

ПОЛТАВСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ АГРАРНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
Факультет інженерно-технологічний
Кафедра будівництва та професійної освіти

Пояснювальна записка

до кваліфікаційної роботи на здобуття ступеня вищої освіти

магістр

на тему: «Дослідження процесу комбінованої обробки високоточних поверхонь
деталей фланцевої засувки»

КРМ.133ГМмд_24.11.000 ПЗ

Виконав: здобувач вищої освіти
за освітньо-професійною програмою
*«Машини і засоби механізації
сільськогосподарського виробництва»*
спеціальності 133 «Галузеве
машинобудування»
ступеня вищої освіти *магістр*
групи 133ГМмд_24
ЛУЧАНІНОВ Дмитро

Керівник: канд. техн. наук, доцент
БІДА Сергій

Полтава – 2023 року

ВСТУП

У всіх галузях машинобудування, зокрема сільськогосподарському, широко використовуються вироби, що мають запірні пристрої для регулювання, відсікання та подачі рідких, газорідних і газоподібних середовищ. До них відносяться клапани, шибери, дросельні пристрої. Багато з таких виробів працюють при високих перепадах тисків, запірні пристрої служать для подачі (або перекриття) агресивних, пожежо- та вибухонебезпечних середовищ, де не допускається навіть незначне їх перетікання.

До особливостей таких виробів відносяться: вміст у вузлі спряжених деталей з індивідуальною геометрією, висока чистота обробки ділянок проточної частини, необхідність протидії агресивних середовищ і зміни форми спряжених деталей при імпульсних (ударних) впливах робочих середовищ. Тим часом, при виготовленні сучасних запірних пристроїв застосування абразивних складових притиральних паст знижує ресурс і експлуатаційні показники виробів через можливість шаржування спряжених поверхонь. З іншого боку, без ріжучих мікрогранул не вдається ефективно видаляти припуски на початковому етапі обробки поверхонь, що спряжуються, або притиральні операції стають надмірно трудомісткими.

Відомі спроби заміни механічного доведення спряжених ділянок технологічними прийомами із використанням електричних методів обробки. Однак на сучасному етапі досліджень не вдалося отримати стабільних результатів по точності спряження і шорсткості поверхні. Тому така технологія отримала використання головним чином у дрібносерійному ремонтному виробництві, де кінцеві показники обробки багато в чому визначаються високою кваліфікацією робітників, які працюють у зазначених галузях, і де трудомісткість виготовлення об'єктів не є визначальною.

Поверхні, що спряжуються, запірних пристроїв зазвичай піддаються зміцнюючим операціям (наплавка, ціанування, азотування, цементация та ін.), що викликає викривлення деталей і високі залишкові напруження поверхневого шару,

					КРМ.133ГМмд_24.11.000 ПЗ	Аркуш
						6
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

що в процесі виконання притиральних операцій дає передумови утворення мікродефектів. Останні викликають неприпустиме перетікання середовищ. У процесі випробування електроерозійного електрохімічного і комбінованого безабразивного доведення поверхонь, що спряжуються, була встановлена можливість забезпечення стабільної герметичності запірних пристроїв на макро- і мікрорівнях за рахунок обґрунтованого призначення технологічних режимів. Однак до теперішнього часу не відомо методів проектування таких режимів і створення на їх базі технологічних безабразивних процесів отримання безазорних спряжених поверхонь, що відповідають вимогам експлуатації запірних пристроїв. Отримання якісних пристроїв такого призначення є актуальним для машинобудування.

Питанням чистової обробки, у тому числі деталей, що спряжені, присвячена чимала кількість публікацій. До них відносяться розроблені способи і пристрої, захищені охоронними документами. Цим займаються організації України, фірми Японії, США, Німеччини, Англії, Швеції та інших країн.

Механічна обробка (притирання) деталей із використанням абразивних паст набула найбільшого поширення, тому що не вимагає складного обладнання, забезпечує високі техніко-економічні показники процесу. Але в разі застосування цього методу для запірних пристроїв, що працюють в умовах інтенсивних течій агресивних середовищ, їх надійність і ресурс знижується. Тому потрібне обґрунтування, пошук і створення принципово нових способів чистового притирання металевих контактних поверхонь, що виключають застосування абразивних середовищ.

					КРМ.133ГМмд_24.11.000 ПЗ	Аркуш
						7
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

1.1 Електроерозійна прецизійна обробка

Електроерозійна обробка (різновид електрофізичної) заснована на вириванні частинок матеріалу з поверхні імпульсом електричного розряду. Якщо задана напруга (відстань) між електродами, зануреними у рідкий діелектрик, то при їх зближенні (збільшенні напруги) відбувається пробій діелектрика – виникає електричний розряд, в каналі якого утворюється плазма з високою температурою.

Так як тривалість використовуваних в даному методі обробки електричних імпульсів не перевищує 10^{-2} с, тепло, що виділяється, не встигає поширитися в глиб матеріалу і навіть незначної енергії виявляється досить, щоб розігріти, розплавити і випарувати невелику кількість речовини. Крім того, тиск, що розвивається частками плазми при ударі об електрод, сприяє викиду (ерозії) не тільки розплавленого, але і просто розігрітої речовини. Оскільки електричний пробій, як правило, відбувається по найкоротшому шляху, то перш за все руйнуються найбільш близько розташовані ділянки електродів. Таким чином при наближенні одного електроду заданої форми (інструменту) до іншого (заготовки) поверхня останнього набуде форми поверхні першого (рисунок 1.1). Продуктивність процесу, якість одержуваної поверхні в основному визначаються параметрами електричних імпульсів (їх тривалістю, частотою проходження, енергією в імпульсі).

Електроерозійний метод обробки об'єднав електроіскровий і електроімпульсний методи.

Електроіскрова обробка була запропонована радянськими вченими Н.І. і Б.Р. Лазаренко в 1943. Вона заснована на використанні іскрового розряду. При цьому в каналі розряду температура досягає 10000°C , розвиваються значні гідродинамічні сили, але самі імпульси відносно короткі і, отже, містять мало енергії, тому вплив кожного імпульсу на поверхню матеріалу невелика. Метод

					КРМ.133ГМмд_24.11.000 ПЗ	Аркуш
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		8

дозволяє отримати хорошу поверхню, але не володіє достатньою продуктивністю. Крім того, при цьому методі знос інструменту відносно великий (досягає 100% від обсягу знятого матеріалу). Метод використовується в основному при прецизійній обробці невеликих деталей, дрібних отворів, вирізці контурів. твердосплавних штампів дротяним електродом.

Рисунок 1.1 – Принципова схема електроерозійної обробки:

1 – інструмент; 2 – заготовка; 3 – рідкий діелектрик; 4 – електричні розряди

Електроімпульсна обробка заснована на використанні імпульсів дугового розряду. Запропонована радянським фахівцем М.М. Писаревським в 1948 р. Цей метод став впроваджуватися в промисловість на початку 1950-х рр. На відміну від іскрового, дуговий розряд має температуру плазми нижче ($4000-5000^{\circ}\text{C}$), що дозволяє збільшувати тривалість імпульсів, зменшувати проміжки між ними і таким чином вводити в зону обробки значні потужності (кілька десятків кВт), тобто збільшувати продуктивність обробки. Характерне для дугового розряду переважно руйнування катода приводить до того, що знос інструменту (в цьому випадку він підключається до анода) нижче, ніж при електроіскровий обробці, складаючи 0,05-0,3% від обсягу знятого матеріалу (іноді інструмент взагалі не зношується). Більш економічний електроімпульсний метод використовується в

					КРМ.133ГМмд_24.11.000 ПЗ	Аркуш
						9
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

основному для чорнової обробки і для трьохкоординатної обробки фасонних поверхонь. Обидва методи (електроіскровий і електроімпульсний) доповнюють один одного.

Електроерозійні методи особливо ефективні при обробці твердих матеріалів і складних фасонних виробів. При обробці твердих матеріалів механічними способами великого значення набуває знос інструменту. Перевага електроерозійних методів полягає в тому, що для виготовлення інструменту використовуються дешевші, легко оброблювані матеріали. Часто при цьому знос інструментів незначний. Наприклад, при виготовленні деяких типів штампів механічними способами більше 50% технологічної вартості обробки складає вартість використовуваного інструменту. При обробці цих же штампів електроерозійними методами вартість інструменту не перевищує 3,5%. Умовно технологічні прийоми електроерозійної обробки можна розділити на прошивання і копіювання. Прошиванням вдається отримувати отвори діаметром менше 0,3 мм, що неможливо зробити механічними методами. В цьому випадку інструментом служить тонкий дріт. Цей прийом на 20-70% скоротив витрати на виготовлення отворів в філь'ерах, в тому числі алмазних. Більш того, електроерозійні методи дозволяють виготовляти спіральні отвори. При копіюванні набула поширення обробка стрічковим електродом (рисунок 1.2). Стрічка, перемотуючись з катушки на катушку, огинає копір, що повторює форму зуба. На грубих режимах стрічка «прорізає» заготовку на необхідну глибину, після чого обертанням заготовки щілина розширюється на потрібну ширину. Більш поширена обробка дротяним електродом (стрічка замінюється дротом). Цим способом, наприклад, можна отримувати з єдиного шматка матеріалу одночасно пуансон і матрицю штампу, причому їх відповідність практично ідеальна. Можливості електроерозійної обробки при виготовленні деталей складної форми видно з рисунка 1.3, а, б. Інші її різновиди: розмірна обробка, зміцнення інструменту, отримання порошків для порошкової металургії та ін.

					КРМ.133ГМмд_24.11.000 ПЗ	Аркуш
						10
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Рисунок 1.2 – Схема обробки пазів стрічковим електродом:

1 – стрічка; 2 – котушки; 3 – копір; 4 – заготовка

Рисунок 1.3 – Можливості електроерозійної обробки:

а – половина кувального штампа; б – робоче колесо газової турбіни,
оброблене електроерозійним методом

Перший у світі радянський електроерозійний (електроіскровий) верстат був призначений для видалення застряглого в деталі зламаного інструменту (1943 р.). З тих пір у СРСР і за кордоном випущено велике число різноманітних за призначенням, продуктивністю і конструкцією верстатів. За призначенням (як і металорізальні верстати) розрізняють верстати універсальні, спеціалізовані

					КРМ.133ГМмд_24.11.000 ПЗ	Аркуш
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		11

(рисунок 1.4) і спеціальні, до необхідної точності обробки – загального призначення, підвищеної точності, прецизійні.

Рисунок 1.4 – Електроерозійний верстат для вилучення уламків свердел з глибоких отворів в колінчастих валах

Спільними для всіх верстатів вузлами є пристрій для кріплення і переміщення інструменту (заготовки), гідросистема, пристрій для автоматичного регулювання міжелектродного проміжку (між заготовкою і інструментом). Генератори відповідних імпульсів (іскрових або дугових) виготовляються, як правило, окремо і можуть працювати з різними верстатами. Основні відмінності пристроїв для переміщення інструменту (заготовки) в електроерозійних верстатах від таких в металорізальних верстатах – відсутність значних силових навантажень і наявність електричної ізоляції між електродами. Гідросистема складається з ванни з робочою рідиною (технічного масла, гас, тощо), гідронасоса для прокачування рідини через міжелектродний проміжок і фільтрів для очищення рідини, що надходить в насос, від продуктів ерозії.

Електроімпульсний верстат відрізняється від електроіскрового практично тільки генератором імпульсів. Промисловість випускає генератори різного призначення. Розвиток техніки напівпровідникових приладів дозволив створити генератори, що забезпечують зміну параметрів імпульсів в широких межах.

					КРМ.133ГМмд_24.11.000 ПЗ	Аркуш
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		12

Наприклад, у генератора ШГИ-125-100 діапазон частот проходження імпульсів 0,1-100 кГц, тривалість імпульсів 3-9000 мксек, максимальна потужність 7,5 кВт, номінальна сила струму 125 А. Діапазон робочих напруг, що виробляються для електроіскрової обробки, – 60-200 В, а для електроімпульсної – 20-60 В. Сучасні електроерозійні верстати – високоавтоматизовані установки, найчастіше працюють в напівавтоматичному режимі.

В [1], [2] показано, що навіть при режимах прецизійної обробки шорсткість металокерамічних твердих сплавів становить $Ra = 0,2 - 0,3$ мкм, а у сталі 0,3 - 0,6 мкм [1]. Похибка може застосовуватися в межах 1,5 - 2 мкм [1] (за [2] 1 – 3 мкм).

У разі використання генератора RC-схеми (електронний генератор, в якому частота коливань визначається частотно-залежним елементом на базі RC-кола) є можливість змінювати параметри режиму (це перш за все ємність конденсаторів і напруга на електродах).

На рисунку 1.5 наведена зміна шорсткості (Ra) від ємності конденсаторів (C) при напрузі 120 В [1].

При малих ємностях конденсаторів ($C < 0,1$ мкф) шорсткість відповідає вимогам до операцій доведення. Якщо врахувати механічну депасивацію, яка використовується під час притирання, то можна отримати шорсткість, що відповідає вимогам остаточної операції і меж, заданих розробником (на рисунку 1.5 показано пунктиром).

Діапазон напружень на електродах [3] може змінюватися від 45 до 240 В. Очевидно, що при притиранні слід застосовувати малі значення параметра (знижувати енергію імпульсу), що показано на рисунку 1.6 [3].

Зниження напруги (рисунок 1.6) до граничного значення сприяє поліпшенню чистоти поверхневого шару. Якщо прийняти менші значення ємності (рисунок 1.5) і напруги (рисунок 1.6), то можна досягти шорсткості, що відповідає остаточному доведенню [4].

					КРМ.133ГМмд_24.11.000 ПЗ	Аркуш
						13
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Рисунок 1.5 – Зміна Ra від C:
1 – твердий сплав типу ВЗК;
2 – сталь 12Х18Н10Т

Рисунок 1.6 – Зміна Ra від напруги на електродах (U): 1 – ємність конденсаторів 0,1 мкф; 2 – ємність 0,5 мкф

У роботі [1] наведено залежності (в основному емпіричні) для оцінки параметрів поверхневого шару сталевих і тврдосплавних матеріалів. Вони зачіпають діапазони отримання шорсткості $Ra > 0,32$ мкм, але придатні для орієнтовної оцінки параметрів режиму притирання за показником Rz.

$$Rz = K_8 \cdot C^{1/3} \cdot U^{2/3}, \quad (1.1)$$

де K_8 – коефіцієнт.

У [5] вказується, що на шорсткість впливає ступінь забруднення межелектродного зазору продуктами обробки. Необхідно встановити залежності для режимів, що забезпечують зниження кількості забруднень в зазорі за рахунок відносних переміщень спряжених деталей (обертальний, поступальний, зворотно-поступальний і ін.) Висота нерівностей може помітно зростати при недостатньому очищенні зазору. Іноді такі несприятливі зміни відбуваються локально. Це може викликати в процесі експлуатації перетікання робочої середовища через запірний пристрій, що є недопустимим.

					КРМ.133ГМмд_24.11.000 ПЗ	Аркуш
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		14

Коефіцієнт K_8 визначається для чистової електроерозійної обробки експериментально для технологічних режимів обробки (таблиця 1.1) [1].

У роботі [3] висота мікронерівностей залежить від розмірів і розташування лунок, що виникають у процесі імпульсного видалення припуску (рисунок 1.7).

У процесі електроерозійної обробки видалення металу із заготовки відбувається за рахунок серії імпульсів, що діють на суміжні ділянки поверхні. Тому форма і розміри лунки будуть відрізнятися від поглиблення після одиничного розряду. На рисунку 1.7 показана зміна діаметра d_l і глибини h_l лунки в порівнянні з тими ж параметрами (d_1 , h_1) після одиничного розряду. Ця різниця буде залежати від відстані l між центрами сусідніх лунок. Взаємний вплив імпульсів оцінюють коефіцієнтом перекриття $\beta = l / d_1$. Умови протікання розрядів розрізняються, і розміри кожної лунки будуть різними. Тому для розрахунку беруть середні розміри поглиблення, які знаходять зі статистичних даних.

Таблиця 1.1 – Величина коефіцієнта K_8

Види матеріалів	Величина K_8		
	Нижня межа	Верхня межа	Середнє значення
Сталь цементована	0,397	0,45	0,417
Сталь азотована	0,392	0,398	0,395
Нержавіюча сталь	0,33	0,37	0,35
Вольфрамо-кобальтові сплави	0,214	0,298	0,251
Титано-кобальтові сплави	0,195	0,207	0,203

Рисунок 1.7 – Формування лунок, що визначають висоту нерівностей

На рисунку 1.7 видно, що висота нерівностей $h_{л}$ залежить від ступеня перекриття лунок. Висота нерівностей профілю [3]

$$R_z = (h_{л1} + h_{л2} + h_{л3} + h_{л4} + h_{л5}), \quad (1.2)$$

де $h_{лi}$ – глибина однієї з п'яти лунок в межах базової довжини.

Приймаючи лунку сферичною, а розміри двох сусідніх поглиблень однаковими, можна знайти розміри нерівностей $h_{л}$ на їх межі.

Розрахункова схема наведена на рисунку 1.7.

Проведені дослідження показали, що з підвищенням частоти проходження імпульсів відстань l між центрами лунок і висота нерівностей R_z знижуються. При частоті вище деякого граничного значення вся поверхня заготовки в зоні обробки матиме лунки, розташовані досить рівномірно. З деяким наближенням можна прийняти $l = R$. Тоді

$$h_{ли} = 1 - \sqrt{\frac{3(h_i^2 + r_i^2)}{4h_{ли}}}. \quad (1.3)$$

Якщо допустити, що розміри всіх лунок на ділянці поверхні, де проводяться вимірювання шорсткості, однакові, то можна вважати $R_z \approx h_{лi}$. Оскільки розмір

					КРМ.133ГМмд_24.11.000 ПЗ	Аркуш
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		16

лунки залежить від енергії імпульсу, то можна висоту нерівностей виразити через енергію імпульсу A_i [3]:

$$R_z = k_n \cdot A_i^p, \quad (1.4)$$

де k_n – коефіцієнт, що залежить від режиму обробки, матеріалу електродів, їх розмірів, виду і стану робочого середовища;

$p = 0,3 \dots 0,04$ – показник ступеня, що характеризує форму лунки. У розрахунках приймають $p = 1/3$. При чистових режимах для твердих сплавів $k_n = 1 \dots 5$, для сталей $k_n = 2 \dots 12$; при чорнових режимах $k_n = 10 \dots 50$. При вимірюванні висоти нерівностей слід враховувати специфіку поверхні після електроерозійної обробки.

З теорії процесу [3] видно, що поглиблення, що визначають шорсткість поверхні, мають форму лунок з плавним спряженням. Це ускладнює оцінку висот нерівностей за допомогою світлових методів вимірювань, наприклад подвійним мікроскопом. Для отримання достовірних результатів слід користуватися профілометрами і профілографами, що працюють за методом аналізу поверхні голкою.

Шорсткість після обробки на чистовому електроіскровому режимі твердих сплавів $R_a = 0,2 \dots 0,3$ мкм; після обробки сталей $R_a = 0,3 \dots 0,6$ мкм. Висота нерівностей при зміцненні і легуванні зростає зі збільшенням товщини шару, що наноситься і може досягати $R_z = 200$ мкм.

Цей параметр можна оцінити, як точність копіювання за [1], де враховується перш за все знос електрода-інструменту, похибка траєкторних переміщень. Останній фактор є визначальним при притиранні поверхонь, що сполучаються. Елементи, наведені в [1] показують, що такі похибки мають величину від 1,5 до 2,6 мкм, що входить в діапазон обмежень при доведенні деталей.

В [2] для випадку виготовлення мікроотворів прошивкою вказується можливість копіювання з похибкою близько 1 мкм. Така точність виходила при

					КРМ.133ГМмд_24.11.000 ПЗ	Аркуш
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		17

взаємному переміщенні електродів (обертання в разі виготовлення круглих отворів) із застосуванням зворотно-поступальних переміщень інструменту із середньою лінійною швидкістю 100-200 мм/с і з обертанням інструмента з частотою до 200 хв⁻¹.

В якості робочого середовища використовувалася деіонізована, дистильована вода, гас з подачею їх під тиском в зону обробки. В [2] не наводиться відомостей про очищення для повторного використання рідини (очевидно, застосовувалося одноразове застосування).

1.2 Електрохімічна обробка

Заснована на законах електрохімії. За використовуваним принципом поділяється на анодну і катодну, за технологічними можливостями – на поверхневу і розмірну.

Поверхнева електрохімічна обробка – практичне використання почалося з 30-х років 19 ст. Перший патент на електролітичне полірування був виданий в 1910 Е.І. Шпітальському. Сутність методу полягає у тому, що під дією електричного струму в електроліті відбувається розчинення матеріалу анода (анодне розчинення), причому швидше за все розчиняються виступаючі частини поверхні, що призводить до її вирівнювання. При цьому матеріал знімається зі всієї поверхні, на відміну від механічного полірування, де знімаються тільки найбільш виступаючі частини. Електролітичне полірування дозволяє отримати поверхні досить малої шорсткості. Важлива відмінність від механічного полірування – відсутність будь-яких змін в структурі оброблюваного матеріалу.

Розмірна електрохімічна обробка – відносять анодно-гідралічну і анодно-механічну обробку.

Анодно-гідралічна обробка вперше була застосована в Радянському Союзі в кінці 20-х рр. для вилучення з заготовки залишків застряглого зламаного інструменту. Швидкість анодного розчинення залежить від відстані між

					КРМ.133ГМмд_24.11.000 ПЗ	Аркуш
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		18

електродами: чим вона менше, тим інтенсивніше відбувається розчинення. Тому при зближенні електродів поверхня анода (заготовка) буде в точності повторювати поверхню катода (інструменту). Однак процесу розчинення заважають продукти електролізу, що скупчуються в зоні обробки, і виснаження електроліту. Видалення продуктів розчинення і оновлення електроліту здійснюються або механічним способом (анодно-механічна обробка), або прокачуванням електроліту через зону обробки (рисунок 1.8).

Цим методом, підбираючи електроліт, можна обробляти практично будь-які струмопровідні матеріали, забезпечуючи високу продуктивність в поєднанні з високою якістю поверхні. Використовувані для анодно-гідрравлічної обробки електрохімічні верстати прості у користуванні, використовують низьковольтне (до 24 В) електрообладнання. Однак значні щільності струму (до 200 А/см²) вимагають потужних джерел струму, великих витрат електроліту (іноді до 1/3 площі цехів займають баки для електроліту).

Рисунок 1.8 – Схема анодно-гідрравлічної обробки поверхні турбінної лопатки рухливими електродами: 1 – лопатка; 2 – електроди; 3 – електроліт (стрілками показано напрямок руху електродів і електроліту)

Електрохімічна розмірна обробка в нестационарному режимі здійснюється, як правило, нерухомими електродами, тобто зі змінним межелектродним зазором,

					КРМ.133ГМмд_24.11.000 ПЗ	Аркуш
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		19

який визначає характер зміни параметрів. В цьому випадку традиційні методи опису, регулювання і управління процесом, наприклад за величиною струму, його щільністю виявляються нездійсненними, так як кожен з відомих об'єктів управління залежить від міжелектродного зазору, який постійно зростає, що змінює кінцеві технологічні показники (шорсткість, точність, якість поверхні). Однак обробка нерухомими електродами має незаперечну перевагу перед іншими способами управління через спрощення обладнання, де можуть повністю бути відсутнім рухливі елементи конструкції. Регулювання процесу зводиться до підтримки часу формоутворення оброблюваної ділянки при стабільних режимах.

У роботах [5, 6] показано, що для підвищення технологічних показників нестационарної обробки слід використовувати методи регулювання зазору шляхом обліку безперервного зміни вхідних впливів і за рахунок компенсації одних чинників іншими по заданих залежностей. Таке управління стало можливим після створення гами принципово нових верстатів з нерухомими електродами, але з адаптивною системою регулювання процесу шляхом безперервного вимірювання фактичного кордону оброблюваної поверхні, напруженості поля в зазорі, стану робочого середовища і коригування часу обробки з урахуванням ступеня впливу на процес сукупності вхідних впливів. Розрахунок коригування часу виконується з використанням мікропроцесора верстата. Запропонована система знайшла використання в точному машинобудуванні, де габарити виробів не великі і впливом зміни зазору в зоні обробки можна в розрахунках знехтувати. Але навіть при таких спрощення управління процесом стало можливим тільки за регресивним рівнянням, які, як відомо, характеризують тільки фізичний зв'язок між вхідними і вихідними параметрами у вузькому діапазоні режимів обробки.

У загальному випадку нестационарний процес може протікати як при уніполярному, так і змінному струмі при прямій і зворотній полярності. Кожен із зазначених варіантів обробки підпорядковується своїм закономірностям: наприклад відомо [3], що розчинення металу можливо тільки на аноді, насичення воднем спостерігається, в основному, на катоді, стрибок напруги при імпульсі

					КРМ.133ГМмд_24.11.000 ПЗ	Аркуш
						20
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

може викликати локальне знімання матеріалу і порушувати точність і якість поверхні. Якщо не передбачити коригування, то після ЕХО нерухомими електродами кінцеві технологічні показники стають нижче, ніж на початку процесу: зі зростанням зазору знижується щільність струму і погіршується чистота поверхні, можуть виникнути межкристалітні розтравлювання, що викликає погіршення механічних характеристик, зокрема втомної міцності.

Фізична модель нестационарного процесу включає кілька стадій: початкову, коли процес формоутворення слабо залежить від стану і руху рідини в зазорі, але багато в чому визначається параметрами струму, станом поверхневого шару заготовки та їх взаємодією (ступеня відповідності параметрів струму умовам проходження його через систему заготовка - зазор - інструмент); стаціонарного режиму обробки, коли зазор змінюється в діапазоні чутливості процесу (як правило це становить 10-12% від початкового зазору. Тут регулювання не потрібно. Тому беруть міжелектродний простір однорідним. Така модель легко описується математично за допомогою виразу виду [7]

$$T = K(U - \Delta U), \quad (1.5)$$

де T – час обробки;

K – коефіцієнт, що враховує склад і стан робочого середовища, матеріал деталі. Як правило, вибирається з таблиць на підставі експериментів;

U – напруга на електродах, залежить від марки матеріалу і складу електроліту. У загальному випадку на вибір напруги впливає міжелектродний зазор, але тут це вплив несуттєво;

ΔU – втрати напруги, які на початку процесу значно перевищують показник при подальшій обробці.

Наближено можна прийняти [7]:

					КРМ.133ГМмд_24.11.000 ПЗ	Аркуш
						21
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$U_{\text{cp}} = \frac{U + \Delta U_1}{2}, \quad (1.6)$$

де ΔU_1 – втрати напруги в сталому режимі при стаціонарному зазорі (використовують в розрахунках початковий зазор).

Подібний опис відповідає фізичній моделі видалення мікрозадирів, що близько до розглянутого нами процесу. Тут зазвичай допускається незначне (в межах 50% допуску на профіль) знімання на віддалених від кромки ділянках, при цьому не регламентується рівномірність розчинення, хоча обмежується зміна якості поверхні (як правило, цей показник помітно поліпшується). Якщо потрібно локалізувати процес, то використовують різні способи захисту від розсіювання струму або зміни напруженості поля, наприклад [5, 8].

При великих задирках застосовують безрозмірну обробку спрямованої інтенсифікації місцевого розчинення металу за рахунок наклепу, механічної депасивації поверхні, наприклад, непровідними щітками, діелектричними розрядами і іншими способами [6].

Якщо розміри заготовки досить великі, то можливе використання секційних інструментів з єдиним або індивідуальним коригуванням режиму.

З літератури [7], відомо, що загальна модель електрохімічної розмірної обробки (ЕХРО) включає 3 взаємопов'язані блоки: електродинаміка, гідродинаміка, масовиніс. В роботі [9] показано, що для стаціонарного процесу необхідно забезпечити винос продуктів обробки потоком електроліту, що відповідає нижній межі стійкості процесу в нейтральних середовищах. Для нестационарних режимів, які виконуються, як правило, при нерухомих електродах, швидкість прокачування може дорівнювати нулю і здійснюватися при негативних тисках на вході (метод відсмоктування), рисунок 1.9, [7]. В цьому випадку технологічні характеристики матимуть нетрадиційний вид, властивий ЕХРО при режимах, близьких до стаціонарних.

					КРМ.133ГМмд_24.11.000 ПЗ	Аркуш
						22
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

При стаціонарних процесах з малими швидкостями прокачування або з відсмоктуванням середовища рідина повністю виконує свої функції тільки в частині хімізму процесу, а в частині депасивації – тільки в початковий момент формоутворення слабопасивуючих поверхонь, далі наступають часткові обмеження і зниження швидкості знімання матеріалу до повного припинення процесу при відсутності масовинесення.

Рисунок 1.9 – Залежність знімання металу від тиску електроліту на вході в міжелектродний зазор, матеріал – сталь 45:
1 – на початку процесу; 2 – у кінці процесу

Інша картина спостерігається на сплавах типу нержавіючих сталей, титану, рисунок 1.10, [7], де є плівка, стійка до хімічного впливу іонів середовища і володіє високими діелектричними властивостями. Тут процес видалення матеріалу починається при швидкості, достатній для часткового розкриття плівки, утворення газоподібних продуктів обробки, усуваючих плівку по всій поверхні. Однак

					КРМ.133ГМмд_24.11.000 ПЗ	Аркуш
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		23

швидкість знімання обмежена через великі втрати напруги на омичну складову процесу і гальмування утворення плівок.

При відсутності прокачування рідини процес протікає тільки за рахунок електродинамічного блоку для слабопасивуючих сплавів із загасаючим зніманням матеріалу протягом короткого часу (частки секунди), рисунок 1.11, [7] або при механічній депасивації електродів.

Опис цього процесу можливо з позицій теорії плівок. Вимірювання величини знімання (залежність 2 на рисунку 1.11) показали, що зміна розміру не спостерігається, але чітко проявляється форма поглиблення в місці обробки, що визначає точність одержуваного профілю.

При відсутності прокачування електроліту $V_e = 0$ (переважно використовується при доведенні поверхонь) для слабопасивуючих сплавів ,рисунок 1.12, [7] показано, що на початку процесу (а) відбувається дисоціація водного розчину солі, при цьому струм J наростає до робочого (J_p), в ході розвитку процесу на електродах (б) відбувається виділення бульбашок кисню і водню і деякої кількості хлору.

Рисунок 1.10 – Залежність знімання металу від тиску електроліту на вході в міжелектродний зазор, матеріал – сплав ОТ 4-1 при швидкості прокачування електроліту 8 м/с: 1 –початок процесу; 2 – кінець процесу

					КРМ.133ГМмд_24.11.000 ПЗ	Аркуш
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		24

Рисунок 1.11 – Залежність знімання металу від часу для слабо пасивуючих (1), легко пасивуючих (2) матеріалів та з покриттям кадмієм (3)

Рисунок 1.12 – Стадії процесу при $V_e = 0$ для слабопасивуючих сплавів:
а – під дією струму; б – реакція; в – утворення газової плівки (діелектрик)
і осад продуктів реакції

					КРМ.133ГМмд_24.11.000 ПЗ	Аркуш
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		25

І у кінці процесу електроди пасивуються суцільною газовою плівкою, на аноді осідає кольоровий осад з продуктів реакції, струм при цьому близький до нуля.

При цьому, час зняття припуску τ може бути отримано аналогічно [10]:

$$\tau = \frac{h(2S_0 + h)}{2\eta \frac{\alpha}{\gamma} (U - \Delta U) \chi_{cp}}, \quad (1.7)$$

де h – необхідна глибина обробки;

S_0 – початковий міжелектродний зазор;

η – вихід за струмом;

α – електрохімічний еквівалент сплаву;

U – напруга на електродах;

ΔU – втрати напруги

$$\chi_{cp} = (\chi + \chi_0) / 2, \quad (1.8)$$

де χ_0 , χ – електропровідність електроліту перед початком обробки та в кінці обробки;

γ – щільність матеріалу анода.

За [10] вирішуючи рівняння відносно h , знаходимо глибину обробки

$$h = \sqrt{S_0^2 + \eta \frac{\alpha}{\gamma} (\chi + \chi_0) \tau} - S_0. \quad (1.9)$$

Для розрахунку за виразами (1.7), (1.9) необхідно знати величину електропровідності електроліту в кінці процесу обробки. Вона обчислюється за формулою Релея, запропонованої для випадку заповнення провідника

					КРМ.133ГМмд_24.11.000 ПЗ	Аркуш
						26
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

кулеподібними провідними частинками і рекомендованої Л.І. Каданером [3], для електрохімічних процесів

$$\chi = \left(1 - \frac{3\varphi}{2 + \varphi - 0,392\varphi^{\frac{10}{3}}} \right) \chi_0, \quad (1.10)$$

де φ – ступінь газонаповнення;

$$\varphi = Q_{г.розр} / Q_e, \quad (1.11)$$

де $Q_{г.розр}$ – кількість газу, що залишився у зазорі в кінці процесу;

Q_e – кількість електроліту в зазорі наприкінці електрохімічного процесу.

Утворені у процесі електрохімічної реакції газу адсорбуються на поверхні окисної плівки. Під впливом електричного поля на зовнішній поверхні плівки і адсорбованих газів утворюються електричні заряди. При цьому заряд, що виникає на поверхні окисної плівки, врівноважується зарядом, рівним по величині і зворотній за знаком, в поверхні металу близької до поверхні окисної плівки.

1.3 Комбіновані методи обробки

Одним із шляхів підвищення характеристик точності і зниження шорсткості спряжених деталей є використання в одному процесі декількох видів впливів.

У [7] наведено класифікацію структури комбінованих методів обробки.

Поєднання різних впливів на об'єкт обробки (рисунок 1.13) [7] з накладанням електричного поля дозволяє підвищити технологічні можливості процесів і досягти результатів, які відкривають можливість створення виробів нового покоління, що не мають аналогів на світовому ринку.

Комбіновані методи обробки проектують шляхом об'єднання фізичних впливів: теплового, хімічного, механічного, магнітного, ядерного. Електричне поле

					КРМ.133ГМмд_24.11.000 ПЗ	Аркуш
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		27

є не тільки джерелом енергії, але і фактором інтенсифікації, що підсилює значення базових впливів.

Рисунок 1.13 – Зв'язки впливів комбінованими методами обробки

Найбільший інтерес для доводочних операцій представляють комбінована анодно-абразивна і електроерозійно-хімічна обробка [3], які поки не освоєні для доводочних операцій при виготовленні спряжених деталей. При комбінованій обробці із використанням абразиву гранули при більшості режимів не можуть потрапити в матеріал заготовки і шаржувати поверхню, тобто процес близький до безабразивного.

При анодно-абразивному шліфуванні тверді частинки (абразивні зерна або наповнювач) пошкоджують плівку, активуючи тим самим процес ЕХРО. Розміри абразивних зерен, що визначають міжелектродний зазор, як правило, не перевищують десятих часток міліметра. При таких малих зазорах щільність струму буде значно більше, ніж у разі розмірної електрохімічної обробки. Різко зростає швидкість знімання металу в зоні дії абразивних зерен інструменту. Крім того,

					КРМ.133ГМмд_24.11.000 ПЗ	Аркуш
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		28

частина припуску видаляється механічним шліфуванням. На відміну від звичайного шліфування при анодно-абразивній обробці на поверхні заготовки не утворюється більш міцний наклепаний шар, а продуктивність шліфування підвищується.

Отже, інтенсивність знімання металу при анодному розчиненні зростає внаслідок механічного видалення пасивуючої плівки і прискорення процесу виносу продуктів обробки з проміжку, а електрохімічне розчинення частини металу, в свою чергу, сприяє підвищенню швидкості механічного шліфування. Крім зазначених складових знімання при малих зазорах може мати місце електроерозійний процес. При малих розмірах зазору частина металу заготовки видаляється за рахунок електричної ерозії.

Швидкість знімання Q металу із заготовки може бути представлена у вигляді чергові суми [3]:

$$Q = Q_1 + Q_2 + Q_3, \quad (1.12)$$

де Q_1 – швидкість анодного розчинення металу за рахунок іонного струму;

Q_2 – швидкість механічного видалення припуску абразивними зернами;

Q_3 – швидкість електроерозійного знімання металу.

Співвідношення між складовими загального знімання може змінюватися в широких межах. Якщо зерна 2 (рисунок 1.14, а) [3] тільки торкаються заготовки 1, то припуск в основному видаляється анодним розчиненням. Механічне і електроерозійне знімання практично відсутні. При значному зусиллі на інструмент виступаючі частини зерен 1 (рисунок 1.14, б) можуть заглиблюватися в заготовку 3. У цьому випадку між металевим інструментом і заготовкою на будь-якій ділянці утворюється контакт. Заготовка з інструментом можуть контактувати за допомогою частинок стружки 2.

Режим обробки може бути таким, що поєднання всіх складових у формулі (1.12) дає можливість отримати найбільш високу швидкість видалення припуску і забезпечити задану якість поверхні.

					КРМ.133ГМмд_24.11.000 ПЗ	Аркуш
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		29

Рисунок 1.14 – Схема електроабразивного шліфування

Цей режим встановлюють зазвичай за результатами експериментів і підтримують його, зберігаючи параметри процесу, зокрема зусилля притискання інструменту до заготовки.

Якщо використовується схема обробки з електронейтральним інструментом, то швидкість знімання по формулі (1.12) визначається двома складовими. Електрична ерозія тут не виникає. Однак і в цьому випадку позначається ефект взаємного позитивного впливу шліфування і анодного розчинення, в результаті якого сумарна швидкість знімання металу значно перевищує суму окремих складових, взятих без урахування такого впливу.

При подачі в зону обробки вільного абразиву процес протікає так само, як при закріпленому зерні. Однак тут складно підтримувати постійну концентрацію зерен в міжелектродному просторі і знімання матеріалу за рахунок механічного шліфування нестабільне. Це впливає на складову Q_2 у формулі (1.12) і процес стає важко керованим. Щоб уникнути коротких замикань, що викликають прижоги поверхні, обробку вільним абразивом зазвичай ведуть при зниженій напрузі ($U < 10$ В).

У разі подачі наповнювача струменем електроліту відстань від сопла до оброблюваної поверхні може досягати десятків міліметрів, тому напруга на електродах підвищується до $U = 60 \dots 80$ В. Прискорення зняття припуску із заготовки відбувається за рахунок видалення пасивуючої плівки та інтенсифікації

					КРМ.133ГМмд_24.11.000 ПЗ	Аркуш
						30
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

анодного розчинення. При використанні металевих наповнювачів досить великих розмірів вдається підвищити електропровідність електроліту, що також сприяє прискоренню знімання металу.

При анодно-абразивному поліруванні припуск видаляється або анодним розчиненням металу і зніманням абразивним зерном, або тільки розчиненням. У першому випадку інструмент містить зв'язаний або вільний абразивний порошок, у другому – у якості інструмента використовують дерев'яні або пластмасові бруски, розташовані між металевими електродами-інструментами. В останньому варіанті швидкість знімання визначається тільки анодним розчиненням, а бруски сприяють механічному видаленню пасивуючої плівки. На рисунку 1.15 [7] показана схема полірування діелектричним інструментом 1 без абразиву. Переміщаючи його по поверхні заготовки 4, знімають плівку 3 на виступах нерівностей. Найсильніше розчинення відбувається на ділянках, розташованих ближче до електрода-інструменту 2 і не маючих пасивуючої плівки – висота нерівностей зменшується.

Рисунок 1.15 – Полірування електронеутральним інструментом

Продуктивність анодно-абразивної обробки із застосуванням зв'язаного електропровідного абразиву багато в чому залежить від швидкості заміни зношених зерен свіжими. Для цього потрібно регулювати знос абразивного інструменту. В одних випадках це можна здійснити за рахунок складової Q_3 знімання металу формули (1.12). Абразивний інструмент, як і електрод-інструмент, при електроерозійній обробці під дією розрядів частково руйнується, оголюючи свіжі ріжучі зерна. Для різних оброблюваних матеріалів інтенсивність зносу

					КРМ.133ГМмд_24.11.000 ПЗ	Аркуш
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		31

інструменту різна, тому експериментально підбирають або теоретично розраховують таке напруження на електродах і такий тиск інструменту на заготовку, щоб отримати найбільшу продуктивність при мінімальній витраті кругів або брусків.

При обробці в'язких сплавів на інструмент налипають частинки оброблюваного матеріалу, що перешкоджає зрізанню стружки. Налипання викликає місцеві прижоги на заготовці та погіршує точність обробки. Щоб усунути цей недолік, на електроди подають напругу зворотної полярності, тобто заготовку підключають до негативного полюса. Відбувається анодне розчинення інструменту, і налиплий метал повністю видаляється. Застосовують також схеми правки з рознесенням зон обробки і правки.

Комбінований метод електроерозійно-хімічної обробки представляє поєднання двох процесів, які чинять взаємний вплив один на одного, значно підвищуючи продуктивність і знижуючи знос інструменту. Дослідження показують, що при кожному імпульсі послідовно здійснюється спочатку анодне розчинення, а потім електрична ерозія металу. Швидкість знімання визначається залежністю [3]

$$Q = Q_1 + Q_3, \quad (1.13)$$

де Q_1 – швидкість знімання металу за рахунок анодного розчинення;

Q_3 – швидкість знімання за рахунок ерозії.

Процес анодного розчинення створює гарні умови для пробою проміжку, так як на катоді-інструменті є парогазовий шар. Ерозія оброблюваної поверхні, в свою чергу, сприяє видаленню пасивуючої плівки, значно прискорює дифузію і винос продуктів обробки. Процес найбільш ефективний при сприятливих умовах видалення продуктів обробки: малої площі робочої поверхні електрода-інструменту, невеликому розмірі поглиблення. Так, при прошивці отворів швидкість подачі електродів після поглиблення на кілька міліметрів знижується в кілька разів.

					КРМ.133ГМмд_24.11.000 ПЗ	Аркуш
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		32

Електрична ерозія сильно позначається на розмірах шорсткості поверхні. На ній виникають поглиблення, які дещо згладжуються анодним розчиненням, але якість обробки все ж гірше, ніж при ЕХО. Знос електрода-інструменту від впливу ерозії може бути знижений, якщо виготовляти його зі стійких проти ерозії матеріалів (графіту, вольфраму). Енергоємність такого методу значно нижче, ніж електроерозійного. Це пояснюється кращими умовами протікання процесу і за рахунок цього зниженням числа розрядів, які не здійснюють видалення металу.

Висновки до розділу 1

1 Механічна обробка (притирання) деталей із використанням абразивних паст набула найбільшого поширення, але для запірних пристроїв, що працюють в умовах інтенсивних течій агресивних середовищ, їх надійність і ресурс знижується.

2 У літературі, у тому числі за електричними методами обробки, дослідження торкалися технологічних показників шорсткості більше 0,5 мкм, за похибкою – понад 50 мкм, що знаходиться за межами вимог до спряжених деталей запірних пристроїв.

3 У доступних джерелах практично не розглядаються експлуатаційні характеристики запірних пристроїв, отриманих за технологією безабразивного притирання поверхонь.

4 Не враховується специфіка засобів технологічного оснащення для реалізації технологічних процесів притирання з накладанням електричного поля.

Отже, **мета дослідження** – обґрунтування вибору і створення методів розрахунку технологічних режимів безабразивного притирання з накладанням електричного поля для отримання безззорних запірних пристроїв, що виключають перетікання будь-яких середовищ на макро- і мікрорівнях протягом усього терміну експлуатації виробів і відкриває можливості відновлення працездатності пристроїв. **Об'єктом** розробки є технологічний процес комбінованої обробки

					КРМ.133ГМмд_24.11.000 ПЗ	Аркуш
						33
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

деталей запірної арматури, а **предметом** – закономірності впливу режимних параметрів, а також умов обробки на якість обробки.

Для вирішення поставленої мети необхідно розв'язати наступні задачі:

- встановити зв'язки між характеристиками поверхневого шару спряжених деталей з режимами комбінованої обробки, що забезпечують технологічні показники не нижче, ніж при традиційних методах притирання;

- створити механізм видалення мікронерівностей і запропонувати шляхи підвищення точності до необхідного рівня при безабразивному притиранні поверхонь запірних пристроїв;

- обґрунтувати параметри різних впливів комбінованих процесів з накладенням електричного поля;

- приділити увагу питанням економічної ефективності, охорони праці та захисту довкілля.

					КРМ.133ГМмд_24.11.000 ПЗ	Аркуш
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		34

РОЗДІЛ 2. ТЕОРЕТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ

2.1 Формування мікро-, наногеометрії безабразивної чистової обробки в електричному полі

При електричних методах обробки з накладанням електричного поля відсутній контакт між різальною кромкою інструмента і заготовкою. Знімання припуску відбувається за рахунок видалення мікрооб'ємів матеріалу (при електроерозійному процесі) або на молекулярному рівні за рахунок хімічних перетворень на кордоні електролізера. При цьому в поверхневому шарі відбуваються перетворення на нанорівні. В результаті зміни, виникають, можуть виявлятися у формі локальної термообробки, руйнування зв'язків між зернами матеріалу, насичення воднем або окислення за рахунок переходу молекул водню або кисню (газоподібних продуктів обробки) в поверхневий шар матеріалу заготовки, що може викликати помітну зміну експлуатаційних характеристик виробів, особливо для високонавантажених деталей, наприклад вузлів проточного тракту авіаційних і космічних двигунів, де поряд з силовими навантаженнями мають місце теплові впливи високотемпературних потоків.

Електроерозійна обробка (ЕЕО) може виконуватися з використанням коротких імпульсів великої частоти (електроіскрова обробка) або потужними тривалими імпульсами (електроімпульсна обробка), які формуються генератором.

При електроіскровому процесі можна забезпечити високу якість поверхневого шару (шорсткість менше 0,1 мкм). Але це супроводжується істотним зниженням продуктивності відносно електроімпульсної схеми.

Якщо метал обробляється імпульсами високої енергії, то спочатку нагріваються і плавляться поверхневі шари металу, а потім теплота проникає вглиб матеріалу [3, 7]. Оскільки час розряду невеликий, а потужність його значна, то виникає велика різниця температур по глибині. Зовнішні шари розширюються більше, а внутрішні – менше. Однак метал у зоні лунки на початку розряду не

					КРМ.133ГМмд_24.11.000 ПЗ	Аркуш
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		35

володіє високою пластичністю, тому в ньому виникають великі внутрішні напруження, що викликають розрив (мікротріщини). У кінці імпульсу, під дією різкого охолодження нагрітого металу робочим середовищем, знову виникають внутрішні напруження, що викликають подальше утворення тріщин [11, 12]. Товщина зміненого шару після серії імпульсів для деяких матеріалів значно перевершує висоту нерівностей. Глибина зміненого шару для сталевих заготовок становить (у залежності від режиму обробки): для електроімпульсної обробки – 0,1...0,4 мм; для електроіскрової обробки – 0,004...0,1 мм. За даними [7], при товщині зміненого шару більше 0,1 мм у більшості сталей, як правило, спостерігається утворення тріщин. Це відноситься до чорнових операцій.

Фізико-механічний стан поверхневого шару в процесі експлуатації при нестационарних навантаженнях багато в чому визначає працездатність і надійність виробу [11], особливо при великому градієнті температур (більше 2500°C на рисунку 2.1) і високому тиску (P_{PC}), викликаному імпульсами розряду, що діють на рідке робоче середовище.

Рисунок 2.1 – Ділянка поверхні із мікро- (нано-) тріщиною

При ЕЕО каналів на нерозрахованих режимах в поверхневому шарі (Н) за рахунок напружень різного знаку (рисунок 2.1) може утворитися розгалужена сітка мікротріщин (серед них частина з нанорозкриттям) з виходом на поверхню деталі [3]. Поглиблення містять по глибині Н (рисунок 2.1) дві ділянки: верхню h_1 , на якій

					КРМ.133ГМмд_24.11.000 ПЗ	Аркуш
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		36

поля вільної поверхневої енергії одного боку тріщини не перекриваються іншою, а сили молекулярного тяжіння (нанорівень) між ними не виявляються; нижній (h_2), на якому молекулярні поля однієї й іншої сторони перекриваються. У результаті цього між протилежними стінками тріщини на таких ділянках виявляються стискаючі сили молекулярного тяжіння (P_6), поступово зростаючі ближче до гирла концентратора.

У разі проникнення у порожнину шпарини молекул робочого середовища вони розташовуються на ділянках поверхні тріщини і переважно замикають на себе раніше некомпенсовані електричні поля матеріалу, тим самим компенсуючи або істотно знижуючи діючу стискаючу силу [3]. Напруження, створювані в гирлі пори від зовнішніх експлуатаційних навантажень, можуть зруйнувати зв'язки між елементами кристалічної решітки і тріщина розвинеться вглиб тіла, внаслідок чого відбудеться подальше порушення поверхневого шару, посилене дією розклинювального ефекту від адсорбційних шарів середовища. Надлишок вільної енергії E_δ тонких стійких плівок, різко зростаючий зі зменшенням товщини плівки δ_n , – результат розклинювального тиску $P_\delta = -dE_\delta / d\delta_n$, що завжди протидіє зменшенню товщини плівки і врівноважується зовнішніми силами [3, 7]. Це більшою мірою відноситься до електроімпульсної обробці, яка має високу продуктивність, але не завжди дозволяє забезпечити необхідні показники якості поверхневого шару. Такий метод застосовується на чорнових операціях (наприклад для вирівнювання припуску на пері лопатки турбіни і при прошивці міжлопаткового каналів).

ЕЕО за електроіскровою схемою стабільно забезпечує необхідну якість поверхневого шару, хоча це супроводжується істотним зниженням продуктивності відносно електроімпульсної схеми, що робить цей метод пріоритетним при виготовленні важкодоступних для інструменту невеликих елементів конструкцій, особливо при обробці жароміцних матеріалів, використовуваних в двигунобудуванні.

					КРМ.133ГМмд_24.11.000 ПЗ	Аркуш
						37
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

При виготовленні складнопрофільних деталей найбільш ефективною є електрохімічна розмірна обробка (ЕХО). Цей метод дозволяє обробляти такі деталі практично з усіх відомих сплавів, має високу продуктивність при великій площі обробки, дозволяє формувати поверхні з високою точністю, малою величиною шорсткості, не викликає фізико-хімічних змін в поверхневому шарі. При цьому в процесі обробки електрод-інструмент не зношується, що актуально для обробки ділянок, важкодоступних при традиційному процесі виготовлення. Для отримання працездатної деталі, яка застосовується в умовах знакозмінних силових і температурних впливів, потрібно забезпечити стабільні характеристики поверхневого шару.

Нано- і мікрогеометрія поверхні (шорсткість) після ЕХО залежить від структури оброблюваного матеріалу, а також від режимів процесу (складу, температури і швидкості прокачування електроліту, електричних параметрів процесу). Ці параметри можуть змінюватися в процесі обробки, що впливає на формування профілю і величини нерівностей.

При ЕХО може спостерігатися значне міжкристалітне розчинення матеріалу, яке і визначає величину шорсткості поверхні (рисунок 2.2) [3, 7]. Тому, чим дрібніше зерно, тим нижче шорсткість поверхні навіть в разі застосування однакових технологічних режимів.

Рисунок 2.2 – Міжкристалітне локальне знімання структурних складових матеріалу, що визначає шорсткість і глибину зміненого шару:

1 – зерно матеріалу; 2 – зв'язка між зернами; h – висота нерівностей на межі зерна, що характеризує величину шорсткості і зміненого шару

					КРМ.133ГМмд_24.11.000 ПЗ	Аркуш
						38
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Зерна матеріалу 1, як правило, розчиняються швидше, ніж матеріал зв'язки 2, особливо на межі цих складових. За рахунок цього тут утворюється поглиблення типу наведеного на рисунку 2.2. Щупові способи контролю шорсткості дозволяють оцінити тільки частину отриманого поглиблення величиною h , яка залежить від геометрії, радіусу голки, що ощупує, положення зв'язки відносно зерна.

При високій щільності струму, властивій комбінованій обробці, розчинення матеріалу спостерігається в основному не по зв'язці, а по самому зерну, на якому утворюються місцеві поглиблення (рисунок 2.3) [9].

Рисунок 2.3 – Поверхня мікронерівностей після комбінованої електроерозійно-хімічної обробки сталі 10X11H23T3MP (фотографія з оптичного мікроскопа при 500-кратному збільшенні – у центрі; тривимірний рельєф поверхні площею $50 \text{ мкм} \times 50 \text{ мкм}$ зі скануючого зондового мікроскопа – по краях)

Для більшості сплавів підвищення щільності струму при ЕХО призводить до зниження шорсткості. Це ж справедливо для комбінованого процесу. Зміна температури електроліту при інших рівних умовах дозволяє зменшити його електричний опір, що збільшує щільність робочого струму, призводить до зниження висоти мікронерівностей і до появи нанозаглиблень на обробленій поверхні.

На рисунку 2.4 наведена залежність шорсткості поверхні жароміцного нікелевого сплаву після ЕХО від щільності робочого струму при різній температурі електроліту. Застосування імпульсного струму дозволяє підвищити

					КРМ.133ГМмд_24.11.000 ПЗ	Аркуш
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		39

його щільність в імпульсі, що сприяє зниженню висоти мікронерівностей на 20...30% у порівнянні з ЕХО при постійному струмі.

У сталей, підданих деяким видам термічної обробки (наприклад загартуванню), спостерігається підвищена шорсткість, особливо при малих швидкостях прокачування електроліту (менше 6...8 м/с) і великому його залуженню ($\text{pH} > 11$). Це можна пояснити зростанням розміру зерен і зміною співвідношення товщини зерна і зв'язки.

Рисунок 2.4 – Залежність шорсткості, отриманої для нікелевого сплаву при ЕХО поверхонь, від щільності струму при різній температурі електроліту

Після ЕХО в середовищі електролітів на базі хлориду натрію шорсткість поверхонь деталей з конструкційних сталей становить $R_a = 0,32 \dots 0,63$ мкм, нержавіючих сталей – $R_a = 1,25 \dots 0,32$ мкм, титанових матеріалів – $R_a = 2,5 \dots 1,25$ мкм, з алюмінієвих сплавів – $R_a = 1,25 \dots 0,63$ мкм [3]. Для розчинів нітрату натрію висота нерівностей зменшується, але знижується продуктивність і вирівнювальна здатність процесу, що знижує точність формоутворення.

					КРМ.133ГМмд_24.11.000 ПЗ	Аркуш
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		40

Після ЕХО в поверхневому шарі не спостерігається зниження вмісту вуглецю, легуючих елементів і зміни мікротвердості по глибині (на відміну від обробки механічним і електроерозійним методом), відсутні наклеп і термічні перетворення. Застосування ЕХО після механічної обробки з одного боку усуває наклеп від попередньої лезової обробки, що може знижувати механічні показники матеріалу, особливо міцність від втоми при багатоциклових навантаженнях; з іншого боку дозволяє видалити сліди дії інструменту, створити більш плавний профіль нано- і мікровиступів. Останнє сприяє підвищенню втомної міцності. Таким чином, в ряді випадків негативні і позитивні фактори компенсують один одного, і застосування ЕХО після механічної обробки може викликати зниження механічних властивостей тільки у окремих матеріалів з великим зерном (наприклад у деяких марок жароміцних, титанових сплавів [3]). У нікелевих, титанових та інших сплавах, схильних до міжкристалітного розтравлювання, після застосування нерозрахункових режимів ЕХО може спостерігатися зниження межі міцності до 10-15%, що, як правило, не виходить за нижню межу, встановлену стандартами на опрацьований матеріал.

У деяких матеріалів (наприклад, у титанових сплавів) після ЕХО може з'явитися насичення воднем обробленої поверхні, що підвищує крихкість матеріалу і знижує втомну міцність. Для того щоб цього уникнути необхідно застосовувати технологічні режими, при яких водень, що утворюється в ході реакції на катоді, буде своєчасно виноситися за межі міжелектродного зазору, не встигаючи проникнути в поверхневий шар оброблюваної деталі [7].

Таким чином, ЕХО можна отримувати деталі складної форми з необхідними показниками точності і якості. Для цього потрібно уникнути проблеми зупинки потоку електроліту (і, відповідно, зупинки обробки). Для отримання в важкодоступних місцях неглибоких (не більше 0,5-0,6 мм) виступів або западин найбільш доцільно застосовувати схему з нерухомими електродами. Така схема гарантує безперервне протікання електроліту через зазор, забезпечує отримання бездефектної поверхні, вона найбільш проста в реалізації, тому що в ній відсутні

					КРМ.133ГМмд_24.11.000 ПЗ	Аркуш
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		41

складні системи подачі електрода-інструменту, контролю величини і стану міжелектродного зазору. При необхідності отримання якісного поверхневого шару на протяжних ділянках для стабілізації виносу газоподібних продуктів обробки із зони зняття припуску в літературі [7, 12] пропонується використовувати складні системи автоматизованого контролю та механізації. Це значно ускладнює і здорожує устаткування. В роботі запропоновано встановлювати гідродинамічний режим, що забезпечує високу якість поверхневого шару при нестабільних умовах протікання процесу, шляхом аналогового моделювання на імітаторі і подальшого застосування цих режимів в процесі обробки виробу.

На якість поверхневого шару, одержуваного після комбінованої обробки, істотно впливає співвідношення теплового (електроерозійна складова процесу) і хімічного (ЕХО) впливу. Шорсткість оброблених поверхонь після комбінованого процесу при чистових режимах зазвичай знаходиться в межах $R_a = 0,32 \dots 0,63$ мкм [7], що забезпечує високі експлуатаційні характеристики виробів.

2.2 Особливості безабразивної обробки електричними методами спряжених металевих деталей

У техніці застосовуються спряжені вузли з різними системами герметизації: при невисоких перепадах тисків перетікання рідких і газоподібних середовищ виключають за рахунок пружних ущільнень (гумових, пластмасових кілець, сальників і ін.), прокладок. Але зі збільшенням тиску на вході виростає знос ущільнюючих елементів, знижується їх надійність і ресурс. Тому якщо перепад тисків досягає десятків МПа, то для забезпечення герметичності починають використовувати ущільнення з розвантажувальними камерами типу наведених в [13]. Однак область їхнього застосування досить обмежена і для більшості запірних пристроїв з високим напором (особливо агресивних протікаючих середовищ) вони не ефективні.

					КРМ.133ГМмд_24.11.000 ПЗ	Аркуш
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		42

У більшості застосовуваних запірних пристроїв необхідно забезпечити високу точність і показники поверхневого шару спряжених рухомих деталей. Для високонапірних пристроїв потрібна спільна обробка таких поверхонь без використання абразивних матеріалів, які можуть шаржувати місця спряження, створювати зазори і викликати протікання середовищ, що перекачуються. При цьому похибки спряжених ділянок повинні бути співрозмірні з висотою мікронерівностей, а ширина розкриття мікродефектів поверхневого шару не перевищувати десятків нанометрів.

У таблиці 2.1 показані технологічні показники і вимоги до механічних операцій доведення [4].

Таблиця 2.1 – Технологічні показники доведення спряжених поверхонь

Етапи доведення	Технологічні можливості та вимоги		
	Припуск, мкм	Похибка, мкм	Шорсткість, R_z , мкм
Попереднє	20-50	3-5	3,2-0,8
Напівчистове	5-20	1-3	0,8-0,4
Остаточне	2-5	0,5-1,0	0,4-0,1
Тонке	2-0,2	0,1-0,5	0,1-0,02

Аналіз таблиці 2.1 дозволяє обґрунтувати вибір оптимального технологічного способу обробки для кожного етапу доведення точних поверхонь, в тому числі спряжених.

Одним із шляхів керованого видалення нерівностей на ділянках запірних елементів є використання безконтактних способів обробки з накладанням електричного поля. Однак тут виникають технологічні складнощі, тому що відома чистова електроерозійна обробка забезпечує отримання мікронерівностей (R_z) не нижче 0,8-1,0 мкм, що неприйнятно для більшості запірних пристроїв. Анодний процес з рекомендованим діапазоном напруги не нижче 3-6 В також не дає можливості отримання необхідних точності (в межах часток мікрометра) і

шорсткості (мінімальна величина R_z близько 0,1 мкм). Крім того перед початком операції доведення кожна з поверхонь, що сполучаються, може мати похибку 5-10 мкм, що вимагає на першому етапі доведення видалення припуску з величиною не менше граничного значення допуску на заготовку.

Використання для цих цілей електроерозійної обробки з «м'якими» технологічними режимами значно підвищує трудомісткість операції і формує на кожному з елементів, що сполучаються коміркову поверхню, не придатну для запірних пристроїв. Крім того застосовані у цьому випадку низькі напруги порушують стабільність процесу і викликають появу місцевих мікродфектів і нерівностей з висотою більшою, ніж допускається умовами креслення. Безконтактне анодне розчинення не дозволяє забезпечити точність місць спряження, а при напругах, нижче граничних, рекомендованих в [7], не вдається знизити вихідну висоту нерівностей, тобто отримати після доведення необхідні показники поверхні на нано- і мікрорівні.

Проведені роботи показали, що в процесі безабразивного доведення спряжених поверхонь, що переміщуються, слід застосовувати 2 етапи обробки: перший – з використанням комбінованого ерозійно-хімічного процесу на постійному струмі з періодичною зміною полярності; другий – при низьковольтному анодному розчиненні мікронерівностей на змінному струмі з механічною депасивацією зони спряження деталей. В останньому випадку напруга на електродах зменшується до 3-4 В за рахунок зниження втрат на видалення пасивуючої плівки, що частково знімається шляхом механічного впливу протилежної спряженої поверхні запірного пристрою, що рухається.

У техніці використовуються спряжені поверхні декількох видів (рисунок 2.5):

- плоскі, характерні для шибєрних запірних пристроїв (рисунок 2.5, а);
- з прямолінійною твірною: циліндричні (рисунок 2.5, б) або конічні (рисунок 2.5, в);
- сферичні (кульові) типу наведених на рисунку 2.5, г.

					КРМ.133ГМмд_24.11.000 ПЗ	Аркуш
						44
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Технологічні схеми їх притирання мають суттєві відмінності. Для плоских вузлів (рисунок 2.5, а) характерна можливість регулювання сили притискання контактних елементів (шибера 3 і торця патрубку 4) шляхом зміни пружних характеристик деталі 5 (наприклад, пружини).

Рисунок 2.5 – Основні види спряжених поверхонь запірних пристроїв:

а – плоскі: 1 – напрямні елементи; 2 – отвір; 3 – запірний шибера; 4 – патрубок магістралі; 5 – пружний елемент; 6 – корпус запірного пристрою; 7 – привід шибера;

б – циліндричні: 1 – поворотна частина; 2 – корпус; 3 – паз в поворотній частині; 4 – паз в корпусі;

в – конічні: 1 – поворотна частина; 2 – притискач; 3 – корпус; 4 – конічне сполучення; 5 – паз;

г – сферичні: 1 – кульове сполучення; 2 – корпус; 3 – привід поворотної частини; 4 – отвір в сфері

					КРМ.133ГМмд_24.11.000 ПЗ	Аркуш
						45
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Крім того, зворотно-поступальне переміщення («А» на рисунку 2.5, а) дозволяє підтримувати при доведенні постійне положення робочої доріжки на шибері і стабілізувати швидкість взаємного переміщення контактних елементів. Ці поверхні, як правило, піддаються хіміко-термічній обробці (наприклад, азотуванню), тому припуск на їх доведення не повинен перевищувати 50 мкм. Аналогічні запірні пристрої можуть мати торцеві контактні елементи, що закривають сідло. При високому тиску і витратах такі пристрої можуть викликати гідравлічні удари, що порушують протікання робочих середовищ, тому вони використовуються переважно в гідравлічних мережах з тиском до 20МПа.

У разі циліндричних запірних пристроїв (рисунок 2.5, б) в процесі попереднього доведення утворюються зазори між поворотною частиною 1 і корпусом 2, що вимагає використання на цьому етапі обробки технологічної поворотної частини із заміною її на остаточній стадії обробки штатною деталлю. Тут можуть виникати складнощі з регулюванням робочих зазорів і їх підтримкою в період експлуатації, особливо при значних перепадах температур протікаючого середовища і корпусу запірного пристрою.

Конічні конструкції (рисунок 2.5, в) досить зручні для доведення, в тому числі без застосування абразивних інструментів, тому що дозволяють регулювати силу притискання в конічному sprzęженні 4 між поворотною частиною 1 і корпусом 3, а також замінити зворотно-поступальні переміщення контактних елементів (рисунок 2.5, а) обертовим рухом поворотної частини 1 в корпусі 3. Їх використання обмежене витратами середовищ, що протікають через пристрій.

Кульові клапани (рисунок 2.5, г) дуже складні у виготовленні, хоча значно розширюють експлуатаційні можливості запірних пристроїв, додаючи їм функції змішувачів і деякі інші властивості. Тут потрібні нові конструктивні елементи для регулювання зазорів і дороге устаткування для виготовлення сферичних контактних поверхонь. При їх доведенні складно виключити використання абразивного інструменту.

					КРМ.133ГМмд_24.11.000 ПЗ	Аркуш
						46
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

2.3 Фізична модель доведення без використання абразиву

Усі, наведені на рисунку 2.5, заірні пристрої можуть бути виконані з доведенням без використання абразивних матеріалів шляхом двоетапного мікро- і макровидалення припуску комбінованим методом із накладанням електричного поля.

На першому етапі відбувається ерозійно-хімічне видалення макро- і мікронерівностей зі зніманням виступів за рахунок, в основному, анодного розчинення металу з вершин нерівностей обох поверхонь, що сполучаються (рисунок 2.6).

На обох сполучених деталях (рисунок 2.6) перед доведенням є нерівності, викликані похибками попередньої обробки, і мікронерівності.

Сполучені деталі 1 і 2 є електродами, до яких підключені джерела струму 6 і 8.

Рисунок 2.6 – Схема обробки спряжених поверхонь: 1, 2 – спряжені деталі; 3, 4 – окисна плівка; 5 – слабопровідне рідке середовище; 6 – РС генератор імпульсів; 7 – перемикач полярності; 8 – джерело низьковольтного струму;

I-I; II-II – межі спряжених поверхонь після першого етапу обробки;
А-А; Б-Б – зовнішня поверхня окисної плівки; Р – тиск на спряжені поверхні;
V – швидкість взаємного переміщення спряжених поверхонь

					КРМ.133ГМмд_24.11.000 ПЗ	Аркуш
						47
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

У середовищі слабо провідної рідини 5 при зближенні деталей 1 і 2 до контакту окисних плівок 3 і 4 відбувається електроерозійне знімання до меж I-I і II-II, які можуть забезпечити спряження деталей на нанорівні точності. Відомо [3], що при комбінованій обробці знімання відбувається переважно з анода. Якщо вихідна шорсткість і похибка однієї з поверхонь, що сполучаються, значно більша за іншу, то можна виконувати доведення на полярності, при якій перша поверхня постійно буде анодом, а знімання з іншої поверхні може відбуватися за рахунок зворотної напівхвилі струму. Однак у більшості випадків доведення передбачаються припуски на обидві спряжені деталі, тому полярність струму періодично змінюють перемикачем 7.

Межі окисної плівки А-А і Б-Б змінюють положення зони контакту спряжених деталей, де притискач регулюється тиском Р. Залежно від стискання деталей 1 і 2 товщина плівки в місцях контакту зменшується. Тут падає опір і відбувається підвищене знімання нерівностей за рахунок електроерозійної складової процесу. Одночасно відбувається анодне розчинення мікроставів струмом від джерела постійного струму 8. Для забезпечення безперервності процесу доведення і періодичної заміни робочого середовища деталі 1 і 2 переміщують зі швидкістю «V».

Під дією електричних розрядів на поверхні спряжених деталей виникають нерівності в формі сферичних лунок (рисунок 2.7).

Частина з них дозволяє видаляти геометричні похибки профілю, інші формують мікронерівності, що визначають чистоту поверхні (R_z на рисунку 2.7, б). Електрохімічна складова комбінованого процесу сприяє (рисунок 2.7, б) згладжуванню мікропрофілю і зниженню нерівностей до нанорівня (на остаточному етапі доведення). Як показано в [7] співвідношення між діаметром (d_n) і глибиною (h на рисунку 2.7, а) залежить від режимів обробки. При цьому глибина (h) визначає запас рідкого робочого середовища (рисунок 2.6) і тривалість протікання анодного процесу, що регулюється швидкістю переміщення деталей, що сполучаються.

					КРМ.133ГМмд_24.11.000 ПЗ	Аркуш
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		48

Рисунок 2.7 – Мікрогеометрія поверхні після першого етапу обробки:

а – положення спряжених поверхонь 1 і 2; б – зміна форми мікролунки за рахунок анодного розчинення виступу нерівності; h – глибина мікролунки; R_z – висота мікронерівності після серії ерозійних розрядів; R_{z0} – висота нерівностей в кінці першого етапу обробки; $d_{л}$ – діаметр лунки

На другому етапі доведення використовується тільки анодне розчинення при низькій знакозмінній напрузі від джерела 8 (рисунок 2.6) з переважним видаленням місць спряження лунок, що утворилися після першого етапу обробки (рисунок 2.7). Потім формується поверхня з точністю і мікронерівностями на нанорівні. Механічна депасивація зони обробки і низька напруга від джерела струму дозволяють уникнути міжкристалітного роз'ятрення зони обробки.

2.4 Математичний опис, визначення режимів обробки

В [7] запропоновано залежність для оцінки діаметра зони дії розряду, який для чистової електроерозійної обробки може бути апроксимований діаметром лунки $d_{л}$ (рисунок 2.8)

$$d_{л} = K_0 \cdot \left(\frac{A_u}{\tau_u} \right)^m \cdot \tau_u^n; \quad (2.1)$$

$$K_0 = \frac{L}{S(m - 0,5n) + 0,5n}; \quad (2.2)$$

					КРМ.133ГМмд_24.11.000 ПЗ	Аркуш
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		49

де L, K_0, m, n – емпіричні коефіцієнти; S – міжелектродний зазор, що вимірюється товщиною окисної плівки; A_u – енергія імпульсу. Для RC схеми $A_u = \eta_1 \frac{CU^2}{2}$ (η_1 – коефіцієнт корисного використання енергії; за [7] $\eta_1 \leq 0,4$, за [5] $\eta_1 \leq 0,2$); C – ємність конденсаторів імпульсного генератора RC схеми. U – напруга на електродах (при надмалих зазорах $U = 10 \dots 20$ В); τ_u – тривалість імпульсу.

$$\tau_u = \frac{1}{q \cdot f}; \quad (2.3)$$

де q – відносна тривалість імпульсів, приймається як відношення періоду повторення до їх тривалості. Змінюється в діапазоні 2-10 (уточнюється експериментально); f – частота проходження імпульсів. Наближено $f = 0,837 / RC$. Тут R – регульований опір RC – генератора.

Рисунок 2.8 – Вплив продуктів електроерозійної обробки на зміну мікрозаглиблень поверхонь, що притираються: 1 – алюмінієві сплави; 2 – мідні сплави; 3 – сталі

У таблиці 2.2 наведено відомості для вибору коефіцієнтів.

					КРМ.133ГМмд_24.11.000 ПЗ	Аркуш
						50
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Таблиця 2.2 – Числові значення емпіричних коефіцієнтів

Матеріал спряжених поверхонь	Числові значення		
	L	m	n
Сталь	0,08...0,1	0,75...0,78	-
Мідні сплави	0,036...0,04	0,65...0,68	0,28...0,3
Алюмінієві сплави	0,097...0,1	0,7...0,75	0,3...0,35
Чавун	0,18...0,2	0,8...0,82	0,35...0,4

Для визначення енергії імпульсу необхідно встановити величину мінімального міжелектродного зазору, який залежить від товщини окисної плівки. За [5] такі плівки утворюються під дією струму і являють собою матеріали, близькі до напівпровідників. Товщина плівки (H) залежить від властивостей оброблюваного матеріалу і в класичному розумінні виражається через енергію розряду (A_u), постійну Больцмана \bar{R} і температуру (T).

$$H = K_H \cdot e^{-A_u/\bar{R}T} \cdot \tau_u; \quad (2.4)$$

де K_H – розмірний коефіцієнт, що враховує швидкість наростання плівки в залежності від властивостей матеріалу.

Гранична товщина окисних плівок для нікелеміських сплавів складає за [5] до 15-30 нм, а у титанових матеріалів – до 50-60 нм. Отже, міжелектродний зазор (S) буде близьким до цих величин для отримання пробою імпульсу досить напруги навіть менше 10 В. Осцилографування показало, що при таких напругах можлива поява тліючих розрядів, які не викликають утворення лунки. Тому взаємне переміщення поверхонь, що сполучаються, під тиском стискання дозволяє

потоншити плівку і отримати локальні ділянки провідності, де можуть формуватися мікророзряди.

Розрахунок за формулою (2.1) дозволяє оцінити глибину лунки h (рисунок 2.7), яка за [7] складає:

$$h = K_h \cdot d_n; \quad (2.5)$$

де K_h – коефіцієнт. За [7] для сталей $K_h = 0,25-0,35$.

Величина « h » обмежена припуском (Z_o) на остаточну обробку

$$h < Z_o - \delta; \quad (2.6)$$

де δ – похибка поверхні після першого етапу доведення. За [4] ця величина складає 3-4 мкм. Звідси припуск на остаточний етап складе $Z_o = h + \delta$ і не перевищує 5-6 мкм.

За глибиною лунки можна встановити величину R_z (рисунок 2.7), на оцінку якої впливає анодна складова процесу (рисунок 2.6), і поява в просторі між спряженими поверхнями нано- і мікрочастинок матеріалу оброблюваного електроерозійним методом (рисунок 2.8). Ступінь їх накопичення залежить від площі спряжених ділянок, швидкості переміщення контактних елементів, режимів ерозійної обробки.

Анодне розчинення (рисунок 2.6) сприяє вирівнюванню мікроповерхні на чистових режимах комбінованого процесу, дозволяє знизити висоту нерівностей на 20-30%, що може бути враховано коефіцієнтом $K_2 = 0,7-0,8$.

Величина R_{zo} , отримана без урахування впливу частинок і анодної складової комбінованого процесу (рисунок 2.7, б), може бути обчислена за формулою, аналогічною наведеній в [4]:

					КРМ.133ГМмд_24.11.000 ПЗ	Аркуш
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		52

$$R_{z_0} = \frac{\beta^2 \left(\frac{d_{\text{л}}}{2}\right)^3 K_h}{3d_{\text{л}}^2 \left(K_h^2 + \frac{1}{2}\right)}; \quad (2.7)$$

де β – коефіцієнт перекриття лунки, $\beta = \frac{d_{\text{л}}}{l}$, (l – відстань між сусідніми лунками) на чистовому етапі обробки $\beta = 0,7 \dots 0,8$.

З урахуванням впливу нано- і мікрочастинок, а також анодної складової процесу, висота мікронерівностей (R_z на рисунку 2.7, б) може бути оцінена залежністю:

$$R_z = R_{z_0} \cdot K_1 \cdot K_2 = \frac{\beta^2 K_h d_{\text{л}}}{12 \left(K_h^2 + \frac{1}{2}\right)} \cdot K_1 \cdot K_2. \quad (2.8)$$

Аналіз рисунка 2.8 показує, що для сплавів на базі заліза та міді закон зміни величини лунки близький до лінійного і при граничній концентрації частинок збільшення R_z може враховуватися постійними коефіцієнтами K_1 (для сталей $K_1 = 1,15-1,16$, для мідних сплавів $K_1 = 1,25-1,3$, алюмінієвих $K_1 = 1,55-1,6$).

Щодо оптимізації, то за [7] можна знайти величину ємності конденсаторів, C , при обробці RC-схеми:

$$C = \left(\frac{R_z}{K_3 U}\right)^3, \quad (2.9)$$

де K_3 – коефіцієнт, значення якого для комбінованої обробки наведені в таблиці 2.3.

Мінімальна величина швидкості переміщення спряжених поверхонь (V на рисунку 2.6) залежить від вихідного профілю контактних ділянок і збільшується в міру зняття нерівностей, тому що площа контакту зростає і продукти обробки починають гальмувати де іонізацію міжелектродного простору. Розмір L_d

					КРМ.133ГМмд_24.11.000 ПЗ	Аркуш
						53
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

контактної поверхні уздовж напрямку переміщення залежить від конструкції виробу, а швидкість накопичення частинок у міжелектродному просторі – від енергії і частоти імпульсів. Із деяким запасом для чистової електроерозійної складової обробки можна прийняти, що при граничному заповненні простору (рисунок 2.6) продуктами обробки вони повинні виноситися з рідким робочим середовищем за рахунок взаємного переміщення сполучених елементів контактної пристрою.

Таблиця 2.3 – Коефіцієнти K_3 (мкм / мкФ·В) для різних матеріалів

Оброблюваний матеріал	Величина K_3 при обробці:	
	електроерозійній	комбінованій
Сталь вуглецева	0,4...0,45	0,25...0,3
Сталь легована	0,3...0,4	0,2...0,25
Мідні сплави	0,7...0,8	0,3...0,4

Якщо прийняти форму нано- і мікрочастинок сферичною, то при заповненні простору між електродами з концентрацією ϕ час τ_0 циклу очищення простору становитиме

$$\tau_0 = \frac{V_{л} \cdot \phi}{(a + bC)UK_1K_2K_4}, \quad (2.10)$$

де $V_{л}$ – об'єм лунки; a , b , K_4 – коефіцієнти. Тут K_4 – враховує умови обробки (робоче середовище, схему обробки, частоту проходження робочих імпульсів); ϕ – характеризує ступінь заповнення лунки глибиною h продуктами обробки. Для

сферичних частинок $\varphi = 0,6-0,7$. Для РС схеми обробки чисельні величини a , b , K_4 приведені в таблиці 2.4.

Таблиця 2.4 – Значення коефіцієнтів a , b , K_4

Оброблюваний матеріал	Значення коефіцієнтів		
	a	b	$K_4 \cdot 10^{-4}$
Сталь вуглецева	0,23...0,25	0,7...0,72	6,7...6,8
Сталь легована	0,2...0,22	0,65...0,7	5,8...5,9
Мідні сплави	0,5...0,7	0,7...0,75	7,8...8,0

У процесі електроерозійної та комбінованої обробки потрібен примусовий винос із зони притирання продуктів обробки, які впливають на інтенсивність знімання припуску (рисунок 2.9) та інші технологічні показники процесу.

Рисунок 2.9 – Зміна швидкості видалення припуску від кількості в зазорі продуктів обробки

Як впливає з рисунка 2.9 винос продуктів обробки дозволяє прискорити процес до 50%. З огляду на, що розподіл часток по зоні притирання нерівномірний, можна стверджувати, що похибка профілю спряжених поверхонь суттєво залежати від забруднення міжелектродного зазору з урахуванням коефіцієнта (K_3) заповнення рідиною об'єму лунок, можна знайти швидкість V_p протікання робочого середовища в зазорі.

$$V_p = K_{л} \cdot R_z \cdot K_3, \quad (2.11)$$

де $K_{л}$ – коефіцієнт, що визначає об'єм лунки в залежності від її глибини (R_z); $K_3 = 0,4 \dots 0,6$.

При швидкості наповнення лунки 30 мг/хв зміна інтенсивності (рисунок 2.9) не перевищує 5...6% і не робить істотного впливу на точність формоутворення.

При притиранні швидкість прокачування може забезпечуватися переміщенням електродів.

Період перемикання полярності τ_1 для електроерозійної та електрохімічної складової комбінованого процесу залежить від часу очищення міжелектродного простору і висоти нерівностей кожної спряженої поверхні перед притиранням. Якщо ці показники близькі, то

$$\tau_1 = \frac{1}{2} \tau_0 = \frac{V_{л} \cdot \phi}{(a + bC) U K_1 K_2 K_4}. \quad (2.12)$$

Тоді швидкість переміщення контактних поверхонь, необхідну для видалення продуктів обробки, можна оцінити по залежності

$$V \geq \frac{L_{д} \cdot (a + bC) U \cdot K_1 \cdot K_2 \cdot K_4}{V_{л} \cdot \phi}. \quad (2.13)$$

					КРМ.133ГМмд_24.11.000 ПЗ	Аркуш
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		56

Тиск притискання (P на рисунку 2.6) має регулюватися за величиною струму між контактними поверхнями. Для стабільного протікання процесу електроерозійної обробки необхідно мати середню щільність струму (j) не менше $0,01 \text{ А/мм}^2$. При площі контактних поверхонь F_k контрольний параметр (струм I) становить:

$$I = j \cdot F_k. \quad (2.14)$$

Для електроерозійної і електрохімічної складової комбінованого процесу на першому етапі доведення полярність однакова. Тут анодний вплив спрямований головним чином на зниження глибини лунки (отже, для зменшення висоти мікронерівностей), як це показано на рисунку 2.6, б. За рахунок регулювання тиску притискання і швидкості взаємного переміщення контактних поверхонь анодне розчинення виступів можна виконувати при напрузі низьковольтного джерела 8 (рисунку 2.6) 3-4 В, що раніше вважалося нездійсненним внаслідок великих омичних опорів в міжелектродному зазорі при проходженні струму через оксидну плівку. Пропонований комбінований процес з низькою напругою дозволяє усунути появу коротких замикань і значно спрощує конструкції установок для прецизійного доведення контактних пристроїв.

Остаточний етап доведення здійснюють анодним розчиненням на змінному струмі з напругою 3-4 В від джерела 8 (рисунку 2.6). Розміри частинок продуктів обробки при доводочних режимах не перевищують 100-1000 нм, а їх об'єм в 150-200 разів більше обсягу знятого металу.

Якщо прийняти об'єм продуктів обробки (гідроокислів, газів і парів рідини) в просторі між лунками при їхньому протистоянні як $2 \cdot V_d$, то перед остаточним етапом доведення об'єм V_m , що знімається з контактної поверхні поблизу лунки металу не може перевищувати

$$V_m = \frac{2V_d}{\varphi_1}, \quad (2.15)$$

					КРМ.133ГМмд_24.11.000 ПЗ	Аркуш
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		57

де φ_1 – відношення об'ємів продуктів обробки в лунці до об'єму металу, що знімається поблизу лунки ($\varphi_1 = 150-200$).

У міру вирівнювання мікроповерхні (рисунок 2.7, б) об'єми лунок, будуть знижуватися, а висота нерівностей R_z зменшуватися до 20-30 нм (таблиця 2.1). З (2.15) випливає, що швидкість анодного розчинення в кінці доведення буде вимірюватися нанометрами в одиницю часу, а контрольний параметр – тривалість процесу τ_e – для обох поверхонь, що сполучаються складе

$$\tau_e = \frac{\gamma_m \varphi_2 (R_{zH} + \delta_H) [\varphi_2 (R_{zH} + \delta_H) + 2R_{zH}]}{\eta \alpha \chi (U - \Delta U)}, \quad (2.16)$$

где γ_m – щільність оброблюваного матеріалу; φ_2 – коефіцієнт, що враховує швидкість вирівнювання поверхні при нерівномірному припуску. Для остаточного етапу доведення $\varphi_2 = 1,1-1,2$; R_{zH} – висота нерівностей: після першого етапу доведення (за таблицею 2.1 $R_{zH} = 0,8-3,2$ мкм); δ_H – похибка на початку другого етапу доведення (0,1-1,0 мкм за таблицею 2.1); η – вихід за струмом. Для дуже малих зазорів за [5] η на 10-20% нижче, ніж наведено в рекомендаціях [7]; α – електрохімічний еквівалент оброблюваного матеріалу (довідкові відомості, наприклад наведені в [7]); χ – питома провідність робочого середовища. Якщо обробка виконується в промисловій воді, то можна вибрати електропровідність за [7] для концентрації солей близько 1%; U – напруга на електродах. У даному випадку $U = 3-4$ В; ΔU – втрати напруги (в основному, омичні в міжелектродному просторі). За [5], [7] при малих зазорах втрати напруги складають $\Delta U = 1-2,2$ В.

Час протікання остаточного етапу доведення може становити десятки хвилин (рисунок 2.10), в той час як тривалість першого етапу не перевищує 1-2 хвилин.

При доведенні на спряженій деталі більшої площі може утворитися виступ між зоною обробки і неробочий частиною поверхні з величиною до 2-5 мкм, який

					КРМ.133ГМмд_24.11.000 ПЗ	Аркуш
						58
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

можна порівняти з шорсткістю заготовки (3,2 мкм), має плавний перехід (за рахунок розсіювання струму при анодному розчиненні межі зони доведення).

Рисунок 2.10 – Трудомісткість остаточного етапу доведення контактних поверхонь (площа 100 мм²)

Виступ не впливає на працездатність запірної апаратури, але вузькі межі допусків (менше 1 мкм в таблиці 2.1) на остаточному етапі обробки можуть служити бракувальною ознакою виробу. Тому доцільно в технічних умовах на спряжений вузол вказати допустимість місцевої перехідної ділянки з перепадом висот в межах 5-10 мкм.

Висновки до розділу 2

1 Широко застосовані у машинобудуванні електричні методи обробки здатні забезпечити високу якість поверхневого шару, що відповідає вимогам розробників сучасної техніки.

2 Механізм формування локальних нано- та мікропрофілей при електроерозійній, електрохімічній і комбінованій обробках дозволяє оптимізувати технологічні режими. З цією метою для розрахунку гідродинамічних параметрів

					КРМ.133ГМмд_24.11.000 ПЗ	Аркуш
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		59

при ЕХО пропонується використовувати спосіб, що враховує всі фазові складові робочого середовища.

3 Запропоновано використання методу безабразивного доведення поверхонь, що сполучаються, для металевих запірних пристроїв з формуванням контактних ділянок, що мають похибку і шорсткість в межах 20-100 нм, шляхом двоетапної комбінованої обробки.

4 Показано, що на першому етапі без використання абразиву можна ерозійно-хімічним методом отримати мікропрофіль, де геометричні відхилення поверхонь, що сполучаються, близькі до висоти мікронерівностей чистового етапу механічного доведення. Це дозволяє на заключній стадії доведення отримати анодним розчиненням висоту нерівності нанорозміру. Це забезпечить герметичність запірної апаратури, що працює при високих перепадах тисків і з великою витратою робочих середовищ.

5 Розроблено технологічні режими, що враховують локальні знімання матеріалу з припуском на рівні нано- і мікророзмірів, що дозволяє забезпечити необхідну точність поверхонь, що сполучаються, без використання абразивних середовищ. Останні викликають шаржування контактних ділянок в зоні доведення.

					КРМ.133ГМмд_24.11.000 ПЗ	Аркуш
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		60

РОЗДІЛ 3. МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕНЬ

3.1 Об'єкт дослідження

Запірні пристрої можуть мати спряжені елементи різної геометричної форми: плоскі (з паралельними поверхнями і клинові), круглі (циліндричні і конічні), сферичні (кульові) та ін.

Матеріал, застосований в запірних пристроях, може бути на базі заліза та кольорових сплавів, мати робочу частину без зміцнення, з покриттям, наплавленням, хіміко-термічною обробкою.

Ускладнення геометрії і технології виготовлення контактних поверхонь практично не впливає на точність спряження, однак всі відомі способи чистової обробки припускають застосування абразивних середовищ, що не бажано в сучасних запірних пристроях.

Для прискорення експериментальних і дослідно-промислових досліджень в якості об'єкта вибрано типовий (найбільш часто використовується) шиберний пристрій, приведений на рисунку 3.1.

Основні технічні дані і характеристики запірного пристрою:

1. Тип засувки – фланцева з ручним приводом.
2. Прохід умовний, мм (дюйми) – 150 (7 1/16).
3. Запірний пристрій – шибер з ущільненням затвора «метал - метал».
4. Діапазон робочих температур, С – -60...+100.
5. Робоче середовище – нафта, газ, газоконденсат, і їх суміші.
6. Вміст CO₂ за об'ємом, % не більше – 6.
7. Робочий тиск, МПа (кгс / см²) – 21 (210).
8. Тиск випробувань, МПа (кгс / см²):
 - на герметичність – 21 (210);
 - на міцність – 42 (420).
9. Зусилля обертання маховика, кН, не більше – 0,45.

					КРМ.133ГМмд_24.11.000 ПЗ	Аркуш
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		61

Рисунок 3.1 – Запірний пристрій (засувка) для перекриття нафтогазових середовищ: 1 – корпус; 2 – маслянка; 3 – пластина напрямна; 4 – шибер; 5 – кільце; 6 – пружина; 7 – сідло; 8 – шток; 9 – гайка; 10 – кільце; 11 – кришка; 12 – втулки; 13 – заглушка; 14 – пакет ущільнень по штоку; 15 – інжектор; 16 – гайка; 17 – шпилька, 18 – втулки сальника; 19 – кільце; 20 – штифт; 21 – шайба регулювальна; 22 – гвинт; 23 – вказівник; 24 – маховик; 25 – шайба; 26 – болт; 27, 28 – кільця; 29 – корпус підшипника; 30 – опори, 31 – маслянка; 32 – підшипники; 33 – гвинт; 34, 35 – шайба регулювальна; 36 – табличка, 37 – заклепка.

					КРМ.133ГМмд_24.11.000 ПЗ	Аркуш
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		62

10. Габаритні розміри, мм – 1145 x 613 x 604.

11. Середній термін служби, років – 15.

На рисунку 3.2 наведені спряжені деталі запірною пристрою, показаного на рисунку 3.1.

					КРМ.133ГМмд_24.11.000 ПЗ	Аркуш
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		63

Рисунок 3.2 – Спряжені деталі запірною пристрою: а – шиббер; б – сідло

3.2 Обладнання експериментальних та дослідних робіт

Відпрацювання режимів і вивчення процесу обробки поверхонь, що сполучаються проводилися на ручній (рисунок 3.3) та механізованій експериментальній установці (рисунок 3.4), змонтованій на базі вертикально-фрезерного верстата.

					КРМ.133ГМмд_24.11.000 ПЗ	Аркуш
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		64

Шпиндель верстата пустотілий, виготовлений зі сталі 12Х18Н9Т та ізолюваний від станини верстата текстолітовою прокладкою. Електрод-інструмент кріпиться до шпинделя за допомогою штанги і являє собою привід для перетворення обертального руху в планетарний (рисунок 3.5).

Рисунок 3.3 – Установка для випробування опру переміщенню та на ресурс

Рисунок 3.4 – Установка для дослідження комбінованого процесу притирання

					КРМ.133ГМмд_24.11.000 ПЗ	Аркуш
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		65

Рисунок 3.5 – Привід установки для дослідження процесу:

1 – вал; 2 – пластина; 3 – вал-струмопідвід; 4 – пробка; 5 – підшипники;
6 – зразок матеріалу клапана; 7 – струмопідвід; 8,9 – гвинти М3×5 – 4 штуки і
гайки М3 – 4 штуки; 10 – шибер; 11 – ванна з діелектрика за розміром столу
верстата; 12 – шпилька М3 і 3 гайки М3

До другого кінця шпинделя приєднаний шланг, через який подається електроліт в зону обробки. На перепускному клапані змонтований гідравлічний манометр зі шкалою від 0 до 0,35МПа, що показує величину тиску електроліту. Для створення необхідної швидкості потоку електроліту в зоні обробки на даній установці застосовувався насос ПА-180 з максимальною витратою електроліту 180 л/хв, при тиску до 0,08 МПа і відцентровий насос «Кама -3» з витратою 3,5 м³/год і тиску до 0,35МПа. Для підтримки необхідної температури електроліту в баку встановлювався нагрівальний елемент потужністю 1 кВт. Для забезпечення відстою шламу в баку були 3 відділення, сполучені між собою. В якості джерела технічного струму використовувався випрямляч ВУ42 / 70, модернізований для отримання напруг від 0 до 25 вольт, через 1,5 -2 вольти.

					КРМ.133ГМмд_24.11.000 ПЗ	Аркуш
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		66

Для контролю та вимірювання необхідних параметрів процесу застосовувалися такі прилади: вольтметр М-362 зі шкалою 0-30 вольт, амперметр М362 зі шкалою до 20 ампер, самописний амперметр типу Н-340, індикатор з ціною поділки 0,001 мм, ареометри зі шкалою 1,03 - 1,08 і 1,08 - 1,16; ціна ділення 0,001 г/см³, термометри зі шкалою 16-42°С (ціна поділки 0,2°С) і ртутний термометр зі шкалою 16-42°С і ціною поділки 1°С, рН-лічильник типу ЛПУ -01 ціною поділки 0.005 од. рН, секундомір з ціною поділки 0,2 сек, аналітичні ваги типу АДВ - 200 з точністю 0,0001 г.

Мікрорельєф поверхні і глибина штриха замірялися і записувалися за допомогою профілографа-профілометра моделі «201» заводу «Калібр».

Для дослідження процесу доведення сполучених поверхонь була створена установка, привід якої наведено на рисунку 3.5.

Для дослідження обробки з накладенням електричного поля застосовувалося 3 схеми (рисунок 3.6.):

1. Електроерозійне припрацювання спряжених поверхонь (рисунок 3.6, а). Регулювання напруги виконується ЛАТРом, опір мережі – реостатом (R), ємності конденсаторів (С) блоком, схема якого і монтажний блок з перемикачами наведені на рисунку 3.7.

2. Електрохімічна розмірна обробка на постійному струмі. При цьому зазор між електродами підтримується шляхом нанесення на один з електродів покриття (наприклад, скотчу). До електродів може додаватися вібрація з звуковий або ультразвуковою частотою.

Для чистового етапу електрохімічної обробки потрібно стабілізувати параметри процесу з урахуванням їх взаємного впливу на сталість всіх вхідних факторів, як це показано на рисунку 3.8 Величина щільності струму і залежить (рисунок 3.8) від напруги на електродах U і електричного опору на одиницю площі електрода S_1 в міжелектродному зазорі. У свою чергу, електричний опір залежить від величини міжелектродного зазору S і від питомої електропровідності

					КРМ.133ГМмд_24.11.000 ПЗ	Аркуш
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		67

електроліту χ , яка залежить від виду електроліту E , від його концентрації C , температури T і ступеня насичення шламом Π .

Рисунок 3.6 – Схеми чистової обробки: а – електроерозійна обробка короткими імпульсами; б – електрохімічна розмірна обробка нерухомими електродами; в – комбінована електроерозійно-хімічна обробка; ЛАТР – лабораторний автотрансформатор; БЖ – блок живлення струмом необхідної полярності і напруги; В – випрямляч струму; А – амперметр; V – вольтметр; R – реостат; С – ємність конденсаторів; З – робоча зона (електроди, робоча зона, ванна)

Ряд чинників, таких як швидкість подачі інструмента, жорсткість системи, можуть не враховуватися.

Для проведення дослідження процесу побудована структурна модель процесу. Аналіз структурної моделі показує, що в процесі обробки партії деталей може

					КРМ.133ГМмд_24.11.000 ПЗ	Аркуш
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		68

змінюватися напруга на електродах U , температура T , і концентрація C електроліту. Інші параметри змінюються незначно (електрохімічний еквівалент α ,

Рисунок 3.7 – Блок конденсаторів:

а – схема: I - плита з діелектрика; II – куточки алюмінієві (латунь, мідь);
III – Перемикачі; C – конденсатори (неелектроліти) на 100-200 В, 0,2; 0,5; 1;
2; 3; мкФ; б – зовнішній вигляд блоку

					КРМ.133ГМмд_24.11.000 ПЗ	Аркуш
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		69

Рисунок 3.8 – Взаємний вплив факторів при електрохімічній чистовій обробці

площа обробки S , вид оброблюваного металу M_e , вид і хімічний склад електроліту E і його залуження pH) або в робочих межах зміни не роблять помітного впливу на процес (концентрація в електроліті шламу $Ш$). Частина інших параметрів є похідною від вищеперелічених (щільність струму j і його величина J , тиск P , площа живого перетину межелектродного зазору S).

Аналіз структурної моделі показує, що по ряду причин зміна частини чинників не робить істотного впливу на процес.

До них відносять:

					КРМ.133ГМмд_24.11.000 ПЗ	Аркуш
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		70

1. Площа обробки \bar{S}_1 , хімічний склад оброблюваного матеріалу і електроліту, які в межах партії деталей залишаються майже незмінними.

2. Ступінь залуження електроліту рН і концентрація шламу в електроліті Ш, які в межах партії змінюються.

Щільність струму j і питома електропровідність χ електроліту, зміна яких може бути врахована в розрахунках через інші фактори. Таким чином, у разі чистової обробки основними факторами, що впливають на технологічні показники процесу, є:

- величина початкового межелектродного зазору S_0 ;
- напруга на електродах U ;
- час обробки τ ;
- швидкість і витрата електроліту W .

Той факт, що одні й ті ж фактори впливають на ряд параметрів, що підлягають дослідженню, призводить до висновку, що найкращою методикою дослідження основних технологічних залежностей є метод активного планування багатofакторного експерименту. Ця методика дозволяє при найменших витратах матеріальних ресурсів і часу розкрити характер залежності кожного досліджуваного параметра від режимів обробки, побудувати математичну модель процесу та визначити оптимальні режими обробки.

3. Комбінована обробка з накладанням імпульсів і постійного струму (рисунок 3.6, в). Відомо [7], що при науково обґрунтованому поєднанні електроерозійного процесу і електрохімічної розмірної обробки вдається досягти нових технологічних показників, які можуть бути використані для чистової обробки.

3.3 Методика проведення багатofакторного експерименту

Дослідження впливу перерахованих режимів обробки на основні технологічні показники проводилося за методикою активного планування багатofакторного

					КРМ.133ГМмд_24.11.000 ПЗ	Аркуш
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		71

експерименту.

Метою дослідження є отримання математичної моделі процесу.

В процесі обробки експериментальних даних визначалися значення основних технологічних показників процесу (рисунок 3.8) залежно від комбінації значень основних нестабілізованих параметрів процесу у всьому діапазоні зміни.

Для S_0

$$U_0 = \Delta U_0 + \frac{j_{\text{пр}} S_0}{\chi_0};$$
$$\chi = f(s); \quad (3.1)$$
$$s = f(\tau).$$

Тут $\Delta \bar{U}$ – зміна напруги за період обробки (U_k – кінець обробки, U_0 – початок).

Таким чином, в кінці обробки

$$U_k = \Delta U_k + \frac{j_{\text{пр}} S_k}{\chi_k};$$
$$S_k = S_0 + \bar{h}; \quad (3.2)$$

де S_k – кінцевий міжелектродний проміжок;

\bar{h} – припуск.

З огляду на, що $\Delta U_0 = 1,5$ В, $\Delta U_k = 2,8$ В, початкова напруга має бути не менше 4,3 В, а кінцева для глибини обробки 0,44 мм до 16 В.

Однак тут з'являється обмеження: при зазорі менше 0,1 мм напруга більше 12 В може викликати пробої і порушення якості поверхні. Воно відповідає

					КРМ.133ГМмд_24.11.000 ПЗ	Аркуш
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		72

$\Delta \bar{U} \approx 9 \text{ В}$. Таким чином діапазон напруг для чистової обробки повинен змінюватися $4,5 \leq U \leq 9 \text{ В}$.

Для оптимізації режимів доцільно безперервно підвищувати напругу в процесі обробки, проте не перевищувати верхньої межі.

3.4 Вибір робочих середовищ та гідродинамічних режимів

Головною умовою оцінки якості при притиранні є збереження меж зони обробки, що аналогічно отриманню штриха при електрохімічному маркуванні [6].

У роботі [6] показано, що якби вдалося направити потік уздовж оброблюваної поверхні, то з'явилася б можливість отримувати точне знімання з глибиною менше 2,0 мм, що в даний час недосяжно.

При цьому відпадала необхідність розрахунку швидкості подачі робочого середовища, так як зміна цього параметра слабо впливає на «розширення», а поняття – «вхід-вихід» потоку втрачає сенс.

3.5 Порядок проведення експериментів

Експеримент планується проводити в наступній послідовності:

1. Перевірити шорсткість спряжених поверхонь зразків в зоні притирання. Виміряти точність профілю поверхні.
2. Зробити шліфи і зробити фото з металографії (якщо це можливо).
3. Перевірити твердість (мікротвердість) в місці притирання.
4. Записати марку матеріалів і результати перевірки в протокол.
5. Встановити деталі на експериментальній установці, підключити джерела постійного струму. Встановити пряму полярність.
6. Залити ванну промисловою водою.
7. Встановити режими (схема на рисунку 3.6, а): $C = 0,5 \text{ мкФ}$, $U = 50 \text{ В}$ (за допомогою ЛАТР), обертання – мінімальне (величину записати). Час обробки 1

					КРМ.133ГМмд_24.11.000 ПЗ	Аркуш
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		73

година (при необхідності збільшувати). Тиск – мінімальний до появи металевого контакту. Далі змінюємо режими обробки наступним чином:

- збільшуємо $C = 1 \text{ мкФ}, 1,5 \text{ мкФ}, 2 \text{ мкФ}$;
- збільшуємо обертання до 30-40 об / хв;
- збільшуємо тиск.

Контроль режимів виконувати через кожні 10 хвилин.

8. Виміряти шорсткість і ступінь спряження поверхонь для кожного режиму.

Зробити шліфи.

9. Відключити ємності конденсаторів.

10. Включити режим електрохімічної розмірної обробки (рисунок 3.6, б) на змінному струмі, $U = 2-3 \text{ В}$. Призначати оберти, встановлені в п.7.

11. Перевірити шорсткість і похибку профілю спряжених поверхонь через 1; 2; 3 години роботи.

12. Включити режим постійного струму.

13. Змінювати тиск від мінімуму до граничного значення. Записувати величину струму.

14. Вимірювати силу струму протягом часу обробки через 10 хвилин.

15. Виміряти шорсткість і похибку.

16. Проаналізувати результати експериментів.

Висновки до розділу 3

1 Обґрунтовано об'єкт досліджень, що дозволило знизити кількість і вартість технологічного оснащення і скоротити терміни проведення експериментальних досліджень.

2 Наведено зразки створеного експериментального обладнання для підтвердження положень теоретичних досліджень і розробки комбінованої прецизійної обробки спряжених поверхонь.

3 Визначена методика проведення багатofакторного експерименту.

					КРМ.133ГМмд_24.11.000 ПЗ	Аркуш
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		74

4 Здійснено вибір робочих середовищ та гідродинамічних режимів.

5 Розроблено порядок проведення експериментів.

					КРМ.133ГМмд_24.11.000 ПЗ	Аркуш
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		75

РОЗДІЛ 4. РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТІВ

4.1 Особливості формування параметрів процесу безабразивного доведення спряжених поверхонь

У всіх навчальних і наукових публікаціях [5, 7, 9] прийнято, що електрохімічна розмірна обробка протікає при наявності зазору між електродами, а в разі комбінованого електрохімічного процесу механічний вплив відбувається електронейтральним інструментом, найчастіше діелектриком.

В [14] наведено спосіб [15], який здійснюється при безпосередньому контакті металевого електрода-інструменту зі струмопровідною деталлю, де при їх переміщенні забезпечується досить інтенсивне анодне розчинення деталі навіть в разі напруги на електродах менше 4-5 В, що виходить за межі напруг (по [7] від 4-5 до 30 В), які потрібні для електрохімічної обробки (ЕХО).

З [7] відомо, що в разі традиційної ЕХО роль депасиватора виконує потік електроліту, що протікає при швидкості більше 2-3 м / с. Той же потік виносить із зони анодного розчинення продукти обробки, накопичення яких на поверхні електролізера призводить до припинення процесу.

У випадку, наведеному в [15] і технологічних додатках для доведення взаємно контактуючих поверхонь, знімання матеріалу не значне, тому винесення продуктів обробки з міжелектродного зазору відбувається уповільнено, в основному за рахунок дифузійних процесів, що посилюються під дією відносних рухів контактних поверхонь

В [6] розглядається процес електрохімічного маркування, здійснюваний при зазорах менше 25 мкм, що протікає як правило, без прокачування електроліту і без механічної депасивації зони обробки. Тут отримане знімання металу із глибиною до 20-30 мкм. При цьому активна фаза анодного процесу становила 0,2-0,3 секунди.

					КРМ.133ГМмд_24.11.000 ПЗ	Аркуш
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		76

Наведені результати швидкісної зйомки і осцилографування динаміки формоутворення процесу маркування дають підстави вважати, що анодне розчинення малих припусків можливо в діапазоні напруг нижче 4-5 В, що дозволяє виключити або спростити складні системи управління міжелектродним зазором в разі чистової і оздоблювальної обробки контактних поверхонь, де знімання металу дуже мале. Наведене обґрунтування служить науковою базою для розробки нового способу комбінованої чистової обробки, що відповідає назві «контактно-механічний метод», що істотно відрізняється від традиційної електрохімічної розмірної обробки і розширює технологічні можливості наукомістких виробництв в машинобудуванні.

Відомі два випадки обробки спряжених поверхонь:

- якщо необхідно за еталонною деталлю отримати її точне відображення. Прикладом може служити відновлення евольвентного профілю зубчастого колеса меншого діаметру [15], що розглянуто в [5]. Тут знімання припуску відбувається на аноді при постійному струмі;

- у разі необхідності отримання точного сполучення контактних поверхонь, де потрібне видалення виступів з обох деталей, застосовується локальне розчинення на змінному струмі.

Для обох випадків мінімальна напруга, необхідна для проходження струму в зоні контакту становить не менше 2 В, що підтверджує наявність поверхневих плівок в місцях торкання суміжних ділянок. Окисні плівки, що утворюються при ЕХО, мають товщину в сотні ангстрем (10^{-10}) і при цьому створюють опір проходженню струму до 10 Ом. Розрахунки показують, що на ділянках спряження падіння електричної напруги близько до 2 вольт. Тоді одним з режимних параметрів буде зміна товщини плівки під дією сили взаємного притискання оброблюваних деталей, яка зростає в міру потоншення плівки при стисканні.

На рисунку 4.1 показаний механізм вирівнювання поверхонь при контактно-електрохімічній обробці. На будь-якій з деталей, що сполучаються (рисунок 4.1, а) можуть бути виступи і западини, які, як правило, розташовані за стохастичними

					КРМ.133ГМмд_24.11.000 ПЗ	Аркуш
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		77

законам, але при певних поєднаннях положення в спряженні можуть створити порожнини, що викликають витікання рідких або газоподібних середовищ.

Рисунок 4.1 – Механізм вирівнювання поверхонь:

1, 2 – спряжені деталі; 3 робоче середовище (електроліт); 4, 5 – окисна плівка на деталях; 6 – напрям відносного переміщення спряжених деталей;
7 – сила стиснення деталей; S – найбільший міжелектродний зазор в районі контакту спряжених деталей

Це неприпустимо в запірних системах, зокрема, трубопроводах (особливо при високому тиску). У процесі доведення спряжених поверхонь струм від зовнішнього низьковольтного (3-5 В) джерела проходить через виступи однієї з

					КРМ.133ГМмд_24.11.000 ПЗ	Аркуш
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		78

деталей і електроліт (3 на рисунку 4.1), утворюючи електролізер. Опір в місцях контакту деталей створює окисна плівка (рисунок 4.1, б), яка при змінному струмі може утворюватися в середовищі електроліту 3 на обох контактних поверхнях. За рахунок натягу плівки її товщина (а отже і опір) змінюється від мінімальної в місцях стиснення деталей (7 на рисунку 4.1, в) до потовщень між точками контактів. Згідно з класичними законами електротехніки найбільший струм, який визначає швидкість анодного розчинення, буде проходити при мінімальному опорі та зазорі між деталями 1, 2 (рисунок 4.1), де плівка найбільш тонка. Це дозволяє забезпечити на виступах з боку анода найбільш інтенсивне знімання матеріалу. При змінній полярності деталей 1, 2 знімання припуску відбуватиметься з обох контактних поверхонь, що дає можливість вирівняти профіль і отримати герметичність з'єднання. Сила 7 стиснення деталей при переміщенні деталі 1 відносно 2 не чинить особливого впливу на товщину плівки, тому її основним призначенням при протіканні анодного процесу є забезпечити притискання деталей до плівки. Після анодного розчинення виступів на спряжених деталях процес можна закінчити. Показником закінчення періоду обробки може бути стабілізація сили струму, що проходить через спряжені деталі.

4.2 Специфіка вибору та розрахунки режимів обробки спряжених поверхонь

Зазор «S» (рисунок 4.1, б) в процесі доведення спряжених поверхонь знижується за рахунок активного анодного розчинення виступів. Однак слід враховувати, що через цей зазор струм може проходити і там має місце знімання припуску, який почне зростати в міру вирівнювання профілю. Це повинно враховуватися при розрахунку припуску (z) на доведення спряжених деталей. Його величина залежить від допуску на профіль виробу після доведення, тому що ідеального спряження досягти неможливо. Очевидно, що товщина плівок в будь-якому випадку буде на кілька порядків нижче в порівнянні з допуском, тому при

					КРМ.133ГМмд_24.11.000 ПЗ	Аркуш
						79
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

розрахунку часу обробки повинен враховуватися тільки зазор «S» (рисунок 4.1, б). Приймаємо, що величина «S» характеризує найбільшу нерівність на поверхні спряжених деталей.

При переміщенні деталей в напрямку б (рисунок 4.1, а) величина міжелектродних зазорів буде змінюватися. Якщо прийняти в розрахунках за середню величину зазор, призначений для обробки (близько 20 мкм), а середнє знімання за час активного маркування (τ_M) (близько 0,2 сек) прийняти рівним глибині знака «h» (близько 20 мкм), то можна встановити час (τ) видалення припуску (z) на сторону. Тоді середня швидкість анодного розчинення (V_a) при малому припуску (в межах 40-50 мкм) складе

$$V_a = \frac{h}{\tau_M}. \quad (4.1)$$

У нашому випадку $V_a \approx 6$ мм / хв. Час видалення виступу може бути оцінено за залежністю:

$$\tau = \frac{z}{V_a}, \quad (4.2)$$

де $z = S + \Delta S(\tau)$. Тут ΔS – приріст зазору за час видалення припуску.

Швидкість відносного переміщення деталей (W) для повного вирівнювання поверхонь становитиме (б на рисунку 4.1)

$$W = \frac{H \cdot V_a}{z}, \quad (4.3)$$

де H – найбільша довжина виступу на деталі, що є анодом.

					КРМ.133ГМмд_24.11.000 ПЗ	Аркуш
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		80

Якщо висота нерівностей однієї зі спряжених деталей укладається в поле допуску на геометрію контактної поверхні, то процес можна виконувати на постійному струмі, де анодом є деталь з більшою величиною нерівностей.

У разі, коли спряжені деталі вимагають видалення припуску, співвідношення часу анодного розчинення вибирається пропорційно припуску на обробку кожної деталі.

Для спряжених деталей, використовуваних в запірних пристроях, потрібно забезпечити малу висоту нерівностей і високу суцільність матеріалів.

При обробці за час контакту виступу однієї з деталей із спряженою поверхнею вихідні нерівності знижуються. Для спряжених деталей вирівнювання мікронерівностей відбувається інтенсивніше на початку процесу доведення (рисунок 4.2).

Рисунок 4.2 – Вирівнювання мікроповерхні:

1 – при ЕХО; 2 – при контактно-електрохімічній обробці

					КРМ.133ГМмд_24.11.000 ПЗ	Аркуш
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		81

З рисунка 4.2 видно, що для сталевих деталей при анодному розчиненні висота нерівностей (R_z) знижується, і в разі ЕХО через 0,4-0,5 секунди досягає величини $R_a = 1,2-1,5$ мкм, що може виявитися недостатнім для доведення поверхонь, що сполучаються. Механічна депасивація дозволяє отримати $R_a = 0,08-0,16$ мкм протягом декількох секунд анодного розчинення, якщо вихідна висота нерівності не перевищує $R_z = 10$ мкм.

Крім того, на герметичність може впливати глибина розтравлювання матеріалів, яка найбільш значна для сплавів з великим зерном (наприклад, жароміцних). Тут поглиблення можуть перевищувати 10-12 мкм. Це явище докладно вивчено в [7], де показано, що поглиблення і мікротріщини викликають втрату герметичності з'єднань і як вихід пропонується силовий вплив на поверхню з метою створення стискаючих напружень, що усувають поверхневі дефекти.

При розглянутому способі обробки можна вважати перспективним збільшення тиску (7 на рисунку 4.1) з метою створення стискаючих зусиль в поверхневому шарі контактних поверхонь. Реалізація такого прийому залежить від структури оброблюваного матеріалу, властивостей оксидної плівки, режимів комбінованого процесу.

Шорсткість, а отже і глибина розтравлення, залежать від швидкості анодного розчинення. Якість поверхневого шару підвищується в міру підвищення щільності струму, яка в місцях контакту при даному процесі може на кілька порядків перевищувати безконтактний метод ЕХО.

Дослідження сталевих зразків, оброблених контактено-електрохімічним методом показали, що комбінований процес дозволяє досягти дзеркального блиску спряжених деталей, що вважалося неможливим або надмірно трудомістким для традиційних методів обробки.

Управління процесом спряження, як правило, виконується за часом обробки.

При використанні електрохімічної обробки (як правило, на низьковольтному струмі) знімання металу відбувається нерівномірно. Якщо цією операцією виконується чистове доведення, то знімання може становити міліграми

					КРМ.133ГМмд_24.11.000 ПЗ	Аркуш
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		82

(рисунок 4.3) та інтенсифікація процесу за рахунок механічної депасивації не дає суттєвих результатів. Але такий процес помітно покращує мікроповерхню, тому його застосування необхідно при проведенні операції чистового та остаточного доведення.

Рисунок 4.3 – Швидкість видалення припуску з анода ($U = 6 \text{ В}$, $S = 0,06 \text{ мм}$, $V_e = 1 \text{ м/с}$) 1 – без механічної депасивації; 2 – з механічною депасивацією

Нелінійність кривих на рисунку 4.3 обумовлена нерівномірністю течії робочого середовища (для сталі на рисунку 4.2 – 15% водний розчин хлористого натрію) і забрудненням рідини продуктами обробки. Збільшення швидкості течії середовища до 3 м/с практично вирівнює криві на рисунку 4.3, хоча і дає незначне збільшення (близько 5%) знімання матеріалу, тому в розрахунках вплив цього параметра можна не враховувати.

Застосування комбінованого ерозійно-хімічного процесу (рисунок 4.4) в слабкому електроліті (промислова вода з хлорним залізом) знижує інтенсивність знімання сплаву (в даному випадку твёрдосплавної наплавки) в 2-3 рази, але дає стабільне видалення (соті і тисячні частки міліметра), що показано на рисунку 4.4.

					КРМ.133ГМмд_24.11.000 ПЗ	Аркуш
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		83

На рисунку 4.4 комбінований процес протікає тільки при напрузі не нижче 40В (крива 2), а при низькій напрузі (крива 1) відбувається анодне розчинення за рахунок механічної депасивації і слабого переміщення робочого середовища в міжелектродному зазорі.

Рисунок 4.4 – Знімання матеріалу з анода при комбінованій обробці

1 – $U = 2В$; 2 – $U = 40В$

Електричні імпульси, що виникають при зближенні виступів на спряжених деталях, сприяють прискоренню вирівнювання поверхонь з похибкою до часток мікрона (рисунок 4.5).

Механічна депасивація (рисунок 4.5, 2) прискорює вирівнювання профілю спряжених поверхонь тільки на початку зняття припуску, але використання взаємного переміщення електродів з малим зазором (менше 0,07 мм) дозволяє не ускладнювати конструкцію установки за рахунок створення системи примусового прокачування робочого середовища. Пропонована для електрохімічної розмірної обробки низька (нижче 6 В) напруга (рисунок 4.6) з механічною депасивацією поверхні при зазорі 60 мкм дозволяє забезпечити вирівнювання поверхонь як для сталевих деталей так і напавленої тврдосплавної ділянки.

					КРМ.133ГМмд_24.11.000 ПЗ	Аркуш
						84
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Рисунок 4.5 – Зміна похибки профілю спряжених поверхонь при комбінованій обробці: 1 – без механічної депасивації поверхні; 2 – з механічною депасивацією

Рисунок 4.6 – ЕХО з механічною депасивацією спряжених поверхонь деталей
(матеріал – нержавіюча сталь)

					КРМ.133ГМмд_24.11.000 ПЗ	Аркуш
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		85

На рисунку 4.6 зміна напруги в діапазоні до 6В істотно не змінює знімання матеріалу. При досить активній механічній депасивації після вирівнювання макроегеометрії можна призначати напруги 3-4В, що виключає можливість появи коротких замикань і спрощує конструкцію обладнання.

Для кожного етапу доведення і виду матеріалу деталі слід вибирати різні варіанти обробки (рисунок 4.7).

Рисунок 4.7 – Зміна шорсткості в процесі притирання (нержавіюча сталь):

- 1 – електроерозійна обробка без депасивації поверхні ($U = 80\text{В}$, $C = 0,5\text{мкФ}$);
- 2 – електрохімічна розмірна обробка ($U = 8\text{В}$, $S = 0,1\text{ мм}$, $V_e = 1\text{м/с}$) без механічної депасивації поверхні;
- 3 – електрохімічна розмірна обробка з механічною депасивацією ($U = 4\text{В}$, $S = 0,05\text{ мм}$);
- 4 – комбінована електроерозійна обробка ($U = 45\text{В}$, $C = 0,25\text{мкФ}$)

На рисунку 4.7 зменшення ємності конденсаторів (крива 1) дозволяє знизити шорсткість до $R_z = 1,5\text{-}2\text{ мкм}$, але забезпечити вимоги до чистового доведення не вдається.

					КРМ.133ГМмд_24.11.000 ПЗ	Аркуш
						86
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Комбінована обробка (крива 4) дає можливість поліпшити показники по висоті мікронерівностей. При тривалості впливу поля з переважним застосуванням анодного впливу дозволяє протягом декількох годин вдається отримати $R_z \approx 1$ мкм, що відповідає технічним завданням для запірних пристроїв з твердосплавного наплавленням робочих частин. Тут необхідно використовувати механічну депасивацію шляхом взаємного переміщення електродів з лінійною швидкістю більше 0,5-1 м/с, що дозволяє виключити примусове прокачування робочого середовища.

Тривалий (протягом декількох годин) процес доведення на низьковольтному струмі зі зміною полюсів (3 на рисунку 4.7) знижує висоту нерівностей сталевих спряжених поверхонь до рівня остаточного механічного притирання ($R_z = 0,3 \dots 0,4$ мкм), що забезпечує задані вимоги до запірного вузла.

Зазвичай використовують багатоступеневе чистове безабразивне доведення, де на першому етапі виконують припрацьовування спряжених поверхонь, наприклад, на режимі чистової обробки (1 на рисунку 4.8).

На рисунку 4.8 показана динаміка підвищення площі контакту для різних видів доведення. Вимірювання проводились методом нанесення фарби за аналогією з оцінкою такого ж параметра для зубчастих коліс.

Якщо запірні елементи виконані з різних матеріалів або один з них має зміцнюючу наплавку, то припуск на доведення (а отже час анодного видалення припуску шляхом зміни полярності) призначають обернено пропорційним їх оброблюваності з накладенням електричного поля.

З огляду на різну тривалість доведення з метою отримання необхідного профілю спряжених поверхонь (рисунок 4.8), що характеризує точність обробки, і час, необхідний для досягнення параметрів мікронерівностей чистового доведення (рисунок 4.9), слід в якості параметра цього процесу використовувати період обробки, що забезпечує задану шорсткість спряжених деталей.

					КРМ.133ГМмд_24.11.000 ПЗ	Аркуш
						87
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Рисунок 4.8 – Притирання поверхонь (зі зміною полярності струму):
 1 – електроерозійна обробка з вібрацією електродів (100 Гц) і планетарним переміщенням одного з електродів; 2 – електрохімічна розмірна обробка (без механічної депасивації поверхні); 3 – ЕХО з механічною депасивацією поверхні;
 4– ЕХО+ЕЕО з механічною депасивацією поверхні

4.3 Експлуатаційні характеристики спряжених деталей

В умовах експлуатації деталі запірних пристроїв піддаються статичним ударним мало- і багатоцикловим впливам, інтенсивному зношуванню контактних поверхонь за рахунок стирання, хімічного руйнування.

Для використання запірних пристроїв в магістральних трубопроводах з перекачуванням хімічно активних середовищ необхідно забезпечити на спряжених деталях (як правило з нержавіючих і високолегованих сталей з хіміко-термічним зміцненням) якісний поверхневий шар, який залежить від способу обробки.

Дослідження, проведені в [1], дають досить повну картину формування поверхневого шару при чистовій електроерозійної обробці на фінішних режимах. Тут не порушується якість покриття (на базі твердого сплаву).

					КРМ.133ГМмд_24.11.000 ПЗ	Аркуш
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		88

Досить детальні дослідження проведені в [9] і [16] з вивчення якості поверхневого шару після електрохімічної розмірної (ЕХО) і комбінованої обробки (КО).

На рисунку 4.9 показаний мікрошліф ділянки спряженої деталі з нержавіючої сталі після КО (комбінована обробка) невисокої щільності струму (близько 3 А/см²). Навіть при значному збільшенні на всіх ділянках (площа обробки близько 3000 мм²) не виявлено поверхневих дефектів, що порушують працездатність виробу.

Рисунок 4.9 – Поверхня спряженої деталі (100-кратне збільшення) після електрохімічного доведення без механічної депасивації (матеріал – нержавіюча сталь)

На рисунку 4.10 наведено мікрошліф термopolіпшеної сталі після ЕХО, де проглядаються нерівності (рисунок 4.10, б) в межах допустимої шорсткості для напівчистового доведення (в ряді випадків допускається кресленням деталей).

Однак і тут не виявлено мікроефектів, що істотно впливають на характеристики міцності сплавів. На малюнку 4.10, а не виявлено ділянок шаржування після шліфування, що могло б внести похибки при подальшій ЕХО або КО, тому що застосовувані при шліфуванні абразиви є діелектриками.

					КРМ.133ГМмд_24.11.000 ПЗ	Аркуш
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		89

Рисунок 4.10 – Поверхневий шар термopolіпшеної сталі (500-кратне збільшення):
а – поверхня після шліфування; б – після ЕХО з механічною депасивацією

Дослідження на машині тертя (розділ 3) показали, що усунення шаржування контактних поверхонь може до 1,5 рази підвищити зносостійкість спряжених деталей. Дослідження проводилися на зразках з нержавіючої сталі (1 на рисунку 4.11) і з напавленої контактною поверхнею (2 на рисунку 4.11), де комбінована обробка дозволила отримати значний позитивний результат.

Рисунок 4.11 – Рівень витривалості після доведення деталей на стирання (щодо зразків, що доводяться із застосуванням пасти): 1 – сталь нержавіюча; 2 – сталь з тврдосплавним напавленням; А – доведення без механічної депасивації; Б – із депасивацією

					КРМ.133ГМмд_24.11.000 ПЗ	Аркуш
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		90

Висновки до розділу 4

1 Рекомендовано до використання комбінований метод контактної-електрохімічної обробки спряжених деталей запірної арматури, шліцьових з'єднань, зубчастих передач, клапанів двигунів тощо. Припуск при обробці незначний, властивий операціям доведення з видаленням шару матеріалу, порівнянного з висотою нерівностей. Механічна депасивація в процесі обробки дозволяє знизити перехідні омичні опори з 4-5 до 2-2,5 В. Це дає позитивний результат при обробці з низькими напругами, що усувають короткі замикання.

2 Комбінована обробка дає можливість поліпшити показники по висоті мікронерівностей. При тривалості впливу поля з переважним застосуванням анодного впливу дозволяє протягом декількох годин вдається отримати $R_z \approx 1$ мкм, що відповідає технічним завданням для запірних пристроїв з твердосплавного наплавлення робочих частин. Необхідно використовувати механічну депасивацію шляхом взаємного переміщення електродів з лінійною швидкістю більше 0,5-1 м/с, що дозволяє виключити примусове прокачування робочого середовища. Тривалий (протягом декількох годин) процес доведення на низьковольтному струмі зі зміною полюсів знижує висоту нерівностей сталевих спряжених поверхонь до рівня остаточного механічного притирання ($R_z = 0,3 \dots 0,4$ мкм), що забезпечує задані вимоги до запірного вузла.

3 Дослідження на машині тертя показали, що усунення шаржування контактних поверхонь комбінованою обробкою може до 1,5 рази підвищити зносостійкість спряжених деталей.

					КРМ.133ГМмд_24.11.000 ПЗ	Аркуш
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		91

РОЗДІЛ 5. ПРАКТИЧНА РЕАЛІЗАЦІЯ РОЗРОБОК

5.1 Економічна ефективність впровадження результатів досліджень

Як показано в попередніх матеріалах роботи для операцій доведення необхідно застосовувати безабразивну обробку спряжених поверхонь. Тут істотні переваги мають безконтактні методи із накладенням електричного поля.

У ряді випадків для стадії попередньої обробки можуть використовуватися технологічні процеси шліфування з вільним і зв'язаним абразивом. При цьому виникає шаржування, яке гарантовано усувається на наступних технологічних операціях чистової і остаточної (якщо це потрібно) обробки доведенням.

При проектуванні технологічного процесу доведення (рисунок 5.1) за технічними вимогами до деталі встановлюють величину шорсткості та за нею призначають кінцевий етап доведення, припуск на операцію. Похибка профілю спряжених деталей регламентується мірою дотику поверхонь і, як правило, оцінюється тільки вибірково за результатами контрольних вимірів невеликої вибірки спряжених деталей.

При проектуванні технологічного процесу виготовлення спряжених деталей необхідно призначати режими, рекомендовані в розділі 4 роботи.

У процесі побудови алгоритму (рисунок 5.1) необхідно враховувати серійність випуску спряжених виробів, рівень оснащення виробництва технологічними засобами, кадрами необхідної кваліфікації, досконалість організаційної структури підприємства.

Наведений на рисунку 5.1 процес включає кілька основних етапів:

1 Обґрунтування вибору етапів доведення. В основу цього етапу покладено вимоги з креслення деталей за критерієм необхідної шорсткості. Тут в якості етапу попередньої обробки може бути призначено шліфування, що забезпечує шорсткість $R_a = 0,63 \dots 0,32$ мкм. Це дозволяє скоротити трудомісткість попереднього етапу безабразивного доведення і прискорити отримання спряження

					КРМ.133ГМмд_24.11.000 ПЗ	Аркуш
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		92

деталей. У результаті цього етапу
намічають мінімально необхідну
кількість етапів доведення для
конкретних спряжених деталей.

Рисунок 5.1 – Алгоритм побудови
технологічного процесу безабразивного
доведення деталей: ЕЕО – електро-
ерозійна обробка; ЕХО – електрохімічна
розмірна обробка; КМО – комбіновані
методи обробки

2 Вибір виду обробки обмеженням
вибору її виду служать характеристики
матеріалу деталей. Якщо
використовується діелектрик, то
доведення необхідно здійснювати
методами без накладення електричного
поля. Особливе місце займають спряжені
деталі запірних пристроїв, що мають
покриття, найчастіше наплавлення
зносоустійким матеріалом (наприклад
твердим сплавом). Тут потрібно
застосовувати спеціальні робочі
середовища та чистові режими,
рекомендації про яких наведені в
розділі 4.

3 Оцінка результатів застосування
пропонованої технології доведення і

					КРМ.133ГМмд_24.11.000 ПЗ	Аркуш
						93
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

контроль деталей, на відповідність вимогам креслення.

4 Обґрунтування відповідності одержуваних деталей умовам експлуатації (оцінка працездатності, досягнення заданого ресурсу та ін.).

Економічний ефект від впровадження комбінованої обробки у нашому випадку буде зумовлений зниженням трудомісткості та витрат на виготовлення запірної арматури.

Економічна ефективність використання нової техніки, винаходів та раціоналізаторських пропозицій становить

$$E = (\Delta C + \Delta Ц) \cdot A_2 - (0,15 + A_1) \cdot K, \quad (5.1)$$

де ΔC – зменшення собівартості 1 т продукції після впровадження заходу, грн.;

$\Delta Ц$ – збільшення вартості продукції, грн.;

A_1 – коефіцієнт, що враховує амортизаційні відрахування, $A_1 = 0,1$;

A_2 – кількість продукції, т, $A_2 = 5$ т;

0,15 – нормативний коефіцієнт ефективності капітальних вкладень;

K – капітальні вкладення на впровадження заходів, грн., $K = 100000$ грн.

Економія від зниження собівартості утворюється за рахунок зниженням трудомісткості та витрат на виготовлення вузлів кріплення:

$$\Delta C = 0,1 \cdot 200000 = 20000 \text{ грн. / т,}$$

де 200000 – середня вартість 1 тони продукції, грн.

Ціна продукції збільшиться за рахунок доплат під час комбінованої обробки:

$$\Delta Ц = \Delta Ц', \quad (5.2)$$

					КРМ.133ГМмд_24.11.000 ПЗ	Аркуш
						94
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

де $\Delta Ц'$ – середнє збільшення доплат за рахунок даних заходів, грн./т,
 $\Delta Ц' = 2000$ грн. / т ;

$$\Delta Ц = 2000 \text{ (грн./т)}.$$

Відповідно до формули (5.1) маємо наступне:

$$E = (20000 + 2000) \cdot 5 - (0,15 + 0,1) \cdot 100000 = 85000 \text{ (грн.)}.$$

5.2 Небезпечні фактори на виробництві

Під час виконання робіт на обробних верстатах на робітників можливий вплив шкідливих та (або) небезпечних виробничих факторів, у тому числі:

- рухомих машин та механізмів, рухомих частин технологічного обладнання, виробів, заготовок та матеріалів, що переміщуються;
- підвищеної загазованості повітря робочої зони;
- підвищеної або низької вологості повітря;
- підвищеної або низької температури повітря робочої зони;
- підвищеної температури поверхонь обладнання, матеріалів;
- підвищений рівень шуму на робочому місці;
- підвищений рівень вібрації;
- підвищений рівень ультразвуку;
- підвищений рівень іонізуючих випромінювань у робочій зоні;
- підвищеного рівня електромагнітних випромінювань (ультрафіолетового, інфрачервоного, лазерного, мікрохвильового, радіочастотного);
- підвищеного значення напруження в електричному ланцюзі, замкнення якого може пройти через тіло людини;
- підвищеної напруженості магнітного поля;
- недостатньої освітленості робочої зони;

					КРМ.133ГМмд_24.11.000 ПЗ	Аркуш
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		95

- гострих кромок, заусениць та шорсткості на поверхні заготовок, інструменту та технологічного обладнання;
- падаючих предметів (елементів технологічного обладнання);
- хімічних і токсично небезпечних і шкідливих виробничих факторів, що впливають на шкіряні покриви та слизові оболонки;
- фізичних перевантажень;
- нервово-психічних перевантажень.

5.3 Знешкодження відходів

Термічне знешкодження відходів являє собою попереднє їх подрібнення, а потім спалювання у печах при температурі не нижче 1000°C. Після печей продукти потрапляють до камери додаткового спалювання при температурі 1200...1400°C, де досягається повне окислення продуктів неповного згоряння. Потім гази, що відійшли потрапляють на очищення, а утворений шлак спрямовують на захоронення.

Ці етапи доцільно доповнити: у камері додаткового спалювання газів, що утворилися, необхідно підняти температуру до температури розкладання, а утворені шлаки спрямовувати, залежно від їх хімічного складу, на виробництво будівельних матеріалів, доріг, очисних споруд або на отримання рідкоземельних матеріалів та ін.

Доцільно термічне знешкодження даних відходів суміщати із знешкодженням інших відходів, а також поєднувати їх для отримання нових хімічних з'єднань та речовин, що суттєво підвищить їх ефективність.

Цех фізико-хімічного знешкодження має декілька відділень залежно від виду відходів. Так, у відділенні знешкодження ціаномісткі відходи розчинюють та оброблюють гіпохлоритом зі зменшенням токсичності відходів до 1000 разів. У відділенні обробки гальванічних відходів токсичні метали переводять до менш токсичних або у важкорозчинні з'єднання.

					КРМ.133ГМмд_24.11.000 ПЗ	Аркуш
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		96

У хромомістких гальванічних стоках хром знаходиться у токсичному шестивалентному стані. Його відновлюють розчином сірчаної кислоти та залізним купоросом до трьохвалентного хрому, а потім оброблюють лугами до отримання $\text{Cr}(\text{OH})_3$. Його, як правило, передають на захоронення, а не на отримання цінних продуктів.

Відділення знешкодження ртутних ламп має агрегати та систему очищення газів для стічних вод від ртуті із передачею її у промисловість.

Висновки до розділу 5

1. Економічна ефективність від впровадження результатів наукового дослідження склала 85000 грн. на рік. Економічний ефект зумовлений зниженням трудомісткості та витрат на виготовлення.

2. Визначено небезпечні фактори на виробництві, що мають вплив на робітника.

3. Розглянуто особливості знешкодження відходів.

					КРМ.133ГМмд_24.11.000 ПЗ	Аркуш
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		97

ВИСНОВКИ

Отже, відповідно до отриманого завдання на кваліфікаційну роботу здобувача вищої освіти та за результатами її виконання зроблено наступні висновки.

1 Доведена можливість високоефективної комбінованої обробки спряжених поверхонь при низькій напрузі струму при гарантованому забезпеченні суцільності і інших показниках якості поверхневого шару. Це дає можливість усунути порушення герметичності запірних пристроїв в період експлуатації і забезпечити необхідні межі зусиль для їх швидкого спрацьовування.

2 Розкрито механізм видалення мікро- і макронерівностей при низькій напрузі струму, які вважалися не перспективними. Показано, що адаптивне управління контактним тиском за сигналами від зовнішнього електричного поля, що накладається, дозволяє досягти необхідної інтенсивності знімання припуску при гарантованому забезпеченні суцільності, необхідної висоти нерівностей поверхневого шару спряжених деталей і герметичності запірного пристрою.

3 Встановлено режими комбінованої безабразивної обробки спряжених поверхонь. Для різних матеріалів рекомендується використовувати напругу: в разі електрохімічної обробки 3-6 В, для електроерозії 30-40 В, комбінованого електроерозійного процесу 10-12 В. Контактний тиск між спряженими поверхнями 0,01-0,02 МПа зі збільшенням його значення пропорційний часу виконання операції притирання до 2 разів. Використання для комбінованої обробки в якості робочого середовища рідини з низькою провідністю (зокрема, промислова вода). Регулювання швидкості відносного переміщення спряжених поверхонь від 0,01 до 0,2 м/с (в залежності від стану оброблюваних ділянок деталей).

4 Приділено увагу питанням економічної ефективності, визначено небезпечні фактори на виробництві, що впливають на працюючих, а також приділено увагу захисту довкілля, а саме знешкодженню промислових відходів.

					КРМ.133ГМмд_24.11.000 ПЗ	Аркуш
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		98