попередньою механоактивною обробкою їх складових компонентів.

Попередня механічна активація порошкових реагуючих сумішей є ефективним способом управління реакцією твердофазного горіння для синтезу неорганічних матеріалів.

Тому в даний час інтенсивно розширяється область застосування композиційних матеріалів, синтезованих за технологією СВС-процесу, що механічно активується.

Одним з ефективних напрямів використання порошкових СВС-механокомпозитів є їх застосування в процесі електродугового наплавлення зносостійких покриттів на

деталі сільськогосподарського машинобудування.

Поверхневі шари робочих органів сільськогосподарської техніки в процесі експлуатації піддаються інтенсивному абразивному зношуванню в результаті взаємодії з грунтом.

Відома французька компанія «AGRICARB» для збільшення терміну служби робочих органів пропонує застосовувати спеціальні захисні пластини із спеченого карбиду вольфраму, які припоюються в місцях найбільш схильних до зносу. Спосіб дорогий і вимагає забезпечення оптимального поєднання жорсткості пластини і її міцності на удар, а також приблизно однакову швидкість зносу сталеві основи і ділянки, захищеної карбідною пластиною.

У різних галузях народного господарства, в тому числі і при ремонті сільськогосподарських машин, застосовується велика кількість методів і способів відновлення деталей. Аналіз даних дозволяє зробити висновок, що частка деталей, відновлюваних на підприємствах агропромислового комплексу методами наплавлення, найбільша і становить 34,4%.

Тому найбільш раціональне, на наш погляд, рішення, зазначеної проблеми, полягає в створенні нових матеріалів для наплавлення покриттів, що забезпечують встановлений ресурс деталей машин.

Процесом, що володіє значним потенціалом у отриманні нових матеріалів, в тому числі карбідоміських, є самопоширюючийся високотемпературний синтез (СВС), відкритий в 1967 році.

Нове явище, що отримало назву «твердого полум'я» (офіційна назва «Явище хвильової локалізації твердофазних реакцій, які автогальмуються»). Тверде полум'я, яке було для того часу досить незвичайним явищем, являє собою процес, в якому вихідні реагенти, проміжні та кінцеві продукти залишаються в твердому стані протягом всього

процесу перетворення. Тверде полум'я дозволило отримувати цінні тугоплавкі матеріали. Ця обставина привела до створення нового високоефективного методу їх виробництва –СВС.

Одним з нових напрямків в отриманні захисних покриттів є застосування попередньо механоактивованих композиційних матеріалів в процесах високо-температурного синтезу, а також застосування композитів, що містять в обсязі матриці нанорозмірні синтезовані включення, в процесах детонаційного напилення. Об'єднання СВС, детонаційного напилення та механохімії в єдину інтегральну технологію має певні перспективи в плані розвитку нанотехнологій. Результати досліджень В.І. Яковлева дозволили встановити, що для більшості технологічних параметрів (гранулометричний склад порошку 40-63 мкм, товщина покриття за один постріл 10-20 мкм, витрати газів горючої суміші – стехіометичне співвідношення, дистанція напилення 50-100 мм, і т.п.) є вузький діапазон, при яких формуються покриття з досить високими властивостями міцності.

Розроблена двоступенева технологія, що поєднує процеси механічної активації порошкових сумішей і СВС, призначених для виготовлення та відновлення деталей сільськогосподарської техніки, схильних до інтенсивного зношування. Створено багатокарбідні СВС-механокомпозити, що представляють собою нові композиційні матеріали зі структурою типу «зміцнююча фаза - матриця». Застосування складів типу «TiC + (Ni-Cr)», «TiC + SiC + (Ni-Cr)», «TiC + WC + (Ni-Cr)», «TiC + SiC + WC + (Ni-Cr)» дозволяє за допомогою порошкового електрода сформувати зносостійке покриття на деталях сільськогосподарського машинобудування.

Розроблено композиційні СВС-матеріали системи P6M5 + TiC і NiCr-сталь + TiC, призначені для зміцнення

деталей методами електродугової наплавки і детонаційного напилення, застосовуються для підвищення ресурсу стрільчастих лап культиваторів і сівалок. Зроблено висновок про перспективність інтегрування СВС-процесів з газотермічними способами напилення покриттів.

Огляд науково-технічної літератури свідчить про перспективність робіт в області СВС-процесів стосовно до методів газополуменевого напилення і наплавлення.

Одне з принципово нових напрямків в отриманні захисних зносостійких покриттів – використання попередньої механоактивації порошкових компонентів для забезпечення високотемпературного синтезу нових композиційних порошкових матеріалів, а також їх застосування для дугового наплавлення і газотермічного напилення деталей машин.

Найбільшою зносостійкістю володіють тверді сплави на основі карбідів, одним з яких є карбід титану (TiC).

Карбід титану TiC відноситься до безкисневих тугоплавким сполук, які є основою сучасних матеріалів, призначених для роботи в екстремальних умовах дії високих температур, тиску, швидкостей, агресивних середовищ і т. д. В даний час все більшого значення набуває застосування порошоків карбіду титану високої і особливо високої дисперсності (мікро - і нанопорошків), які забезпечують істотне поліпшення властивостей матеріалів на його основі. Основним способом виробництва карбіду титану є вугільнотермічний спосіб його отримання з діоксиду титану, який характеризується великим енергоспоживанням на стадії тривалого синтезу в печах і при подрібненні спечених брикетів карбіду титану в розмельних агрегатах. Відкриття в 1967 році нового явища, що отримало назву «твердого полум'я» (офіційна назва «Явище хвильовий локалізації автотормозящихся твердофазних реакцій») вигідно відрізняється від застосовуваних раніше способів малим

споживанням енергії, високою продуктивністю і простим малогабаритним обладнанням. Тверде полум'я дозволило отримувати цінні тугоплавкі матеріали. Це привело до створення нового високоефективного методу їх виробництва – саморозповсюджуючого високотемпера-турного синтезу (СВС).

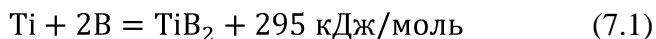
Виконання операції механоактивації реакційної суміші в атриторії дозволяє зробити взаємоподрібнення вихідних порошків і сформувати композиційні частинки з рівномірним розподілом вихідних реагентів за обсягом, а також знижує тепловтрати при синтезі, підвищує активність системи і гомогенність продукту горіння. Найбільш популярними є композиції на основі карбіду титану. Це пов'язано з високим екзотермічним ефектом реакції утворення карбіду титану з елементів (179 кДж/моль), що забезпечує широкий вибір матеріалу зв'язки.

В результаті виділяемого тепла температура твердих і розплавлених продуктів реакції досягає 2500-3500 К, тому реакція не залежить від зовнішніх джерел нагріву і може поширюватися як хвиля горіння, яка сама виробляє енергію для свого поширення. Незважаючи на високу температуру, перехід будь-якого з компонентів суміші в газову фазу незначний, і їм можна знехтувати.

Бор є одним з найбільш ефективних і економічних легуючих елементів сталі. У більшості випадків мінімальна концентрація бору в металі для одержання позитивного результату становить близько однієї тисячної масової частки відсотка. Унікальність бору полягає в тому, що при такому малому змісті в сталі, він здатний надавати на її властивості вплив, еквівалентну дії значно більшої кількості таких легуючих елементів, як Cr, Mo, Ni і ін. Використання бору для легування сталі привабливо також з точки зору безпеки його застосування та екологічної нешкідливості. Однак існують певні труднощі з борним мікролегу-

ванням сталі, які до цього часу залишаються невирішеними. Традиційним матеріалом, використовуваним для борного легування сталі, є ферробор. Багаторічна практика застосування ферробора показала, що здійснити мікролегування сталі бором з його допомогою досить складно. Пов'язано це, в першу чергу, з високою реакційною здатністю бору в сталевому розплаві і його високою хімічною спорідненістю по відношенню до кисню та азоту. Крім того, в більшості випадків потрібно забезпечити в металі вкрай малу концентрацію розчиненого бору.

Тому при отриманні композиційного матеріалу буде-мо синтезувати диборид титану.



В якості вихідних матеріалів для отримання порошкових наплавочних сумішей використовували порошки титану марки ВТ1-0, бору В, вуглецю марки ПМ-15 з метою синтезу карбіду і диборида титану. Крім того, для збільшення теплового ефекту в процесі синтезу карбіду і диборида титану в механічну суміш вводиться термореагуючий порошок алюмініда нікелю ПТ-НА-01, алюмінієвий порошок ПАП-1 ГОСТ 5494-95 і оксид заліза Fe_2O_3 . Фракційний склад всіх вихідних порошкових компонентів знаходився в межах (63...100) мкм. Вибрані компоненти змішувалися, і отримана порошкова суміш піддавалася механічній активації. Вибір цього способу впливу на матеріали обумовлений необхідністю створення композитів, в мікрооб'ємах яких повинна відбуватися реакція СВС. Функцію матричного матеріалу виконував самофлюсуючийся наплавочний порошок марки ПГ-10Н-01 ТУ 322-19-004-96.

Для отримання механоактивованих порошкових сумішей застосовувався метод механічної активації в планетарних кульових млинах АГО-2.

У проведених експериментах обсяг барабанів – 160 см³, діаметр куль – 4-5 мм, маса куль 200 г. Час процесу

механоактивації варіювалося в діапазоні від 2 до 6 хвилин.

Дугова наплавлення здійснювалася на заготовки зі сталі 20. Наплавлення виконували з використанням інверторного джерела живлення Патон ВДІ-200Р DC TIG.

Наплавочну суміш получали по наступній технології:

- змішування та механоактивація порошків Ti, B, C, Fe₂O₃, Al;

- додавання сполучного – клей марки «Метилан»;

- формування циліндра і сушка;

- ініціювання саморозповсюджуючого високо-температурного синтезу;

- дроблення і механоактивація композита, отриманого на першому етапі і додавання матричного матеріалу ПГ-10Н-01.

Наплавлення СВС-механокомпозитів проводилося графітовим електродом діаметром 10 мм.

Досліджували структури за допомогою оптичного мікроскопа МІМ-8.

Мікротвердість покриттів вимірювалася на твердомірі марки ПМТ-3 згідно ГОСТ 9450-76.

СВС проводили на циліндричних зразках в умовах фронтального здійснення синтезу. Підпалювання реагуючого складу здійснювалося електричною дугою (рис. 7.1, 7.2).

Після отримання композиційного матеріалу у вигляді спека (рис. 7, б) виробляли його дроблення, здійснювали механоактиваційну обробку і додавали матричний матеріал ПГ-10Н-01 в кількості 80-90% для поліпшення технологічних властивостей при наплавленні (рис. 7.3).

Результати дослідження мікротвердості наплавлених покриттів з композиційних матеріалів складу {10% (Ti+B+C+Fe₂O₃+Al) + 90% ПГ-10Н-01} та {20% (Ti+B+C+Fe₂O₃+Al) + 80% ПГ-10Н-01}, показали,



а

б

в

Рисунок 7.1 – СВЧ-процес формування композиційного матеріалу з компонентів (Ti+V+C+Fe₂O₃+Al), стадії: а – початкова; б – максимальне горіння; в - завершуюча



а

б

Рисунок 7.2 – Композиційний матеріал (Ti+V+C+Fe₂O₃+Al) після: а – формовки; б – СВЧ-процесу

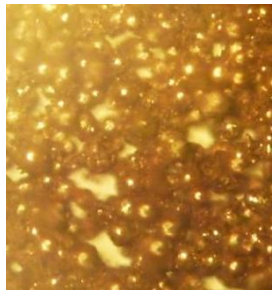


Рисунок 7.3 – Композиційний матеріал 10% (Ti+V+C+Fe₂O₃+Al) + 90% ПГ-10Н-01, ×35

що в наплавленому шарі присутні тверді включення – імовірно це карбід (TiC) і диборид титану (TiB_2), карбід заліза (Fe_3C). Так мікротвердість покриття композиційним матеріалом {20% ($Ti+V+C+Fe_2O_3+Al$) + 80% ПГ-10Н-01}, отриманого електродуговим наплавленням на сталеву основу (сталь 20), перевищує мікротвердість наплавленого покриття ПГ-10Н-01, рівну 760 HV, і становить 787 HV.

На рис. 7.4 представлені результати зносних випробувань покриттів ПГ-10Н-01 і композиційного матеріалу {20% ($Ti+V+C+Fe_2O_3+Al$) + 80% ПГ-10Н-01} на машині тертя типу МІ за схемою диск-колодка в середовищі індустричного мастила питомим навантаженням 8 МПа.

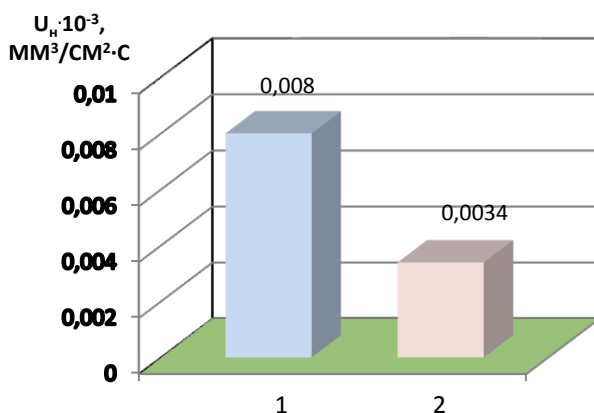


Рисунок 7.4 – Інтенсивність зношування в процесі нормального тертя в середовищі індустричного мастила пар: покриття ПГ-10Н-01 – сталь 45 HRC 50 (1); покриття з композиційного матеріалу {20% (70% ($Ti+C+Fe_2O_3+Al$) + 20% ПГ-10Н-01 + 10% ПТ-НА-01) + 80% ПГ-10Н-01} – сталь 45 HRC 50 (2)

Результати випробувань свідчать про більш високу зносостійкість пропонованого механокомпозиту

{20% (Ti+B+C+Fe₂O₃+Al) + 80% ПГ-10Н-01}, яка в 2,35 рази перевищує зносостійкість самофлюсуючого сплаву ПГ-10Н-01.

Мікроструктура наплавлених покриттів являє собою матричний матеріал – сплав ПГ-10Н-01, в якому рівномірно розподілені тверді включення, імовірно, ґрунтуючись на результатах виконаних досліджень, це частинки карбіду (TiC) і диборида титану (TiB₂), карбіду заліза (Fe₃C) (рис. 7.5).

Дані включення забезпечують високу зносостійкість композиційного матеріалу. При збільшенні вмісту твердих включень в матричному матеріалі його зносостійкість збільшується.

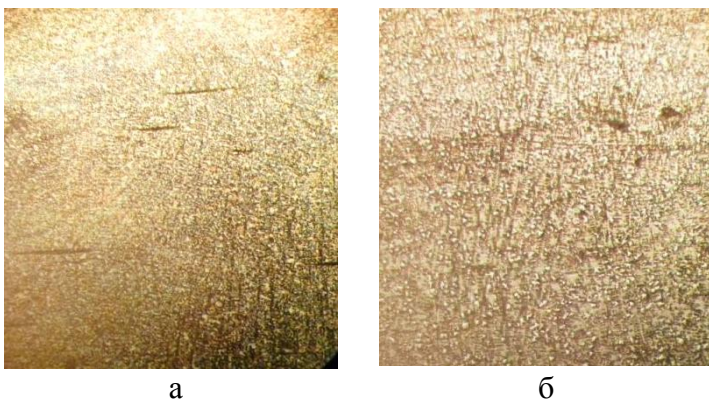


Рисунок 7.5 – Мікроструктура наплавлених композиційних покриттів, $\times 100$:

а – 10% (Ti+B+C+Fe₂O₃+Al) + 90% ПГ-10Н-01;

б – 20% (Ti+B+C+Fe₂O₃+Al) + 80% ПГ-10Н-01

Розроблено композиційний матеріал на основі самофлюсуючого сплаву системи Ni-Cr-B-Si (порошок марки ПГ-10Н-01 ТУ У 322-19-004-96), модифікований механокомпозитом складу (Ti+B+C+Fe₂O₃+Al), отриманим із за-

стосуванням СВС-процесу, що містить карбід і диборид титану.

Композиційний матеріал 20% (Ti+B+C+Fe₂O₃+Al) + 80% ПГ-10Н-01 має більш високу зносостійкість в порівнянні з самофлюсуючим сплавом ПГ-10Н-01.

Мікроструктура наплавлених покриттів являє собою матричний матеріал – сплав ПГ-10Н-01, в якому рівномірно розподілені тверді включення, імовірно, це частинки карбіду (TiC) і дибориду титану (TiB₂), карбіду заліза (Fe₃C).

3. Наноструктурні покриття.

Наноматеріали – це матеріали, що містять структурні елементи (кристалітів, волокна, шари, пори), геометричні розміри яких хоча б в одному напрямку не перевищують нанотехнологічного кордону – 100 нм (від 1 до 100 нм), що володіють якісно іншими в порівнянні з традиційними матеріалами фізичними, хімічними, механічними і біологічними властивостями, функціональними та експлуатаційними характеристиками.

Верхня межа діапазону обумовлена тим, що істотні зміни властивостей матеріалів починаються при розмірах структурних елементів менше 100 нм. Нижня межа діапазону обумовлена критичним розміром нанокристалічного матеріалу як структурного елементу, що має упорядковану будова, тобто кристалічну решітку (наприклад, для заліза ця межа становить 0,5 нм).

Термін «наноматеріали» є об'єднуючим і включає в себе велику групу різних матеріалів – нанокристалічних, нанофазних, нанокомпозитних, нанопористих, а також нанокластери, наночастини, нанопорошки, нанопокриття, фулерени, нанотрубки і т.д.

Перспективним напрямком генеративного формування є створення наноструктурних функціональних

покриттів.

Завдяки застосуванню високотвердих нанокристалічних зносостійких покриттів на основі нітридів, карбідів, боридів тугоплавких металів, багат шарових наноструктурних покриттів складного складу може бути істотно збільшена стійкість різних видів ріжучих інструментів і забезпечений значний прогрес в напрямку створення високоефективних інструментальних матеріалів, підвищена стійкість деталей, що працюють на тертя і знос.

Розроблено склади і технології нанесення надтвердих наноструктурних покриттів (мають мікротвердість 40 ... 80 ГПа), а також ультратвердих (з твердістю більше 80 ГПа), поступаються за твердістю тільки алмазу.

Нанорозмірні покриття, крім високої твердості, мають також більш високу міцність в порівнянні з покриттями зі звичайною структурою, високою термічною стабільністю, надвисокої ударної в'язкістю. Ще однією їх важливих переваг є зменшення рівня залишкових напружень і, як наслідок, потенційна можливість збільшення їх товщини в кілька разів.

Багатофункціональні наноструктурні покриття знаходять успішне застосування для захисту поверхні виробів та інструменту, які піддаються одночасно різним видам зносу, впливу високих температур, агресивних середовищ. Це, перш за все, ріжучий і штамповий інструмент, прокатні валки, деталі авіаційних двигунів, навігаційно-приладових комплексів, газових турбін і компресорів; підшипники ковзання, сопла для екструзії скла і мінерального волокна і т.д.

Іншими прикладами реального застосування наноструктурних покриттів можуть бути наступні:

- використання багатфазних складів (наприклад, TiB_2 / MoS_2) в якості самозмащувальних покриттів для космічної техніки;
- застосування нанопокриттів (наприклад, на основі

TiO₂ і полімерного сполучного) для забезпечення водо- і масловідштовхуючих властивостей поверхонь ряду виробів – автомобільного скла, скління літаків, корпусів резервуарів для зберігання рідин, будівельних конструкцій і т.д. ;

– застосування керамічних багатофункціональних (зносостійких, корозійностійких) нанопокриттів для підвищення зносостійкості валів гвинтів і перископів підводних човнів, в інших вузлах механізмів, що працюють в умовах корозійних середовищ. Планується нанесення керамічних нанопокриттів на деталі реактивних і дизельних двигунів для підвищення їх робочих характеристик. Передбачається використання даних покриттів також в медицині – в стоматології і для імплантатів в ортопедії.

Нанопорошки є тонкодисперсними наддрібнозернистими кристалічними або аморфними утвореннями, розмір яких не перевищує 100 нм. Кількість атомів у поверхневому шарі і в об'ємі НП стає сумірною, і через це вони набувають унікальних фізико-хімічних та механічних властивостей, які суттєво відрізняють їх від властивостей матеріалів того ж хімічного складу у звичайному масивному стані. Внаслідок того, що атоми на поверхні наночастинок мають сусідів лише з одного боку, їх рівновага порушується, і проходить структурна релаксація, яка призводить до зміщення міжатомної відстані в шарі товщиною 2–3 нм. Таким чином, поверхневі шари частинок стають розтягнутими, а внутрішні – стиснутими. У наночастинках реалізуються умови, при яких міжатомна відстань закономірно змінюється при переході від центра частинки до її поверхні. Ультрадисперсні частинки мають істотно спотворену кристалічну ґратку, що впливає на енергію активації більшості процесів, в яких вони беруть участь, змінюючи їх послідовність і звичний хід.

Малі кристалічні або аморфні частинки, з яких складаються нанопорошки, займають проміжну позицію між

кластерами і однорідними матеріалами. Для частинок такого розмірного діапазону характерне різке (до 30 С) зниження температури плавлення, зменшення в 1,4 рази коефіцієнта лінійного розширення, зниження концентрації вакансій відносно макроскопічних розмірів.

Поява нанорозмірних компонентів у складі композиційних покриттів стабілізує структуру матриці, перешкоджає руху дислокацій, а сама наявність фази з високими фізико-механічними властивостями призводить до покращення інтегральних функціональних характеристик у цілому.

Контрольні питання

1. У чому суть механоактивації композиційних матеріалів?
2. Як залежить інтенсивність зношування покриттів від об'ємної частки карбідної складової?
3. Дайте визначення, що представляють собою наноматеріали?
4. Якими властивостями володіють нанопорошки?

ЛЕКЦІЯ 8 ЕКОНОМІЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ ВІДНОВЛЕННЯ ДЕТАЛЕЙ

1. *Критерій вибору способу відновлення деталей з урахуванням їх ресурсу.*
2. *Оцінка витрат по нанесенню покриття.*

1. Критерій вибору способу відновлення деталей з урахуванням їх ресурсу

Вибір оптимального способу відновлення деталей з урахуванням їх ресурсу та економічної доцільності пропонується проводити з комплексним техніко-економічним

критерієм (K_k), який представляє собою множення швидкості зношування (V) відновного покриття на питомі витрати з його напилування ($Z_{об.уд}$):

$$K_k = V \cdot Z_{об.уд} \quad (8.1)$$

Критерій економічної ефективності технологічного процесу нанесення відновного покриття зручно представити як питомі витрати на напилання одиниці об'єму покриття. Це дозволяє порівнювати різні способи нанесення покриттів з економічної точки зору.

2. Оцінка витрат по нанесенню покриття

Річні витрати по нанесенню покриття складають

$$Z_i = E_n K_i + C_i, \quad (8.2)$$

де E_n – нормативний коефіцієнт окупності капітальних вкладень;

K_i – капітальні витрати (вартість технологічного обладнання, оснащення);

C_i – витрати на матеріал покриття, технологічні матеріали та електроенергію;

i – номер варіанта способу нанесення покриття.

Тоді витрати при нанесенні покриття на одну деталь складають:

$$Z_{уді} = \frac{Z_i}{N_i} = \frac{E_n K_i + C_i}{N_i}, \quad (8.3)$$

де N_i – кількість деталей, відновлюваних протягом року.

$$N_i = \frac{\Phi_i}{T_{ні}}, \quad (8.4)$$

де Φ_i – дійсний річний фонд часу роботи обладнання з урахуванням втрат часу з організаційних причин, на проstoї, огляди та ремонти;

T_{ni} - час нанесення покриття.

Підставляючи вираз (8.4) в (8.3) отримуємо наступну формулу

$$Z_{yoi} = \frac{T_{ni}(E_n K_i + C_i)}{\Phi_i} = T_{ni} \left(\frac{E_n K_i}{\Phi_i} + \frac{C_i}{\Phi_i} \right), \quad (8.5)$$

Аналізуючи вираз (8.5) робимо висновок, що перший доданок в дужках являє собою капітальні витрати, віднесені до однієї години дійсного фонду роботи обладнання, іншими словами – питомі капітальні вкладення. Другий доданок є технологічною собівартістю години роботи обладнання, тобто питомі витрати на нанесення покриття.

Якщо уявити час нанесення покриття T_{ni} в наступному вигляді

$$T_{ni} = \frac{F_i h_i}{Q_i}, \quad (8.6)$$

де F_i – сумарна площа відновлюваної поверхні, см^2 ;

h_i – товщина покриття, см ;

Q_i – продуктивність нанесення покриття, $\text{см}^3/\text{хв}$.

Тоді вираз для визначення витрат при нанесенні покриття на одну деталь (8.5) набуде вигляду

$$Z_{yoi} = \frac{F_i h_i}{60 Q_i} \left(\frac{E_n K_i}{\Phi_i} + C_{mi} \right), \quad (8.7)$$

де $C_{mi} = \frac{C_i}{\Phi_i}$ – технологічна собівартість години роботи обладнання.

Отриманий вираз (8.7) дозволяє визначити витрати на нанесення покриття необхідної товщини на задану площу відновлюваної поверхні або, іншими словами, технологічну собівартість нанесення покриття.

Для зручності порівняльної оцінки різних способів

нанесення відновного покриття отримаємо вираз без урахування геометричних характеристик покриття (площі і товщини), тобто розділимо витрати з нанесення покриття на його обсяг, тобто. $V_i = F_i h_i$

$$Z_{об.ydi} = \frac{1}{60Q_i} \left(\frac{E_n K_i}{\Phi_i} + C_{mi} \right), \quad (8.8)$$

Формула (8.8) являє собою багатопараметричну техніко-економічну модель, що дозволяє визначити витрати з напилювання одиниці об'єму відновного покриття, що і є критерієм економічної ефективності технологічного процесу.

Мінімум $Z_{об.ydi}$ буде свідчити про високу економічну ефективність технологічного процесу відновлення деталей. У той же час мінімальний рівень витрат не завжди може відповідати необхідній зносостійкості деталі. Тому вибір оптимального технологічного процесу відновлення деталей слід проводити з комплексного техніко-економічного критерію K_e (8.1), який враховує швидкість зношування нанесеного покриття:

$$V = \frac{Z}{\Delta T}, \quad (8.9)$$

де Z – лінійний знос деталі (зразка);

ΔT – інтервал часу, протягом якого виник знос.

Контрольні питання

1. Що враховує комплексний техніко-економічний критерій вибору способу відновлення деталей?

2. Що є критерієм економічної ефективності технологічного процесу нанесення відновного покриття?

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Лузан С.О. Комплексна оцінка номенклатури деталей, які визначають ресурс мобільної техніки та її безпеку / С.О. Лузан // Вісник ХНТУСГ ім. П. Василенка. – Харків: 2014. – Вип. 148. – С. 478-485.

2. Лузан С.О. Класифікація типових модульних сполучень деталей засобів транспорту / С.О. Лузан // Вісник ХНТУСГ ім. П. Василенка. – Харків: 2014. – Вип. 151. – С. 101-107.

3. Лузан С.А. Математическое моделирование интегрированного газопламенного напыления / Науковий вісник будівництва – Харків: ХНУБА, 2014. – № 2(76). – С. 160-163.

4. Сідашенко О.І. Ремонт машин та обладнання: Підручник. / О.І. Сідашенко та ін.; за ред. проф. О.І. Сідашенка, О.А. Науменка. – К.: Агроосвіта, 2014. – 665 с.

5. Лузан С.А. Газотермическое напыление покрытий [Текст]: Монография. / С.А. Лузан – Харьков: Издательство "НТМТ", 2009. – 134 с.

6. Лузан С.А. Оценка микротопографии при щеточной подготовке напыляемых поверхностей деталей / С.А. Лузан // Вестник ХНАДУ : сб. научн. трудов. – 2014. – Вып. 67. – С. 32-36.

7. Лузан С.А. Повышение ресурса деталей шасси колесных тракторов во время их восстановительного ремонта / С.А. Лузан // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Збірник наукових праць. Тематичний випуск: Автомобіле- та тракторобудування. – Харків: НТУ «ХПІ». – 2015. - № 9(1118). – С. 17-22.

8. Лузан С.А. Прочность сцепления газопламенных покрытий и шероховатость напыляемой поверхности при использовании щеточной обработки / С.А. Лузан // Науко-

вий вісник будівництва – Харків: ХНУБА, 2015. – № 1(79). – С. 226-230.

9. Лузан С.А. Исследование влияния параметров вибрационной обработки на износостойкость газопламенных покрытий системы Ni-Cr-B-Si / С.А. Лузан // Вісник ХНТУСГ ім. П. Василенка. – Харків: 2015. – Вип. 158. – С. 9-14.

10. Лузан С.А. Определение способов восстановления деталей сельскохозяйственных машин, обеспечивающих их ресурс на уровне и превышающем уровень новых / С.А. Лузан // Вісник ХНТУСГ ім. П. Василенка. – Харків: 2015. – Вип. 158. – С. 93-98.

11. Лузан С.А. Исследование зависимости скорости изнашивания газопламенных покрытий от мощности разряда при электроискровом легировании / С.А. Лузан // Вісник ХНТУСГ ім. П. Василенка. – Харків: 2015. – Вип. 159. – С. 60-65.

12. Luzan S. The study of possible application of plasma alumina coating on machine parts / S. Luzan, A. Sidashenko // MOTROL. Commission of Motonization and Energetics in Agriculture. – Poland: 2016. – Vol. 18. – No. 7. P. 15-18.

13. Лузан С.А. СВС-процессы в технологиях упрочнения и восстановления деталей машин наплавкой и газотермическими способами напыления покрытий (обзор) / С.А. Лузан, А.И. Сидашенко, А.С. Лузан // Технічний сервіс агропромислового, лісового та транспортного комплексів. – Харків: 2016. - № 6. – С. 152-162.

14. Сідашенко О.І. Властивості покриттів з композиційних механоактивованих СВС-матеріалів, наплавлених електродуговим способом / О.І. Сідашенко, А.С. Лузан // Вісник ХНТУСГ ім. П. Василенка. – Харків: 2017. – Вип. 183. – С. 134-144.

15. Лузан С.А. Критерии выбора способа восстановления деталей машин и определение рационального марш-

рута технологии / С.А. Лузан // Вісник ХНТУСГ ім. П. Василенка. – Харків: 2017. – Вип. 183. – С. 45-56.

16. Сідашенко О.І. Технологія ремонту машин та обладнання. Курс лекцій / Сідашенко О.І., Тіхонов О.В., Лузан С.О. та інші. Навч. посібник – Харків: ХНТУСГ, 2017. – 361 с.

17. Sidashenko O. Repair Technology of Machinery and Equipment. Lecture course. / Sidashenko O., Tikhonov O., Luzan S., and others. Textbook. – Kharkiv: KhNTUA, 2017. – 340 p.

18. Пузряков А. Ф. Теоретические основы технологии плазменного напыления: / А. Ф. Пузряков. – М. : Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2003. – 360 с.

19. Лузан С.А. Газотермическое напыление покрытий [Текст]: Монография. - Харьков: Издательство "НТМТ", 2009. – 134 с.

20. Лузан С.А. Получение и исследование восстановительных покрытий на деталях машин с использованием механокомпозитов, содержащих TiC и TiB₂ / С.А. Лузан, А.И. Сідашенко, А.С. Лузан // Загальнодержавний міжвідомчий науково-технічний збірник. Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин, вип. 47, ч. II. – Кропивницький: 2017. – С. 159-166.

21. Лузан С.А. Алгоритм разработки технологии наплавки защитных покрытий, модифицированных композиционными материалами / С.А. Лузан // Технічний сервіс агропромислового, лісового та транспортного комплексів. – Харків: 2018. - № 12. – С. 109-116.

22. Лузан С.О. Аналіз умов роботи та методів підвищення зносостійкості робочих органів ґрунтообробних машин (огляд) / С.О. Лузан, Д.М. Петренко, Михеев Ю.Р. // Технічний сервіс агропромислового, лісового та транспортного комплексів. – Харків: 2018. – № 14. – С. 79-88.

23. Лузан С.О. Теоретичні основи подрібнення і ме-

ханоактивації матеріалів для наплавлення і газотермічного напилення / С.О. Лузан, І. Сідашенко, А.С. Лузан, Д.М. Петренко // Технічний сервіс агропромислового, лісового та транспортного комплексів. – Харків: 2019. – № 15. – С. 8-18.

24. Лузан С.О. Інженерія поверхні. Курс лекцій / С.О. Лузан, О.І. Сідашенко. – Харків: Водний спектр Джі-Ем-Пі, 2019. – 188 с.

25. Лузан С.О. Підвищення довговічності деталей машин під час їх відновлювального ремонту / С.О. Лузан, Д.М. Петренко // Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства ім. П. Василенка. – Харків: 2019. – Вип. 205. – С. 211-217.

26. Лузан С.А. Повышение износостойкости наплавленных покрытий системы Ni-Cr-B-Si путем модифицирования их композиционными материалами, синтезированными с применением СВС-процесса / С.А. Лузан, А.И. Сидашенко, А.С. Лузан // Сварочное производство. – 2019. – № 10. – С. 15-20.

27. Патент № 133419, Україна, МПК (2019.01) С22С 14/00, В22F 1/00. Шихта для отримання композиційного зносостійкого матеріалу з використанням СВС-процесу / С.О. Лузан, О.І. Сідашенко, А.С. Лузан – Опубл. 10.04.2019; Бюл. № 7.

НАВЧАЛЬНЕ ВИДАННЯ

Лузан Сергій Олексійович
Сідашенко Олександр Іванович
Лузан Аліса Сергіївна

ОБҐРУНТУВАННЯ ТА ВДОСКОНАЛЕННЯ ТЕХНОЛОГІЙ ВІДНОВЛЕННЯ ДЕТАЛЕЙ

Курс лекцій

Комп'ютерна верстка: Лузан А.С..
Підписано до друку 24.01.2020р
Формат 60x84 1/16 Папір офсетний. Друк різнографічний.
Гарнітура Times New Roman. Ум. друк. арк. 7,4
Обл. – друк. арк. 5,86
Наклад 100 прим. Зам № 129.

Видавництво «Діса плюс»
Тел. (057) 768-03-15
Свідоцтво про внесення суб'єкта видавничої справи до
Державного реєстру видавців, виготівників та
розповсюджувачів видавничої продукції:
серія: ДК № 4047 від 15.04.2011.



Надруковано в друкарні «БУКЛАЙН»
61000, м. Харків, вул. Катерининська, 46
Тел. (099) 604-49-45
e-mail: bookline.ua@gmail.com