

ПОЛТАВСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ АГРАРНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
Факультет інженерно-технологічний
Кафедра механічної та електричної інженерії

Пояснювальна записка
до кваліфікаційної роботи на здобуття ступеня вищої освіти
« магістр »
бакалавр, магістр

на тему: «Удосконалення технології відновлення зношених бронзових втулок сільськогосподарської техніки напіканням металевих порошків»

Виконав: здобувач вищої освіти за
освітньо-професійною програмою
Машини і засоби механізації
сільськогосподарського виробництва
назва ОПП
спеціальності 133 Галузеве
машинобудування
код та найменування спеціальності
ступеня вищої освіти «магістр» групи 1
Сальтевський І.І.
Прізвище та ініціали здобувача вищої освіти
Керівник: Сайчук О.В.
Прізвище та ініціали керівника

Рецензент: Науменко А.О.
Прізвище та ініціали рецензента

ВСТУП

В умовах підвищення кількості одиниць сільськогосподарської техніки особливе значення набуває наявність відповідної до сучасних умов ремонтно-обслуговуючої бази галузі АПК. На сьогоднішній день багато ремонтних підприємств не мають тієї чіткої системи обслуговування й ремонту техніки, як 20 або 30 років тому. Однак у деяких ремонтних підприємствах донині, здійснюється ремонт агрегатів і навіть повнокомплектних машин.

Основною причиною виходу з ладу сільськогосподарської техніки, у більшості випадків, є неминуче зношування конструкційних деталей. При ремонті техніки, як правило, зношені деталі, не підлягають відновленню, часто вибраковують, із заміною їх на нові, що, відповідно, підвищує собівартість ремонту техніки.

Однієї з особливостей сільськогосподарських машин є застосування в їхніх конструкціях досить великої кількості деталей з кольорових металів і сплавів, тому що вони мають високі антифрикційні властивості, корозійну стійкість, витримують значні питомі навантаження й високі швидкісні режими. Найчастіше це бронзові підшипники ковзання типу «втулка».

Ціль роботи. Розробити технологічний процес відновлення бронзових деталей типу «втулка» методом електроконтактного напикання із застосуванням порошку з кольорових сплавів.

Об'єкт дослідження. Технологічний процес відновлення-зношених поверхонь автотракторних деталей типу «втулка» електроконтактним напиканням порошкових матеріалів.

Наукова новизна. Полягає в теоретичному обґрунтуванні кількості необхідної енергії, підведеної безпосередньо до шару, що напикається, з максимальним виключенням параметра втрати тепла на електроди

Практична цінність. Полягає в обґрунтуванні можливості застосування процесу електроконтактного напикання порошків з кольорових сплавів для відновлення бронзових деталей типу «втулка». У розробці й впровадженні технології відновлення важко навантажених бронзових деталей способом ЕКН (електроконтактного напикання), який орієнтований на реальні умови експлуатації сільськогосподарських машин.

1. СТАН ПИТАННЯ І ЗАВДАННЯ ДОСЛІДЖЕННЯ

1.1. Зношування деталей сільськогосподарських машин

Виробники як вітчизняної, так і імпоротної сільськогосподарської техніки висувають у якості одного з вимог до випуску продукції: підвищення надійності й довговічності вузлів і агрегатів, а так само окремих швидкозношуваних деталей.

Ці підвищені вимоги були продиктовані конкурентною боротьбою між провідними виробниками сільськогосподарської техніки, а також науково-технічним розвитком, але ці вимоги останнім часом пред'являються не тільки до нових деталей, але також і до відновлених.

Добре відомо, що застосування прогресивних технологій при відновленні зношених деталей в 5...8 разів скорочує кількість операцій у порівнянні з їхнім виготовленням, в 10...20 разів знижує витрати матеріалів. У результаті застосування ремонтних технологій собівартість відновлення багатьох деталей становить 60...80% від собівартості нових. У цей час розробка нових технологій ремонту зношених деталей або вдосконалення існуючих відновлювальних операцій стає ще більш актуальним, тому що вартість нових машин така, що в багатьох випадках експлуатуючі організації не мають можливості їх придбати.

Як відомо, деталі транспортних і технологічних машин, автомобілів і інших машин у процесі експлуатації піддаються різним видам зношування, що викликає виникнення несправностей природнього і аварійного характеру. Основними несправностями машин є: порушення в сполучених поверхнях заданої посадки, зниження опору матеріалу навантаженнями циклічного характеру.

Зношування деталей, з урахуванням виду зношування можна умовно розділити на чотири групи (рис. 1.1).

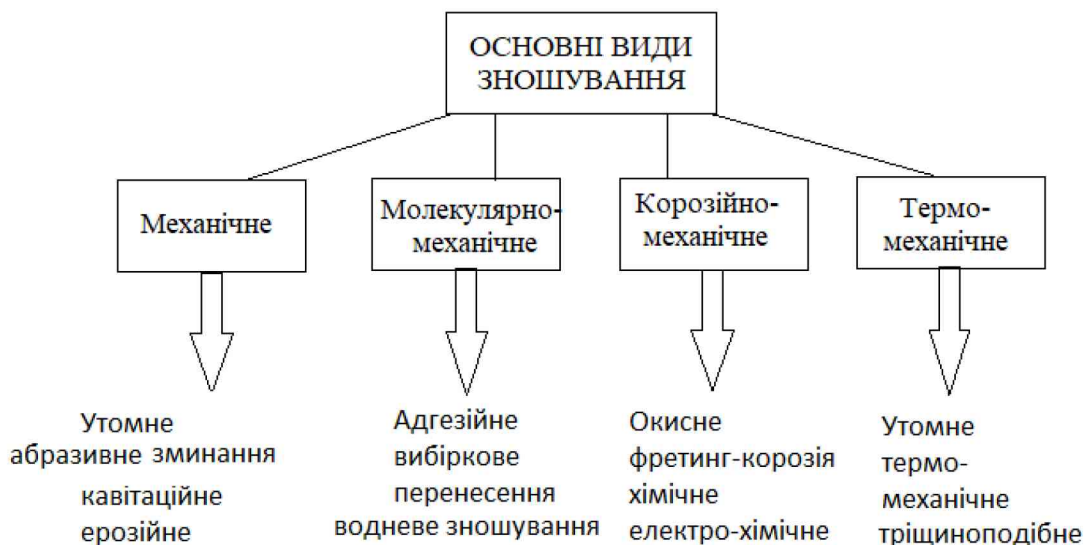


Рисунок 1.1 - Класифікація видів зношування.

Найпоширенішим видам зношування є абразивне, адгезійне (схоплювання), втомне, кавітаційне, корозійне і ерозійне [1].

Як видно з діаграми (рис. 1.2), більшість деталей виходить із ладу в результаті абразивного, гідро й газоабразивного зношування. Його характер може значно мінятися залежно від фізико-механічних властивостей матеріалів і абразиву, тиску в зоні контакту, швидкості деформування поверхневого шару, температури нагрівання матеріалу й агресивності середовища.

Абразивні частки, що зношуються, можуть мати мінеральне й металеве походження.

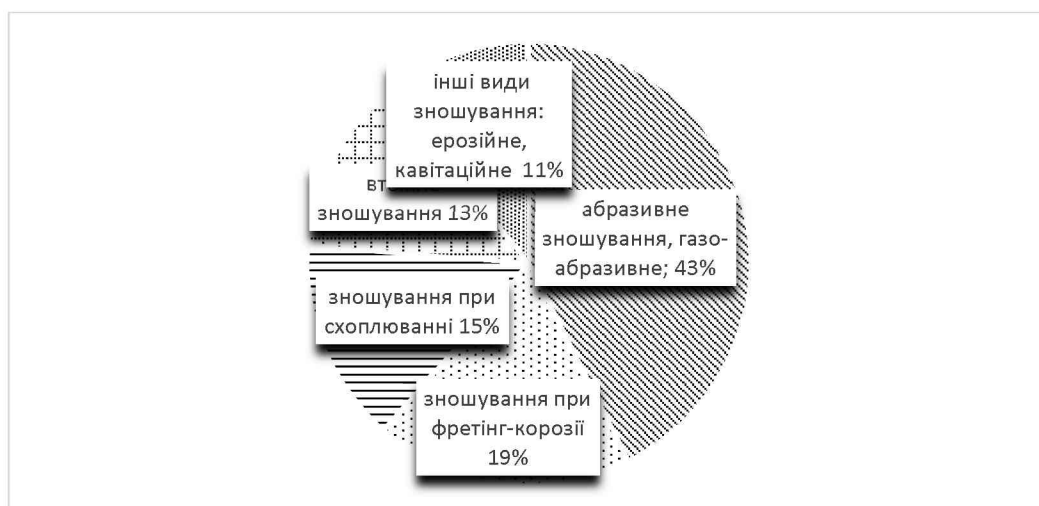


Рисунок 1.2 - Діаграма розподілу різних видів зношування деталей сільськогосподарських машин.

1- абразивне зношування, газо-абразивне (43%);

- 2- зношування при фретинг-корозії (19%);
- 3- зношування при схоплюванні (15%);
- 4- втомне зношування (13%);
- 5- інші види зношування: ерозійне, кавітаційне (11%).

1.2. Величина і характер зношування бронзових втулок

За чисельним значенням величин зношування (на діаметр) автори-розроблювачі ремонтних технологій рекомендують підрозділяти їх на три категорії [1]:

1 категорія, до них відносяться втулки, працездатність яких припиняється при зношуванні до 0,1 мм;

2 категорія - втулки, що втрачають працездатність при зношуванні до 2,0 мм;

3 категорія - втулки зі зношуванням більш 2,0 мм.

Зношені втулки 1-ї і 2-ї категорії відносяться до розряду втулок з малими величинами зношування.

Середнє значення зношування бронзових втулок опорних котків у ходовому візку тракторів Komatsu D-65-15, Д-10 становить 0,5 мм. Найбільше зношування 1,5 мм, а в тракторів Komatsu D-87, Т-130 0,64 мм, найбільше зношування 2,0 мм. Тому можна вважати, що фактичне зношування внутрішньої поверхні втулок досягає більш 1,0 мм на діаметр.

По технічним умовам втулки, що мають зношування більш 0,45 мм на діаметр вибраковуюються й підлягають відновленню або замінюються.

1.3. Існуючі основні способи відновлення втулок

У цей час найпоширенішим способом при відновленні працездатності агрегату або вузла, у якого вийшла з ладу бронзова втулка, є заміна зношеної втулки новою, виготовленою із заготовки аналогічної марки бронзи. Однак висока вартість виготовлення нової втулки при її виготовленні роблять цей спосіб у край неекономічним.

Найбільш простим методом відновлення бронзових втулок є метод

пластичної деформації. Пластичну деформацію втулок виконують як у холодному, так і в гарячому стані [2]. Основними видами пластичної деформації є осадка і обтиснення.

Осадка застосовується для зменшення внутрішнього й збільшення зовнішнього діаметра втулки, за рахунок зменшення її довжини.

Для сполучення питомі навантаження, що сприймають значні, зменшення довжини втулок допускається не більше ніж на 5...8%, для менш навантажених втулок - на 10...15% від номінальної довжини. Зі зменшенням довжини втулки, що осаджується, за рахунок зменшення площі її поверхні, різко збільшується тиск валу на втулку, що викликає підвищене зношування й скорочення ресурсу втулки. Тому даним способом рекомендується відновлювати бронзові втулки із внутрішнім діаметром до 60 мм і величиною зношування до 0,2 мм. Вібродугове наплавлення має високу продуктивність (до 2,6 кг/г); незначним нагріванням деталі (до 100°C); зона термічного впливу при наплавленні незагартованих деталей - 0,6...1,5 мм, загартованих - 1,8...4,0 мм залежно від режиму, що дозволяє наплавляти деталі малого діаметра (від 12 мм), не побоюючись їх прожога або короблення [3].

До істотних недоліків способу слід віднести великий розкид твердості покриття й низьку втомну міцність деталі.

Спосіб детонаційного напилювання широко використовується іноземними фірмами для нанесення зносостійких покриттів на поверхні виробів [4]. При детонаційному напилюванні забезпечується більш щільне й міцне зчеплення покриття з вихідним матеріалом (до 100МПа), ніж при газополум'яному і плазмовому напилюванні деталей. Короткочасність протікання процесу в стволі (2–3 мс) і нагрівання до 150°C дозволяють використовувати для покриттів тугоплавкі матеріали (карбіди, бориди, нітриди).

Детонаційне напилювання також має недоліки й, насамперед сильний безперервний шум при стрілянині, необхідність дистанційного керування процесом і пристрою звуконепроникного боксу, низька продуктивність (покриття товщиною 0,5 мм наноситься зі швидкістю 0,1 - 0,2 м²/с).

Дифузійна металізація. За останні десятиліття був проведений ряд досліджень в області відновлення й зміцнення деталей машин методами дифузійної металізації. Дифузійне хромування - це різновид хіміко-термічної обробки, що полягає в насиченні поверхневих шарів деталей хромом у чистому виді або його з'єднаннями (карбіди, бориди, нітриди, силіциди тощо). Дифузійне хромування вигідно відрізняється від гальванічного, забезпечуючи високу продуктивність і низьку собівартість відновлення деталей. Відновлені цим методом деталі практично не піддаються корозії.

Приріст геометричних розмірів на зразках зі сталі 45,45Х становить (на діаметрі) 100 мкм. Таке збільшення геометричних розмірів дає можливість відновлювати деталі, що мають зношування порядку 70 - 90 мкм [5].

Технологічний процес дифузійного хромування відновлюваних деталей досить простий. Деталі очищаються й знежирюються. Потім на відновлювані поверхні наноситься обмазка, що містить хром. Підготовлені в такий спосіб деталі встановлюються в термічну піч, де нагріваються до температури 1100...1200°C. Час витримки встановлюється залежно від необхідності одержання приросту геометричних розмірів.

Після остигання деталей піддається алмазному шліфуванню. Але, незважаючи на простоту й дешевину відновлення деталей даним методом, висока якість одержуваних поверхонь деталей, даний метод може бути впроваджений у ремонтне виробництво стосовно до відновлення не великої частини деталей типу «вал», тому що не забезпечує необхідний приріст геометричних розмірів.

Через що ремонту підлягає тільки обмежена номенклатура деталей (з зносами до 100 мкм), а більша частина деталей має зноси, що перевищують цю величину.

Спосіб відцентрового заливання полягає в нанесенні розплавленої бронзи на відновлювану поверхню втулки в процесі її обертання із заданою окружною швидкістю. Плавлення бронзи може, здійснюватися нагріванням із застосуванням електродугового нагрівання і з нагріванням струмами високої

частоти. Найбільш працездатним виявився процес відцентрового заливання із застосуванням електродугового нагрівання при відновленні внутрішньої зношеної поверхні бронзової втулки. Інші технології практично не застосовуються по різних причинах, але основною із цих причин є висока собівартість відновленої втулки.

Сутність процесу відцентрового заливання із застосуванням електродугового нагрівання при відновленні внутрішньої зношеної поверхні бронзової втулки в наступному. У внутрішню порожнину втулки розміщується шихта, що представляє собою суміш, що складається або зі стружки, гранул, або порошку відповідної марки бронзи з необхідною кількістю флюсу. Заготовка закривається з торців ущільнювальними фланцями із центральними отворами, установлюється на верстат (пристрій) і приводиться в обертання. Через центральні отвори у фланцях усередину заготовки вводяться електроди, між якими запалюється електрична дуга, що є джерелом тепла для розплавлення шихти й підігріву поверхневого шару металу втулки, метал шихти що розплавляється під дією відцентрових сил, рівномірно розподіляється по внутрішній поверхні відновлюваної втулки. Потім подача електроенергії на електроди припиняється, а заготовка продовжує обертатися до повного закінчення кристалізації залитого сплаву. Далі заготовка знімається з пристрою, і її подальше охолодження ведеться в піску.

Поверхня втулки, що заливається, не повинна мати слідів корозії, забруднень, тому що це перешкоджає змочуванню й дифузії розплавленого металу шихти зі зношеною поверхнею втулки, знижуючи міцність зчеплення шару який наноситься з основою втулки. У якості флюсу застосовується збезводнена й розмелена бура в кількості 1,5...2% від маси шихти бронзового матеріалу. Для зневоднювання бури її прокалюють до температури 800°C, а потім подрібнюють до порошкоподібного стану. Зашихтовка проводиться за допомогою спеціального пристосування, яке ущільнює шихту й надає їй кільцеву форму. Шихта у вигляді кільця з невеликим натягом запресовується в середину втулки (рис. 1.3).

Однією з основних умов технологічного процесу є дотримання заданої швидкості обертання заготовки при розплавленні шихти. Вона повинна забезпечити достатню величину відцентрових сил, необхідних для міцного зчеплення розплавленого шару металу з основою втулки, а також для додання внутрішньої поверхні залитого шару форми, близької до циліндра.

Для забезпечення необхідної якості залитого шару бронзи окружна швидкість заготовки в поверхні, що заливається, повинна бути в межах від 3 до 6 м/с. При швидкості нижче 3 м/с сторонні включення через досить малу відцентрову силу не можуть виділитися з розплавленої бронзи й залишаються в ній. Проведені дослідження показали, що якісне заливання бронзи даним методом відбувається при гравітаційних коефіцієнтах, рівних 60...70, що відповідає окружній швидкості обертання заготовок 4,2...4,6 м/с.

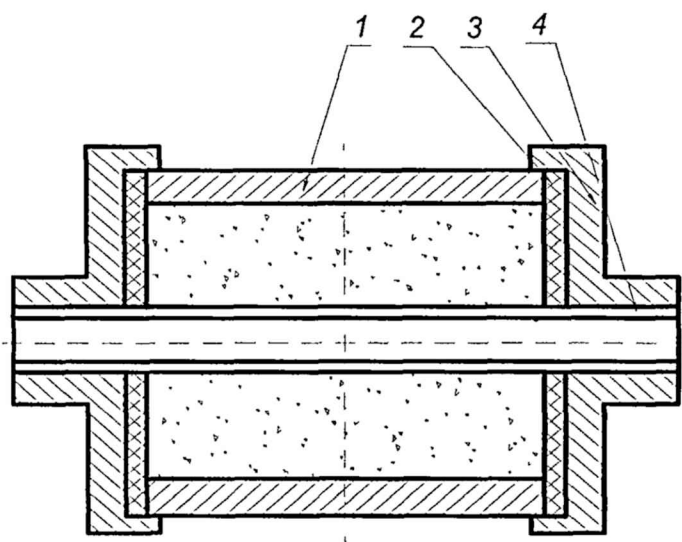


Рисунок 1.3 - Схема оправки для відцентрового заливання: 1 - заготовка-основа; 2 - прокладки; 3 - фланець; 4 - графітова втулка

Теплова потужність дуги вибирається достатньою для забезпечення швидкого розплавлення шихти й нагрівання заготовки. На вибір необхідної потужності дуги істотний вплив здійснюють розміри й маса заготовки і шихти. Визначальною величиною для вибору потужності дуги при невеликих коливаннях товщини стінки заготовки стосовно діаметра може прийматися площа поверхні, що заливається. Оптимальним є питома потужність дуги, що доводиться на 1 см² поверхні заготовки, що заливається, у межах

0,06...0,13 кВт/см². При такій потужності необхідне горіння дуги коливається від 3 до 10 хвилин. Висока якість досягається при забезпеченні рівномірності нагрівання заготовки. Рівномірність нагрівання підвищується зі збільшенням довжини дуги. Встановлено, що найкращою є довжина дуги в межах 0,80...1,00 від довжини заготовки. Для забезпечення стійкого дугового розряду при достатній довжині дуги в умовах електродугового заливання втулок напруга холостого ходу джерела живлення повинна бути не менш 150 В. Робоча напруга дуги залежить від внутрішнього діаметра заготовки, що заливається.

Достатню текучість бронза має при температурі 1100...1200°C, тому не слід перегрівати бронзу вище 1300°C. Температура нагрівання контролюється по нагріванню зовнішньої поверхні заготовки за допомогою оптичного, радіаційного або фотоелектричного пірометрів, з урахуванням перепаду температури.

Таким чином, даний технологічний процес, дозволяє нарощувати зношену поверхню бронзової втулки на 1...2 мм, при всіх своїх - гідностях має ряд істотних недоліків, які значно впливають на ефективність застосування даного процесу. До цих недоліків відносяться:

1. Під дією відцентрових сил у розплавленій шихті виникають гідродинамічні процеси, які викликають нерівномірність розподілу компонентів рідкої бронзи, що приводить до значної ліквідації нарощеного шару;
2. Більша трудомісткість у підготовці й готуванні шихти, шихтових кілець;
3. Застосування достатньо складного і дорогого устаткування;
4. Більші витрати часу при відновленні однієї втулки;
5. Можливість відновлення тільки внутрішнього діаметра втулки,
6. Застосування електродів різко знижує екологічну чистоту процесу.

Плазмове напилювання. Останнім часом у ремонтному виробництві для відновлення циліндричних деталей застосовуються більш досконалі технологічні процеси.

Плазмове напилювання - прогресивний метод захисту деталей і конструкцій від зношування й корозії, відновлення розмірів і декоративної

обробки [6]. Сутність процесу плазмового напилювання захисних або зміцнюючих покриттів полягає в нагріванні й розплавлюванні матеріалу що напиляється, стислою дугою (плазмовим струменем) і наступним осадженням часток на основному металі без його розплавлювання. Покриття можуть бути отримані на будь-яких матеріалах практично без зміни властивостей підкладки, тому що поверхня виробу звичайно нагрівається до температур не більш 300°C.

При подачі в струмінь часток порошкового матеріалу розміром від 5-7 до 100-140 мкм залежно від теплофізичних властивостей матеріалу й розмірів часток відбувається їх нагрівання й проплавлення або повністю, або на значну глибину. Частинка стає рідкою або пластичною. Одночасно відбувається розгін часток до швидкостей 1000 - 2500 км/год. При ударі нагрітої до рідкого або пластичного стану частки по підготовленій підложці відбувається її деформація, розтікання, охолодження й кристалізація.

Плазмове напилювання дозволяє одержувати деталі й вироби зі спеціальними й декоративними властивостями поверхні: зносостійкістю, антифрикційністю, корозійністю, жаростійкістю, кавітаційною стійкістю, ерозійною стійкістю, електроізоляцією, стійкістю проти фретинг-корозії тощо.

Технологічний процес складається з попереднього очищення (будь-яким відомим методом), активаційної обробки й безпосереднього нанесення покриття. Швидкість переміщення плазмотрона 2...30 мм/с, відстань між плазмотроном і виробом 100...150 мм, діаметр плями напилювання 10...25 мм, товщина покриття 0,05...1,0 мм. Плазмостворюючим газом є, як правило, аргон або повітря. У якості порошкового матеріалу, що формує покриття, використовуються різні матеріали й сплави, тугоплавкі з'єднання, оксиди, полімери і їх композиції розміром часток до 100 мкм.

Устаткування для плазмового напилювання складається з одного або двох серійних зварювальних джерел живлення, малогабаритного плазмотрона й порошкового дозатора.

У порівнянні з газополум'яним, електродуговим і детонаційним напилюванням, даний процес має переваги:

- ефективне управління енергетичними характеристиками напиляємих часток і умовами формування покриття;
- високий коефіцієнт використання порошку (до 85%), міцність зчеплення покриття з основою (до 60 МПа), низька пористість;
- відсутність обмежень по розмірах напиляємих виробів;
- низький термічний вплив на напиляему основу;
- нанесення покриття на локальні поверхні;
- нанесення покриття з мінімальними припусками;

Але, як і інші методи відновлення деталей, метод плазмового напилювання не позбавлений деяких недоліків:

- поряд з високою твердістю й зносостійкістю у наплавленому металі - висока крихкість;
- необхідність у складному технологічному устаткуванні й висококваліфікованому персоналі;
- погана робота в умовах знакозмінних і ударно-абразивних навантажень;
- низька продуктивність процесу;
- висока вартість матеріалів (аргону й порошкових сплавів).

За останні роки в технології ремонту зношених деталей стали застосовуватися металеві порошки із застосуванням процесу електроконтактного напикання даних порошків. Питання використання електричного струму для нагрівання порошкових матеріалів при їх припиканні на зношену поверхню деталі давно привертає увагу дослідників. Можливість одержання високих температур за короткий час дозволяє вести процес припикання порошків без захисної атмосфери й без значного нагрівання самої відновлюваної деталі. Ще в 1944 р. був розроблений метод електроімпульсного припикання порошкових матеріалів на поверхню деталі з використанням зварювального устаткування для контактного зварювання.

Основними технологічними параметрами процесу електроконтактного способу одержання покриттів і міцність зчеплення його з основою, є величина

струму I , тривалість імпульсів (τ), величина зусилля стиску електродів-пуансонів (P). Істотний вплив на якість технологічного процесу здійснюють; характеристика наплавляемого порошку, його хімічний і гранулометричний склад, а також матеріал відновлюваної деталі.

Можливість варіювання складом порошкових сплавів у широкому діапазоні, одержання напеченого шару із заданою пористістю, що забезпечує найбільшу зносостійкість, мале нагрівання деталі, що виключає викривлення геометричних параметрів відновлюваної деталі, малі припуски на наступну механічну обробку й ряд інших властивостей дозволяють якісно відновлювати деталі широкої номенклатури з різних матеріалів.

За останні роки електроконтактне напикання металевих порошоків на зношені поверхні сталевих деталей різного призначення досить добре вивчений.

Електроконтактна приварка порошкових матеріалів (ЕКПП) Способи приварки, засновані на вільному засипанні присадкового матеріалу, тобто подачі порошоків у зону приварки самопливом.

Поширення цих способів викликане в першу чергу їх простотою й відсутністю необхідності в складних додаткових пристроях і пристосуваннях. При відновленні або зміцненні циліндричних деталей подачу порошкового матеріалу здійснюють, як правило, за схемою (рис. 1.4 а,б), що забезпечує затягування («заклинювання») порошку між роликівим електродом і деталлю. Це дозволяє з великою ймовірністю гарантувати рівномірність покриття й сталість його товщини. Переваги даного технологічного варіанту досить очевидні, а на його недоліках слід зупинитися більш докладно, тому що через простоту його виконання підприємства вибирають саме цей спосіб, що неминуче зменшує можливості процесу по номенклатурі відновлюваних або зміцнюємих деталей.

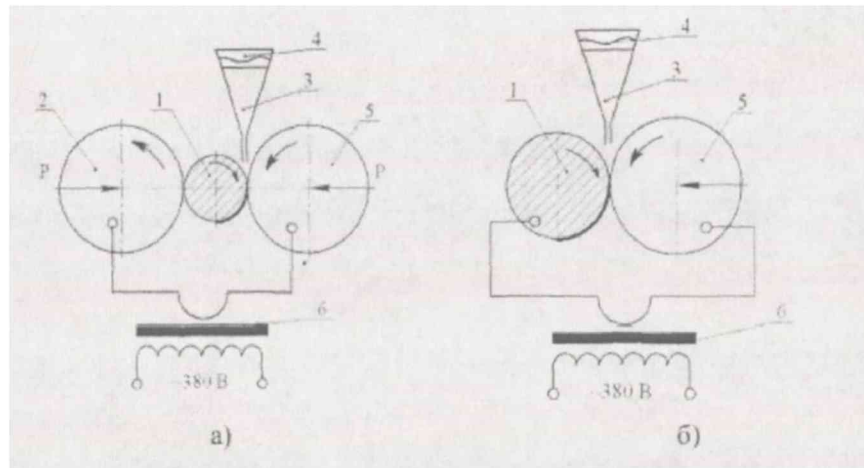


Рисунок 1.4 - Способи ЕКП порошків, засновані на вільному засипанні: а) при приварці двома роликами; б) при приварці одним роликом

Недоліком розглянутого способу є відсутність можливості регулювання товщини отриманого покриття. Залежно від величини зношування деталі товщина покриття може різнитися в десятки й більше разів. Таким чином, при використанні даної технології необхідно буде або здійснювати процес одержання багат шарового покриття, наносячи послідовно один шар за іншим, або суттєво збільшити припуск на механічну обробку покриття, що небажане через необхідність застосування дорогих алмазних і ельборових кіл і їх підвищеної витрати.

Слід також зазначити, що в цьому випадку має місце збільшення витрати присадкових матеріалів.

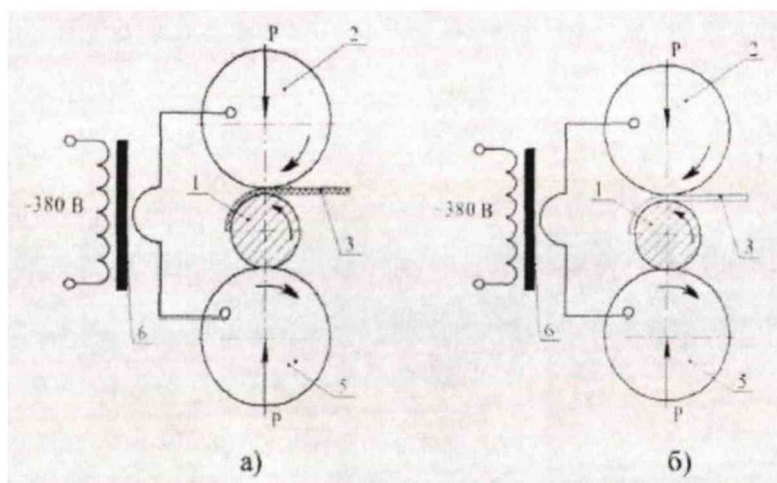


Рисунок 1.5 - Способи ЕКП порошків у вигляді: а) спечених і армованих порошків; б) порошково-полімерної стрічки (ППС)

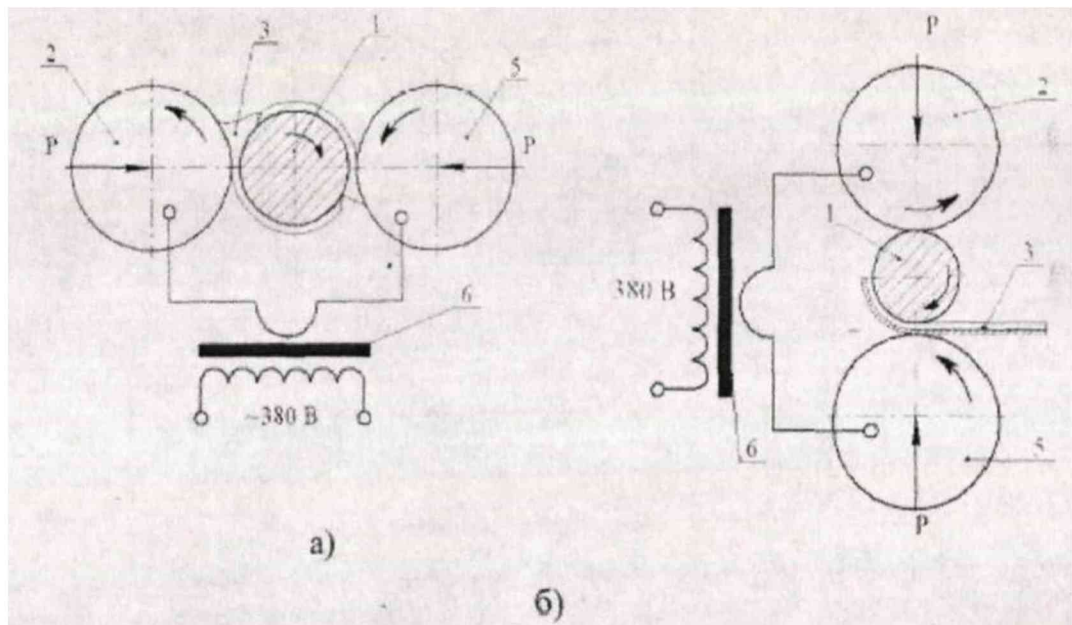


Рисунок 1.6 - Способи ЕКП: а) пастоподібного порошку; б) порошоків, частково ув'язнених в оболонку, або порошоків, закріплених на підкладці

Позначеннями на всіх вище наведених рисунках є: 1 - відновлювана деталь; 2, 5 - дискові ролики-електроди; 3 – присадний матеріал; 4 - бункер-дозатор; 6 - джерело живлення зварювального струму.

Крім того, у розглянутому технологічному варіанті приварки покриття скрутне охолодження деталі й електродів, причому, остання обставина має дуже великий вплив на стабільність процесу. Плинність порошкових матеріалів у великій мірі залежить від геометричної форми часток, їх розмірів, щільності, магнітних властивостей і ін., і тому у випадку використання суміші порошоків завдання їх стабільної подачі в зону приварки є найчастіше досить складною.

Спосіб приварки попередньо спечених порошоків. Заготовки з попередньо спечених порошоків можуть бути виконані у вигляді стрічок, листів (рис. 1.5 а) або матеріалів, що мають необхідну форму пластинок, що відповідають по розмірах величині ділянки, що підлягає нанесенню покриття.

Технологія виготовлення спечених заготовок полягає в складанні суміші порошоків потрібного складу, багатогодинному змішуванні композиції з додаванням невеликої кількості рідини, прокатці суміші (або пресуванні заготовок потрібної форми), спіканні заготовок, звичайно у відновлювальній атмосфері. Таким чином, при даному способі точно задають і забезпечують

необхідний склад, товщину й властивості вихідного матеріалу, що підлягає контактній приварці. Склад матеріалу, що приварюється, практично не змінюється через короткочасність протікання процесу формування покриття й з'єднання його з деталлю, ініційованого теплотою, що виділяється в зоні контакту при проходженні імпульсів струму тривалістю не більш 0,1 с.

Спечені порошкові стрічки в початковий період їх дослідження одержали досить широке практичне застосування у виробництві. Однак висока вартість спечених матеріалів і складність їх придбання, зокрема досить більші обсяги замовлення, привели до того, що в цей час лише 4-5 підприємств використовують дану технологію. У той же час слід зазначити ряд недоліків технологій у їхньому сучасному виді. Так у силу особливостей технології виготовлення всі спечені матеріали мають пористість у межах 10-40%, яку можна в зазначених межах регулювати умовами прокатки й, особливо, спіканням. У процесі ЕКПП пористість різко знижується й може бути доведена до 1-5% з одночасною усадкою матеріалу, що приварюється, яку необхідно враховувати в технологічному процесі.

Недоліком підвищеної пористості є істотна крихкість цього присадного матеріалу, що викликає найчастіше необхідність попереднього «формування» відрізаної заготовки, особливо у випадках відновлення валів малого діаметра із застосуванням високолегованих видів порошкової спеченої стрічки. Крім того, такі марки спеченої стрічки мають більшу твердість, і різання заготовок від великого шматка повинне здійснюватися за допомогою гільйотинних ножиців, особливо у випадках, коли товщина стрічки перевищує 1мм. Необхідність попереднього різання (розкрою) стрічки збільшує загальну трудомісткість і сприяє втратам стрічки при розкрої, тому що маленькі обрізки використовувати важко, хоча й можливо, оскільки границі між ними в процесі приварки повністю заплаваються. Спечена стрічка має підвищену стійкість до корозії й повинна зберігатися в сухих приміщеннях.

Спосіб приварки порошково-полімерних стрічок (ППС). Сутність даного способу полягає в наступному. Суміш порошоків потрібного складу ретельно

переміщується з рідким полімеризуючим матеріалом, складаючи густу масу, яку прокочують до одержання потрібної товщини й розмірів.

Після полімеризації сполучного матеріалу виходить так звана порошково-полімерна стрічка, досить пластична й схожа на гумову пластинку, що дозволяє обернути її навколо вала діаметром більш 30 мм, що підлягає відновленню (рис. 1.6б). Після цього процес приварки в принципі мало відрізняється від варіантів приварки катаної або спеченої стрічки.

Даний спосіб виготовлення присадного матеріалу із суміші порошків значно простіше й дешевше, ніж виготовлення спеченої стрічки, оскільки не вимагає складного встаткування й може бути здійснений на будь-якому підприємстві. Однак, як і в інших розглянутих вище варіантах, застосування порошково-полімерної стрічки було реалізовано лише дослідно-виробничому масштабі через ряд негативних сторін даного способу.

Незважаючи на те, що в складі порошково-полімерної стрічки кількість зв'язувального матеріалу не перевищує 10% по вазі, саме використання полімеру створює ряд труднощів, у тому числі, екологічного характеру. Дослідникам поки не вдалося підібрати полімер, що повністю відповідає як технологічним вимогам процесу контактної приварки, так і вимогам безпеки.

У процесі виготовлення стрічки також доводиться мати справу з токсичними полімерними матеріалами. Таким чином, спосіб контактної приварки, що відрізняється гранично сприятливими екологічними характеристиками, перетворюється в виробничо небезпечний у випадку використання полімерної стрічки, тобто втрачає одне з найважливіших своїх переваг перед дуговою й газотермічними методами напилювання. Слід також зазначити, що в ППС більшість металевих часток порошку ізольовані друг від друга тонкими плівками зв'язувального полімеру, тому в початковому стані до стиснення цей матеріал є практично ізолятором, тобто стрічка не проводить струм. Тільки в результаті прикладення до стрічки стискальних зусиль ролика металеві частки порошку, руйнуючи пластичну полімерну плівку, входять у безпосередній контакт між собою, і на даній ділянці стрічка стає

струмопровідною.

Спосіб приварки порошків, частково замкнених в оболонку, і порошків, закріплених на підкладці . Є уривчаста інформація про спроби приварки контактним способом з використанням одночасно часткової оболонки і явища гравітації. У цьому випадку використовується сталева стрічка з відбортовкою по краях або вигнута (сформована) у форму жолоба. На стрічку такого типу насипають суміш порошків до рівня відбортовки або висоти стінок жолобу, а стрічку подають під нижній електрод, у результаті чого порошок опиняється, як би затиснутим між поверхнею деталі (у цьому випадку вала) і сталеною стрічкою, що притискається електродом (рис. 1.6 б). Принципова реалізація варіанта приварки за описаною схемою не представляє труднощів і в цьому полягає, очевидно, одне з деяких її переваг.

До позитивних сторін такого варіанта можна віднести також і те, що поверх привареного покриття завжди розташовується м'яка й дешева стрічка з низьковуглецевої сталі, що скорочує витрату дорогих порошкових матеріалів. Однак даний спосіб лише полегшує подачу порошків, не вирішуючи завдання їх утримання під дією магнітного поля, охолоджувальної рідини й інших факторів, що негативно впливають на процес. Різновидом описаного способу можна вважати варіант приварки порошків, закріплених на підкладці, наприклад на тій же сталевій стрічці. Однак використання полімерних матеріалів для закріплення часток порошків погіршує умови безпеки праці й крім того, ускладнюється регулювання товщини шару і не забезпечується сталість складу покриття тощо.

1.4. Порошкові сплави для ЕКН.

Як показує практика, застосовувати покриття з металевих порошків ГОСТ 28377-89 вигідно в ремонтному виробництві [7, 8, 9].

Тому що розміри й гранулометричний склад порошків впливають на якість і властивості покриттів їх класифікують (табл. 1.1).

Для напилювання й напікання переважно використовувати порошки з першого по дев'ятий клас, а для наплавлення - з восьмого по вісімнадцятий. Таблиця 1.1 - Класифікація порошків по розміру часток

Позначення класу	Розмір часток (фракція), мкм	Позначення класу	Розмір часток (фракція), мкм
1	5-20	10	100-140
2	5-45	11	400-280
3	20-45	12	100-400
4	Менш 45	13	100-630
5	20-63	14	160-280
6	Менш 63	15	280-400
7	40-100	16	Менш 400
8	Менш 125	17	Менш 630
9	90-100	18	Менш 800

Таблиця 1.2 - Класифікація порошків на основі кольорових металів

Найменування порошку	Позначення порошку	Умовна позначка типу порошку
Бронзи алюмінієві, алюмінійзалізні	БрЮ, БрЮЗ	ПР
Бронзи цинисті, цинонікелеві, циноцинкові	БрОл, БрОлН, БрОлЦн	ПР
Бронзи хромові	БрХ	ПР
Латуні	Л	ПР

По хімічному складу порошки на основі кольорових металів підрозділяють на групи й підгрупи (табл. 1.2).

У позначенні марок порошків по хімічному складу включають літерні позначення елементів (компонентів) і номінальний зміст одного-трьох легуючих елементів у відсотках, зазначене після відповідної букви. Наприклад, БрО-10, БрОС-15-5, БрАЖНМЦ. Хімічний склад порошків багато в чому визначає їхнє призначення.

1.5. Установка для напикання порошкових сплавів.

Для цілей електроконтактного напикання використовують машини для контактного зварювання, які класифікуються:

- 1) по типу застосування - точкові, рельєфні, шовні й стикові;
- 2) по роду зварювального струму - змінного або постійного струму й конденсаторні;

3) по характеру зусилля стиску за цикл – з постійним зусиллям, зі змінним зусиллям.

Машини змінного струму використовуються для всіх способів контактного зварювання й одержали велике поширення через простоту конструкції й універсальності. Електричні й механічні характеристики машин визначають їхні технологічні можливості, тобто можливості напикання металевих порошків на деталі з матеріалів різних марок і товщини.

Теоретичну основу технології становить ряд фізико-хімічних процесів, що протікають при формуванні з'єднань. Технологія визначає вимоги до зварювального устаткування.

Зварювальне устаткування – комплекс пристроїв (механічних і електричних), що забезпечують виконання заданої технології виробництва зварних конструкцій. Устаткування складається з машини, засобів механізації й автоматизації, апаратури керування технологічним процесом зварювання (рис. 1.7).

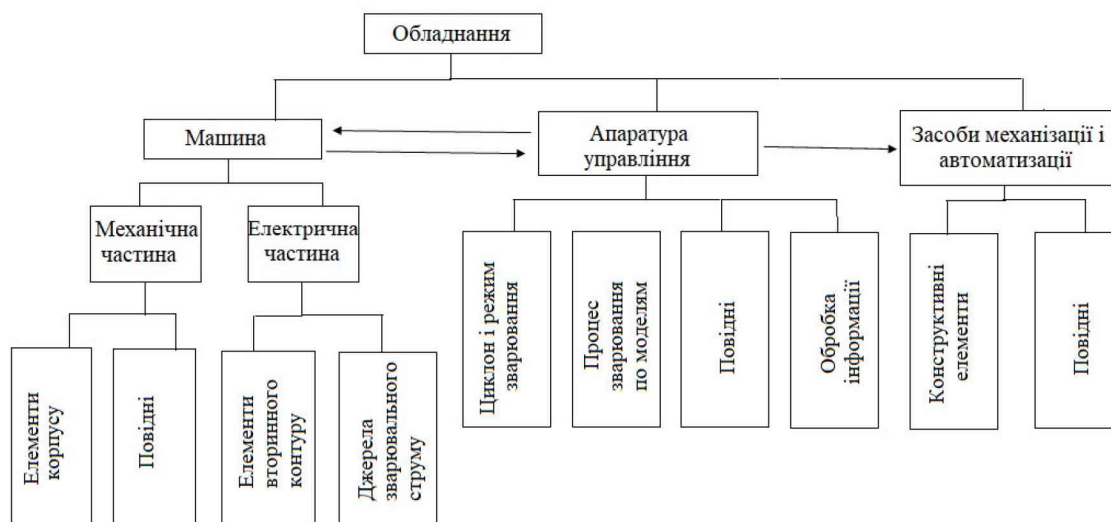


Рисунок 1.7 - Структура зварювального устаткування

Машинa складається із двох частин: 1) механічної частини, що включає конструктивні елементи, які створюють твердість і міцність (корпус, станина, кронштейни тощо), приводи для стиску й переміщення деталей і елементи вторинного контуру машини (консолі, електродотримачі, електроди); 2) електричної частини, що складається із джерела зварювального струму

(зварювального трансформатора, випрямляча, перетворювачів струму, акумулятора електричної енергії – батареї конденсаторів тощо) і вторинного контуру для підведення струму від джерела живлення до електродів. Засоби механізації й автоматизації являють собою пристосування до універсальних машин, роботи, автоматичні пристрої, які забезпечують складання, установку деталей перед зварюванням, переміщення їх під час зварювання й знімання зварених вузлів, формозміна деталей до й після зварювання, зачищення деталей, електродів і роликів тощо [10].

Апаратура керування визначає задану послідовність і тривалість усіх або частини операцій зварювального процесу, керування й регулювання основних електричних і механічних параметрів режиму зварювання, контроль і керування процесом.

1.6. Мета і завдання дослідження.

Враховуючи досить високу ефективність способу електроконтактного напикання металевих порошків на зношені поверхні сталевих деталей і наявність металевих порошків з кольорових металів і сплавів різного хімічного складу, а також велику потребу у відновленні деталей з кольорових металів і сплавів, була поставлена мета дослідження технологічного процесу відновлення зношених поверхонь бронзових деталей типу втулка із застосуванням металевих порошків з кольорових металів і сплавів методом електроконтактного напикання з одночасним підвищенням післяремонтного ресурсу відновлених деталей [11].

Відповідно до поставленої мети визначено такі основні завдання дослідження:

- розробити технологічні режими нанесення порошків з кольорових металів і сплавів на зношені поверхні деталей при ЕКН;
- дослідити фізико-механічні властивості одержуваного покриття;
- розробити практичні рекомендації використання порошків з кольорових металів і сплавів при процесі ЕКН.

2. ТЕОРІЇ ПРОЦЕСУ ЕЛЕКТРОКОНТАКТНОГО НАПІКАННЯ МЕТАЛЕВИХ ПОРОШКІВ НА МЕТАЛЕВІ ПОВЕРХНІ

2.1. Теорія напикання одно і багато компонентних металевих порошків на металеві поверхні

Напикання є одним з важливих технологічних процесів, застосовуваних при виготовленні або відновленні матеріалів і виробів.

Напикання є нагрівання і витримка порошкового матеріалу при температурі нижче точки плавлення основи, однак це не означає, що в процесі нагрівання взагалі не повинне відбуватися розплавлення якої-небудь складової у випадку багатокомпонентних матеріалів.

Напикання насипаного порошку являє собою комплекс фізико-хіміко-механічних явищ, що протікають одночасно або послідовно.

Порошкові матеріали являють собою складні системи, спікання яких викликає труднощі, пов'язані з:

- зниженою вільною енергією складових компонентів;
- значним впливом власних діаграм стану складових компонентів на процес спікання;
- гетеродифузією у багатокомпонентних системах, яка може приводити до гальмування процесу усадки насипного шару порошку;
- охолоджувані водою електроди служать найсильнішими охолоджувачами.

Враховуючи все це, у конструкцію пристосування для напикання металевих порошків на поверхню деталі були введені графітові вставки. Дані вставки в процесі напикання нагрівалися одночасно з порошком і деталлю й забезпечували рівномірність нагрівання насипаного шару порошку й деталі, підтримку температурного поля в заданих тимчасових інтервалах і забезпечували повільне охолодження напеченого шару разом з деталлю.

2.1.1. Спікання однокомпонентних систем

При аналізі процесів, що супроводжують нагрівання порошкових тіл, виділяють шість стадій спікання: 1) розвиток і виникнення зв'язків між частками;

2) утворення і ріст “шийок” міжчасткових контактів; 3) закриття наскрізної пористості в порошковому тілі; 4) сфероїдизація пор; 5) ущільнення порошкового тіла за рахунок усадки ізольованих пор; 6) укрупнення пор.

Розвиток зв'язків між частками починається відразу з нагріванням порошкового тіла, тобто на самому ранньому етапі спікання. Це - дифузійний процес, що приводить до утворення і розвитку міжчасткових границь і, отже, збільшенню міцності й електропровідності порошкового тіла. Результат цієї стадії - виникнення “шийки”.

Ріст “шийок” контактів - природне продовження процесу міжчасткового зв'язування; його необхідна умова - перенос речовини в область міжчасткового контакту, який може бути здійснений за допомогою різних транспортних механізмів. Порошкове тіло стає більш міцним і електропровідним. У якийсь момент міжзерені (міжчасткові) границі починають переміщатися, і їхнє первісне розташування порушується. Спікаєме порошкове тіло за структурою наближається до стану двох безладно перемежованих фаз речовини й порожнечі. Звичайно вважають, що ріст “шийок” відбувається досить швидко й характеризує початковий етап спікання. Однак ця стадія може тривати й при більш пізніх стадіях спікання.

Закриття наскрізної пористості є результатом росту “шийок” і приводить до появи ізольованих груп пор або навіть окремих пор. При цьому загальний (сумарний) обсяг пор у порошковому тілі зменшується й відбувається його ущільнення (усадка).

Сфероїдизація пор – стадія, що як і попередня, пов'язана з ростом “шийок”: речовина з деяких ділянок поверхні пор переміщається в область міжчасткового контакту, а самі пори округляються, здобуваючи сферичність.

Усадка ізольованих пор - одна з найбільш важливих стадій спікання, що вимагає високих температур і достатньо тривалого нагрівання. Тільки її завершення може привести до одержання безпористого (компактного) порошкового тіла.

Укрупнення пор полягає у рості великих пор за рахунок зменшення

розмірів і зникнення дрібних, ізольованих пор. Загальна пористість при цьому зберігається незмінною, а число пор зменшується при збільшенні їх середнього розміру.

У порошковому тілі, що нагрівається, можливі наступні механізми транспорту речовини: перенос через газову фазу; поверхнева дифузія; об'ємна дифузія; в'язкий плин; плин, викликаний зовнішніми навантаженнями (гаряче пресування, спікання під тиском і подібні випадки).

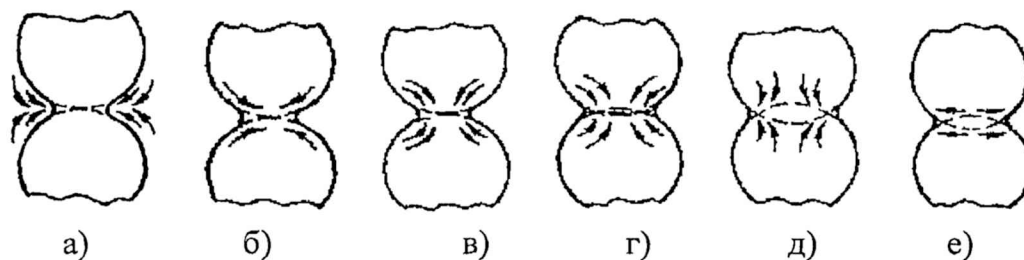


Рисунок - 2.1 Схеми дії різних механізмів при спіканні

Перенос речовини через газову фазу. Згідно з моделлю, що демонструє цей вид транспортного механізму (рис. 2.1.а), речовина випаровується з опуклих ділянок часток і конденсується на ввігнутій поверхні контактних перешийків. Цей механізм часто називають “випарювання - конденсація”. Він повинен приводити до росту “шийок” і сфероїдизації пор і буде діяти доти, поки в порошковому тілі зберігається помітна різниця в кривизні окремих ділянок поверхні розподілу «речовина – пора». Спрямований перенос речовини в зону міжчасткового контакту приводить до зміцнення й поліпшення електропровідності порошкового тіла, але не може викликати зміну його об’єму, тобто усадку. Цей механізм відіграє помітну роль лише у випадку матеріалів з відносно високим тиском пару при температурі спікання (не нижче 1-10 Па), тобто коли кількість перенесеного через газову фазу матеріалу може бути значним.

Поверхнева дифузія. Рухливість поверхневих атомів залежить від займаного ними місця. У порядку зростання рухливості їх можна розташувати в такий спосіб:

- найменш рухливі атоми, що перебувають усередині контактних ділянок,

- потім ідуть атоми на границях контактної ділянки,
- атоми в поглибленнях і западинах поверхні,
- атоми на рівних ділянках,
- атоми на виступах поверхні часток. Тому що атоми на міжчасткових контактних ділянках менш рухливі, мають менший запас вільної енергії, ніж на всіх інших ділянках поверхні, то від вільних, неконтактних ділянок до контактних переходить значно більше атомів, ніж у зворотному напрямку, і відбувається розширення контактної ділянки (рис. 2.1 б). Отже, при поверхневій міграції атомів пори будуть сфероїдизуватися без зміни їх сумарного об'єму, тобто *перенос маси по цьому механізму не приводить до усадки порошкового тіла при спіканні.*

Разом з тим, у збільшенні міцності міжчасткового зчеплення (основна ознака спікання) поверхнева й приповерхнева міграції атомів відіграють дуже важливу роль. Поверхнева дифузія атомів приводить до вигладжування поверхні дотичних часток, а також забезпечує переміщення атома з поверхні великої пори на поверхню більш дрібної пори, тобто в положення більшої термодинамічної стійкості.

Таким чином, на всіх стадіях спікання поверхнева дифузія приводить до збільшення й зміцнення міжчасткових контактів. При забрудненні поверхні часток різного роду хімічними домішками (оксидами, механічними включеннями сторонніх речовин і ін.), а також дислокаційними лініями що вийшли на поверхню, переносу маси навіть при значній дифузійній рухливості атомів не буде.

Поверхнева дифузія вносить найбільш значний внесок у формування властивостей порошкового тіла на перших стадіях спікання.

Об'ємна дифузія. В об'ємі частки перенос речовини пов'язаний з рухом атомів. Переміщення атомів у кристалічних решітках речовини - це послідовне заміщення ними вакансій. Коефіцієнт об'ємної дифузії атомів D пов'язаний з концентрацією вакансій C_0 рівністю $D = C_0 D'$, де D' - коефіцієнт дифузії вакансій ($D' = D_0 e^{-E_a/kt}$, де D_0 - температурно-незалежна величина, а E_a - енергія активації

руху атомів або вакансій). З урахуванням C_0 одержуємо $D = D_0 e^{-E_0/kt}$, де E_0 - енергія активації дифузії, рівна $E_0 = E_b + E_a$. З підвищенням концентрації вакансій ($C > C_0$) збільшується коефіцієнт дифузії атомів.

При припіканні двох сферичних часток у зв'язку з об'ємною дифузією можливі два результати залежно від структури області контактної перешийки. У першому випадку стоком надлишкових вакансій, що виникають поблизу ввігнутої поверхні "шейки", є опукла поверхня порошинки (тобто між частками відсутня сформована границя, наприклад при спіканні вільно насипаного порошку) і ріст площі контактів не супроводжується зближенням геометричних центрів часток (рис. 2.1. в). У другому випадку стоком надлишкових вакансій є границя між, припікаємими порошинками й ріст площі контактів між ними супроводжується зближенням центрів часток (рис. 2.1. г).

Установлено, що загальний час τ_{II} повного дифузійного заростання сферичної пори початковим радіусом r_0 від поверхні якої надлишкові вакансії ($\Delta C = C_0 2\gamma V_0 / kTr_0$) рухаються до зовнішньої поверхні твердої речовини, що служить місцем її розташування (атоми рухаються в протилежному напрямку), становить:

$$\tau_{II} = (kT / 6DV_0) r_0^3 \quad (2.1)$$

У будь-який момент часу ізотермічної витримки при спіканні ізольована сферична пора буде мати радіус r , рівний

$$r^3 = r_0^3 - (6\gamma DV_0 / kT) \tau. \quad (2.1)$$

В'язкий плин (рис. 2.1 д). В аморфних тілах в'язкий плин відбувається по механізму неграничної повзучості шляхом кооперативного переміщення атомів. Для кристалічних тіл в'язкий плин - це також процес неграничної повзучості, однак переміщення атомів не є процесом кооперативним, а є результатом незалежних стрибкоподібних переміщень атомів.

У кристалічних тілах масоперенос внаслідок в'язкого плину суттєво залежить від структури речовини, тобто коефіцієнт в'язкості η є константою не речовини взагалі, а речовини при даному стані структури.

Плин речовини, викликаний зовнішніми навантаженнями пов'язане з

деформацією часток (рис. 2.1 е).

Ущільнення порошкового тіла. Під час спікання щільність порошкового тіла зростає й відбувається зменшення його розмірів (лінійна усадка) і об'єму (об'ємна усадка) як наслідок скорочення числа й об'єму пор у результаті їх заростання. Умовно процес усадки (ущільнення) порошкового тіла при ізотермічному спіканні можна розділити на три стадії, що протікають послідовно:

1. *Рання стадія.* Щільність порошкового тіла мала й швидкість ущільнення визначається процесами, що відбуваються в приконтактних областях. Швидкість зсуву відносно один одного й об'ємного деформування часток, що приводить до усадки пористої конструкції, висока.

2. *Проміжна стадія.* Щільність порошкового тіла досить велика. Пориста матриця із часток поводить як в'язке середовище і її ущільнення рівномірне по всьому об'єму (при рівномірному розподілі пор).

3. *Пізня стадія.* Порошкове тіло містить окремі ізольовані пори, які заліковуються (заростають) у результаті дифузійного розчинення в матричній речовині з виходом вакансій на зовнішню (габаритну) поверхню спікаємого виробу.

Однією з характерних рис усадки порошкового тіла, що нагрівається, є затримка її швидкості при ізотермічній витримці (рис. 2.2.): з підвищенням температури спікання швидкість підвищення щільності збільшується, але зменшення цієї швидкості з підвищенням температури спікання відбувається більш інтенсивно.

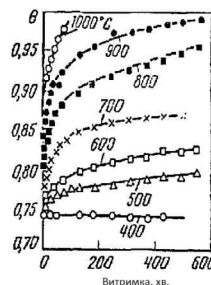


Рисунок 2.2 – Зміна відносної щільності (вихідна 0,74) пресування нікелю при ізотермічному спіканні

2.1.2. Спінання багатокомпонентних систем

Порошкові матеріали, які використовуються в різних галузях техніки, у переважній більшості випадків являють собою багатокомпонентні системи [12, 13]. Головна відмітна риса таких матеріалів - відмінність концентрацій компонентів у різних точках порошкового тіла (градієнт хімічних потенціалів), спостережуване або тільки у вихідному стані й на проміжних етапах спікання, або також і в кінцевому стані, якщо компоненти не повністю розчинені друг у друзі у твердому стані. Основною причиною їх нерівноважного стану є неоднорідність хімічного складу. У таких матеріалах одночасно із самодифузією повинна відбуватися гетеродифузія, що забезпечує вирівнювання концентрацій компонентів.

Прийнято розрізняти два види твердофазного спікання багатокомпонентних систем: 1) спікання компонентів, що володіють повною (необмеженою) взаємною розчинністю; 2) спікання компонентів, що володіють обмеженою взаємною розчинністю; спікання компонентів, взаємно нерозчинних.

Системи з повною взаємною розчинністю компонентів.

У результаті спікання таких систем (Cu-Ni, Fe-Ni, Co-Ni, Cu-Au і ін.) утворюється одна фаза (твердий розчин); на проміжних стадіях спікання існує кілька фаз: частки вихідних металів і тверді розчини змінної концентрації.

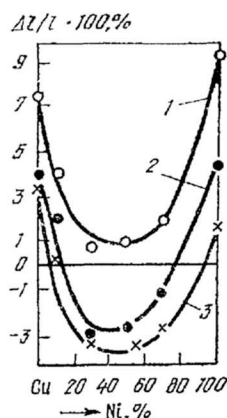


Рисунок 2.3 - Концентраційна залежність усадки для суміші порошків Ni і Cu при спіканні (1000°C) з різною витримкою: 1) - 4 год; 2) - 15 хв; 3) - 0 хв (нагрівання + охолодження)

Усадка порошкового тіла при нагріванні, як правило, менше адитивної, розрахованої виходячи з можливої усадки кожного з компонентів. Це пояснюється більш низькою рухливістю атомів у твердих розчинах у порівнянні із чистими металами й неможливістю одержати при змішуванні вихідних компонентів абсолютно однорідну суміш, через що швидкість дифузії атомів неоднакова. Так, у системі Cu -Ni (рис. 2.3) при підвищенні змісту Ni у Cu (або навпаки) усадка зменшується й може відбуватися навіть ріст порошкового тіла, що пов'язане з більшим коефіцієнтом дифузії Cu в Ni у порівнянні з коефіцієнтом дифузії Ni у Cu: у частках міді утворюються надлишкові вакансії, що коаліцюють в пори, а частки нікелю збільшуються в розмірах через перевагу притоку атомів міді над відтоком атомів нікелю.

Однак при спіканні суміші порошоків деяких із систем можна спостерігати зростання швидкості ущільнення з ростом вмісту другого компонента. Так, у системі W - Mo є слабо виражений максимум у концентраційній залежності усадки (рис. 2.4).

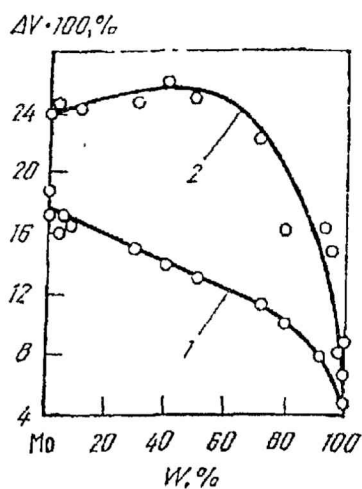


Рисунок 2.4 - Концентраційна залежність усадки для суміші порошоків W і Mo в результаті ізотермічного спікання при 1350°C (1) і 1750°C (2) протягом 30 хв

Істотна особливість спікання кожної з розглянутих систем полягає в тому, що деякі з контактів між однойменними й різнойменними порошинками можуть порушуватися. Причини цього - напруги в зоні контакту дифузійного

походження, “зникнення” порошинки, яка внаслідок випаровування або поверхневої дифузії переміститься на поверхню іншої порошинки, і ін.

Для розв'язання практичних завдань важливе питання про необхідний ступінь гомогенізації по складу сплавів, що утворюються при спіканні: тому що багато властивостей порошкових тіл визначаються величиною й станом контактних поверхонь між частками, у ряді випадків досягнення повної гомогенізації сплаву усередині часток виявляється непотрібним.

Системи з обмеженою розчинністю компонентів.

У практиці порошкової металургії такі системи зустрічаються найбільше часто: наприклад, Fe-C, W-Ni, Cu-Ag, Mo-Ni-Cu.

Для них характерні діаграми стану як з евтектикою і перитектикою, так і з хімічними сполуками. При нагріванні на проміжних стадіях гомогенізації в порошковому тілі присутні всі фази, наявні на діаграмі, практично незалежно від вихідного складу суміші порошків. Залежності усадки від змісту елементів у сплаві відрізняються від лінійних, а їх характерний вид (напрямок опуклості) може бути різним. Наприклад, для системи W-Ni при близькій дисперсності вихідних порошків спостерігається крива із плавним мінімумом (рис. 2.5).

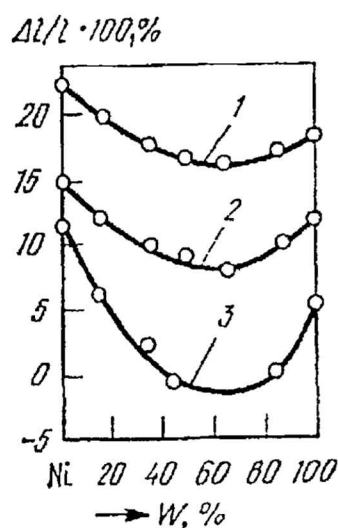


Рисунок 2.5 - Концентраційна залежність усадки для суміші порошків W і Ni при ізотермічному спіканні (1000°C) з різною витримкою:

- 1) - 7 год;
- 2) - 3 год;
- 3) - 0 (нагрівання + охолодження)

Властивості матеріалів, утворених розглянутими системами компонентів після спікання, залежать від ряду факторів: повноти гомогенізації в області обмежених твердих розчинів, пористості, досконалості міжфазних і однофазних контактів і ін. Роль гетеродифузії зводиться до забезпечення вирівнювання концентрацій елементів в області обмеженої розчинності, причому досягнення гомогенності в більшості випадків небажане (при граничних концентраціях багато показників властивостей обмежених твердих розчинів максимальні).

Системи з нерозчинними компонентами.

Прикладами таких систем є Cu-C, W-Ag, W-Cu, Mo-Cu і ін. Термодинамічна умова припікання двох часток різнорідних невзаємодіючих компонентів має вигляд: $\sigma_{AB} < |\sigma_A + \sigma_B|$, де σ - поверхнева енергія; тобто поверхнева енергія, що утворюється в межфазній границі АВ повинна бути менша, ніж сума поверхневих енергій часток А і В, а якщо ні, то порошокове тіло спікатися не буде. Механізми й кінетики припікання суттєво різняться для двох можливих випадків при дотриманні даної умови:

$$\sigma_{AB} < |\sigma_A - \sigma_B| \quad (2.3)$$

$$\sigma_{AB} > |\sigma_A - \sigma_B| \quad (2.4)$$

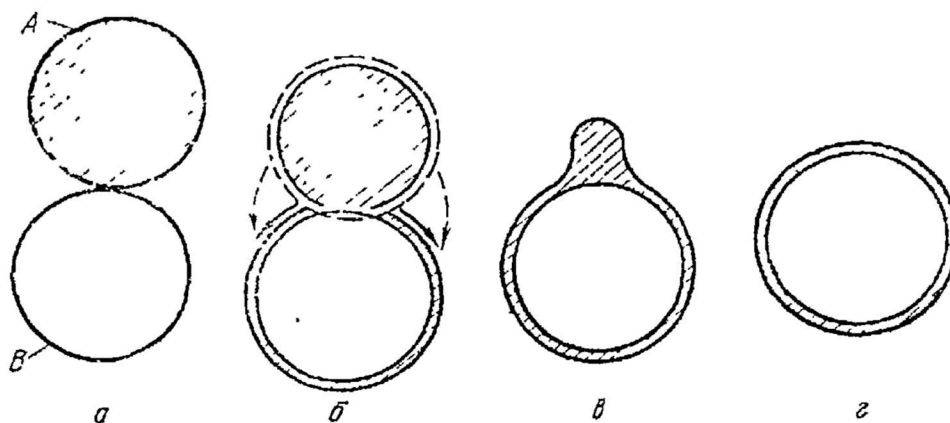


Рисунок 2.6 - Схематичне зображення етапів (а - г) припікання часток

У випадку, коли виконується співвідношення (2.3), енергетично доцільне покриття поверхні частки речовини з більшою поверхневою енергією речовиною з меншою поверхневою енергією (рис. 2.6). Спочатку (стадія а) частка такої речовини (нехай це буде речовина В) покривається шаром атомів другої речовини (у цьому випадку речовини А) за допомогою механізму поверхневої

гетеродифузії або шляхом переносу через газову фазу; при цьому форма вихідних часток зберігається. Потім контактна площа між часткою А і часткою В, покритої шаром речовини А, збільшується (стадія б), що супроводжується зменшенням сумарної поверхні в системі А–В й, відповідно, її вільної енергії. Кінетика цього етапу припікання близька до кінетики припікання двох однорідних сферичних часток, хоча речовина в область приконтактного перехідка буде надходити від однієї порошокинки А, а не від обох часток А і В. Злиття сферичних часток А і В повинне завершитися утворенням сферичного тіла, ядром якого буде частка В (стадії в і г).

Коли нижня границя величини σ_{AB} задається умовою (2.4) (більш розповсюджений випадок у практиці порошокинної металургії), припікання часток суттєво відрізняється від розглянутого. Розподіл речовин А і В в області контактного перехідка визначається границею, яка має форму сфери з опуклістю убік частки з меншою поверхневою енергією, і порошокинка речовини з більшою поверхневою енергією як би вдавлюється в порошокинку речовини з меншою поверхневою енергією. Повного ущільнення порошокинного тіла при цьому не досягається.

Як відомо, при електроконтактному напіканні металевих порошокин за допомогою зварювальних машин, основними параметрами процесу електроконтактного напікання для одержання необхідної величини теплоти для напікання порошокини на поверхню деталі є сила струму I (А) і тривалість імпульсу протікання струму t (с). Але електроконтактне напікання металевих порошокин на поверхню деталі супроводжується одночасно прикладенням зусиль для пластичного деформування зерен порошокини і їх дифузії в поверхневий шар деталі.

У процесі електроконтактного напікання порошокинного матеріалу відбувається ущільнення порошокини. У первісний момент електрод зварювальної машини однократно пресує насипаний шар порошокини із зусиллям, установленим відповідно до режиму напікання. Спресований шар (холодне пресування) характеризується певною щільністю, електричним опором і товщиною. При протіканні імпульсу струму, шар порошокини розігрівається, додатково

ущільнюється під дією прикладеного зусилля на електрод, який під дією цього зусилля переміщається на певну величину ΔL . Одночасно відбувається спікання зерен порошку між собою й припікання шару порошку до поверхні деталі.

2.2. Вплив геометричного, температурного й магнітоелектричного факторів на якість відновлюваної поверхні

Основними параметрами процесу ЕКН є величина й тривалість імпульсу струму, а також тиск електродів на порошковий шар [14].

Технологічні й експлуатаційні властивості покриттів, одержуваних ЕКН металевих порошоків, залежать від великої кількості факторів, що характеризують матеріали деталі й вихідного порошку, і їх габарити. Так, наприклад, зносостійкість і твердість покриттів визначаються не тільки властивостями вихідних порошкових матеріалів, але й режимами напікання. При постійному хімічному складі вихідного порошку зносостійкість, твердість і міцність зчеплення покриття з основою змінюються в широких межах.

Аналіз результатів досліджень показує, що при постійному вихідному порошковому матеріалі властивості покриттів, отриманих ЕКН, визначаються умовами ущільнення порошку й температури.

Геометричний фактор обумовлений тим, що розміри електричних контактів, як правило, набагато менше розмірів деталей. Ілюстрацією впливу геометричного фактора служить характер електричного поля в рівномірно нагрітих деталях при електроконтактному напіканні (рис. 2.7 а). Електричне поле, що характеризується в цьому випадку розподілом потенціалів, симетрично відносно z.

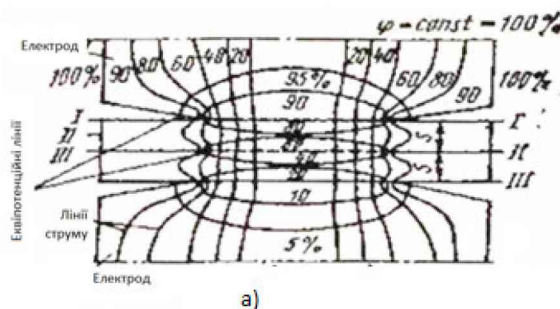
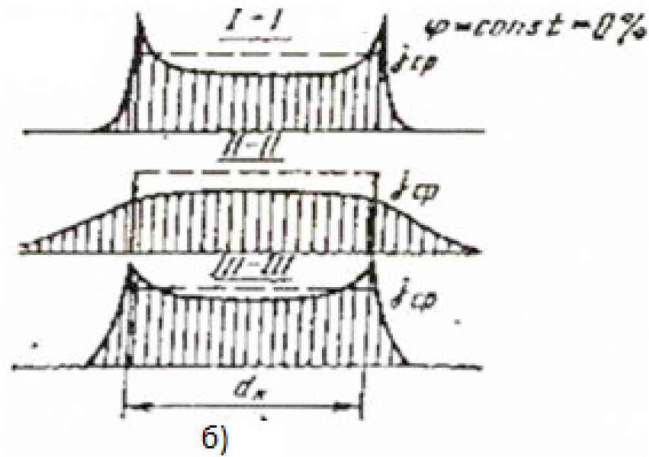


Рисунок 2.7 - Електричне поле при електроконтактному напіканні:

а) - розподіл потенціалів ϕ ;



б) - розподіл щільності струму в різних перетинах без урахування контактних опорів

Поле щільності струму залежить від абсолютних значень потенціалів і електричних опорів деталей і електродів. Найбільші щільності струму (рис. 2.7,б) у перетинах I-I і III-III досягаються поблизу границь контактів у результаті розтікання струму в електродах і деталях. У перетині II-II щільність струму поблизу осі z практично постійна й поступово убуває за границями контакту. Нерівномірність електричного поля зростає зі зменшенням відносини d_k/s . Наприклад, при $d_k/s=3,3$ близько 25% струму протікає поза поверхнею циліндра з основою d_k , а при $d_k/s=5$ лише 15%. Характер поля залежить також від діаметра електрода, розташування в ньому охолоджувального каналу.

Електроди мають інтенсивне внутрішнє й зовнішнє охолодження із вказанням допустимості, необхідності і умови застосування зовнішнього охолодження в конструкторській або технологічній документації. Відстань від робочої поверхні електрода до охолоджувального каналу становить 12-16 мм, для забезпечення найбільшої стійкості електродів.

При ЕКН порошкових матеріалів електродом-пуансоном рівномірність ущільнення, а отже, і властивостей одержуваного покриття по площі напікання визначається відповідністю форми контактної поверхні електрода-пуансона формі відновлюваної поверхні деталі (табл. 2.1).

Електроди зі сферичною робочою поверхнею забезпечують більш інтенсивне нагрівання при відносно менших струмах, ніж електроди із плоскою

робочою поверхнею. А електроди із плоскою поверхнею забезпечують більш інтенсивну тепловіддачу, так як пляма контакту з поверхнею деталі значно більше, ніж в електродів зі сферичною поверхнею.

Таблиця 2.1 - Комбінація електродів залежно від умов їх функціонування.

Умови функціонування електродів	Комбінація електродів
Плоскі деталі з більшим радіусом кривизни, матеріали рівної товщини, матеріали різної товщини.	Електроди з однаковими за формою й розмірам робочими поверхнями. З боку тонкої деталі електрод повинен бути з меншим розміром робочої поверхні, ніж з боку деталі більшої товщини.
Різнорідні матеріали.	З боку матеріалу з більшою теплоелектропровідністю електрод повинен бути з меншим розміром робочої поверхні.
На контактній поверхні не повинно бути вм'ятин.	Електрод повинен мати великий радіус кривизни або плоску робочу поверхню великого діаметра.

Електричне поле - сукупність потенціалів або щільностей струму в різних точках відновлюваних деталей у різні моменти часу.

Для ЕКН характерно нерівномірне електричне поле, що пов'язане з дією геометричного, температурного й магнітоелектричного факторів.

Температурний фактор - проявляється в обтіканні струмом більш нагрітих ділянок з'єднання, що відрізняються підвищеним опором, в умовах нерівномірного температурного поля й поля електричних опорів.

Магнітоелектричний фактор - пов'язаний із проявом поверхневого ефекту, ефекту близькості і т.п, мало впливає на характер електричного поля, за винятком випадку використання струмів підвищеної частоти.

Залежно від ролі процесів тепловиділення і тепловідводу розрізняють жорсткі та м'які режими зварювання.

Жорсткий режим. Характеризується короткочасним потужним імпульсом струму, коли $t_{св} < 0,02s$ (с) при напиканні деталей різних товщин.

Температурне поле в цьому випадку визначається переважно тепловиділенням: ізотерма температури має при цьому форму, близьку до прямокутника (рис. 2.8), кути якого витягнуті у бік областей з підвищеною щільністю струму (до периферії контактів), а $Q_2+Q_3 < 20\%Q_{\Sigma}$.

Жорсткий режим характеризується високими швидкостями нагрівання й охолодження.

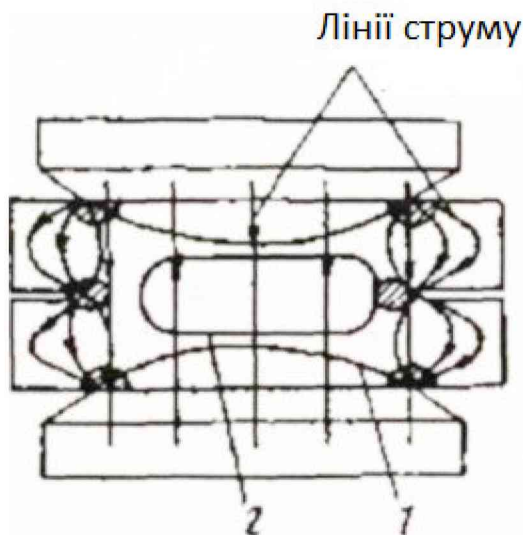


Рисунок 2.8 - Розподіл струмів при зварюванні на жорсткому (1) і м'яких режимах (2)

М'які режими - характерні значною тривалістю протікання струму ($t_{\text{св}} > 0,1\text{s}$) відносно малої сили. При цьому відбувається значний теплообмін усередині деталей і з електродами ($Q_2+Q_3 > 80\%Q_{\Sigma}$). Швидкість нагрівання й охолодження, а також величина $F_{\text{св}}$ менше ніж на жорстких режимах.

3. ЗАГАЛЬНА МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕНЬ

3.1. Вибір відновлюваних деталей для проведення експериментів.

Для визначення різних режимів напикання й інших параметрів процесу ЕКН були використані зразки із бронзи.

Зразки виготовлялися на токарському верстаті при режимах різання: $t = 1\text{ мм}$; $S = 0,12\text{ мм/об}$; $n = 670\text{ об/хв}$, охолодження - емульсія. Шорсткість поверхонь, на які напікалися порошки, мали різне значення.

3.2. Вибір порошкових матеріалів з кольорових сплавів

Алюмінієві бронзи. Ці сплави, на основі міді, у яких головним легуючим елементом є алюміній. Застосовуються подвійні Cu-Al (прості) і багатокомпонентні (Cu-Al-Fe, Cu-Al-Mn і ін.) алюмінієві бронзи.

Алюмінієві бронзи вигідно виділяються серед інших мідних сплавів високою корозійною стійкістю й застосовуються для виготовлення високонавантажених деталей, що працюють на стирання, а також такі що, витримують ударні навантаження (втулки, зубчасті колеса, шестірні, черв'ячні передачі). До таких бронз також можна віднести й багатокомпонентні алюмінієво-залозисті бронзи з аналогічним % вмістом Al, типу БрАЖ9-4, тому найбільший практичний інтерес представляють бронзи зі вмістом Al до 10% (рис. 3.1).

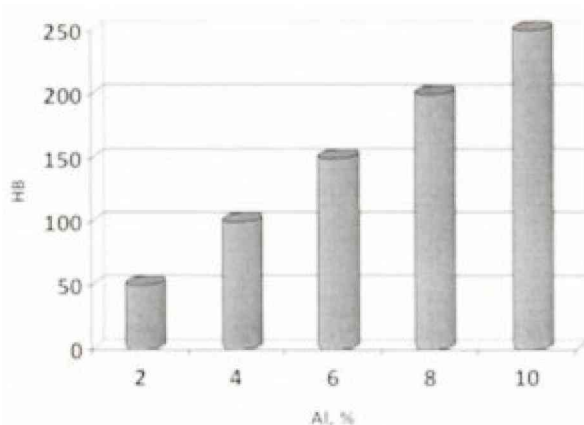


Рисунок 3.1 - Зміна поверхневої твердості алюмінієвих бронз Cu-Al залежно від вмісту алюмінію

Легування двокомпонентних алюмінієвих бронз різними елементами

помітно поліпшує структуру й підвищує механічні властивості бронзи. Основними легуючими елементами Cu-Al бронз є залізо, марганець, нікель.

Введення добавок заліза в сплави Cu-Al приводить до підвищення міцності й твердості бронзи (табл. 3.1).

Таблица 3.1- Хімічний склад бронзи без олова

Марка бронзи	Основні компоненти %							Домішки, не більше %		
	Al	Be	Fe	Mn	Ni	Si	Cu	As	Sb	Sn
БрА5	4-6	-	-	-	-	-	Ост	0,01	0,002	0,1
БрА7	6-8	-	-	-	-	-	Ост	0,01	0,002	0,1
БрАМц 9-2	8-10	-	-	1,5-2,5	-	-	Ост	0,01	0,002	0,1
БрАМц 10-2	9-11	-	-	1,5-2,5	-	-	Ост	0,05	0,05	0,2
БрАЖ 9-4	8-10	-	2-4	-	-	-	Ост	0,01	0,002	0,1
БрАЖ Мц10-3-1,5	9-11	-	2-4	1-2	-	-	Ост	0,01	0,002	0,1
БрАЖ Н10-4-4	9,5-11	-	3,5-5,5	-	3,5-5,5	-	Ост	0,01	0,002	0,1
БрБ2	-	1,8-2,1	-	-	0,2-0,5	-	Ост	-	-	-
БрКМц 3-1	-	-	-	1-1,5	-	2,75-3,5	Ост	0,002	0,002	-
БрКН 1-3	-	-	-	0,1-0,4	2,4-3,4	0,6-1,1	Ост	-	-	0,1

Спикання з різнорідних матеріалів - матеріалу зношеної деталі й матеріалу порошку - приводили до нестабільності результатів по зчіплюваності в процесі електроконтактного напикання. В принципі, як показують теоретичні розрахунки, спикання різнорідних матеріалів можливе, але для розв'язання цього завдання необхідно було розробити досить складне оснащення, яке створювало б постійне температурне поле в зоні напикання порошку на зношену поверхню деталі й ретельно регулювати режими напикання в процесі ЕКН. При напиканні однорідних матеріалів основи (зношеної деталі) і порошку ці труднощі знімалися. Тому для процесу ЕКН і подальших досліджень, напікаємих покриттів був узятий порошок, відповідний до марки матеріалу основи-деталі.

Найпоширенішою маркою бронзи, з якої виготовляють підшипники

ковзання типу «втулка», застосовуваних в конструкціях сільськогосподарських машин є бронза БрАЖ 9-4. Хімічний склад даного сплаву зазначений у табл. 3.2.

Таблиця 3.2 - Хімічний склад порошкового сплаву БрАЖ9-4

Марка бронзи	Основні компоненти %							Домішки, не більше %		
	Al	Be	Fe	Mn	Ni	Si	Cu	As	Sb	Sn
БрАЖ 9-4	8-10	-	2-4	-	-	-	Ост	0,01	0,002	0,1

При виборі класу величини металевих порошків відповідно до класів величини (табл. 1.1) проводилися попередні експерименти по визначенню щільності й зчіплюваності 3-х класів величини порошків - 2-го, 4-го й 7-го. Найбільш оптимальні результати виходили при напіканні порошків 4-го класу величини з розміром часток менше 45 мкм. Тому, у подальших експериментах використовувалися порошки 4-го класу величини.

3.3. Вибір флюсу

Як відомо, мідь є елементом який сильно окисляється. Оксид, що утворюється, CuO знижує пластичність і механічну міцність напеченого шару. Крім усього іншого, з'являються дрібні тріщини в розплавленому металі (воднева хвороба). Це й пояснює необхідність обов'язкового використання флюсів при роботах з міддю. У міру використання флюсів, оксиди, що перебувають у шарі, що напікається, трансформуються в легкоплавкі шлаки.

Флюсом називають неметалічну речовину, яка призначена для видалення оксидної плівки з поверхні металу. Активність флюсу, тобто його здатність флюсувати, залежить від його складу.

Для визначення оптимального складу флюсу при електроконтактному напіканні порошку марки БрАЖ9-4 були обрані наступні флюси:

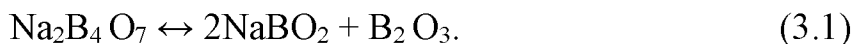
флюс №1 склад: - бура прогартована 100%.

флюс № 2 склад: - цинк хлористий - 70%, калій хлористий - 10%, натрій хлористий - 10%, амоній хлористий - 10%;

флюс № 3 склад: - бура прогартована- 60%, борна кислота - 10%, карбонат натрію - 10%, поташ-10%, поварена сіль-10%.

Вибір флюсу № 1 обґрунтовувався тим, що при плавленні бури вона

розкладається на натрійметаборат і борний ангідрид:



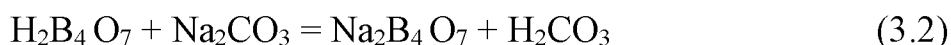
Основна властивість B_2O_3 як компонента флюсу в тому, що він утворює з оксидами міді й цинку порівняно легкоплавкі борати, метаборати та інші складні з'єднання. Борати мають гарні розкисляючі й захисні властивості від окиснення.

Хлористі солі (флюс № 2) були обрані тому, що вони є сильними активаторами флюсів. При взаємодії хлориду амонію з оксидами міді утворюється хлорид міді, аміак і вода. Аміак дисоціює при нагріванні на N_2 і 3H_2 , і одержуваний при цьому водень служить захисним середовищем від окиснення часток порошку. При взаємодії хлориду міді із хлоридом амонію утворюються розчинні солі, що плавляться при температурі 140°C .

У результаті розкладання хлориду цинку утворюються пари хлористого водню, які, впливаючи на оксиди часток порошку, переводять їх у більш розчинні хлориди.

Суміші хлориду цинку із хлоридом амонію мають більшу активність, ніж кожний з них окремо.

На вибір флюсу № 3 вплинуло задоволення наступної вимоги: підвищення ефективності дії окремих компонентів і зміна температури плавлення основних хімічних компонентів-бури прогартованої. Наприклад, суміш борної кислоти й соди цілком відповідає таким вимогам:



Крім того, при підвищенні змісту карбонатів калію й натрію, інтенсивніше утворюється й відводиться, з напікаємої поверхні:



3.4. Вибір устаткування

Для проведення досліджень по електроконтактному напіканню порошків з кольорових металів на поверхню зношеної деталі була обрана зварювальна установка МТ-1618.

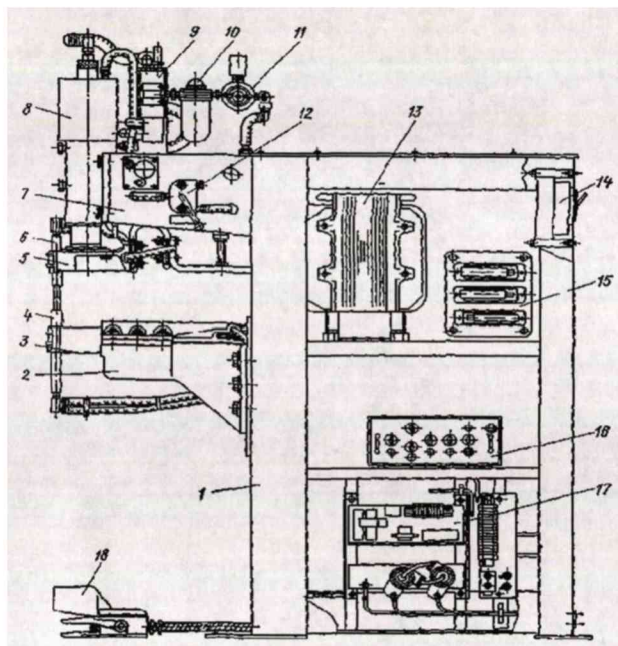


Рисунок 3.2- Машина точкового зварювання МТ-1618

Імпульсний струм дозволяє за короткий період нагріти порошок і відновлювану деталь на будь-яку температуру від 20 до 2500°С і підтримувати її за допомогою автоматики тривалий час.

Розглянемо конструктивні особливості машини точкового зварювання МТ-1618 (рис. 3.2). На передній стінці зварного корпусу 1 закріплений болтами нижній кронштейн 2, несучий консоль 3 з електродотримачем 4. Нижній кронштейн 2 можна переставляти по висоті. Верхній кронштейн 7 з'єднано з корпусом 1 зварюванням.

Пневматичний привод 8 з напрямним пристроєм встановлено на верхньому кронштейні 7. На його штоку закріплена рухлива консоль 5 з верхнім електродотримачем 6. Керування приводом здійснюється за допомогою електропневматичного клапана 9 (КПЕ-4), маслорозпилювачем 10, повітряного редуктора 11 і крана додаткового ходу 12. Консолі 3 і 5 з'єднані з виводами вторинної обмотки трансформатора 13 твердими й гнучкими шинами. Трансформатор 13, автоматичний вимикач 14 і перемикач щаблів 15 ножового типу встановлені усередині корпусу машини. Для керування машиною служить регулятор циклу зварювання 16 (РЦЗ-403). Первинний (і зварювальний) струм включається й вимикається тиристорним контактором 17 (КТ-1). Для включення циклу зварювання використовується педальна кнопка 18.

Усі машини мають пневматичний поршневий привод зусилля; шток привода переміщається в напрямних з тертям ковзання. Середня продуктивність машин при робочому ході 10 мм становить 120-150 зварювань/хв. Слід зазначити, що продуктивність машини залежить не тільки від швидкодії привода й робочого ходу, але й від використовуваного режиму зварювання (тривалості інтервалів циклу). Останній, природно, визначається маркою й товщиною металу, що зварюється.

Робота машини починається з натискання педалі 18 (рис. 3.2), після контактів електрода через зразок + порошок. Із цього моменту автоматично, у певній послідовності, відбуваються операції циклу зварювання: Стиск електродів 4 (рис. 3.2.), проходження зварювального струму через зразок + порошок (зварювання), витримка в стислом стані при включеному струмі (проковування) і розкриття електродів.

Якщо педаль залишається натиснутою, цикли зварювання будуть повторюватися.

Таблиця 3.3 - Технічна характеристика МТ-1618

Технічна характеристика установки МТ 16-18	
Нормальний зварювальний струм, А	16000
Номінальний тривалий вторинний струм, А	9000
Число ступенів при змішаному регулюванні	6
Номінальний ступінь	6
Номінальна споживана потужність, кВА	100
Найбільша тривала потужність, що допускається, кВА	564
Найбільша споживана потужність при короткому замиканні, кВА	128
Зусилля стиску на електродах, кгс:	
номінальне	600
найменше	130
найбільше	700
Номінальне, виліт, мм	500
Витрата охолоджувальної рідини, л/год.	700

3.5. Допоміжне устаткування для експериментів

Для відновлення внутрішньої й зовнішньої поверхні втулок використовувалися спеціальні оправлення, виготовлені з різних матеріалів (сталь, графіт). На рисунку 3.3 представлено оправлення, виготовлене із графіту, для відновлення внутрішньої поверхні бронзової втулки насоса НШ-32.

На рисунку 3.4 представлено те ж оправлення в розібраному виді.

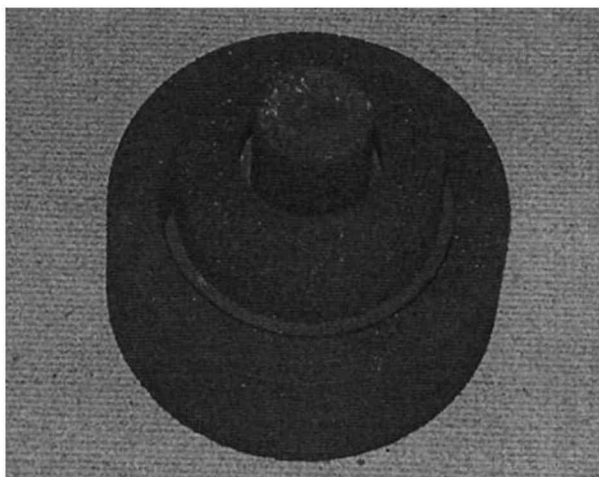


Рисунок 3.3 - Загальний вид оправлення для відновлення внутрішньої поверхні втулки насоса НШ-32

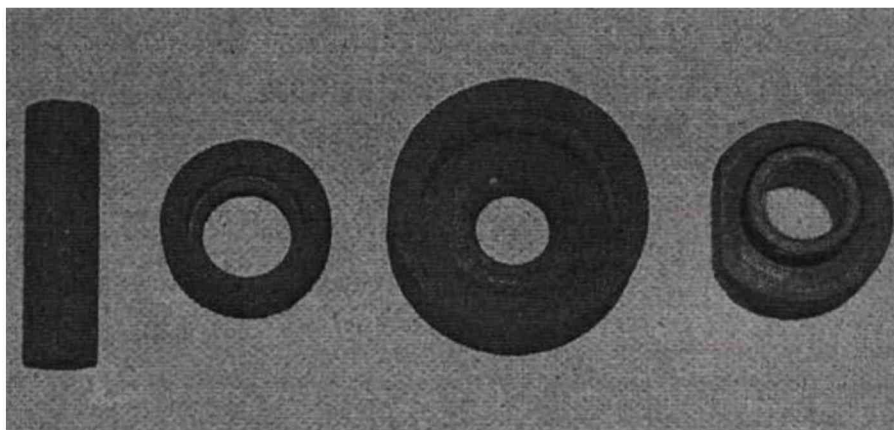


Рисунок 3.4 - Графітове оправлення в розібраному виді

На рисунку 3.5 представлено оправлення для відновлення внутрішньої поверхні бронзової втулки виготовленої зі сталі із застосуванням графітових вставок. На рисунку 3.6 те ж оправлення в розібраному виді.

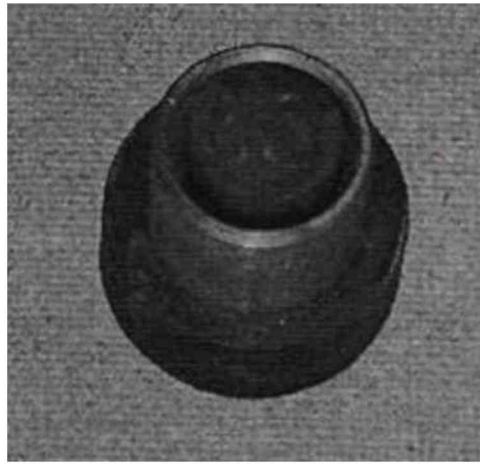


Рисунок 3.5 - Загальний вид оправлення

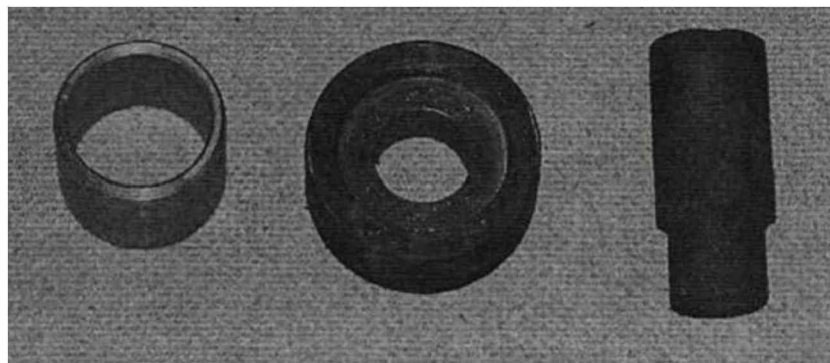


Рисунок 3.6 - Оправлення в розібраному виді

На рисунку 3.7 наведена схема напикання суміші на зовнішню й внутрішню поверхні зразків.

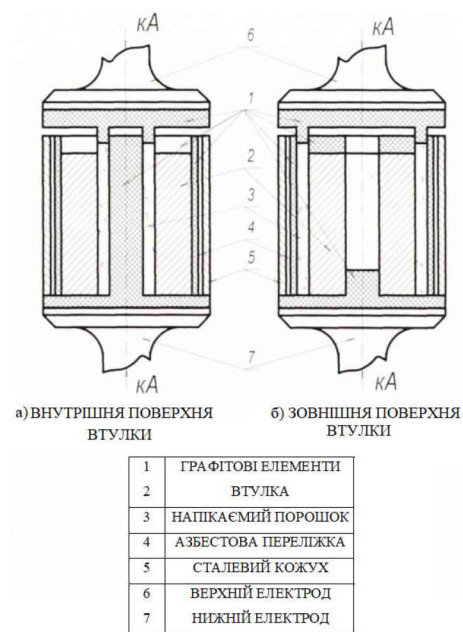


Рисунок 3.7 - Схема напикання залізного порошку на поверхню зношеної втулки

Застосування графітових вставок у пристосуванні для напикання порошків пояснюється наступним:

1) як показують теоретичні розрахунки напикання металевих порошків з кольорових матеріалів на основу-деталь для одержання щільної структури напеченого шару й високого зчеплення напеченого шару з основою, необхідно постійно підтримувати розрахункове теплове поле в процесі напикання;

2) як відомо, електропровідність металевого порошку, що має складний хімічний і структурний склад, у різних точках контакту електрода зварювальної машини з насипаною поверхнею порошку різна. Отже, і нагрівання порошку по площі й по глибині нерівномірне;

3) через стислість процесу напикання (не більш 30...50 сек.) і впливу охолоджуваних водою електродів на напечений шар, відбувається інтенсивне охолодження даного шару, хоча структурні зміни ще не відбулися в повному обсязі. Це приводить до різкого зниження адгезії часток порошку між собою й зниженню зчеплення напеченого шару з поверхнею відновлюваної деталі.

Отримані результати стали основною причиною використання графітових вставок у вигляді ущільнювальних кілець і графітових стрижнів, поміщених у пристосуванні (оправлення), які й дозволили розв'язати головне питання - створення рівномірного теплового поля в зонах порошку, що напикається, у перехідній зоні й у металі основи-зразка, а також поступового тривалого охолодження досліджуваного зразка.

3.6. Забезпечення основних параметрів процесу ЕКН і їх контроль

Основними параметрами процесу електроконтактного напикання є сила струму I (А), тривалість імпульсу протікання струму t (сек.), а також зусилля стиску електродів зварювальної машини P (МПа). Для визначення даних параметрів був прийнятий критерій технологічної подоби «К», який визначається для технологічних процесів з використанням зварювальних машин як:

$$K = \frac{I^2 \times P_t \times h \times \sqrt{t} \times G_t}{d_t \times T_{пл} \sqrt{\lambda r c \delta P}}, \quad (3.2)$$

де P_t - середній питомий опір порошку; h - висота порошку до напикання

(мм); t - час імпульсу струму (с); G_t - характеристика міцності покриття; d_t - діаметр зразка (мм); $T_{пл} \sqrt{\lambda r c}$ - теплова здатність порошку; δ - товщина порошку після напикання (мм); P - сила стиску електродів (Н).

Використання технологічного критерію подоби для сьогодишньої практики застосування зварювальних машин для електроконтактного напикання металевих порошоків зручний, тому що з його допомогою можна з достатньою точністю знайти режими електроконтактного впливу для невідомих матеріалів і будь-яких розмірів деталей. Критерій «К» для сучасних зварювальних машин коливається в межах 25...50. Згідно з літературним аналізом на вибір величини критерію технологічної подоби «К» при електроконтактному напиканні металевих порошоків дана величина для процесів ЕКН різних металевих порошоків коливалася від 40 до 46. При проведенні експериментів величина «К» була прийнята рівною 42.

Для визначення величини зварювального струму на вторинну обмотку зварювальної машини був установлений трансформатор струму ТС, пов'язаний з тарованим реєстраційним амперметром. Показання амперметра множилися на коефіцієнт трансформації трансформатора струму й визначалися значення зварювального струму для напикання порошку при різних імпульсах проходження струму через систему «порошок-деталь», насипного об'єму порошку.

Граничні мінімальні й максимальні значення величини зварювального струму визначалися необхідною кількістю теплоти для забезпечення високої адгезії часток порошку між собою й високого зчеплення напеченого шару з основою-деталлю.

Величина необхідної кількості теплоти при напиканні різної об'ємної маси порошку, при різних зусиллях стиску порошку в процесі напикання й інших факторів при ЕКН визначалася температурою напикання порошку, яка контролювалася термомпарами, уведеними в різні зони напикання (рис. 3.8) [15]. Для визначення температури напикання порошку на внутрішню поверхню втулки, використовувалася наступна схема розташування термопар (рис. 3.9).

Застосовувалися хром-алюмінієві термопари з діапазоном робочих температур від 20 до 1000°C. Термопари розташовувалися у верхній, середній і нижньої зонах напівкання. Температура реєструвалася міліамперметром з попереднім таруванням.

Реєстрація величини імпульсу проходження зварювального струму через систему порошок-деталь здійснювалася відповідним реєструючим приладом, вбудованим у панель контрольних приладів на зварювальній установці. Діапазон вимірювання імпульсу на даному приладі реєструється від 0,5с до хвилини з інтервалом 0,5 с.

Зусилля стиску електродів при проведенні експериментів здійснювалося робочим органом зварювальної машини й контролювалося динамометром моделі ДОС-3, який був вбудований між електродами. Схема установки динамометра ДОС-3 на машину точкового зварювання представлено на рисунку 3.10.

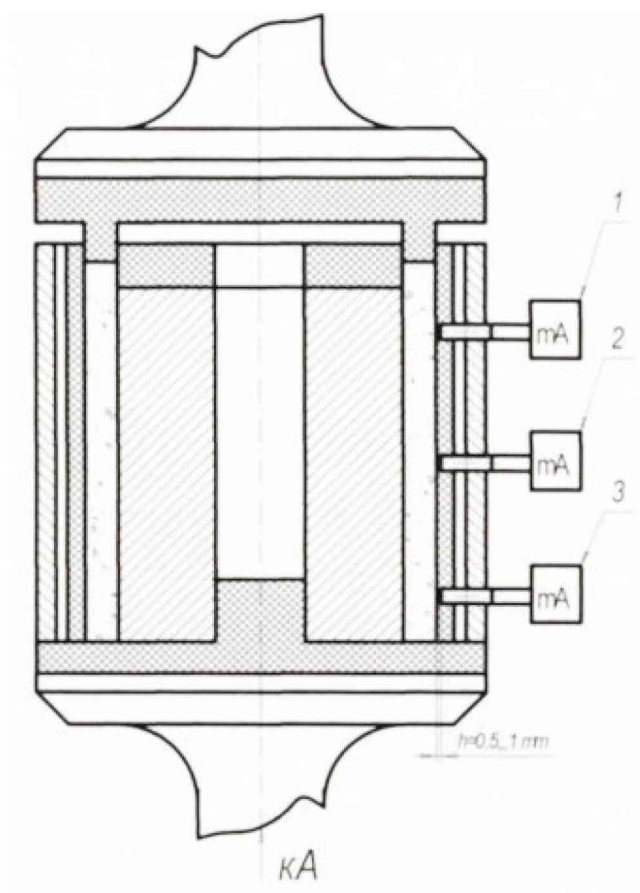


Рисунок 3.8 - Схема розташування термопар: 1 - верхня границя шару, 2 - середина шару, 3 - нижня границя шару.

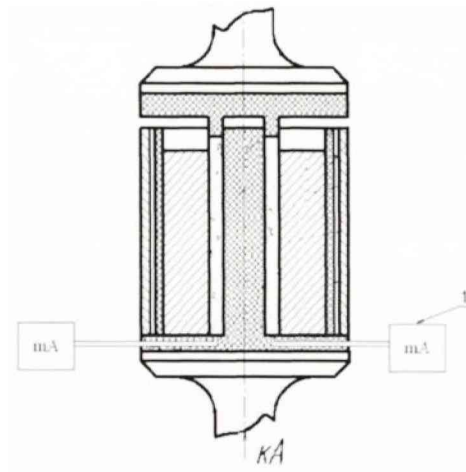


Рисунок 3.9 - Схема розташування термопар: 1 - нижня границя шару

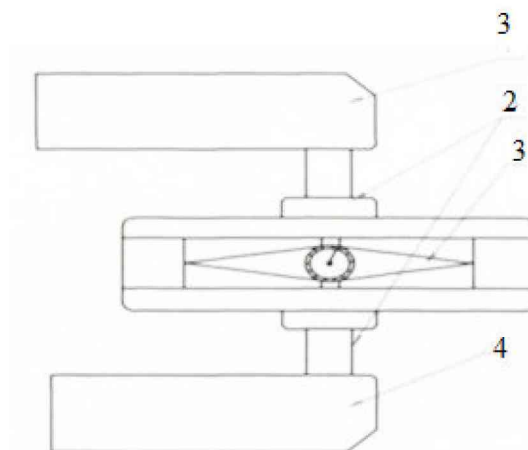
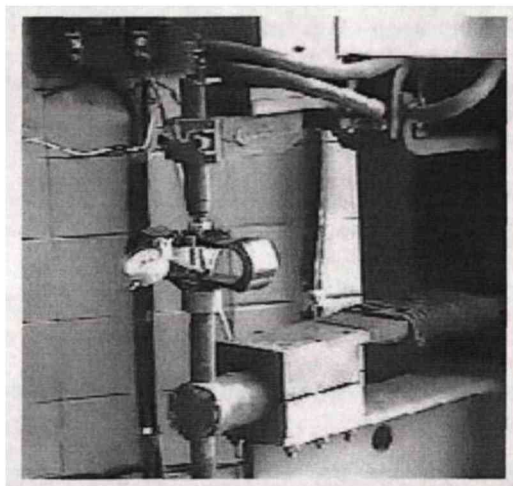


Рисунок 3.10 - Динамометр ДОС-3 установлений на машину точкового зварювання МТ 16-18: 1 – Динамометр ДОС-3; 2 – електроди; 3 – верхня траверса; 4 – нижня траверса.

3.7. Структурна схема досліджень фізико-механічних властивостей напеченого покриття

Методика оцінки властивостей покриття при розробці технологічного процесу електроконтактного напикання й виборі покриття повинна включати два основні етапи.

1. Вибір видів випробувань, необхідних для призначення покриття конкретної деталі або для одного або іншого варіанта її ремонту. Тести повинні складатися з наступного:

а) абсолютно необхідних при оптимізації режимів ЕКН і наступної паспортизації покриття:

- визначення механічних властивостей (адгезія, твердість, мікротвердість);
- перевірка структури й мікроструктури (пористість, границя розділу покриття з основою);

б) застосовуваних залежно від вимог, пропонованих до покриття:

- визначення триботехнічних характеристик;
- вплив структури й складу зношеної поверхні основи на шар, що напікається.

- визначення зносостійкості напеченого шару.

2. Організація оперативного контролю якості покриттів безпосередньо у виробництві:

- дотримання процесів режиму;
- визначення міцнісних властивостей на спеціально підготовлених зразках (адгезія, мікроструктура, мікротвердість).

На рисунку 3.11 наведені основні види випробувань фізико-механічних властивостей матеріалу покриттів.



Рисунок 3.11 - Основні види випробувань фізико-механічних властивостей покриттів

3.7.1. Методика визначення мікротвердості поверхні.

Мікротвердість напеченого шару визначалася на приладі ПМТ-3 (рис. 3.12).

Випробування на мікротвердість проводять вдавленням у випробовуваний зразок чотиригранної алмазної піраміди з кутом при вершині 136° , таким же як і в піраміди при випробуванні по Віккерсу. Вимірювання пірамідою дають більш точні значення для матеріалів з високою твердістю, ніж вимірювання кулькою або конусом. Алмазна піраміда має великий кут у вершині й діагональ її відбитка приблизно в 7 раз більше глибини відбитка, що підвищує точність вимірювання відбитка навіть при проникненні піраміди на невелику глибину.

Твердість H визначають по тій же формулі, що й твердість по Віккерсу

$$HV = \frac{P}{F} = \frac{2P \sin^{\alpha/2}}{d^2} = \frac{P \cdot 1,854}{d^2}, \quad (3.5)$$

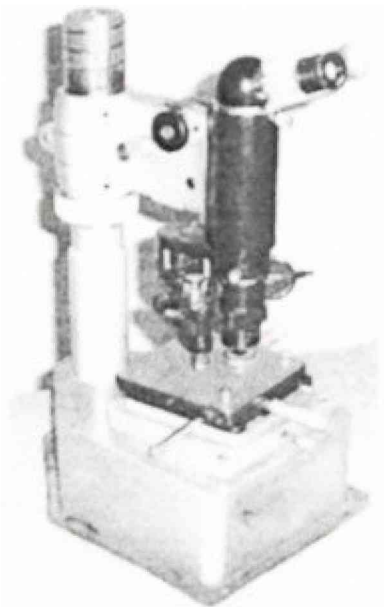


Рисунок 3.12 - Загальний вид приладу для вимірювання мікротвердості ПМТ-3

На кожному мікрошліфі проводилося 5 вимірів мікротвердості. Мікротвердість визначалася по глибині й ширині зразка основи, на границі порошок-основа, по глибині й ширині напеченого шару. Висота напеченого шару становила до 4,0мм. Потім усі зразки шліфувалися для одержання рівної висоти напеченого шару товщиною 1,5мм.

3.7.2. Методика визначення твердості по висоті напеченого шару.

При визначенні твердості по висоті напеченого шару зразки пошарово обточувались на токарському верстаті з товщиною першого дефектного шару 0,2 мм, а потім по 0,5 мм. Перед зняттям чергового шару проводилося вимірювання твердості по методу, зазначеному в п. 3.7.1. Обточування напеченого шару проводилося доти, поки товщина шару була в межах 0,4...0,5 мм.

3.7.3. Методика визначення міцності з'єднання напеченого шару з поверхнею зразка.

Міцність з'єднання покриття з металевих порошоків зі зношеною поверхнею відновлюваної деталі є одним з найважливіших показників якості її відновлення. У більшості методів визначення міцності з'єднання [16] визначають міцність покриття на відрив у найбільш слабкому його перетині (метод Олларда).

Але, як відомо, така схема руйнування покриття зустрічається дуже рідко.

Руйнування покриття найчастіше відбувається під дією дотичних напружень по площинах ковзання. Тому для визначення міцності зчеплення металевих порошків при електроконтактному напиканні був прийнятий метод руйнування покриття дотичними напруженнями шляхом зрізу покриття з основи. Загальний вид і схема установки показано на рисунку 3.13.

Зразок з напеченим шаром установлювався на опорний палець 4, потім установлювався пуансон 1, який під дією сили тиску 1 зрізує напечений шар 2 із втулки 3.

Напруга зрізу визначалася з вираження:

$$\tau_{\text{ср}} = P/F \quad \text{кН/мм}^2 \quad (3.6)$$

де P – прикладене зусилля для руйнування покриття (кН);

F – площа напеченого шару, мм^2 .

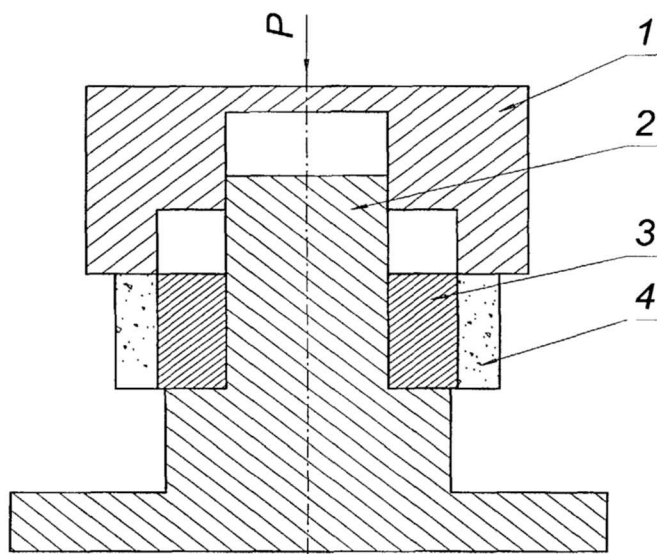


Рисунок 3.13 - Схема зрізу напеченого шару із втулки P – Тиск; 1 – Пуансон; 2 – Опорний палець; 3 – Втулка; 4 – Напечений шар

Оцінка зчеплення напечених порошків з поверхнею зразків, залежно від різних режимів процесу напикання, здійснювалася як конкретними значеннями дотичних напружень, так і коефіцієнтом зчеплення K_{τ} , який визначався з вираження:

$$K_{\tau} = \tau_i / \tau_{\text{зт}}, \quad (3.7)$$

де: τ_i - поточні значення величин дотичних напружень, отриманих у

результаті експериментів, $\tau_{\text{эт}}$ - еталонне значення дотичного напруження. У якості еталонного дотичного напруження було прийнято його значення при руйнуванні зрізом матеріалу зразка. Величина дотичних напружень при руйнуванні матеріалу зразка була 110...120 кН/мм².

Вивчалася зміна зчеплення від наступних режимів напікання:

- температури,
- шорсткості зношеної поверхні бронзової втулки,
- висоти шару, що напікається,
- часу напікання.

3.7.4. Методика визначення пористості напеченого шару.

Пористість напеченого шару визначалася за стандартною методикою.

Значення пористості вираховувалось з вираження:

$$\Pi = (m_n - m_c) / (\rho_{\text{ж}} V), \quad (3.10)$$

де: m_n – маса насиченого рідиною напеченого шару, г

m_c – маса сухого напеченого шару, г

$\rho_{\text{ж}}$ – щільність рідини, г/см³

V – об'єм напеченого шару, см³.

Для зняття впливу пористості матеріалу зразків перед зануренням у дистильовану воду зразка з напеченим шаром "вільні" поверхні зразка покривалися лаком.

Вивчалися вплив на пористість наступних параметрів напікання:

- температура напікання порошку,
- тиск електродів на спікаємий порошок,
- часу напікання.

4. ОСНОВНІ ПАРАМЕТРИ ПРОЦЕСУ ЕЛЕКТРОКОНТАКТНОГО НАПІКАННЯ АЛЮМІНІЄВО-ЗАЛІЗИСТИХ БРОНЗ МАРКИ БРАЖ 9-4

4.1. Металографічний аналіз і оцінка пористості покриттів

Аналіз мікроструктур напечених покриттів проводився з метою дослідження якості напеченого шару. Критерієм оцінки якості була відсутність порожнеч, тріщин, раковин і інших дефектів.

На рисунках 4.1, 4.2, 4.3 представлені фотографії напеченого шару порошку марки БрАЖ 9-4.

Залізо у твердому стані незначно розчинне в сплавах Cu-Al і утворює з алюмінієм інтерметалічне з'єднання $FeAl_3$ (рис. 4.1), яке виділяється як самостійна фаза у вигляді дрібнодисперсних часток. При введенні добавок заліза відбувається здрібнювання α -фази за рахунок дрібнодисперсних часток інтерметалічної фази, які перешкоджають росту зерен в алюмінієвій бронзі БрАЖ 9-4 при високих температурах, а також підвищенню твердості й міцності бронзи за рахунок його розчинення в міді.

Крім того, залізо затримує фазову перекристалізацію алюмінієвої бронзи БрАЖ 9-4 і при повільнім охолодженні до деякої міри нормалізує або скорочує утворення евтектики. Це дуже важливо, так як відсутність включень заліза робить самочинний відпуск, що приводить до підвищення крихкості сплаву.

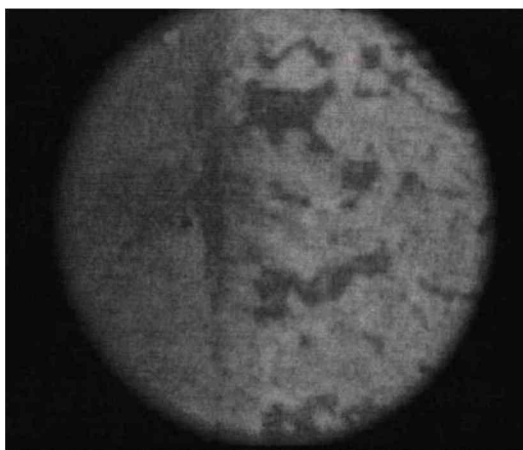


Рисунок 4.1 - Загальний вид мікроструктури напеченої поверхні

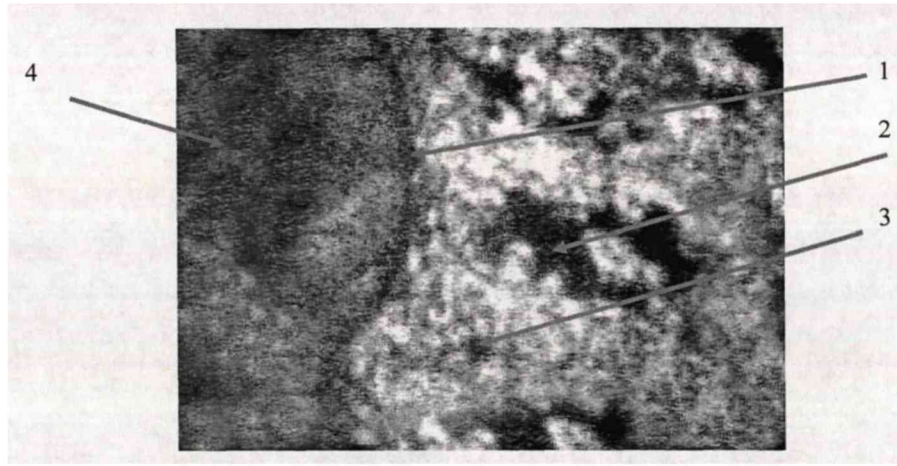


Рисунок 4.2 - Фотографія мікроструктури напеченого шару порошку марки БрАЖ 9-4 на основу з того ж матеріалу ($\times 350$). 1 - Зона з'єднання порошку, що напікається, з основою (алюмінійзалістий прошарок); 2 - евтектика $\alpha+\gamma$ (темні виділення по границях фази α); 3 - сірі крапки-включення $FeAl_3$; 4 - відновлювана основа типу втулка



Рисунок 4.3 - Фотографія мікроструктури напеченого шару порошку марки БрАЖ 9-4 на основу з того ж матеріалу ($\times 500$).

Пористість є ще одним немаловажним аспектом у вивченні мікроструктури напеченого шару.

Існує кілька основних параметрів, що впливають на пористість напеченого шару, такі як:

- тиск електродів у момент процесу електроконтактного напікання;
- температури напікання порошку;
- часу напікання часток порошку на зношену основу.

Виводи ряду дослідників по порошкових матеріалах пояснюють сталість

пористості, отриманої при деякому оптимальному тиску зовнішніх зусиль на порошок, що й надалі не змінює своєї величини з ростом, прикладених зовнішніх тисків при стиску порошку пояснюють наступним:

- у спікаємому шарі, в основному, є замкнені ізольовані пори, число й загальний об'єм яких можуть зменшуватися під дією прикладеного тиску (5...11 МПа),
- при більших зусиллях стиску відбувається усадка ізольованих пор, що полягає в перетворенні дрібних пор у великі. Загальна пористість при цьому зберігається колишньою, а число пор зменшується при збільшенні їх середнього розміру (13...21 МПа).

Незначне підвищення пористості при високих тисках порошкового матеріалу із бронзи БрАЖ 9-4 можна пояснити частковим видавлюванням у поверхневий шар рідкої фази елементів порошку і їх вигорання.

При проведенні експериментів по визначенню впливу тиску електродів була прийнятий оптимальна температура напикання, яка рівнялася 950...970°C, час напикання - 30...45 с., а тиск електродів змінювався від 5 до 13 МПа з інтервалом 2 МПа. Висота шару, що напікається, у всіх експериментах до 4 мм.

При проведенні експериментів по визначенню впливу температури напикання порошки напікалися при температурі 700...950°C з інтервалом в 50°C. Тиск електродів становив 13 МПа як найбільш оптимальне, отримане при попередніх експериментах і час напикання - 30...40с. Висота шару, що напікається, - до 4 мм.

При проведенні експериментів по визначенню впливу часу напикання шару температура напикання становила 950...970°C, тиск електродів у межах 13 МПа, висота шару, що напікається, - до 4 мм, а час напикання змінювалося від 10 до 60 с.

Результати експериментів представлені на графіку (рис. 4.4).

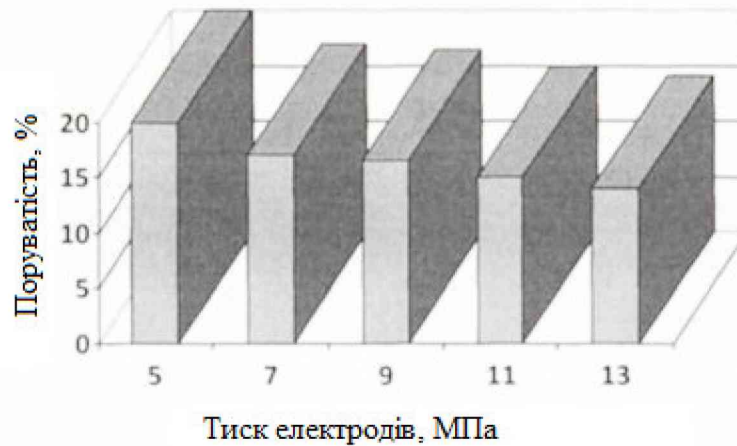


Рисунок 4.4 - Залежність впливу тиску електродів на пористість спікаємого шару.

На рисунку 4.5 наведені значення пористості напеченого шару з порошку БрАЖ 9-4, отримані при оптимальних режимах напикання, при порівнянні з пористістю ливарної бронзи, яка коливається в межах 0,3...0,36 %, і виражені через відносний коефіцієнт пористості:

$$K_{\Pi} = K_i / K_{бр} \quad (4.1)$$

де K_i - експериментальні значення пористості напеченого шару при різних оптимальних режимах напикання,

$K_{бр}$ - середнє значення пористості ливарної бронзи БрАЖ 9-4, прийнятої 0,33%.

Отримані залежності показують, що електроконтактне напикання кольорового порошку марки БрАЖ 9-4 знижує пористість шару, що напикається, у порівнянні з пористістю ливарної бронзи з даного матеріалу. Це підтверджує відомий висновок багатьох дослідників по застосуванню металевих порошків, що напикання є нагрівання й витримка порошкового матеріалу при температурі нижче точки плавлення основи, однак це не означає, що в процесі нагрівання взагалі не повинне відбуватися розплавлення якої-небудь складової у випадку багатокомпонентних матеріалів.

Спикання порошку БрАЖ 9-4 відбувається в присутності рідкої фази (температура плавлення алюмінію лежить у межах 660°C), що забезпечує практично повне ущільнення спікаємого порошку й одержання виробів з мінімальною пористістю.

Величина пористості, одержувана при електроконтактному напіканні порошку БрАЖ 9-4 перевищує критичне значення пористості ($P < 10\%$), прийнятих для антифрикційних матеріалів. Таким чином поверхня, що напікається, порошком з матеріалу БрАЖ 9-4 може бути застосована не тільки для нарощування зношених поверхонь антифрикційних деталей, але й зберігати властивості цих деталей.

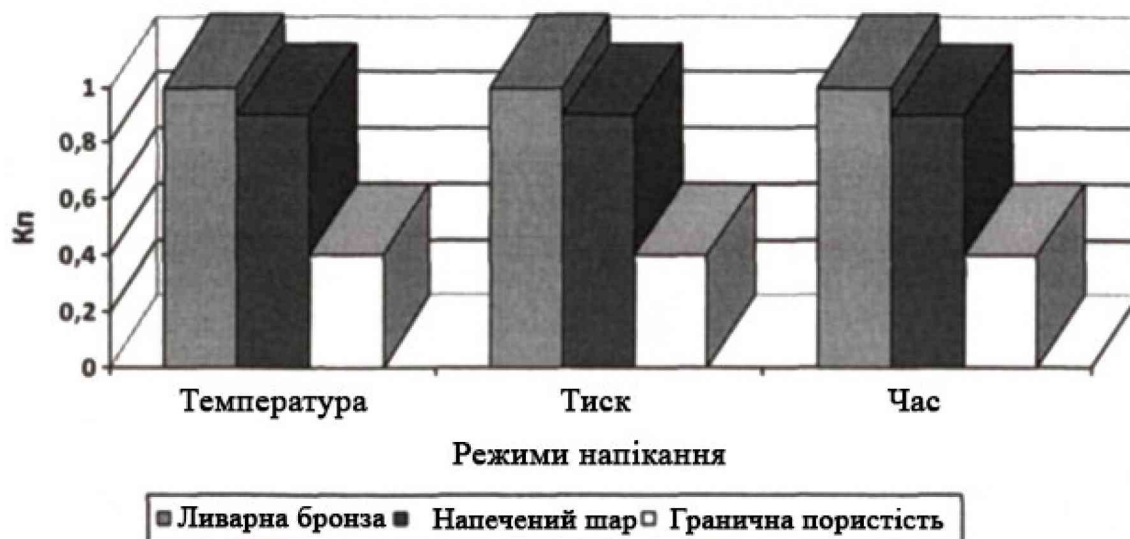


Рисунок 4.5 - Зміни відносного коефіцієнта пористості K_p від режимів напікання

4.2. Визначення твердості й мікротвердості напеченої поверхні.

Мікротвердість напеченого металу є одним з найважливіших показників, що характеризують якість і працездатність нанесеного металопокриття. У цьому зв'язку певний інтерес представляє результат виміру мікротвердості металу.

Для визначення поверхневої твердості напеченого шару на зразки напікався порошок висотою шару від 1 до 4-х мм при температурі 950...970°C, тиском електродів 13 МПа й часом напікання 30...40 с. Напікання порошку проводилося на зовнішню поверхню зразків. Далі зразки обточувалися на токарському верстаті із частотою обертання $n = 630$ об/хв., подачею 0,07 мм/об й глибиною різання $t = 0,25$ мм при різьному охолодженні для зняття впливу температурних напруг, що виникають у процесі точіння. Для вимірювання мікротвердості зразки встановлювалися на призму. Тому що висота зразків становила 20 мм, то на твірній зразка проводилося 6 вимірів на рівній відстані друг від друга.

На рисунку 4.6 представлена порівняльна діаграма твердості нової втулки, виготовленої із бронзи БрАЖ 9-4 (97 HRB) і напеченого покриття з того ж матеріалу.



Рисунок 4.6 - Порівняння твердості напеченого шару щодо нової втулки.

Результати експериментів по напиканню залізистого порошку на зразки різної висоти представлено на рисунку 4.7.

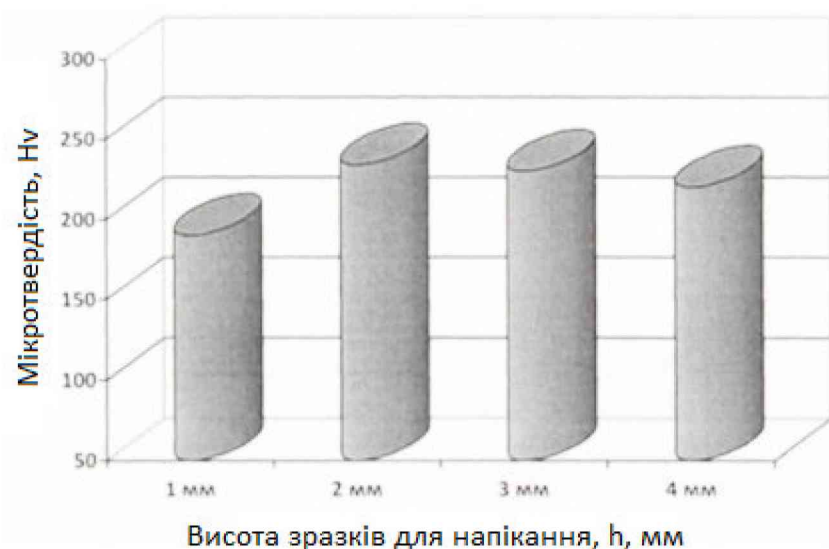


Рисунок 4.7 - Зміна поверхневої твердості від висоти порошку, що напікається.

При малих значеннях шару, що напікається (1 мм і менше) спостерігається значне зниження поверхневої твердості. Це викликане тим, що алмазна піраміда приладу продавлює напечений шар і попадає в зону алюмінійзалізного прошарку порошку з матеріалом зразків. Це видно на мікрошліфі (рис. 4.8), де відбиток піраміди в зоні порошок-поверхня зразка значно менше відбитка на матеріалі зразка й напеченого шару.

Зниження поверхневої твердості напечених шарів з великою висотою

($h > 3$ мм) пояснюється недостатнім зпеченням часток порошку в поверхневому шарі. При напиканні шару висотою $h = 2$ мм. поверхнева мікротвердість, обумовлена після пошарового видалення напеченого порошку, склала в межах 234 HV. При напиканні вихідного шару $h = 3,0$ мм. і $h = 4,0$ мм. характер зміни пошарової поверхневої твердості аналогічний напеченому шару $h = 2,0$ мм. Незначне зниження поверхневої твердості при різних значеннях висоти напеченого шару порядку 4...7% можна пояснити, мабуть, неповним спіканням і пропиканням часток порошку між собою.

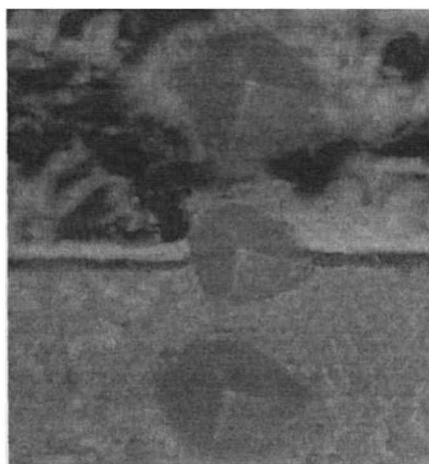


Рисунок 4.8 - Вид мікрошліфа з відбитком піраміди в зоні порошок-поверхня зразка

Для вивчення методики визначення твердості по глибині напеченого шару були виготовлені зразки з висотою напеченого шару 2, 3 і 4 мм при зазначених вище режимах напикання. Далі, з поверхні зразків знімався перший шар товщиною 0,2 мм, для усунення дефектного поверхневого шару й уздовж утворюючої зразка проводився вимір твердості. Потім зі зразків знімали шар товщиною 0,5 мм і робили виміри твердості. Ця операція повторювалася доти, поки при останньому точінні глибина напеченого шару склала 0,4...0,5 мм (рис. 4.9)

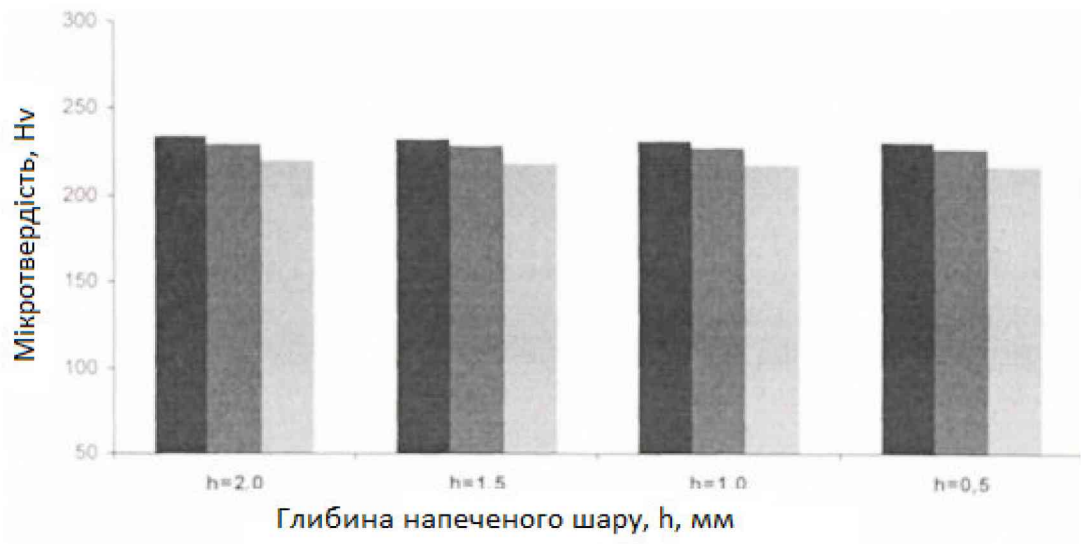


Рисунок 4.9 - Зміна твердості по глибині напеченого шару

На фотографіях мікрошліфів (рис. 4.10) представлені відбитки піраміди, отримані в ході виміру поверхневої твердості, які проводилися на різній висоті напеченого шару, а також представлені відбитки індентора для порівняльного аналізу твердості напеченого шару й поверхневої твердості нової втулки (рис. 4.11). Для вимірів використовувалася втулка з напеченим шаром $h = 3\text{ мм}$, методика виміру наведена вище.

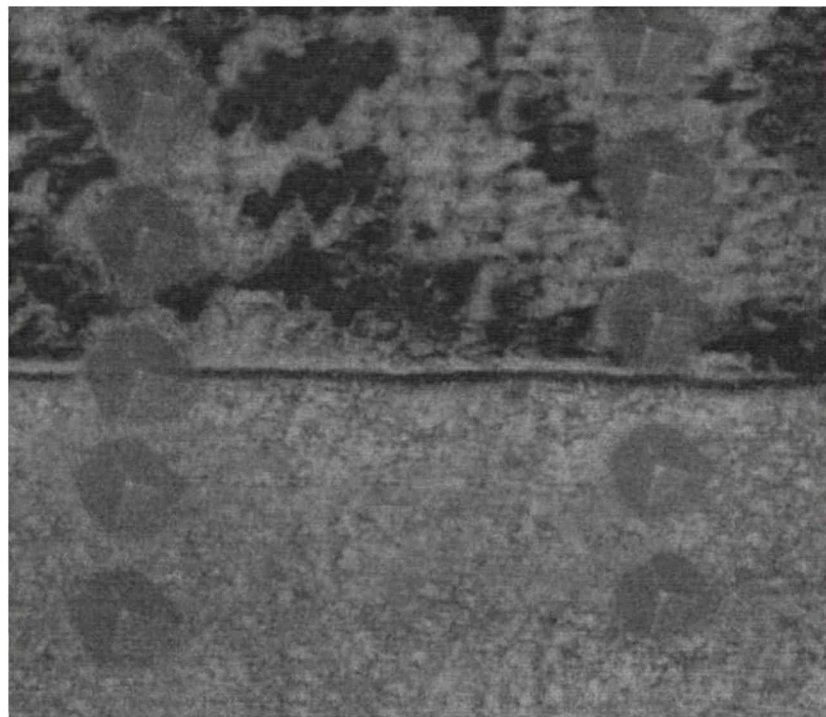


Рисунок. 4.10 - Вид мікрошліфа при визначенні мікротвердості по висоті напеченого шару

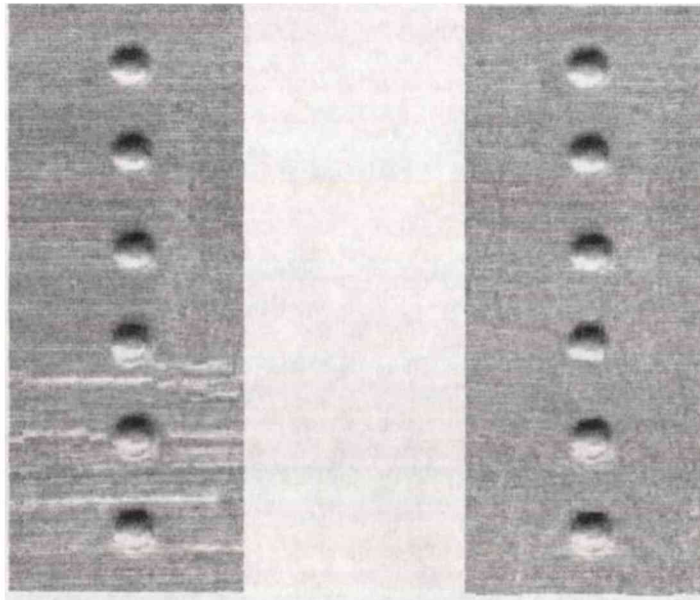


Рисунок. 4.11 - Фотографії відбитків індентора на напеченій поверхні (ліворуч) і на новій поверхні втулки (праворуч)

4.3. Визначення температури напикання.

Розв'язання рівнянь, представлених у формулах, показує, що при напиканні порошку марки БрАЖ 9-4 методом електроконтактного напикання із застосуванням сталевих акумуляторів теплоти оптимальна температура повинна становити більш 900°C . З метою перевірки адекватності отриманої формули із практикою процесу ЕКН, були проведені дослідження із впливу різної температури напикання порошку з урахуванням різної висоти шару, що напикається h , і часу напикання t на зчеплення напеченого шару з поверхнею деталі-зразка.

Відомо, що при стиковому зварюванні теплота, виділяема на одиницю висоти напикаємого шару, яка витрачається на нагрівання порошку й зразка до заданої температури T , можна визначити з вираження:

$$Q = \rho_T I_{\text{св}}^2 \tau / F \quad (4.2)$$

де ρ_T - середній питомий опір порошку + матеріал зразка, Ом/м

F - площа поверхні, що напикається, зразка, мм^2 ,

З іншого боку, кількість теплоти Q можна визначити з вираження:

$$Q = (c G T) / h \quad (4.3)$$

де c - питома теплоємність часток порошку й матеріалу зразка, Дж/кг- $^{\circ}\text{C}$,

G - насипна маса порошку для одержання заданої висоти напеченого шару,

кг,

h - висота напеченого шару, мм

Вирішуючи спільно рівняння 4.2 і 4.3, температура нагрівання в зоні контакту порошку з поверхнею зразка буде визначатися як:

$$\vartheta = h\rho_T I_{CB}^2 \tau / (F\vartheta G) \quad (4.4)$$

Досліджувана температура напикання порошку було обрано в інтервалі 600...1083°C.

Для визначення оптимальної температури напикання слід знати максимальне й мінімальне значення температури. За мінімальну температуру можна прийняти температуру близьку до температури плавлення алюмінію (660°C) у складі порошку БрАЖ 9-4, тобто 600°C.

За максимальне значення приймається температура - 1000°C, тобто близька до температури плавлення міді (1083°C), значення при якому починається плавлення основи порошку, що напікається.

При дослідженні зчеплення напеченого шару з поверхнею зразків висота напеченого шару коливалася від 2 до 4 мм. Величина середнього питомого опору порошку й матеріалу зразків приймалася рівною й становила 0,06 Ом-мм²/м.

Питома теплоємність часток порошку й матеріалу зразків становила 370 Дж/кг°C. Площа поверхні, що напікається, при експериментах коливалася від 1400 до 1800 мм². Насипна маса порошку становила від 10 до 45 г.

Методика визначення зчеплення напеченого порошку з поверхнею зразків представлено в главі 3. Поверхня зразків перед напиканням оброблялася на токарському верстаті для одержання шорсткості поверхні в інтервалі 10...15 мкм. Результати експериментів по впливу температури напикання на зчеплення напеченого шару різної висоти з поверхнею зразка наведено на рисунку 4.12.

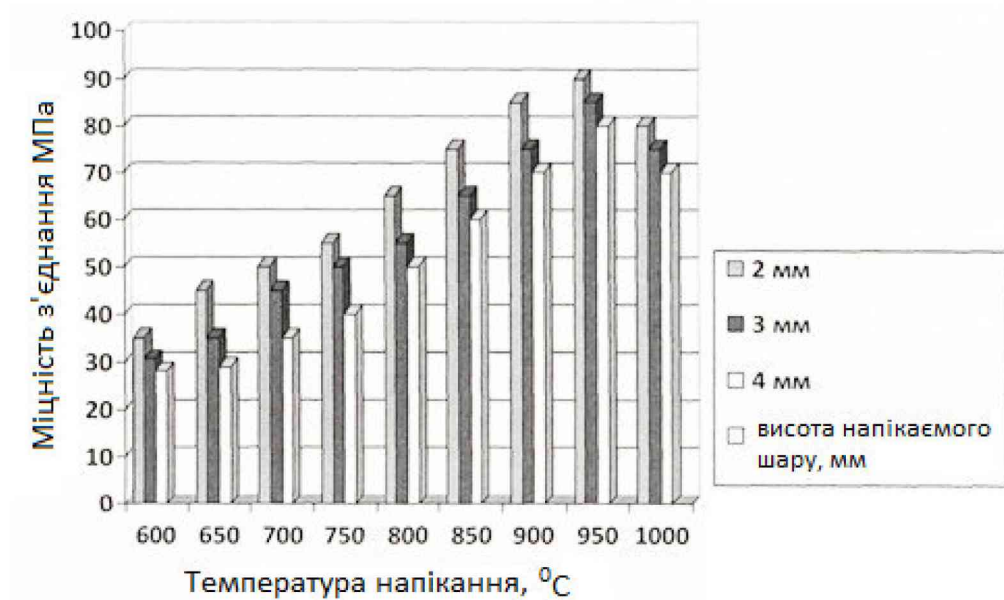


Рисунок 4.12 - Зміна міцності з'єднання напеченого шару з поверхнею втулки

Як видно з наведених на рисунку 4.16 залежностей, оптимальна температура напикання порошку БрАЖ 9-4 на поверхню зразка з однорідного матеріалу перебуває в інтервалі 950...970°C і практично не залежить від висоти шару, що напикається. Дана температура напикання забезпечує найкраще зчеплення напеченого шару з поверхнею зразків. Таким чином, теоретичні розрахунки адекватні проведеним експериментам.

Що стосується збільшення висоти (товщини) шару, що напикається, то зчеплення напеченого порошку з поверхнею зразків збільшується, але обмежується граничним значенням даної висоти. Напикання досить товстих шарів порошку (більше 2-3 мм) приводить до погіршення зчеплення.

Кращі показники зчеплення напеченого шару з поверхнею зразків виходили при висоті напеченого шару 2...3 мм, а підвищення товщини шару, що напикається, більше 3 мм приводило до зниження зчеплення шару зі зразками.

Напикання малих шарів, товщиною 1 мм при температурі 1000°C, позитивних результатів не дало.

4.4 Технологія відновлення зношених бронзових втулок

Технологічний процес включає виконання комплексу операцій:

1. Підготовка зношених бронзових втулок до процесу

електроконтактного напикання - контроль зношування й протирання від масла й бруду (знежирення поверхні не потрібно).

2. Операція готування порошкової суміші містить у собі: зважування компонентів відповідно до їхнього процентного вмісту в суміші:

Флюс: 4% (компоненти що входять до складу флюсу: бура прокалена -60%, борна кислота - 10%, карбонат натрію - 10%, поташ-10%, поварена сіль-10%.)

- Порошок БрАЖ 9-4: 98 % і перемішування до одержання однорідної маси.

3. Упакування прес-форми проводиться в такий спосіб:

- складання графітової форми

- установка сталевого кожуха

- укладання азбестової прокладки між сталевим кожухом і графітовою формою

- установка бронзової втулки в прес-форму

- засипання суміші і її ущільнення

- установка верхнього графітового диска

4. Установка прес-форми на зварювальний апарат моделі МТ-1618 (установку робити між електродами зварювальної установки, при цьому нижня й верхня частині прес-форми повинні бути щільно затиснуті верхнім і нижнім електродами зварювальної установки).

5. Термічний цикл процесу електроконтактного напикання:

- нагрівання деталі до 950-970 °С, і витримка 30-40 с

6. Вивантаження й охолодження прес-форми.

7. Розпакування прес-форми, виймання деталі й контроль якості напеченого покриття (зовнішній огляд, відбраковування деталей з покриттями що мають дефекти).

8. Механічна обробка втулок, що пройшли процес відновлення зношеної поверхні методом електроконтактного напикання.

ВИСНОВКИ

1. Досліджені умови роботи, важко навантажених бронзових деталей ряду сільськогосподарських машин і встановлений діапазон їх зносів, що становить від 0,2 до 1,8 мм.

2. Встановлено, що для одержання якісного покриття температура напикання повинна бути в межах 950...970°C, час напикання повинне становити не більше 40с, а тиск стиснення електродів повинний бути не більш 13 МПа.

3. Металографічні дослідження, випробування на мікротвердість показали, що з'єднання, отримане ЕКН порошку марки БрАЖ 9-4, без його плавлення, при оптимальних режимах напикання не мають дефектів типу пор, тріщин і несплошностей. При цьому, у зоні з'єднання, є перехідний шар у вигляді темної переривчастої смуги розміром 0,5 мкм. Основу цього прошарку становлять такі елементи як Fe і Al, що утворювалися, очевидно, у результаті часткової дифузії елементів основи й порошку.