

СХІДНОУКРАЇНСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
імені ВОЛОДИМИРА ДАЛЯ

Факультет інженерії

Кафедра Машинознавства та обладнання промислових підприємств

ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА
до магістерської роботи

освітньо-кваліфікаційного рівня *магістр*

спеціальності *131 прикладна механіка*
спеціалізації - *технології машинобудування*

на тему «Удосконалення технології обробки деталей з щілинними каналами за
рахунок комбінованої обробки каналів»

Виконав: студент групи ТМ-17дм

Коломійцев Є.О.
(прізвище, та ініціали)

_____ (підпис)

Керівник Сергієнко О.В.
(прізвище та ініціали)

_____ (підпис)

Завідувач кафедри Архипов О.Г.
(прізвище та ініціали)

_____ (підпис)

Рецензент Шевченко О.В.
(прізвище та ініціали)

_____ (підпис)

РЕФЕРАТ

Магістерська робота за темою «Удосконалення технології обробки деталей з щілинними каналами за рахунок комбінованої обробки каналів»: 111 с., 5 табл., 53 рис., 105 джерел.

МЕТАЛООБРОБКА, ТЕХНОЛОГІЧНИЙ ПРОЦЕС, ЩІЛИННІ КАНАЛИ, КОМБІНОВАНА ОБРОБКА, МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ, АПРОКСИМАЦІЯ, ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ.

Об'єкт дослідження – технологічний процес обробки деталей з щілинними каналами.

Мета магістерської роботи – розробка технології, що забезпечує підвищення експлуатаційних характеристик вузьких щілинних каналів і поєднує в одній операції виборчу комбіновану обробку їх середовищем, що проводить струм та володіє абразивними властивостями, з одночасним параметричним контролем робочого тіла.

Методи дослідження – аналітично-чисельний метод, метод абразивної обробки та анодного розчинення в робочих середовищах з абразивними гранулами, що слабо проводять, методи поверхневого пластичного деформування, методи математичної статистики.

У першому розділі виконано аналіз методів отримання малорозмірних каналів та технології забезпечення експлуатаційних показників деталей з щілинними каналами.

У другому та третьому розділах розроблено методологію технологічного забезпечення якості обробки деталей з щілинними каналами та виконано моделювання процесу їх комбінованої обробки.

У четвертому розділі виконано зіставлення результатів теоретичних розрахунків і експериментальних досліджень та проведено експериментальне дослідження процесу комбінованої обробки щілинних каналів.

У п'ятому розділі розроблено технологію комбінованої обробки щілинних каналів та шляхи її реалізації.

В останньому розділі розглянуто вимоги охорони праці та техніки безпеки при проведенні науково-дослідних робіт процесів механічної обробки деталей.

ЗМІСТ

	С.
СКРОРОЧЕННЯ ТА УМОВНІ ПОЗНАКИ.....	5
ВСТУП.....	6
1 АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЧНИХ МЕТОДІВ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ ПОКАЗНИКІВ ДЕТАЛЕЙ З ЩІЛИННИМИ КАНАЛАМИ.....	8
1.1 Типові деталі з щілинними каналами.....	8
1.2 Особливості експлуатації деталей з малорозмірними проточними щілинними каналами.....	15
1.3 Технологічні труднощі обробки щілинних каналів.....	16
1.4 Методи отримання малорозмірних каналів.....	18
1.4.1 Традиційна лезова обробка.....	18
1.4.2 Технологічне усунення уривчастості процесу обробки...	20
1.4.3 Нетрадиційні методи обробки.....	22
1.4.4 Комбіновані методи.....	27
1.4.5 Формування каналів при отриманні заготовки.....	28
1.4.6 Методи доведення малорозмірних отворів пластичним деформуванням.....	30
1.4.7 Методи доведення малорозмірних каналів за допомогою абразиву.....	37
1.5 Методи контролю експлуатаційних параметрів деталей з каналами.....	40
1.6 Мета та завдання дослідження.....	47
2 МЕТОДОЛОГІЯ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЯКОСТІ ОБРОБКИ ДЕТАЛЕЙ З ЩІЛИННИМИ КАНАЛАМИ.....	49
2.1. Робочі гіпотези.....	49
2.2. Вибір методу технологічного забезпечення експлуатаційних показників деталей з малорозмірних щілинними каналами.....	50
2.3 Аналіз можливих технологічних схем комбінованої обробки щілинних каналів.....	52
2.4 Основні критерії, що визначають якість комбінованої обробки	

деталей з проточними щілинними каналами.....	56
2.5 Лабораторне та експериментальне обладнання.....	58
2.6 Програма виконання роботи.....	64
3 МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ КОМБІНОВАНОЇ ОБРОБКИ.....	65
3.1 Механізм процесу комбінованої обробки каналів.....	65
3.2 Моделювання процесу комбінованої обробки каналів.....	67
4 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ КОМБІНОВАНОЇ ОБРОБКИ.....	76
4.1 Вимоги до параметричних випробувань деталей з щілинними каналами.....	76
4.2 Засоби технологічного оснащення для випробувань.....	77
4.3 Експериментальна перевірка розрахункових режимів обробки	79
5 РОЗРОБКА ТЕХНОЛОГІЇ КОМБІНОВАНОЇ ОБРОБКИ ЩІЛИННИХ КАНАЛІВ ТА ШЛЯХИ ЇХ РЕАЛІЗАЦІЇ.....	84
5.1 Основні завдання проектування технології комбінованої обробки.....	84
5.2 Основні етапи проектування технологічного процесу комбінованої обробки малорозмірних проточних каналів.....	85
5.3 Вибір параметрів абразиву.....	86
5.4 Розробка рекомендацій по створенню дослідного устаткування і проектування серійних верстатів.....	90
5.5 Розширення області використання розробленої технології у машинобудуванні.....	91
6 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА ТЕХНІКА БЕЗПЕКИ ПРИ ПРОВЕДЕННІ НАУКОВО-ДОСЛІДНИХ РОБІТ.....	92
6.1 Загальні заходи щодо безпеки життєдіяльності.....	92
6.2 Заходи безпеки при проведенні технологічних процесів термообробки металів.....	96
ВИСНОВКИ.....	98
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ.....	100

СКОРОЧЕННЯ ТА УМОВНІ ПОЗНАКИ

HB – твердість за Бринелем

HV – твердість за Вікерсом

HRC – твердість за Роквелом

РРД – рідинний ракетний двигун

ЕХО – електрохімічна обробка

k – постійна Больцмана, Дж/К

n_T - запас пластичної міцності інструменту

n – кількість дослідів

T – температура, К

δ – відносна деформація зразка, %

σ_s - напруга плинності, МПа

σ_b – границя міцності, МПа

σ_t – границя текучості, МПа

$\sigma_{0,2}$ – умовна границя текучості, МПа

σ_{-1} – границя втоми, МПа

ψ – відносне звуження, %

μ - коефіцієнт Пуасона

ВСТУП

Деталі з малорозмірними проточними щілинними каналами в складі високонапірних систем охолодження широко використовуються в агрегатах подачі робочих середовищ енергетичних установок і двигунів. Для отримання мінімального опору при переміщенні робочого тіла до проточної частини пред'являються підвищені вимоги по чистоті обробки і працездатності поверхонь в умовах термодинамічних навантажень і агресивних середовищ. Дрібнорозмірні канали в даний час отримують в цільних заготовках різним і методами: традиційної лезовою обробкою, прошиванням на електроерозійних, електрохімічних верстатах і електронним променем, а також з використанням комбінацій з різних способів формоутворення. Основна проблема полягає в тому, що щілинні канали висотою менше 2 міліметра не дозволяють досить ефективно використовувати традиційні засоби металообробки і контролю показників якості поверхні, а також її геометрії при профілювання в процесі виготовлення таких деталей. В даний час контроль забезпечення заданих експлуатаційних показників проводиться після остаточного виготовлення деталей при параметричних випробуваннях на спеціальних проливочних стендах (в складі агрегату або окремо), з подальшим індивідуальним доопрацюванням з перегородками, що є дуже трудомісткою дорогою операцією. Для деталей з численними закритими каналами це стає рівноцінним процесу їх нового виготовлення, що економічно недоцільно.

Для підвищення експлуатаційних показників перспективних виробів найбільш успішним виявився метод комбінованої обробки з накладенням електричного поля. Подібні дослідження для відкритих поверхонь, в тому числі для широких каналів, системно проводять в Харкові, Запоріжжі, Львові. Вони виявилися дуже результативними, забезпечуючи, в випадках повністю проточних поверхонь, зниження величин шорсткості до розрахункових. Однак при малих перетинах протяжних і закритих щілинних каналів дослідникам не вдавалося отримати стабільного мікропрофілю поверхні, що знижувало експлуатаційну надійність і ускладнювало створення перспективних

енергоустановок і двигунів. Це і є науковою проблемою, розв'язуваною в роботі, в результаті чого створюються теоретичні та методичні основи спрямованого використання комбінованої обробки, що забезпечує виборче вирівнювання мікропрофілю поверхні в умовах обмеженого щільного простору і гарантують отримання експлуатаційних характеристик виробу без доопрацювання в вузлі. Технологічне забезпечення необхідних параметрів створюється за рахунок поєднання в одному процесі операцій доведення і параметричного контролю.

1 АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЧНИХ МЕТОДІВ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ ПОКАЗНИКІВ ДЕТАЛЕЙ З ЩІЛИННИМИ КАНАЛАМИ

1.1 Типові деталі з щілинними каналами

До типових деталей з щілинними каналами відносяться кільця завіси, орєбрєні оболонки (рис. 1.1 і 1.3), щілинні форсунки, плунжєри, золотники.

Класифікація деталей з проточними каналами представлена на рис. 1.2.

Кільця завіси (пояс завіси) камери рідинних ракетних двигунів (РРД) - елемент камери (газогенєратора) ЖРД- призначений для введення одного з компонентів палива або продуктів газогенєрації (одного з компонентів палива) в пристєночну область вогневого простору для створєння захисного шару рідини або газу [19].



Рисунок 1.1 - Деталь системи охолодження камери згоряння

Камера згоряння РРД потребує охолодження. У зв'язку з цим розрізняють два способи охолодження: зовнішнє (стінки камери згоряння охолоджуються зовні) і внутрішнє (охолоджувач вводиться у внутрішню порожнину камери згоряння, створюючи при цьому пристінковий шар газу зі зниженою температурою).

Для створєння такого шару використовуються так звані кільця завіси, що представляють собою ряди дрібних каналів у внутрішній стінці камери, через які вводиться охолоджуючий газ [33].

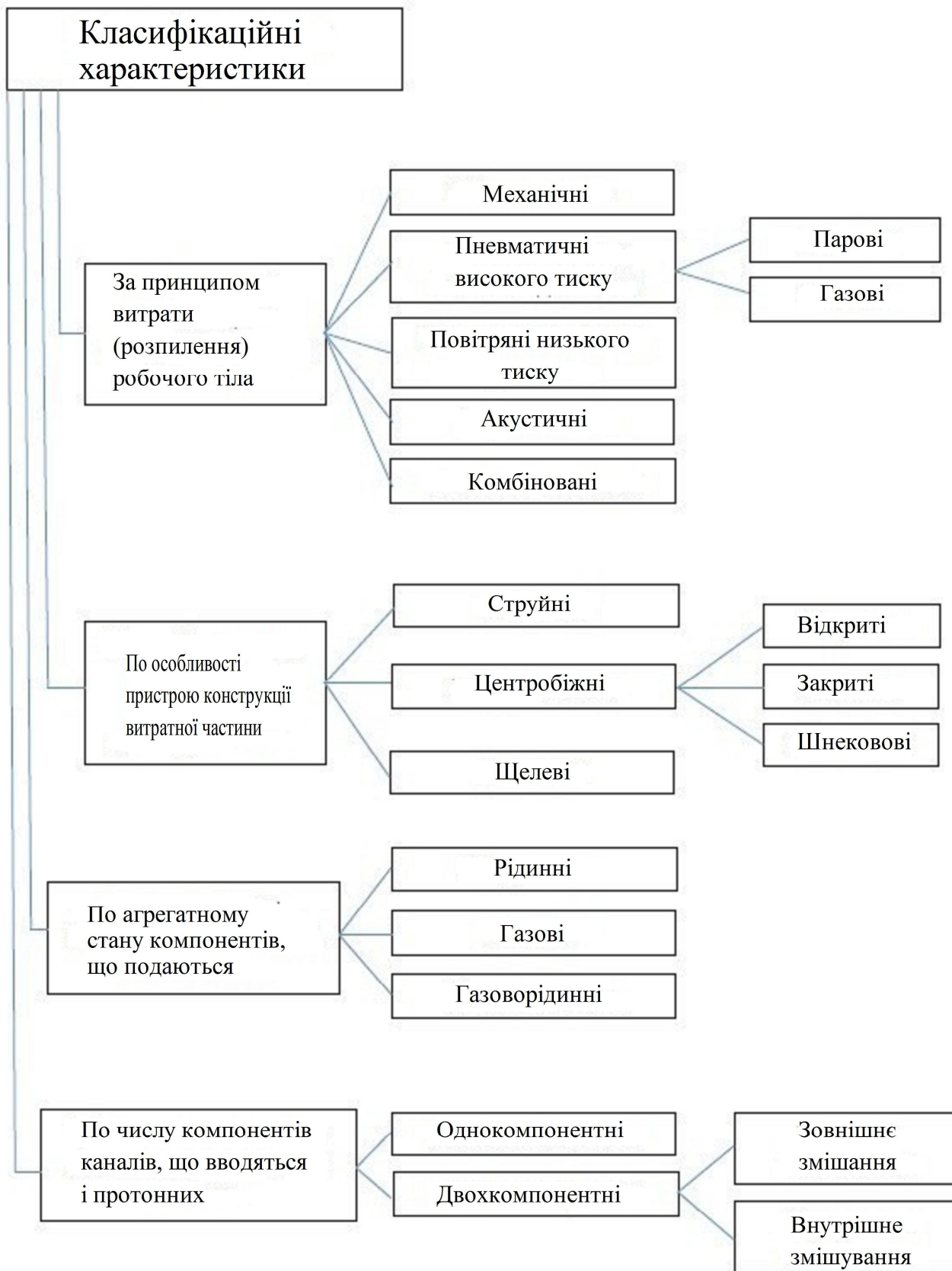


Рисунок 1.2 - Класифікація деталей з проточними каналами

На рисунку 1.4 представлені тривимірні комп'ютерні моделі типових кілець завіси.

Золотник - це пристрій, що спрямовує потік рідини або газу шляхом зміщення рухомої частини щодо вікон в поверхні, по якій він ковзає. Золотники застосовують в пневматичних і гідравлічних системах, двигунах, парових турбінах і ін.



Рисунок 1.3 - Фрагмент охолоджувальної оболонки з тангенціальними каналами оболонки

Форсунка є технологічно складним елементом з каналами все можливих профілів і переривчастими поверхнями малих розмірів. Форсунка - це пристрій, призначений для подачі (вприскування) до камери згоряння двигуна або газогенератора компонентів палива, їх розпилення, перемішування і початкового розподілу по об'єму камери згоряння.

Форсунки класифікують за такими ознаками [21]:

1. За особливостями будови і конструкції:
 - струменеві;
 - відцентрові;
 - щілинні.
2. По агрегатному стану подаються компоненти палива:
 - рідинні;
 - газові;
 - газорідинні.
3. За кількістю компонентів, що вводяться в камеру згоряння однієї форсункою:
 - однокомпонентні;
 - двокомпонентні.



а)

б)

Рисунок 1.4 - 3D моделі типових кілець завіси:

а) з тангенціальними отворами; б) з щілинними каналами

У відцентрової форсунки з тангенціальними отворами (рис. 1.5) паливо, що подається під значним тиском, закручується в каналах або в спеціальній вихровий камері, звідки через звужене сопло подається в обсяг, заповненим газом. Форсунки такого типу виготовляються, в основному, на тиск від 0,6 до 6 МПа в залежності від заданої продуктивності і від необхідної дальності струменя.



Рисинок 1.5 - Зовнішній вигляд відцентрової форсунки

Відцентрові форсунки діляться на закриті, відкриті і шнекові (рисунок 1.6). У шнекових форсунках паливо закручується завдяки шнеку, тому немає потреби в тангенціальних отворах.

У струменевих форсунках паливо, як правило, подається під значно більшим тиском, ніж в форсунках відцентрового типу. Іноді воно навіть перевищує 100 МПа. Такі форсунки застосовуються, головним чином, в двигунах внутрішнього згоряння [11].

Щілинні форсунки (рис. 1.8) застосовують в поршневих двигунах внутрішнього згоряння. Внаслідок високого тиску подачі рідкого палива і малого куту факела їх рідко використовують в газотурбінних і реактивних двигунах, в яких іноді встановлюють форсунки з зіштовхуючими струменями; ці форсунки також використовують в протипожежних пристроях [63]. Щілинні форсунки мають різні конструктивні виконання (рис. 1.8) [2].

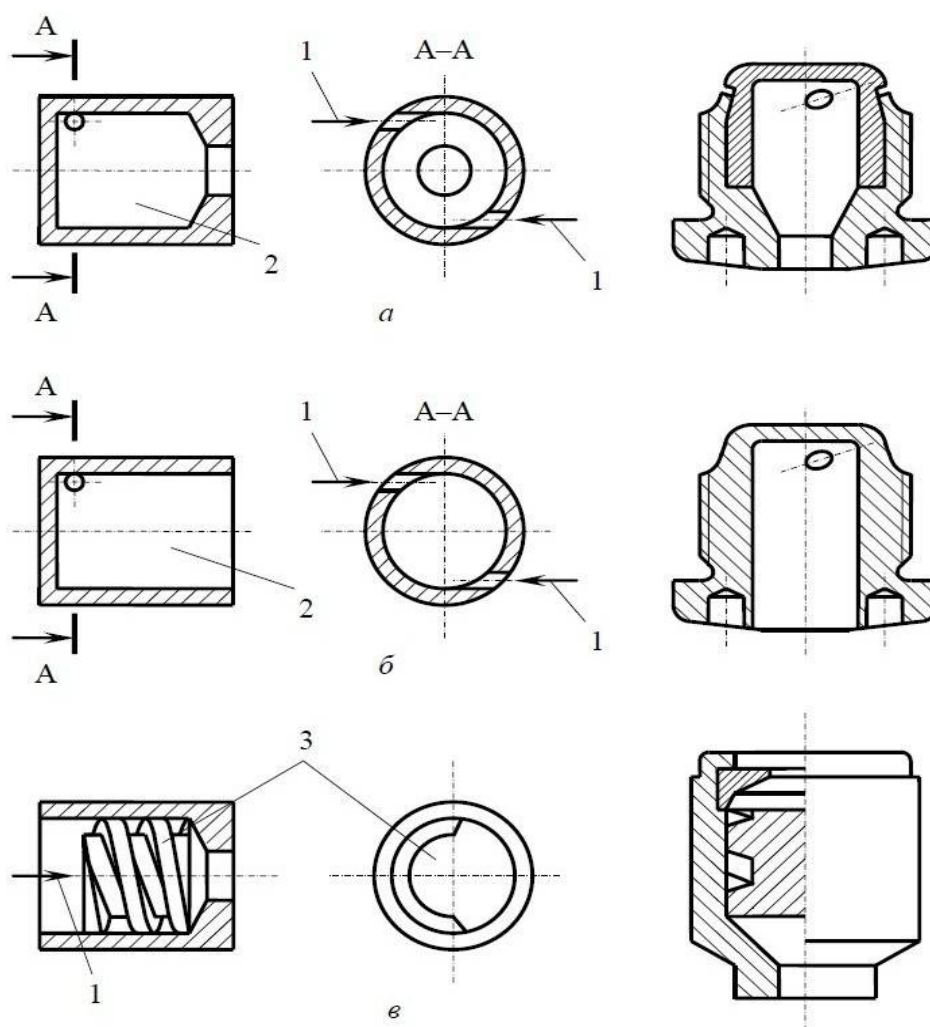


Рисунок 1.6 - Схеми і конструктивне виконання відцентрових форсунок:

а - тангенціальна закрита; б - тангенціальна відкрита; в - шнекова;

1 - подача робочого тіла (рідини або газу), 2 - камера закручування; 3 – шнек



Рисунок 1.7 - Зовнішній вигляд деталі з щілинним каналом

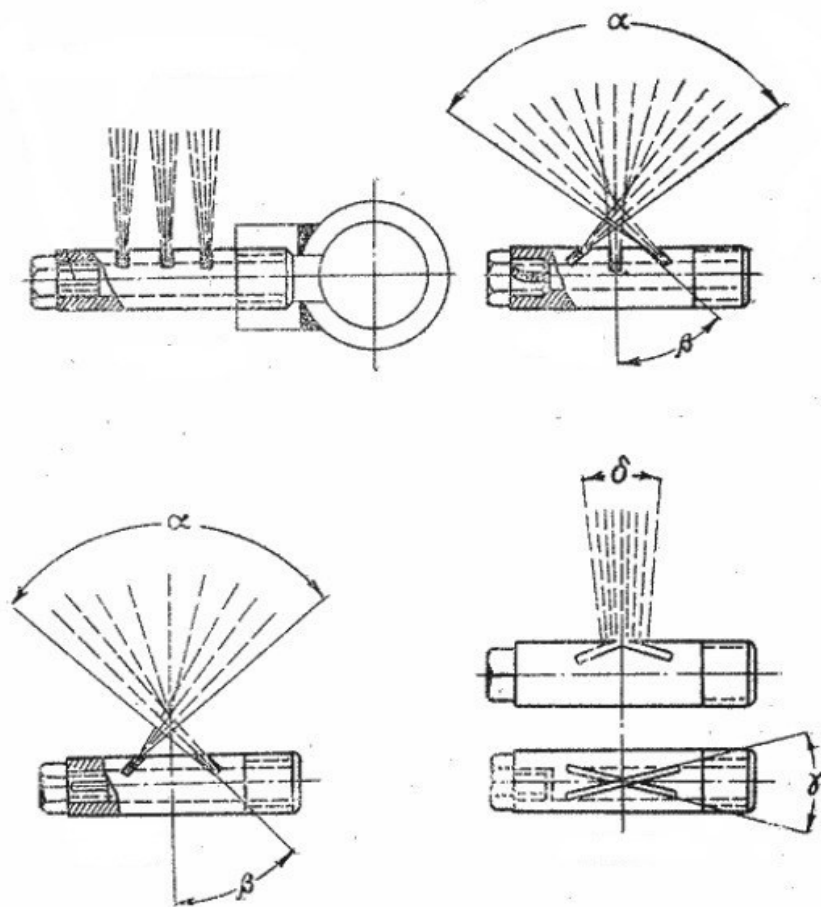


Рисунок 1.8 - Типи щілинних форсунок

У двокомпонентних форсунках паливе і окислювача змішуються між собою в соплі форсунки або в її спеціальній камері змішання і поступають в камеру згоряння у вигляді емульсії [62].

Двокомпонентні форсунки, в свою чергу, поділяють на форсунки із зовнішнім і з внутрішнім змішуванням (рис. 1.9 і рис. 1.10) [21].

Практично все різноманіття форсунок, що застосовуються в ракетних двигун, являє собою різні комбінації двох основних їх типів: струменевих і відцентрових.

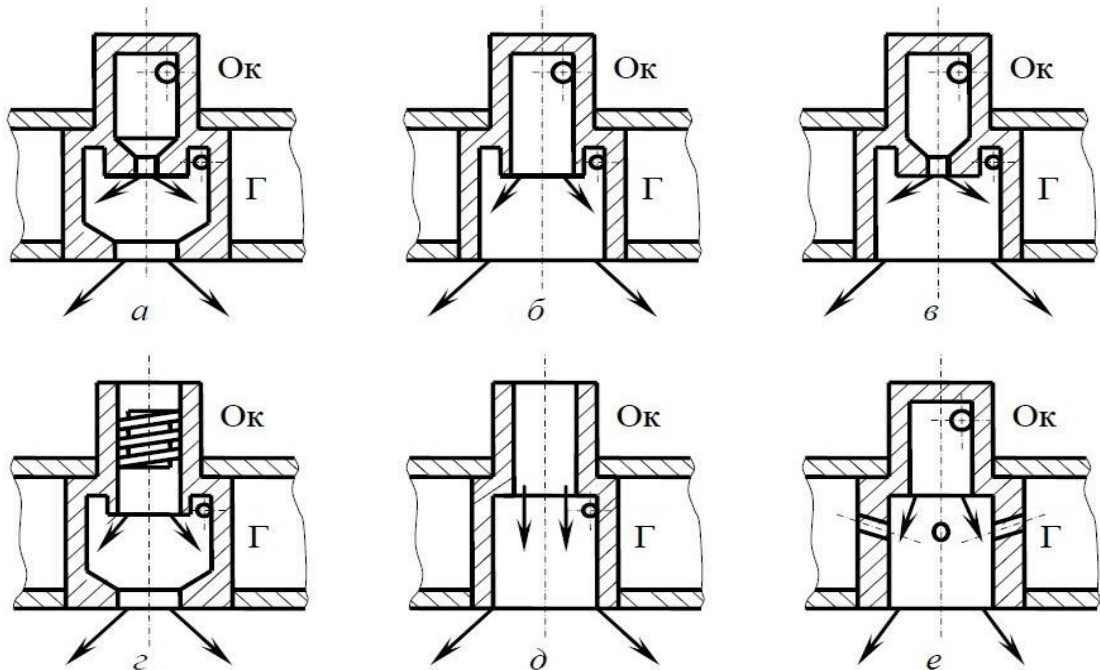


Рисунок 1.9 - Схеми двокомпонентних форсунок з внутрішнім зміщенням:

- а - відцентрово-відцентрова закрита;
 б - відцентрово-відцентрова відкрита; в - відцентрово-відцентрова закрито-відкрита; г - відцентрово-відцентрова відкрито-закрита;
 д - струменеві-відцентрова відкрита; е - відцентрово-струменевий відкритий

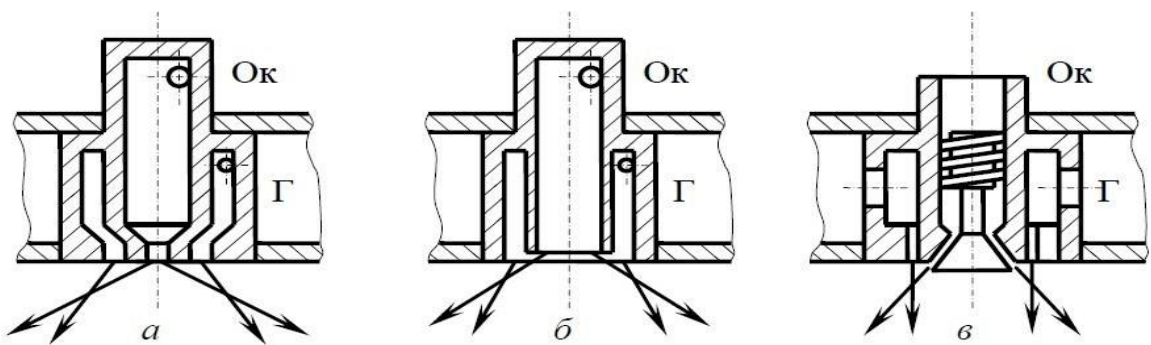


Рисунок 1.10 - Схеми двокомпонентних форсунок із зовнішнім змішуванням:

- а - відцентрово-відцентрова закрита; б - відцентрово-відцентрова відкрита;
 в - відцентрово-щілинна

Стосовно до форсунок конструктивно-технологічні проблеми досить опрацьовані і частина з них вирішена. Кільцям завіси, особливо з щілинними каналами, в даний час не приділяється належної уваги, по-цьому їх доведення проводиться в основному екстенсивним шляхом з проведенням багаторазових випробувань.

1.2 Особливості експлуатації деталей з малорозмірних проточними щілинними каналами

Деталі з малорозмірними проточними каналами, типовими представниками яких є золотники, кільця завіси, високонапірні щілинні форсунки, широко використовуються в агрегатах подачі енергетичних установок, двигунів і технологічного обладнання для базових галузей промисловості. Для отримання мінімальної опори при переміщенні робочого тіла до проточної частини пред'являються підвищені вимоги за якістю обробки і працездатності поверхонь в умовах нестационарних термодинамічних навантажень і агресивних середовищ [25, 41, 42, 81-83, 86].

Також деталями з проточними щілинними каналами є прецизійні пари, які виконують функції пар тертя і чутливих елементів регулюючих пристроїв, які є одним з основних елементів, що визначають надійність роботи паливно-регулюючої системи в ЖРД [13]. Деталі з щілинними каналами найчастіше застосовуються групами. Наприклад, це деталі типу форсунок в камерах згоряння ракетних двигунів (рис. 1.11). Важливо отримання стабільності експлуатаційних показників, так як від цього залежить стабільність, якість і довговічність роботи зміщувальної головки. У вітчизняній промисловості це є актуальним, і гостро стоїть завданням, так як багато виготовляючихся деталей мають широкий розкид експлуатаційних параметрів. Щілинні канали для технологічних пристроїв у вигляді насосів, що перекачують струменеві пристрої схильні до абразивного зносу, що може змінювати їх характеристики.

Робота деталей з каналами, що застосовуються в наукомістких галузях промисловості, характеризується якістю розпилу компонентів, який визначається наступними експлуатаційними параметрами:

1. Тонкістю розпилу, що оцінюється деяким середнім розміром капель, одержуваних в факелі розпилу. Найчастіше використовується медіанний діаметр.

2. Однорідністю розпилу, тобто діапазоном зміни розмірів крапель у факелі розпорошеного палива. Чим менше цей діапазон діаметрів утворившихся крапель, тим однорідніше розпил палива.

3. Далекобійністю факела, тобто глибиною проникнення розпорошеного палива в газове середовище.

4. Рівномірністю витрати, тобто рівномірністю розподілу рідини в факелі розпилу.

5. Середнім кутом розпилу, що вимірюється у зрізі сопла.

6. Об'ємною або масовою витратою [21].

Забезпечення цих експлуатаційних параметрів є складним технологічним завданням.



Рисунок 1.11 - Зовнішній вигляд змішувача головки РРД

1.3 Технологічні труднощі обробки щілинних каналів

У різних галузях промисловості досить широке використання знаходять деталі з щілинними каналами і переривчастими поверхнями.

У виготовленні подібних деталей гостро стоїть технологічною проблемою інструментальне забезпечення та вибір способу обробки для відтворення заданих точносних і якісних показників. Важко оброблювальні зносостійкі, жароміцні і корозійностійкі матеріали погано піддаються обробці традиційними методами обробки і традиційними інструментальними матеріалами. Тому потрібні додаткові рішення, аж до внесення змін в конструкцію деталі. Відомі причини, що зумовлюють нестійкий характер процесу різання: циклічність за рахунок чергування гладких і переривчастих ділянок оброблювальної поверхні заготовки, зміни і коливання сил різання, температури, а також зміна умов стружко утворення. Нестабільність переривчастого різання впливає на знос інструментів, визначає стійкість і, в кінцевому рахунку, якісні показники процесу. Переривчасте різання характеризується циклічністю: через проміжки часу, вимірювані секунд або частками секунд, різання чергується з холостим пробігом ріжучої кромки інструменту. Початок кожного різання здійснюється або при нульовій (наприклад, при зустрічному фрезеруванні), або при всій заданій товщині (стругання) зрізується. Виникає ряд специфічних явищ, в результаті яких зміна стійкості інструменту підпорядковується іншим залежностям, ніж при безперервному різанні[22,27,28,72].. Інша складність виникає в разі, коли величина заокруглення крайок в місці переривання робочої поверхні не повинна притупляти кута без наявності задирок. Подібна вимога часто є обов'язковою в деталях ракетної техніки, зокрема в прецизійних парах (рисунок 1.12) з щілинними каналами.

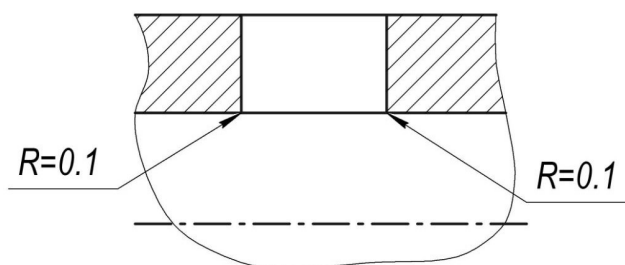


Рисунок 1.12 - Крайка каналу плунжера

На сьогоднішній день для обробки переривчастих поверхонь крайок щілинних каналів широко поширена обробка пов'язаним абразивом, але такий

спосіб має істотне обмеження в разі неприпустимість заокруглення в місці переривання робочої поверхні.

Подібні вимоги ускладнюють обробку точної поверхні з пазами абразивним кругом: потрапляючи в паз, інструмент за рахунок радіального зусилля зміщується за нижню межу допуску і, при виході з паза, вривається в протилежну крайку (рис. 1.13) [69], Незважаючи на використання обладнання з високим ступенем жорсткості технологічної системи.

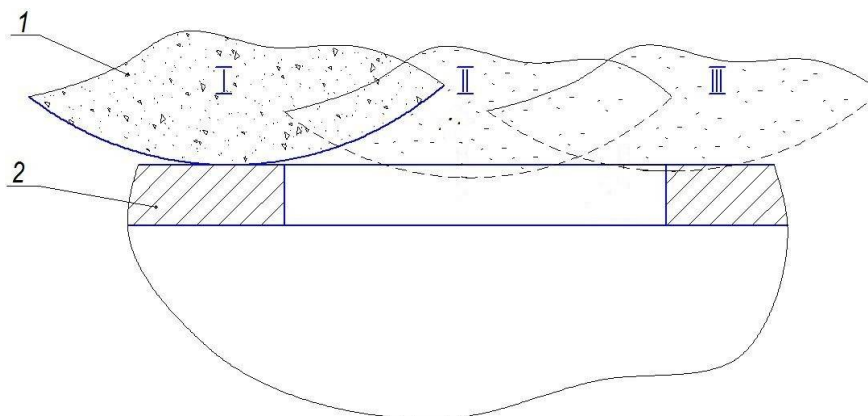


Рисунок 1.13 - Характер зсувів інструменту при проходженні паза:

1 - шліфувальний круг, 2 - деталь з пазом; I - положення кола в контактi з поверхнею, II - коло поза контактом з деталлю; III - вривання кола в кромку паза

У більшості випадків на стадії точіння і фрезерування кромки каналів закладаються дефекти. За існуючими технологічними процесами після попереднього шліфування потрібна трудомістка суперфінішна доведення переривчастої поверхні для забезпечення необхідного мікрорельєфа і необхідної форми [65].

Тому кромки проточних каналів і пазів намагаються формувати в процесі отримання каналу без подальшої обробки.

1.4 Методи отримання малорозмірних каналів

1.4.1 Традиційна лезова обробка

Для отримання малорозмірних тангенціальних каналів застосовують традиційний метод лезової обробки - свердління.

Свердління вхідних тангенціальних каналів пов'язане з деякими труднощами, зумовленими односторонньою дією сил різання на свердло на початку і в кінці свердління, як це схематично показано стрілками (рис. 1.14).

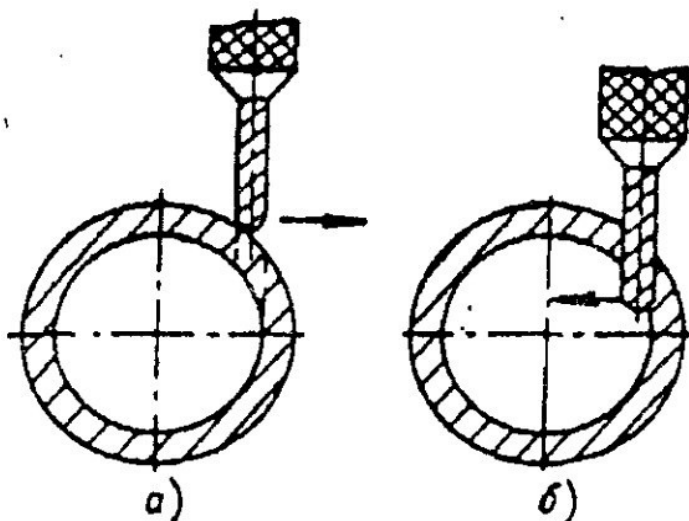


Рисунок 1.14 - Віджим свердла при свердлінні тангенціальних каналів:
а) на початку свердління; б) в кінці свердління

Ці сили, діючи на тонке свердло, що має малу жорсткість, згинають його, що веде до викривлення осі каналу або до помилки в направленні цієї осі. Тим часом для забезпечення гарної роботи деталі потрібно направити струмінь рідини строго по дотичній до котра утворює поверхні внутрішньої виточки деталі. Для попередження відведення свердла застосовують кондуктори (рисунок 1.15) з направляючими втулками, облягаючи наружні поверхні деталі і коректують напрямок свердління з урахуванням віджиму свердла.

Свердління повинно проводитися з малої, завжди однаковою подачею, так як сила різання, а отже, і сили віджиму свердла залежать від січення стружки.

Для свердління тангенціальних каналів в малорозмірних деталях, деталь встановлюється між призмами. Для вибору люфту призма виконується рухомою - піджимається гвинтом. Потім планка повертається навколо осі до упору, коли виріз на другому кінці планки зайде в проточку на стрижні.

Потім затискним гвинтом закріплюють деталь. Свердління виробляють через кондукторні втулки, облягаючи зовнішні поверхні деталі для погашення сил, віджимаючих свердло. Після утворення одного отвору кондуктор

повертається і свердлить наступний тангенціальний канал через кондукторну втулку.

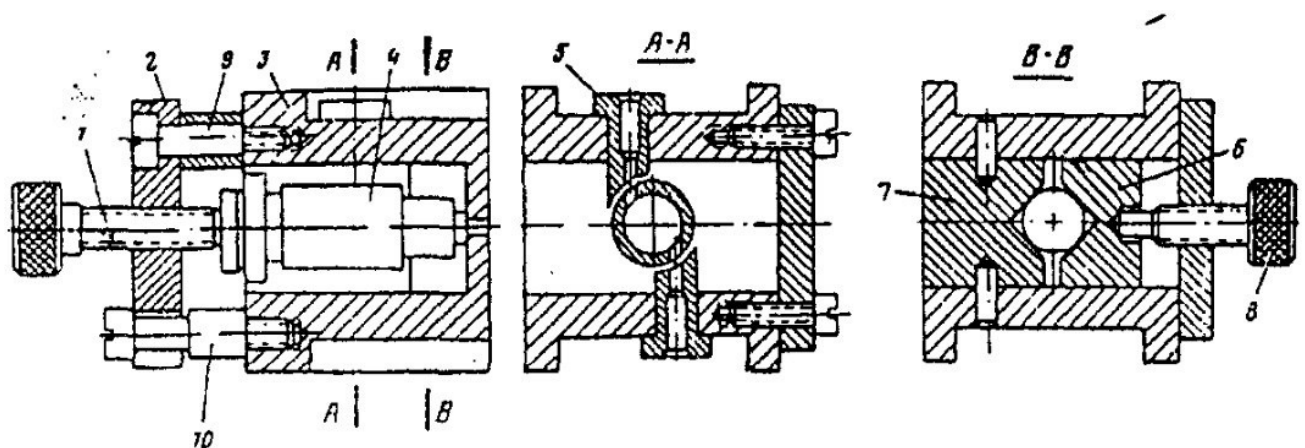


Рисунок 1.15 - Кондуктор для свердління тангенціальних каналів:

1 - гвинт; 2 - планка; 3 - корпус; 4 - деталь; 5 - кондукторна втулка; 6,7 - призма; 8 - гвинт; 9 - вісь; 10 - стрижень.

Однак свердління має істотні недоліки. По-перше, деталі, які використовують в ЖРД, виготовляють з литих або штампованих важкооброблюваних зносостійких жароміцних і корозійностійких матеріалів, де лезовий інструмент має низьку стійкість, а при обробці глибоких каналів діаметром менше 1 мм часто ламається. Після свердління в місці виходу свердла залишаються задирки, які необхідно усувати [13,48].

Відомий спосіб виготовлення каналів малого діаметра, що полягає у його свердлінні з подальшим виконанням вхідної ділянки шляхом розгортки з кутом розкриття 11° з метою забезпечення високого і стабільного коефіцієнта витрати [23]. Даний спосіб важко застосовувати при виготовленні отворів діаметром менше 0,5 мм через складність виготовлення зенкерів відповідного розміру. Крім того, при обробці зенкером утворюється стружка, яку складно видалити з отворів малого діаметра (менше 0,5 мм) без порушення вхідних і вихідних кромки (забоїни, задирки, ризики і т.п.), що, в свою чергу, призводить до небажаного розпаду струменя на джгути і краплі на виході з каналу деталі.

1.4.2 Технологічне усунення уривчастості процесу обробки

Існує спосіб обробки переривчастих поверхонь з попереднім заповненням

пустот наповнювачем. Спосіб реалізується наступним чином.

Попередньо виконують чистову обробку різанням заготовки, що складається з жароміцного сплаву і наповнювача, на низьких, середніх і високих швидкостях різання жароміцного сплаву при постійній глибині різання і подачі. Вимірюють шорсткість оброблених ділянок і визначають наповнювач з максимальною шорсткістю для кожної швидкості різання жароміцного сплаву. В якості наповнювача вибирають високоміцний чавун з кулястим графітом марки ВЧ.

За технологією виготовлення деталей з жароміцного сплаву вибирають швидкість різання (низьку, середню, високу). Порожнечі між привчистими поверхнями заповнюють за допомогою пресовій посадці наповнювачем з забезпеченням максимальної шорсткості для даної швидкості різання. Проводять чистову обробку деталі спільно з наповнювачем. Після закінчення обробки наповнювач видаляють з пустот між переривчастими поверхнями каналів [53].

Однак цей спосіб не застосуємо до тонкостінних малорозмірних деталям, так як при видаленні наповнювача порушується геометрія деталі.

Широке поширення отримує обробка переривчастих поверхонь із заповненням пустот магнітно-реологічної рідини.

Магнітно-реологічна рідина це рідина, сильно ріжуча в присутності магнітного поля. Реологічна рідина представляє собою систему, що складається з феромагнітних або феррімагнітних частинок манометрових розмірів, що знаходяться в підвищеному стані в несучій рідині, в якості якої зазвичай виступає органічний розчинник або вода.

Спосіб обробки полягає в наступному: порожнини в деталі з преривістими поверхнями заповнюють магнітно-реологічною рідиною, після чого подають на деталь напругу. Магнітно-реологічна рідина приймає твердий стан і відбувається обробка деталі різанням. По завершенню обробки напругу з деталі знімають і порожнини звільняються від реологічної рідини [76]. Недолік цього способу полягає в неспроможності його застосування до малорозмірних каналів.

1.4.3 Нетрадиційні методи обробки

Основна виробнича проблема виготовлення малорозмірних проточних каналів полягає в тому, що канали перетином в десяті частки міліметра не дозволяють досить ефективно використовувати традиційні засоби металообробки, тому широко використовується електроерозійне прошивання (рисунок 1.16) [32,97,98].

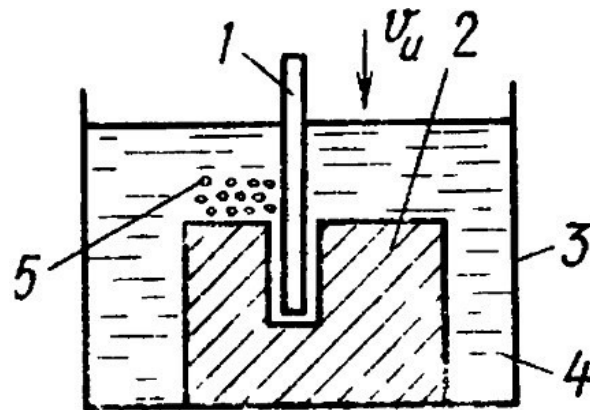


Рисунок 1.16 - Схема електроерозійного прошивання:

1 - електрод-інструмент; 2 - заготовка; 3 - ванна; 4 - діелектрик; 5 - продукти обробки; v_u - швидкість переміщення електрод-інструменту

Відомий спосіб виготовлення розпиленням отворів ЖРД на електроіскрових напівавтоматах [78,99]. З подальшим контролем за допомогою поливки водою, де по виміру еквівалентної витрати води, що пропускається через деталь в одиницю часу, відбувається відбраковування виробів, які не відповідають технічним вимогам по рівномірності розпилю. Як показала практика, величина витрат рідини через канал залежить не тільки від діаметра каналу, а й від шорсткості внутрішньої поверхні і кромки каналу, які контролювати і допрацьовувати зважаючи на малий діаметр отворів (близько 1 мм) надзвичайно важко, тому багато деталей відбраковуються [5,88,89].

Отримані електроерозійним прошиванням поверхні мають дефектний шар, який характеризується нерівністю поверхні і високим рівнем залишкових напруг. Отже, потрібна подальша фінішна обробка.

Електрохімічне прошивання - має на увазі обробку, при якій електрод-інструмент, заглиблюючись в заготовку, утворює отвір постійного перетину за

рахунок анодного розчинення металу. Електрохімічне прошивання використовують при прошивці каналів і пазів складної форми.

На рисунку 1.17 представлена схема електрохімічного прошивання. При такій схемі електрод-інструмент складається з струмопровіду 1, омивається потоком електроліту. Струмопровід знаходиться всередині корпусу 3 з ізоляційного матеріалу. Електроліт створює струмопровідний канал між струмопровідом 1 і заготовкою 2. У місці контакту рідини з оброблюваною поверхнею матеріал заготовки розчиняється і утворюється поглиблення. У мірі збільшення глибини отвору корпус 3 зближується з заготовкою 2. Процес йде досить швидко тільки при високих напругах [93,97].

Недоліком цього способу є геометрично неточна форма отвору після обробки [97].

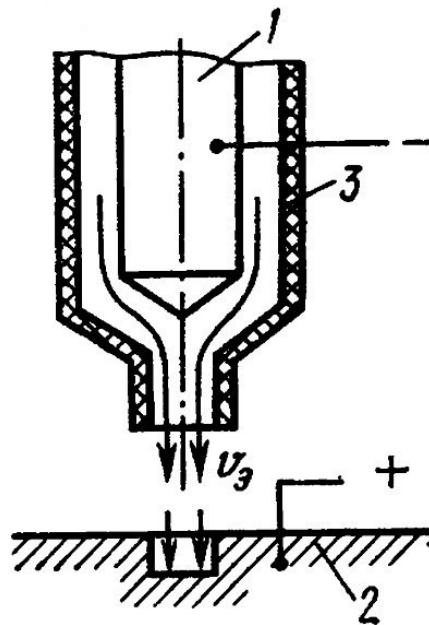


Рисунок 1.17 - Схема електрохімічного прошивання:

1 - струмопровід; 2 - заготовка; 3 - корпус

Застосовують ультразвукову обробку абразивними зернами, рухаються за рахунок переміщення ультразвукового інструменту. На рисунку 1.18 показана схема прошивання отворів. Ультразвуковий інструмент 3 з'єднаний з концентратором 2, припаяним до ультразвукового перетворювача 1. Інструмент періодично вдаряється по зернам абразивної суспензії 4, заповнюють проміжок між інструментом і заготівлею 5. Зерна видаляють невеликі частки матеріалу

оброблюваної заготовки. Інструмент має подовжню подачу і притискається до заготовки з деяким зусиллям. продукти обробки виводяться з під торця інструменту разом з суспензією. Повідомляючи інструменту та заготовці різні види подач (подовжню, попередню) і змінюючи профіль перетину інструменту, можна прошивати глухі і наскрізні канали, обробляти поглиблення і пази, зокрема криволінійні пази [8, 20, 97].

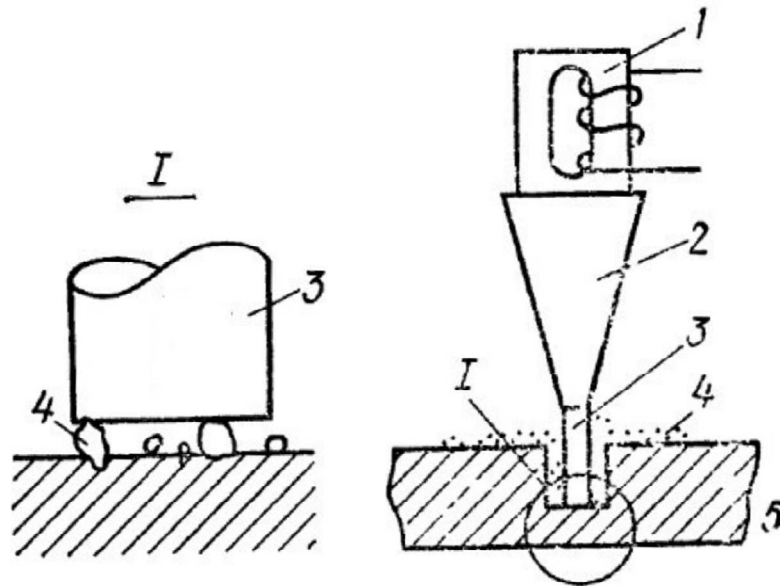


Рисунок 1.18 - .Механізм ультразвукової розмірної обробки:

1 - перетворювач; 2 - концентратор; 3 ультразвукової інструмент; 4 - зерна абразивного суспензії; 5 – заготовка

Ультразвукова обробка застосовна тільки до твердих і тендитних матеріалів. В авіаційно-космічній промисловості широко застосовуються в'язкі матеріали, які не піддаються обробці ультразвуком.

Променева обробка концентрованим променем лазера заснована на локальному плавленні матеріалу і його подальшому видаленні під дією сили тяжкості, концентрованого потоку або газового струменя. пари перегрітого металу можуть втекти із зони обробки за рахунок власної пружності або додатковим струменем газу.

Основними процесами, що протікають при утворенні отворів, являють випаровування і плавлення. При фокусуванні випромінювання поблизу поверхонь заготовки в матеріалі утворюється отвір, профіль якого близький до

циліндричного.

Лазерна обробка може бути використана для прошивання отворів малих діаметрів ($d < 0,1$ мм) з великим відношенням глибини до діаметру і виготовлених з різних матеріалів.

Швидкість знімання металу при використанні лазерного випромінювання досягає 1 мм/с. Однак по питомій витраті енергії лазерна обробка поступається механічним і електрофізичним методам.

Недолік цього способу полягає в розплавленні вхідної ділянки отвору і, відповідно, неможливість отримати гостру кромку, а крім того, має місце висока енергоємність процесу.

Відомий спосіб струминної електрохімічної обробки, де застосовується порожнистий електрод-інструмент, виконаний з електроізоляційного матеріалу (скла) і має катодну втулку, при цьому електрод інструмент переміщується поступально. На деталь підводиться анод джерела струму і електрохімічне прошивання здійснюється з використанням сформованої струменем електроліту, що дозволяє виробляти формоутворення отворів діаметром 0,3-1,5 мм [78].

Недоліком відомого способу є неможливість отримання дрібних каналів (менше 0,3 мм) із забезпеченням рівномірності витрати рідини через кожен з них.

Відомий також спосіб електролітичного полірування випускного отвору золотника, що включає подачу струмопровідного рідкого середовища через порожнистий інструмент-катод і оброблювані отвори [61]. Який дозволяє видаляти задирки з внутрішньої конусної поверхні отвору золотника.

Однак цей спосіб не дозволяє здійснювати доведення каналів з рівномірним розпилком, так як не враховує індивідуальних видаткових характеристик кожного каналу деталей, тому багато деталей доводиться відбраковувати.

Для забезпечення рівномірної витрати через всі отвори деталей з малорозмірними каналами застосовується спосіб, наведений на рисунку 1.19 [55].

Даний спосіб доведення деталей здійснюють наступним чином: включають подачу струмопровідної рідини через порожнистий інструмент-катод 3 і оброблювані канали без підключення струму до інструменту-катода 3, реєструють її витрату через кожен оброблюваний канал, потім визначають канал з найбільшим витратом і заглушають всі канали, після чого включають струм і послідовно відкривають канали, розташовані за каналом з найбільшим витратом, і через кожен з них здійснюють прокачування струмопровідної рідини до досягнення витрати, рівної витраті через канал з найбільшою витратою. При цьому за рахунок електрохімічного процесу здійснюється знімання матеріалу близько каналу, що дозволяє підвищити пропуску здатність каналу. Відсічення технологічної напруги відбувається після наповнення мірної мензурки 7, спливання поплавка 8 і спрацьовування вимикача 9.

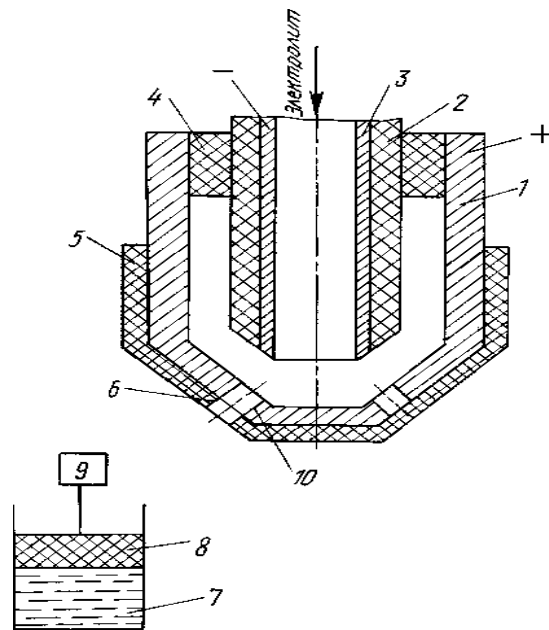


Рисунок 1.19 - Спосіб отримання рівномірної витрати через усі канали форсунки: 1 - форсунка; 2 - ізолятор; 3 - інструмент-катод; 4 - електроізоляційна втулка; 5 - заглушка; 6 - отвір в заглушці; 7 - мірна мензурка; 8 - поплавок; 9 - вимикач; 10 - опрацьований канал

Головний недолік цього способу полягає в неможливості забезпечити геометричну форму отвору з перекрученою вихідною формою перетону і глибокого отвору через нерівномірності знімання матеріалу.

1.4.4 Комбіновані методи

Електроерозійна-хімічна обробка заснована на поєднанні електрохімічної обробки з електроерозійним руйнуванням металу, які роблять взаємний вплив один на одного, значно підвищуючи продуктивність і знижуючи знос інструменту. При кожному імпульсі послідовно здійснюється спочатку анодне розчинення, а потім електрична ерозія металу. Швидкість знімання визначається залежністю $Q = Q_1 + Q_2$, де Q_1 - швидкість знімання металу за рахунок анодного розчинення, Q_2 - швидкість знімання за рахунок ерозії.

Процес анодного розчинення створює гарні умови для пробою проміжку, так як на катоді-інструменту є парогазовий шар. Ерозія оброблюваної поверхні, в свою чергу, сприяє видаленню пасивної плівки, значно прискорює дифузію і винос продуктів оброблення. Технологічні показники методу, такі як точність, продуктивності, якість поверхневого шару, ступінь корисного використання енергії, що підводиться досить високі і залежать від складу робочого середовища і хімічних добавок [9,16,77] .

Недоліком методу є те, що процес неефективний при більшому розмірі поглиблення. Так при прошивці каналів швидкість подачі електродів після поглиблення на кілька міліметрів знижується в кілька разів. Електрична ерозія сильно позначається на розмірах шорсткості поверхні. На ній виникають поглиблення, які кілька згладжуються анодним розчиненням, але якість обробки все ж гірше, ніж при електрохімічній обробці (ЕХО) [97].

Електроерозійне свердління є електроерозійна обробка з використанням полого обертового електрода-інструменту з прокачуванням під тиском діелектричної робочого середовища через внутрішній канал. Електроерозійне свердління дозволяє ефективно і постійно видаляти шлам з між електродного проміжку. Тому це більше продуктивний і менш тепло напружений процес в порівнянні з електроерозійною прошивкою [12].

Цей метод можна застосовувати тільки до прямолінійним каналах циліндричної форми і має обмеження по шорсткості одержуваної поверхні.

Для підвищення продуктивності застосовують комбіновану

ерозійнотермічну обробку електродами з термоактивним покриттям, але після неї залишається нестабільний мікропрофіль поверхні по образуючому каналу і значно (до 40 мкм) змінений поверхневий шар матеріалу, утворення якого на стінках каналу неминуче для інтенсивних режимів обробки жароміцних сплавів [30].

1.4.5 Формування каналів при отриманні заготовки

Порошкова металургія дозволяє формувати заготовку, граничну але наближену до остаточної деталі, а також відразу сформувати в корпусі необхідні технологічні елементи: отвори, бурти, шестигранні ділянки і т.д.

Крім того, технологія дозволяє відразу сформувати в корпусі конічний отвір під посадку втулки і тим самим виключити ручну операцію розгортки [10].

Важливою перевагою запропонованої технології є можливість суміщення операції пайки втулки в корпусі одночасно з операцією спікання порошкового корпусу (рис. 1.20).

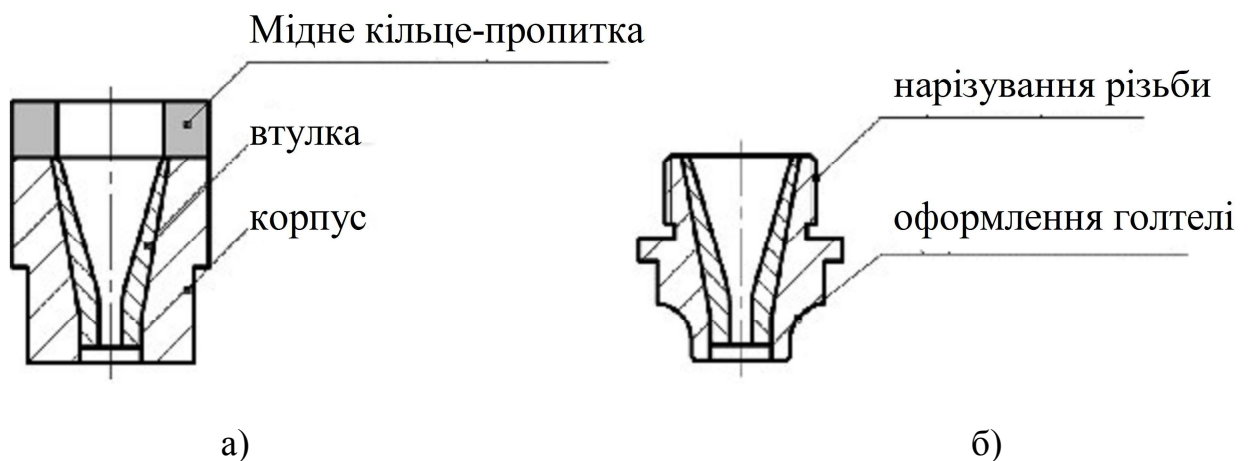


Рисунок 1.20 – Технологія суміщення операції пайки втулки в корпусі одночасно з операцією спікання порошкового корпусу:

а) вид деталі в зборі перед спіканням в високотемпературної печі; б) вид готової деталі після механічної обробки

Корпус деталі формується з порошкової шихти стали із зусиллям пресування 600-700 МПа, при якому досягається щільність матеріалу $7,2 \text{ г/см}^3$.

Спикання проходить в водородомісткій атмосфері при температурі 1150°C протягом 40 хвилин.

Спикання поєднується з просоченням корпусу міддю, після чого втулка і корпус стають нероз'ємним з'єднанням. Спечена порошкова сталь має структуру легованого перлитороостита з включеннями 5 карбідних фаз. Твердість стали корпусу після спикання становить 18-30 HRC.

Остаточна операція виготовлення включає фінішну механічну обробку порошкового корпусу.

Все частіше для виготовлення деталей, в тому числі деталей зі складними малорозмірними каналами, застосовують адитивні технології. Спосіб варто в пошаровою побудові, пошаровому синтезі виробів шляхом фіксації шарів модельного матеріалу і їх послідовного з'єднання між собою різними способами: спиканням, сплавом, склеюванням, полімеризацією - в залежності від нюансів конкретної технології. Ідеологія адитивних технологій базується на цифрових технологіях, в основі яких лежить цифровий опис виробу, його комп'ютерна модель.

Деталь, отримана за допомогою адитивної технології, представлена на рисунку 1.21.

Застосовують дві технології формування моделі при побудові - лазерна (спикання, сплавлення) і технологію Inkjet, згідно з якою шар фіксується за допомогою спеціального складу, що накладається на поверхню порошкового металу через багатоструйну рухливу голівку (по типу 3D-принтера). Після створення 3D моделі деталі вона виготовляється на 3D принтері, шар матеріалу фіксується за допомогою спеціального складу, що накладається на поверхню порошкового металу через рухливу голівку [24].

При обробці порожнин потрібна установка конструктивних підтримок, при видаленні яких розкриваються мікропорожнини. При виготовленні довгих проточних каналів немає можливості отримати рівномірний перетин каналу на всій довжині. Обробка каналів змінного перерізу в заготовках, одержуваних з порошків методами швидкого прототипування, не дає необхідного ефекту внаслідок виборчого характеру більш інтенсивного анодного розчинення

матеріалу в місцях підвищеної концентрації рихлот, мікротріщин і пор [87].



Рисунок 1.21 - Деталь з каналами отримана за допомогою адитивних технологій на 3D принтері

1.4.6 Методи доведення малорозмірних отворів пластичним деформуванням

Суттєвого підвищення якості поверхневого шару крайок деталей можна досягти, застосовуючи зміцнюючі методи обробки. Серед цих методів широке поширення в промисловості отримали методи поверхневого пластичного деформування [75].

Один із способів включає поверхнево-пластичне деформування переривчастих поверхонь каналів циліндричних деталей шляхом впливу на обертоту деталь деформуючим елементом (рис. 1.22). Зусилля деформуючого елемента, виконаного у вигляді кулі і встановленого в державці, створюють за допомогою мастильно-охолоджувальної рідини. В'язкість згаданої мастильно-охолоджувальної рідини визначають з умови забезпечення переміщення деформуючого елемента в вікно деталі на задану величину, яка виключає появу дефектів на поверхні вікна деталі і її крайок. В результаті цього неможлива поява дефектів на поверхні крайок по контуру вікна деталі [56] .

Використання цього способу обмежене при обробці деталей з невеликим

діаметром внутрішньої поверхні.

При обробці деталей з переривчастими поверхнями каналів застосовують вигладжування на токарно-фрезерних центрах.

У вигладжуючих інструментах для підвищення продуктивності і якості обробки поверхонь, особливо мають канали, пази, отвори і западини, для гасіння віброколювання використовують спеціальні демпфери в'язкого (гідролічні), сухого тертя (механічні) або гумово-металеві.

Застосування інструменту для вигладжування переривчастих поверхонь каналів дозволяє зменшити шорсткість обробленої поверхні до рівня в кілька нанометрів при підвищенні продуктивності до межі, що визначається теплостійкістю алмазу і виключити поломку алмазного наконечника при обробці (рисунок 1.23) [57].

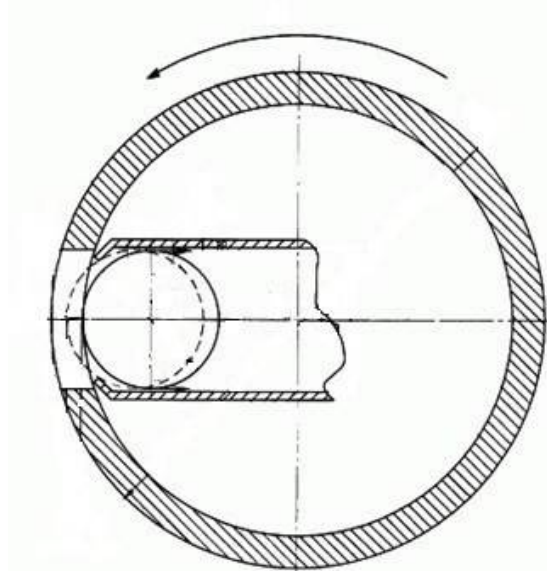


Рисунок 1.22 - Спосіб поверхнево-пластичне зміцнення за допомогою деформуючого елемента, виконаного у вигляді кулі

Вигладжування відбувається наступним чином: алмазний наконечник 3 підводять до оброблюваної деталі 8 і, переміщаючи корпус 1 вигладжують інструменту, створюють робочий натяг L_1 . Зсув індентора на величину натягу L_1 призводить до зміщення також гумової шайби 5, шайбу 4 на величину L_1 . Тим самим здійснюється само встановлення демпфера в робочий стан. Пружина 7 впливає з попередньо налаштованим робочим зусиллям P на індентор 2. Оброблювальну деталь 8 повідомляють обертальний рух і включають подачу

інструменту. Виникаючі коливання індентора 2 з амплітудою в межах шорсткості оброблюваної поверхні гасяться дисипативними силами в'язкого тертя в гумовій шайбі 5, яка зафіксована щодо корпусу силами сухого тертя.

При обробці амплітуда коливань індентора 2 зростає, що приводить до зміщення шайби 5 відносно корпусу 1. Виникаюча при цьому сила сухого тертя гумової шайби 5 з корпусом 1 ефективно розсіюють енергію коливань індентора 2. Гасіння вібрації виконується також силами сухого тертя, розмір яких обмежений робочим зусиллям пружини.

Цей спосіб застосовується тільки до зовнішніх поверхонь деталей, оброблюється на токарних верстатах.

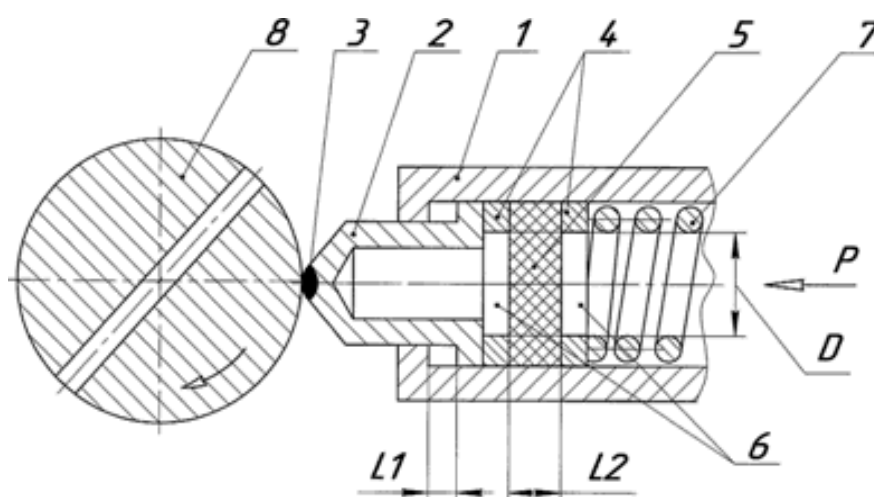


Рисунок 1.23 - Інструмент для вигладжування переривчастих поверхонь каналів: 1 - корпус; 2 - порожнистий індентор; 3 - алмазний наконечник; 4 - шайби; 5 - гумова шайба; 6 - отвори в шайбах; 7 - пружина; 8 - оброблювана деталь

Дорнування (Деформування протягуванням, прошиванням) складається в холодній пластичній деформації заготовки при поступальному переміщенні через канал з деяким натягом спеціального інструменту. При цьому забезпечується підвищення точності отворів, інтенсивне згладжування микронерівностей і зміцнення поверхневого шару; після дорнування на оптимальному режимі в поверхневому шарі формуються стискаючі залишкові напруги.

Як інструмент при дорнуванні використовують сталеві і тверді сплавні кулі, однозубі і багатозубі прошивки і протягання (рис. 1.24). Робоча частина зубів прошивок і протяжок в більшості випадків оформляється у вигляді двох усічених конусів, з'єднаних циліндричною стрічкою. Оптимальні значення кутів конусів складають $6 \dots 10^\circ$, ширина циліндричної стрічки - $0,1 \dots 3$ мм.

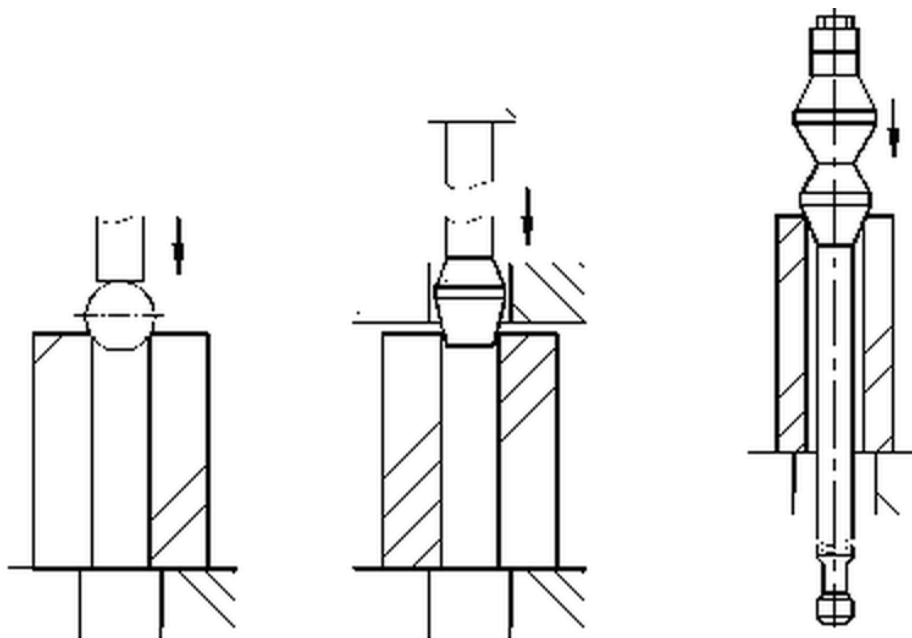


Рисунок 1.24 - Інструмент використовується при дорнуванні

В цілому, дорнування дозволяє забезпечити високу точність отворів (до 6 ... 7 квалітет), отримати дуже малу шорсткість поверхні (до $0,05 \dots 0,1$ мкм), значно зміцнити поверхневий шар (зростання мікротвердості досягає $130 \dots 260\%$), створити в цьому шарі стискаючі залишкові напруги, найбільша величина яких близька до межі плинності матеріалу заготовки.

Разом з тим технологічні можливості дорнування дуже істотно залежать від ставлення діаметра зовнішньої поверхні заготовки до діаметра її отвору.

Недоліком дорнування є неможливість обробки криволінійних і важкодоступних каналів [74].

Існує спосіб доведення проточного каналу за допомогою голки. Спосіб [52] за яким канали малого діаметра отримують, наприклад, способом електроіскрової обробки, після чого проводять додаткову обробку, формуючи вхідну ділянку голки, надаючи їй зворотно-поступальний і реверсивний

обертальний рух. При такій обробці вхідної ділянці надається форма подовженої конічної воронки; при цьому нерівності, які були на поверхні каналу, мнуть, і шорсткість конічного вхідної ділянки стає близькою до шорсткості, відповідної шліфовці. Однак такий спосіб формування вхідної ділянки супроводжувалося освітлюванням навколо вхідної крайки напливу металу (метал видавлюється голкою з отвору, накопичується навколо вхідної крайки в вигляді важковидалеюмого напливу), який змінює характер перебігу рідини, робить його нестабільним,

Усунення зазначених вище недоліків можна досягти шляхом підвищення якості обробки вхідної ділянки і вхідної кромки, які сприяють стабілізації гідравлічних характеристик деталей з каналами.

Зазначений технічний результат досягається заявленим способом з виготовлених деталі, що включає отримання малорозмірного каналу і додаткову обробку його вхідної частини шляхом здійснення зворотно поступального і обертального рухів голкою. За розглянутим засобом використовують голку, виконану з гранованою пірамідальною оброблюємою поверхнею.

В процесі обробки голці можуть надавати додатково реверсивний обертальний рух, який покращує якість оброблюваної поверхні.

Для отримання стабільних гідравлічних характеристик деталей з каналами (не розпадаючими частинами струменя; стабільне, без тремтіння, витікання в заданому напрямку; стабільна витрата) доцільно забезпечити кут при вершині голки в межах 11-20°. Цей обробний інструмент має хвостовик 1, робочу частину 2 у вигляді гранованою пірамідальною поверхні з ріжучими крайками 3 (рис. 1.25).

Для обробки магнітом'якого матеріалу типу 14X17H2, 10X32H8 і т.д. або магнітного типу 12X12H10T застосовують голку, виконану з матеріалу з магнітними властивостями.

На рисунку 1.26 показана деталь з отвором, отриманим електроіскровою обробкою (або свердлінням); на рисунку 1.27 показана деталь, з конусною ділянкою, відформованою голкою.

В результаті у втулці виконаний проточний канал з підвідного паза, вхідна ділянку якого має гостру кромку.

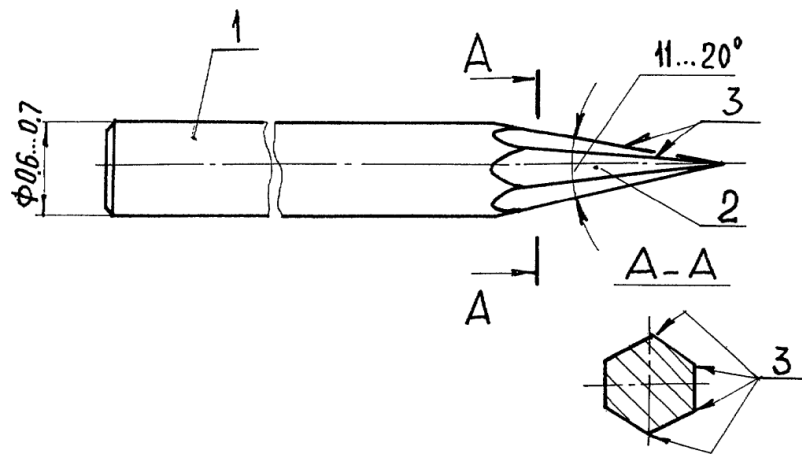


Рисунок 1.25 - Оброблювальний інструмент:

1 - хвостовик; 2 робоча частина; 3 - ріжучі кромки

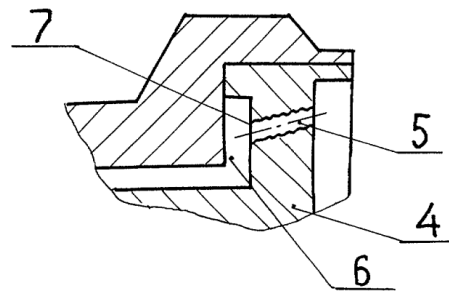


Рисунок 1.26 - Канал, виконаний електроіскровий обробкою:

4 - втулка; 5 - канал $\Phi 0,6$ мм; 6 - підвідний паз; 7 – кромка

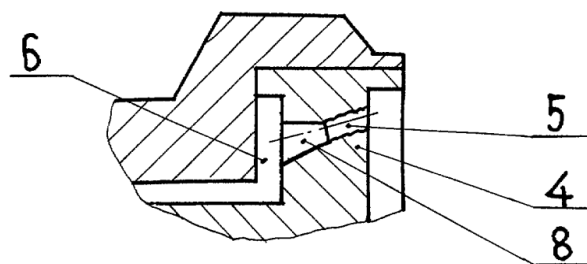


Рисунок 1.27 - Деталь, канал в якій сформовано голкою: 4 - втулка; 5 - канал $\Phi 0,6$ мм; 6 - підвідний паз; 8 - конічний вхідний ділянку

Для формування вхідної ділянки у втулці 4 методом електроіскрового пропалювання або свердління виконують отвір 5 з підвідним пазом 6. Крайка 7

на вході в отвір 5 виходить гострою кромкою з невеликим підйомом матеріалу, а шорсткість стінок отвору така, що висота нерівностей порівнянна з діаметром каналу, особливо для каналу з малим діаметром (0,2 мм). Голку хвостовиком 1 встановлюють в цанговий затискач (не показаний), а робочу частину 2 вводять у вхідну ділянку отриманого отвору.

Виконуючи обертальний і зворотно-поступальний рух, роблять обробку вхідної ділянки. Така обробка голкою призводить до формування конічної ділянки. Оброблювальний інструмент зрізає своїми ріжучими крайками 3 метал на західній частині і одночасно загладжує утворюючи конічну поверхню, доводячи шорсткість до стану близького до шліфування. Підвищити якість обробки можна, надаючи голці додатково реверсивний обертальний рух. Новоутворена в результаті зрізання металу стружка видавлюється назовні (до вхідних кромок оброблюваного отвору), заповнюючи пази між гранями обробного інструменту і оброблюваної поверхнею. Стружка налипає на інструмент, що дозволяє легко видалити її.

При роботі деталі, виготовленої зазначеним способом, робоче тіло рідкий компонент палива, дійшовши по пазу 6 до каналу деталі, потрапляє в конічну вхідну ділянку 8, потім плавно переходить в отвір 5, а з нього в камеру згоряння. Якщо довжина не розкладеної частини струму з каналу, виконаної методом електроіскровий прошивки (або свердлінням), становить приблизно 15 мм, то довжина нераспавшоїся частини струменя з західної ділянкою, сформованим пропонованим способом, становить 95 мм при ливарці водою при швидкості витікання до 45 м/с.

Цей спосіб можна використовувати тільки при обробці розбірних двокомпонентних деталей.

Відомий спосіб зміцнюючої обробки внутрішніх поверхонь деталей мікрокульками [59]. Що полягає в подачі на оброблювану поверхню кульок і з накладенням електричного поля, що відрізняється тим, що обробку проводять в газожидкістному слабопровідному середовищі при напрузі електричного поля 2-5 В у два етапи. На першому етапі на оброблювальну поверхню під кутом не більше 60° подають мікрокульки діаметром 150-200 мкм при тиску стисненого

повітря 0,2-0,4 МПа і часу обробки кожної ділянки поверхні 30 с., а на другому етапі мікрокульки діаметром близько 50 мкм при тиску стисненого повітря не більше 0,3 МПа і часу обробки кожної ділянки поверхні 15с. [43,45].

Даний спосіб не може бути реалізований в отворах глибиною більше 5 діаметрів і діаметром менше 1 мм через ефект екранування кульок в отворі.

1.4.7 Методи доведення малорозмірних каналів за допомогою абразиву

Для отримання тангенціального каналу з високими вимогами по шерохватості і геометричності форми застосовують притирання. Притирання є чистою операцією, виконуваною після попередньої лезової або електроерозійної обробки. Притирання забезпечує низьку шорсткість поверхні, високу точність розмірів і форми каналу [80]. Але при притиранні каналів малого діаметра і великої довжини досягти високого ступеня прямолінійності дуже важко через малу жорсткості притиру. Ще одним мінусом способу є мала продуктивність. Застосовується притирання зазвичай в одиничному і дрібносерійному виробництві і для каналів, як правило, діаметром 4 мм і більше.

Для оздоблювальної обробки глибоких каналів малого діаметра використовують абразивно-екструзійну обробку. Вона дозволяє забезпечити параметр шорсткості поверхні 0,08 ... 0,12 мкм при початковому значенні 1 ... 1,5 мкм . Зокрема, абразивно-екструзійна обробка дозволяє ефективно видаляти дефектний шар, сформований при електроерозійній прошивці каналів [92]. Точність каналів при абразивно-екструзійній обробці зберігається приблизно на рівні їх вихідної точності [74].

Відомий спосіб абразивно-екструзійної обробки деталей [54], маючих канал циліндричної форми, що переходить в конусну. У конусної частини каналу розміщують компенсаційний пристрій, що має форму конуса. Останнє забезпечує постійну площу поперечного перерізу виникаючого кільцевого зазору по всій довжині конусної частини. Згадана площа перевищує площу поперечного перерізу циліндричної частини каналу в 1,2 ... 6,4 рази. Каналом продавлюють в'язко пружні абразивні суміші із забезпеченням сталості

об'ємної витрати абразивної суміші. Такі дії сприяють підвищенню рівномірності обробки каналу по всій довжині. Цей спосіб не може бути реалізований в каналах діаметром менше 1 мм. Більш того, відбувається нерівномірне знімання матеріалу, різко збільшуються в менших містах перетину каналу, що не дозволяє забезпечити точність отвору.

Видалення матеріалу за рахунок піщаної ерозії. Піщана циркуляційна ерозія є особливою формою зносу елементів ковзання, причому в якості отриманої речовини виступає вода, а захоплюється нею пісок являє собою проміжне тіло як засіб зносу. Картина зносу відрізняється хвилястою структурою відповідної поверхні. Піщана ерозія часто супроводжується корозією, коли вода містить іони і видалені перешкоджають корозії шари окислів. Аналогічно зносу струменем визначеним є абразивні властивості піщаних зерен і швидкість потоку. Кут між напрямком руху потоку і поверхнею через виникнення вихорів не грає такої великої ролі, як кут падіння при зносі, що викликається струменем.

Для оцінки опору цікавлять нас матеріали по відношенню до абразивної дії піску є результати дослідів з ерозійним апаратом [17], що представляє собою замкнуту систему з циркуляційним насосом, з відносною швидкістю в проточному каналі 33 м/с [100].

Концентрація піску становила 2%. Тривалість досвіду досягала 60 г. Кожні 12 годин воду з піском міняли, щоб запобігти затуплення зерен піску. Опір шліфовці піском вимірюється в відносних одиницях, причому втрата у вазі стали марки Ст45 за 60 годин приймається за 1. У таблиці 1.1 наведені величини опору абразивному впливу піску для деяких матеріалів в залежності від мікротвердості. Хоча ті зразки мають майже однаковими величинами твердості, їх відношення до зносу дуже різне. Ухвалення за основу макротвердості тут також нічого не дає. Більш докладне дослідження окремих елементів структури та напружень осі лиття дозволяють отримати реальну картину зміни опору зносу [46].

До недоліку піщаної ерозії відноситься нерегульована ерозія при великій концентрації абразиву і високій швидкості потоку.

Процес струменевої гідроабразивної обробки полягає у напрямку струменя суспензії, що складається з води і частинок абразивних матеріалів, на оброблювану поверхню заготовки. В результаті такої обробки утворюються чисті матові поверхні без спрямованих рисок, характерних для лезової обробки матеріалу. Дія різальних крайок абразивних частинок на оброблювану поверхню недовго і має ударний характер. Робота з видалення металу проводиться за рахунок кінетичної енергії абразивної частинки.

Таблиця 1.1 - Опір деяких матеріалів зносу піском

Типовий матеріал	Твердість НВ 10/3000/30	Опір зносу
сталь 40Х	126	0,89
сталь 45	143	1,00
чавун сірий	153	1,22
чавун ковкий	156	0,83
хромиста сталь 20Х13	192	1,01
сталь 65Г	196	1,06
нержавіюча сталь	277	1,14

Струменева гідроабразивна обробка забезпечує зміцнення оброблювальної поверхні, внаслідок чого підвищується втомна міцність оброблених деталей [12].

Всі процеси механічної обробки металу супроводжуються розвитком значних зусиль і виділенням в зоні різання великої кількості тепла, що викликають пластичну деформацію поверхневого шару. При струменевій гідроабразивній обробці температура оброблюваних деталей не змінюється. Мікронагрів, що викликається відділенням стружки абразивною часткою, усувається потоком суспензії, які супроводжують цю абразивну частку [15].

Струминну гідроабразивну обробку доцільно застосовувати для обробки складних поверхонь: крім значного зниження часу обробки цей спосіб дозволяє здійснити механізацію процесу відділочних операцій і поліпшити умови праці

[17].

Недоліком є нерівномірне знімання матеріалу з поверхневого шару каналу.

1.5 Методи контролю експлуатаційних параметрів деталей з каналами

Витратою називається кількість рідини, що протікає через поперечний перетин потоку в одиницю часу. Залежно від одиниць вимірювання кількості рідини витрата може бути об'ємною Q (в м³/с) або масовою M (в кг/с). Точність виготовлення діаметру проточних малорозмірних каналів контролюється проливкою, тривалість якої визначається з точністю $\pm 0,1$ с. Проливання проводиться технічною водою при кімнатній температурі.

Об'ємний метод вимірювання витрати полягає в вимірі обсягу рідини, що пролилася через випробувану деталь за строго певний відрізок часу, і в порівнянні його з витратою, заданою в технічних умовах на деталь даного типу [13].

Схема об'ємного методу вимірювання витрати наведена на рис. 1.28. Послідовність вимірювань: встановити випробувальну деталь в режимний пристрій 5, відкрити кран 1. Включити пристрій для випробувань, попередньо поставивши тиск рідини (вказане в конструкторській документації або технічних умовах на деталь) і час випробування. При включенні електромагнітний механізм 3 переведе стенд в робочий стан і автоматично через певний час обробки зупинить випробування. За ризиками на водомірному склі 9 можна визначити величину об'ємної витрати.

Для визначення нерівномірності розподілу рідини по колу конуса розпилювання застосовують метод, в основі якого лежить принцип отримання результату за рахунок того, що виконується безпосереднє і безперервне вимірювання ваги (маси) рідини, що проходить в заданому секторі факела проточного отвору, підсумовування збільшень ваги (маси) і безперервне визначення похідною від збільшення, тобто вагових витрати, а не опосередковане визначення даних параметрів через функціональну залежність об'єму рідини і перепаду тиску газу в мірній ємності (рис. 1.29) [51].

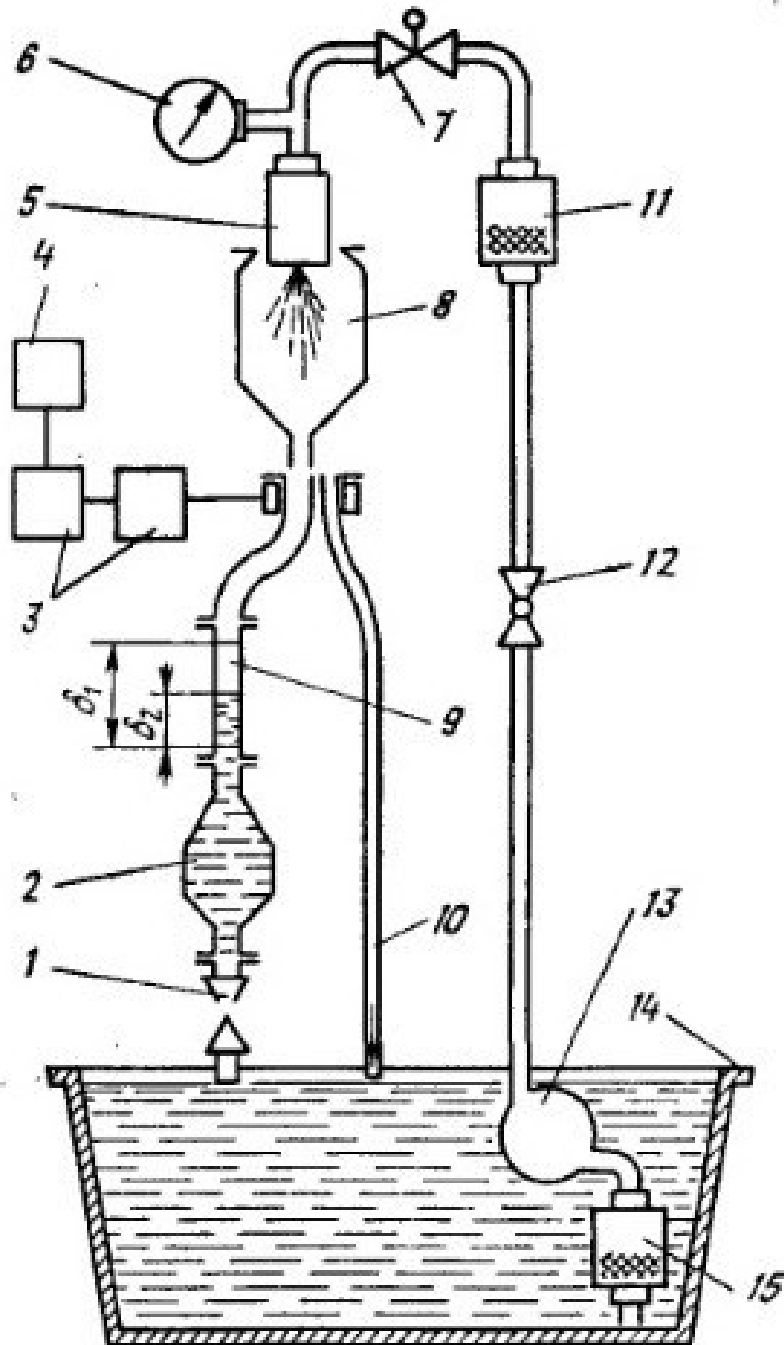


Рисунок 1.28 - Схема об'ємного способу вимірювання витрати рідини. 1 - кран запірний; 2 - мірний бак; 3 - електромагнітний механізм; 4 - електросекундомір; 5 - затискний пристрій; 6 - манометр; 7 - кран дросельний; 8 - приймальня ємність; 9 - водомірне скло; 10 - слив; 11 - фільтр; 12 - кран прохідний; 13 - насос; 14 - бак з водою; 15 - фільтр

Пристрій містить корпус 1 з затискачем для деталі 3, поворотний приймач розпилює рідину 4 з відбивачем 6 і приводним механізмом 7, ресивер 8 і зливний механізм 10. Особливість способу в тому, що з метою підвищення

точності визначення окружний нерівномірності витрати рідини і продуктивності вимірювальних операцій пристрій забезпечений ваговим датчиком 13, які мають автоматичні ваги з датчиком розбалансу 17, підсилювачем 18 і електросиловим компенсатором, вантажо-приймальною ємкістю, з'єднаної з ресивером за допомогою трубопроводу і встановленої на вагах, двома опорними резисторами 22 і 23, встановлений на виході підсилювач послідовно з компенсатором, двома аналогово-цифровими перетворювачами 24 і 31, реєстратором набраної ваги рідини 25, датчиком дози, реєстратором поточної витрати рідини 32, хронометром 26, диференціатором 28, підсилювачем 29 і потенціометром 30.

Причому один з опорних резисторів підключений через один з аналогово-цифрових перетворювачів до реєстратора набраного сумарної ваги рідини 25, датчиком дози 27 і хронометром 26, а другий опорний резистор через диференціатор 28, масштабуючий підсилювач 29 і потенціометр 30 підключений до іншого аналогово-цифрова перетворювача і реєстратору текучої витрати рідини 32.

Для випробувань деталей 2 встановлюють в затиск 3 і подають робочу рідину. Двигун 35 через приводний механізм 7 обертає приймач 4 на 360°, і за допомогою електроніки відбувається безперервна фіксація збільшення маси і визначення вагового витрати по всьому конусу розпилу.

Пристрій для випробування деталей з малорозмірних проточними каналами дозволяє отримати ефект значного підвищення точності визначення окружної нерівномірності витрати рідини і продуктивності вимірювальних операцій за рахунок автоматизації процесу визначення витрати безпосередньо в одиницях ваги (маси) і виключення непропорційних функціональних залежностей витрати від вторинних параметрів (тиск повітря, обсягу і т.д.).

Пристрій для визначення ефективного прохідного перетину проточного отвору застосовують при випробуваннях паливної апаратури двигунів для визначення прохідного перетину деталей типу форсунок і паливопроводів високого тиску [58,60]. Його схема показана на рисунку 1.30.

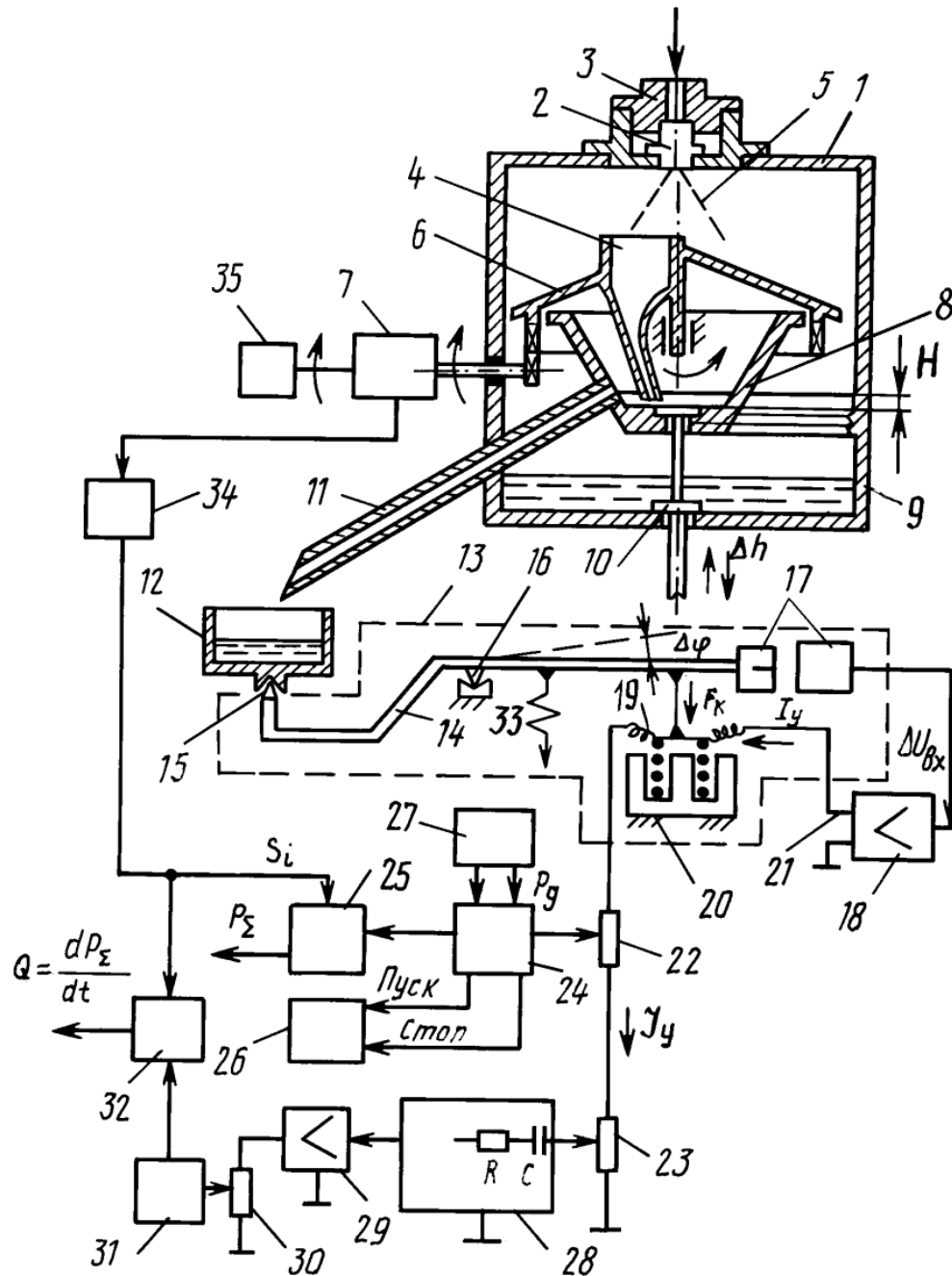


Рисунок 1.29 - Схема пристрою для визначення конуса розпилу:

1 - порожнистий корпус; 2 - випробувана деталь; 3 - затиск; 4 - поворотний прийом-ник; 5 - розпилюють рідину; 6 - відбивач; 7 - приводний механізм, 8 - ресивер; 9 - спусковий клапан; 10 - зливний клапан; 11 - трубка; 12 - вантажопідіймальна ємність; 13 - ваговий датчик; 14 - ваги; 15, 16 - опорні вузли; 17 - датчик розбаланса; 18 - підсилювач; 19 - котушка; 20 - магніт; 21 - вихід підсилювача; 22, 23 - резистори; 24, 31 - аналогово-цифровий преобразователь; 25 - реєстратор; 26 - хронометр; 27 - датчик; 28 - диференціатор; 29-підсилювач; 30 - потенціометр; 32 - реєстратор поточної витрати рідини; 33 - пружина; 34 - синхронізуючий пристрій; 35 - двигун

Робота пристрою відбувається наступним чином. При установці перемикача розподільника 3 в неробочий стан і включенні електронасоса 2 паливо під тиском, створювальним електронасосом 2, з бака 1 по нагнітальному паливо проводу 4 через розподільник 3 надходить в емкість гідропневмоакумулятора 8, де стискає повітря до заданого тиску (наприклад, до 5 МПа), що підлягає контролю за манометром 6. Потім електронасос 2 вимикають, а перемикач розподільника 3 переводять в робоче положення, при якому нагнітальний паливопровід 4 перекривається, а зливний паливопровід 5 повідомляється з порожниною гідропневмоакумулятором 8. Одночасно з цим включають секундомір. Під дією тиску стисненого повітря паливо з гідропневмоакумулятора 8 через зливний трубопровід 5 проходить через випробовувану деталь 7 (або паливопровід високого тиску) і зливається в бак 1 до тих пір, поки тиск в гідропневмоакумуляторі 8 не впаде до заданого кінцевого тиску (наприклад, до 1 МПа). Одночасно з цим секундомір вимикають.

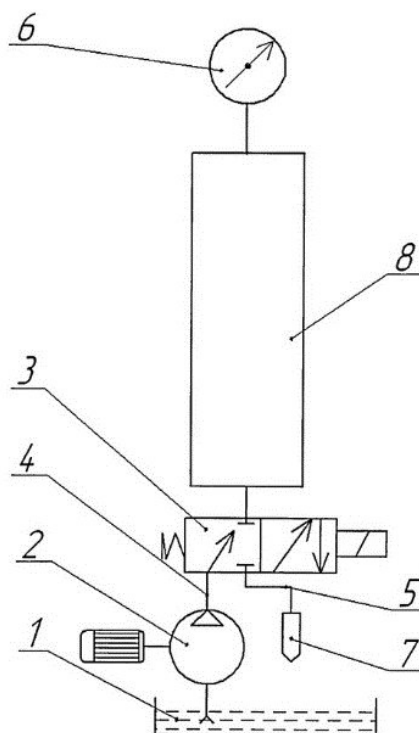


Рисунок 1.30 - Схема пристрою для визначення ефективного прохідного перерізу: 1 - паливний бак; 2 - електронасос; 3 - розподільник; 4 - нагнітальний паливопровід; 5 - зливний паливопровід; 6 - манометр; 7 - випробовувана деталь; 8 - гідропневмоакумулятор

Знаючи за результатами випробування початковий і кінцевий тиск, обсяг стисненого повітря в гідропневмоакумуляторі і час падіння тиску повітря в гідропневмоакумуляторі від заданого початкового до заданого до кінцевого, розраховують ефективний прохідний перетин проточного каналу.

Існує спосіб селективного складання розпилювального пакета деталей з гідравлічними параметрами. Пропонований спосіб реалізується в чотири етапи. На першому виконується контроль (випробування) всіх наявних деталей розпилювального пакета з метою виявлення фактичних значень їх гідравлічних параметрів (витрата палива R і нерівномірність розпилу палива χ). Умови випробувань максимально точно імітують роботу деталей. Для деталей типу "перехідник" визначається тільки параметр витрати палива. Для деталей типу "розпилювач" визначаються параметри витрати і нерівномірності розпилу палива. На другому етапі деталі упорядковані на комплекти (розпилювальні пакети) на підставі даних, отриманих на першому етапі. Деталі відбираються за параметрами витрати палива R і нерівномірних його розпилу χ .

Як гранично допустимого відхилення за параметрами витрати палива, викликаного коригуванням по нерівномірності розпилу χ , приймає 5% поріг від досягнутих значень по витраті палива. Завдання технологічного управління комплексними параметрами ε і ψ (ψ - щільність стиків між деталями паливного тракту; ε - зміщення каналів паливного тракту від розрахункового положення) вирішується на третьому етапі. Кожен підібраний комплект являє собою три окремі деталі, взаємодію між собою в процесі складання (перехідник, розпилювач I контуру, розпилювач II контуру). Технологічні похибки деталей по параметрам, що входять до складу ε і ψ , при складанні можуть порушити розрахунковий стан паливного тракту і привести до відхилень експлуатаційних показників. При складанні розпилювального пакета вплив на вихідні параметри деталі надає відносне кутове розташування деталі 2 (рис. 1.31). Кожному підібраний розпилювальний пакет необхідно випробувати в зборі.

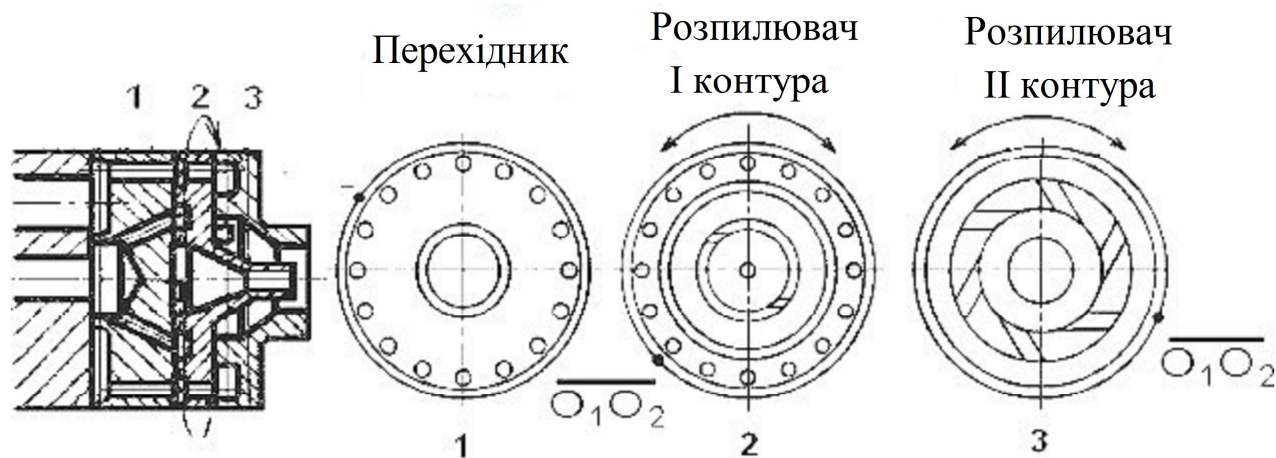


Рисунок 1.31 - Схема розташування деталей розпилювального пакета з
можна кутовими положеннями

Деталь "перехідник" залишається нерухомим. Випробування проводиться за два циклу. У першому циклі розпилювач II контуру залишається нерухомим. Розпилювач I контуру повертається на 90° в положення 1. У цьому положенні виконується визначення витрати палива і нерівномірності розпилу палива для I ступеня. Після закінчення проливки розпилювач I контуру повертається ще на 90° в положення 2, і випробування повторюється. Таким чином, деталь проходить чотири фіксованих кутових положення (через 90°) і чотири випробування.

З отриманих пар значень гідравлічних параметрів вибирається найкраща. Фізичний сенс відбору полягає в наступному: чим кращі умови контактування мають деталі розпилювального пакета, тим більше витрата і менше нерівномірність розпилу палива. Розпилювач I контуру встановлюється в положення з найбільшим досягнутим витратом і найменшою нерівномірністю розпилу. На другому циклі обертається деталь і розпилювач II контуру. Розпилювач I контуру залишається в оптимальному положенні, досягнутому на першому циклі. Розпилювач II контуру аналогічним чином по черзі проходить чотири фіксованих положення через 90° . У кожному положенні визначаються значення витрати і нерівномірності розпилу по обидвум сходам (I + II ступінь). За результатами другого циклу випробувань визначається найкраще кутове положення розпилювача II ступені. Принцип відбору значень аналогічний

першому циклу. Отримане положення розпилювачів I і II контура є оптимальним з точки зору гідравлічних параметрів. Описаний порядок дій повторюється з усіма маючими розпилювальними пакетами.

На четвертому етапі проводиться остаточне складання деталей з каналами з урахуванням використання отриманих комплектів розпилювальних пакетів. Безпосередня збірка виконується за існуючою технологією, але без використання доводочних операцій.

В якості технічних засобів для забезпечення розробленого способу збірки пропонуються спеціальне технологічне пристосування випробувань установки, які можуть застосовуватися для виконання випробувальних як окремих деталей, так і скомплектованих розпилювальних пакетів. Основним призначенням пристосування є забезпечення процесу підбору взаємного кутового розташування деталей розпилювального пакета (3-го етапу способу збирання).

Пропонована випробувальна установка відрізняється від існуючих аналогів сучасної елементної бази і більш високими техніко економічними показниками [6; 3].

1.6 Мета та задачі дослідження

Метою роботи є розробка технології, що забезпечує підвищення експлуатаційних характеристик високонапірних систем охолодження і поєднує в одній операції виборчу комбіновану обробку вузьких щілинних каналів середовищем, що проводить струм та володіє абразивними властивостями, з одночасним параметричним контролем робочого тіла.

Для досягнення поставленої мети були вирішені наступні завдання:

1. Наукове обґрунтування вибору схеми технологічного забезпечення експлуатаційних показників щілинних каналів на основі поєднання параметричного випробування з комбінованою обробкою.

2. Дослідження механізму формування орієнтованого потоку абразивних частинок низької концентрації для стабілізації експлуатаційних показників щілинних проточних каналів при одночасному впливі низьковольтного

електричного поля шляхом поєднання механічної та електричної складової процесу обробки в один процес.

3. Створення нового технологічного способу комбінованої електрохімікоабразивної обробки вузьких щілинних каналів, підвищує стабільність видаткових характеристик після комбінованої обробки з організацією об'єктивного паралельного контролю.

4. Обґрунтування граничних значень концентрації абразивного наповнювача, що забезпечують ефективність анодного впливу при комбінованій обробці середовищем з керованою енергією її механічного впливу за рахунок дозування абразивних властивостей.

5. Обґрунтування робочих діапазонів технологічних режимів комбінованої раніше обробки вузьких проточних каналів абразивно насиченою середою низької концентрації в умовах анодного розчинення матеріалу.

6. Розробка режимів процесу обробки щілинних каналів з комбінованим електрохімікоабразивним впливом, що забезпечує не тільки вибірковість видалення мікровиступів поверхні, але і усунення мікродефектів для забезпечення якості високонапірних експлуатаційних витратних характеристик.

7. Розробка спеціальних засобів технологічного забезпечення комбінованої обробки щілинних каналів з комбінованим електрохімікоабразивним впливом, що дозволяють поєднати операції доведення мікропрофілю і контролю високонапірних експлуатаційних витратних характеристик.

2 МЕТОДОЛОГІЯ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЯКОСТІ ОБРОБКИ ДЕТАЛЕЙ З ЩІЛЬНИМИ КАНАЛАМИ

2.1 Робочі гіпотези

1. Одиночне використання механічного впливу стабільно не реалізується в каналах перетину з висотою менше 2 мм. Електрохімічні ж методи ефективні для обробки початково геометрично правильних і осесиметричних поверхонь, що і дозволяє отримувати задану витрату на попередньо точно оброблених каналах, наприклад, після свердління або прошивання.

2. Обробка потоком рідини з абразивом дозволяє виправляти локальні похибки форми, так як абразив активніше працює в місцях зменшення умовного проходу і знімає матеріал саме в цих місцях, які потребують додаткового зняття матеріалу.

3. Електрохімічний вплив інтенсифікує процес механічного зняття мікровиступів, скорочуючи час обробки і надмірне анодне розчинення матеріалу в місцях вихідних дефектів поверхні.

4. Замір витрати проходить через отвір електроліту, при електрохімічній обробці дозволяє контролювати масову витрату рідини і при досягненні потрібного показника припиняти прокачування електроліту. Це забезпечить отримання каналу з точним, заздалегідь встановленою витратою і дозволить вчасно помітити й усунути можливе забруднення в каналі.

5. Поєднання в одному процесі двох видів впливів: механіко-абразивного і електрохімічного з одночасним виміром витрати абразивонасиченого електроліту - дозволяє одночасно забезпечувати необхідну геометричну форму перетину каналу, необхідну шорсткість і задану витрату.

6. За рахунок зміни концентрації абразиву і напруги струму можна керувати процесом формування мікрогеометрії поверхні із заданими характеристиками.

2.2 Вибір методу технологічного забезпечення експлуатаційних показників деталей з малорозмірними щілинними каналами

При отриманні каналів в деталях, що працюють в умовах високих навантажень, агресивного середовища і підвищених температур, важливе значення набувають питання забезпечення конструктивно і технологічно обумовлених експлуатаційних параметрів.

При виготовленні і наступних випробуваннях деталей виявляється неприпустимо високий відсоток деталей з експлуатаційними параметрами, відмінними від заданих. виправлення або доведення таких деталей є трудомісткою, нетехнологічною операцією. Забезпечення вимог по витраті і якістю розпилу при виготовленні цих виробів досягалося в основному застосуванням традиційних методів лезвої обробки, використанням електрохімічного доведення і застосування різних режимів обробки.

Об'єктом дослідження є деталі з проточними поверхнями малого перетину, найбільш проблемними з яких є деталі з щілинними каналами: кільця завіси (рис. 2.1 і рис. 2.2). Вони застосовуються в камерах згоряння авіаційних газотурбінних двигунів, РРД, в технологічному обладнанні, топкової техніці, хімічної промисловості [94].

Основна технологічна складність полягає в тому, що щілинні канали заввишки менше 2 міліметрів не дозволяють досить ефективно використовувати традиційні засоби металообробки, а так само контролю показників якості поверхні і її геометрії при профілювання каналів в процесі виготовлення таких деталей.

Крім іншого, існуючі методи обробки щілинних каналів які залишилися після попередньої обробки дефекти. Ці дефекти дуже складно виявити, так як вони знаходяться у важкодоступних місцях і після складання їх практично неможливо усунути, тому що найчастіше збірка проводиться нероз'ємними методами.

Рішення завдання технологічного забезпечення заданих експлуатаційних показників таких деталей зводиться до отримання стабільної витрати та

інших спеціальних вимог (наприклад, забезпечення кута розпилу робочого тіла).

Відомо кілька перспективних технологічних методів обробки деталей з малорозмірними проточними каналами в залежності їх форми і забезпечуваних експлуатаційних параметрів (глава 1):

- дорнування [74];
- електроерозійне прошивання [97];
- доведення проточного отвору за допомогою голки [52];
- струменева електрохімічна обробка [55,78];
- абразивно-екструзійна обробка деталей [54];
- адитивні технології [24].

Налаштування режимів комбінованого доведення проводиться з використанням зразків-свідків з контрольного матеріалу (12X18M10T), що обробляється на оснащенні (рис. 2.1). Вибір оптимальних режимів комбінованої обробки, що забезпечують стабільність експлуатаційних показників деталей з малорозмірними проточними каналами, проводиться з урахуванням умови забезпечення видаткових і точнісних характеристик деталі без наступного доведення.

Попередня експериментальна перевірка розрахункових параметрів комбінованої обробки щодо забезпечення необхідної витрати підтвердила можливість їх використання при проектуванні технологічного процесу.

Отримані результати дають можливість реалізувати комбіноване доведення малорозмірних проточних каналів із забезпеченням заданих показників якості. Типовий об'єкт досліджень - циліндр зависи з висотою щілинного каналу 1,6 мм (рис. 2.2).



Рисунок 2.1 - Зразок-свідок у оснащенні



Рисунок 2.2 - Типова деталь: циліндр завіси

2.3 Аналіз можливих технологічних схем комбінованої обробки щілинних каналів

Дрібнорозмірні деталі з проточними щілинними каналами (рис. 2.3) мають різну геометрію, можуть виконуватися з важкооброблюваних зносостійких і жароміцних матеріалів. Малі розміри перетинів не дозволяють досить ефективно використовувати традиційні засоби металообробки і контролю показників якості поверхні, а так же геометрії.

Тому контроль забезпечення заданих експлуатаційних показників проводиться після остаточного виготовлення деталей при параметричних випробуваннях на спеціальних стендах у складі агрегату або індивідуально з подальшою настройкою, що є дуже складною і дорогою операцією.

Особливо великі труднощі в цьому випадку викликає необхідність чистового калібрування робочих ділянок каналів за результатами випробувань, що ставати рівноцінним процесу їх нового формоутворення.

Спроби скорочення обсягу випробувань і допрацювання за рахунок селекційного добору деталей [73] наводять в кінцевому підсумку до широкого розкиду кінцевих показників, що не забезпечує надійність виробів і їх робіт здатність в екстремальних умовах експлуатації.

Запропоновані та обґрунтовані автором гіпотези дозволили розробити новий спосіб комбінованої електрохімічної обробки з додаванням абразиву в робочу рідину, що прокачується через канал деталі. До особливостей запропонованого способу відноситься можливість виборчого виправлення геометричних дефектів поверхні від попередньої обробки. Останнє дозволяє підвищити стабільність отримання експлуатаційних показників за рахунок отримання стабільного мікропрофілю поверхні і виборче вирівнювання мікропрофілю поверхні в умовах обмеженого простору.

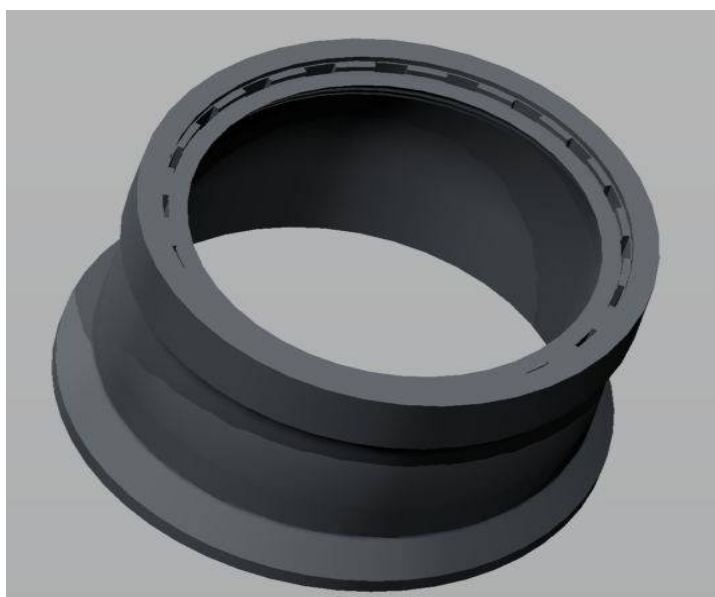


Рисунок 2.3 - Типова деталь з щілинними каналами, 3D модель

На рисунку 2.4 показана модель комбінованої електрохіміко абразивного доведення деталі з каналами.

Суть методу полягає в проходженні потоку токопровідної абразивонасиченої рідини низької концентрації 5 через оброблювані канали деталі 1. На технологічну систему накладено струм низької напруги (8-10 В), і вона витримується при певному режимі протягом часу, необхідного для отримання заданої витрати при постійному тиску рідини.

Обробка потоком рідини з абразивом 3 дозволяє виправляти локальні похибки форми 4, так як абразив активніше працює в місцях зменшення умовного проходу і знімає матеріал саме в цих місцях, які потребують додаткового зняття матеріалу. Електрохімічний вплив інтенсифікує процес механічного зняття матеріалу з мікровиступів, скорочуючи час обробки [85].

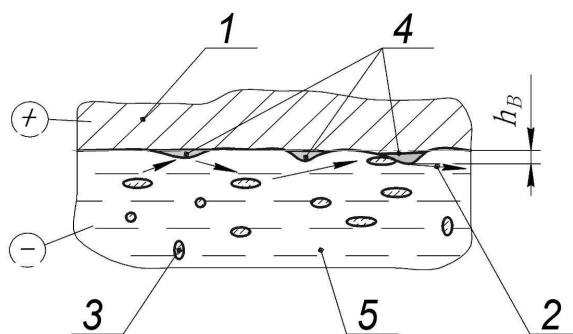


Рисунок 2.4 - Внутрішня поверхня каналу в процесі електрохіміко-абразивної доводки:

1 - оброблювана деталь; 2 - напрямок руху одиничного зерна абразиву при обробці; 3 - абразивне зерно; 4 – місцеві мікровиступи; 5 – токопровідна рідина; h_B – висотам мікро виступів

При механічному контакті абразивного зерна з виступами зняття матеріалу відбувається за рахунок мікрорізання і продуктивність процесу залежить від концентрації абразиву, орієнтації одиничного абразиву в момент взаємодії з поверхнею, розмірів гранул і профілю каналу. У разі анодного розчинення зусилля контакту буде знижуватися за рахунок рідинної і оксидної плівки між заготівкою та гранулою, а також внаслідок

анодного розчинення вершин нерівностей [91] на поверхні в місцях контакту з гранулою, що знижує опір тертя.

Для проведення експериментальних досліджень з комбінованої обробки щілинних каналів обладнання для електрохімічного доведення було модернізовано і вбудовано в пролівочний стенд для виміру витратних характеристик.

Сутність роботи такої технологічної системи, полягає в наступному:

- 1) попередній вимір витрати через оброблюваний канал;
- 2) комбінована електрохімічна обробка з додаванням абразивного наповнювача;
- 3) промивка системи від залишків абразиву;
- 4) контрольний вимір витрати;
- 5) при необхідності повторна комбінована обробка на скоригованих режимах.

Замір витрати проходить через отвір електроліту при електрохімічній-абразивній обробці дозволяє контролювати масову витрату рідини і при досягненні потрібного показника припиняти прокачування електроліту. Це забезпечує отримання каналу з точним, заздалегідь встановленою витратою. Поєднання в одному процесі двох видів впливів: механіко-абразивного і електро-хімічного з одночасним виміром витрати абразивонасиченого електроліту дозволяє одночасно забезпечувати необхідну геометричну форму перетину отвору, необхідну шорсткість і задану витрату. За рахунок зміни концентрації абразиву і напруги струму можна керувати процесом формування мікрогеометрії поверхні із заданими характеристиками.

Таким чином, запропонована нова технологічна схема обладнання для об'єднання комбінованого процесу та методів контролю витратних характеристик проточних поверхонь, що дає можливість істотного скорочення термінів і трудомісткості технологічного доведення нової техніки [71]. Створені технічні рішення є патентоспроможними.

2.4 Основні критерії, що визначають якість комбінованої обробки деталей з проточними щілинними каналами

При обробці деталей з щілинними каналами основними показниками якості, що визначають якість обробки, є сталість витрати і сталість тиску (відсутність стрибків) на зрізі щілини.

Це залежить визначальною мірою від:

- форми утворюваного каналу (рис. 2.5);
- мікропрофілю поверхні (рис. 2.6);
- геометричної точності вихідної кромки (рис. 1.12).

Досяжні показники якості щілинних каналів в залежності від різних способів обробки представлені в таблиці 2.1.

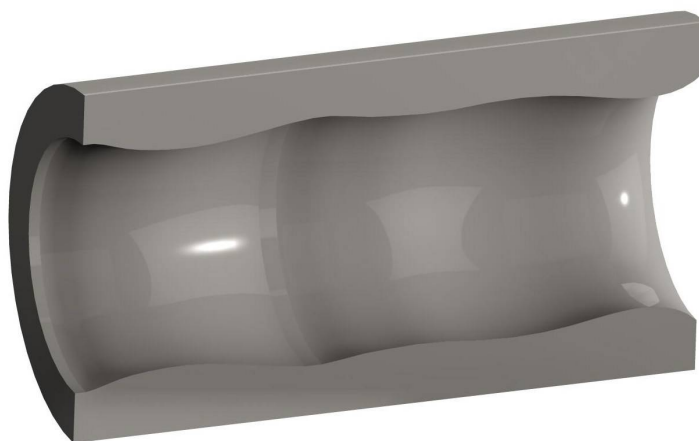


Рисунок 2.5 - Стилїзована форма утворюваного каналу, 3D модель

Таблиця 2.1 - Способи обробки каналів і одержувані експлуатаційні параметри

Спосіб обробки	Технологічні та експлуатаційні показники					Типові деталі	Примітка
	Шорсткість, Ra мкм	Точність (квалітет)	Ступінь наклепу, %	Глибина залягання дефектного шару, мкм	Дисперсія витрати, %		
1	2	3	4	5	6	7	8
свердління	3,2	H12	15	30	10	форсунка	

Продовження таблиці 2.1

фрезерування	6,3	H12	10	50	12		
доведення (Дорнування)	0,8	H8	20	45	4		
розгортання протягування	0,8	H7	3	5	5		
Електроерозійне прошивання	2,5	H9	2	20	8	Кільце завіси	Розрахункове значення
Електрохімічна обробка	0,4	H8	-	5	6		
Комбінована обробка (ЕХО + Абразивний наповнювач)	0,4	H7	-	5	3		

Аналіз технологічних можливостей різних методів обробки каналів складного профілю показує, що найбільш відповідним методом є комбінована обробка, що поєднує в собі електрохімічну обробку і використання абразивного наповнювача.

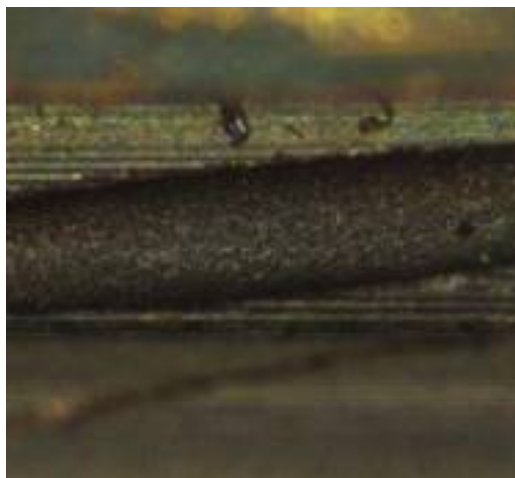


Рисунок 2.6 – Мікропрофіль поверхні проточного каналу з характерними дефектами

2.5 Лабораторне та експериментальне обладнання

Попереднє формоутворення малорозмірних проточних каналів проводили на спеціалізованій установці для прошивання каналів в кільцях зависи і форсунки (рисунок 2.7). Параметри установки наведені в таблиці 2.2.

Працездатність запропонованого способу обробки перевірялася на лабораторному стенді для комбінованої електрохімікообразівної обробки проточних каналів. Загальний вигляд установки представлений на рисунку 2.8, схема його приведена на рисунку 2.10.

Таблиця 2.2 - Технічні характеристики експериментальної установки

Найменування	значення параметра
Розміри координатного столу, мм	140x140
Хід координатних переміщень: x, y; мм	25
Установче переміщення каретки, мм	80
Робоче переміщення вібратора, мм	40
Діаметри прошивання отворів, мм	0,015-0,5
Найбільша глибина прошивання отворів, діаметрів електрода	15-30
Точність виконання отворів, мм	± 0,002
Швидкість прошивки отворів 0,015-0,1 мм в твердому сплаві ВК-6М, мм / хв	0,5-1,5
Шорсткість обробленої поверхні, R _a мкм	0,1-0,5
Частота слідування імпульсів, кГц	44,66,100,200
Тривалість імпульсів струму, мкс	0,05-0,5
Амплітуда імпульсів струму, А	2-25
Частота коливань електрода, Гц	200-800
Споживана потужність, кВт	0,25
Між електродна середа	дистильована вода
Витрата води, л / год	4
Габаритні розміри, мм	720x650x1400
Маса, кг	160

Після отримання попередніх каналів в зразках імітаторах, вони піддавалися комбінованій обробці з додаванням абразиву.

Розрахунковим шляхом з подальшим експериментальним підтвердженням встановлені режими електрохімікоабразивного доведення: напруга $U = 8-10$ В, анодна щільність струму $500 \div 1000$ А / м², концентрація абразиву до 2%.

Як струмопровідний хімічно активний компонент робочих середовищ традиційно використовуються кислоти і луги, що входять до складу розчинів і електролітів (H_2SO_4 ; $NaNO$; Na_2SO_4 ; CrO_3) а в даній роботі між електродним середовищем виступає технічна вода. Це дозволяє скоротити агресивну дію рідини на технологічно точну техніку і не використовувати дороге корозійностійке обладнання [31].



Рисунок 2.7 - Загальний вигляд установки для електроерозійного прошивання каналів



Рисунок 2.8 - Загальний вигляд станда для комбінованої електрохімікоабразивної обробки

Відпрацювання режимів проводилася на зразках-імітаторах, що містять малорозмірний щілинний канал. Для експериментів була спроектоване оснащення, що дозволяє проводити комбіновану обробку зразків-імітатора. Імітатор в оснащенні представлений на рисунку 2.9.

Для експериментального дослідження режимів комбінованої обробки отвору імітаторів типові деталі були піддані анодному розчиненню з абразивним впливом і з паралельним виміром витрати. Аналіз результатів

експерименту дозволив визначити оптимальні інтервали часу обробки з урахуванням забезпечення витрати, заданою технічною документацією.



Рисунок 2.9 - Зразок-імітатор в оснащенні

Для проведення експериментальних досліджень з комбінованої обробки щілинних каналів в установку для електрохімічної доведення був вбудований поливальний стенд для виміру витратних характеристик. Сутність роботи такої технологічної системи полягає в наступному:

- перед початком електрохімічної обробки з додаванням абразивного наповнювача виробляють вимір витрати рідини через проточний канал;
- для проведення комбінованої обробки заповнюють магістраль токопровідною рідиною з додаванням абразиву і включають установку для комбінованої обробки. Після закінчення розрахункового часу установку вимикають і проводять промивання системи;
- після проведення обробки необхідний контрольний вимір витрати;
- при відхиленні значень отриманої витрати від заданих значень проводять повторну комбіновану обробку на скоригованих режимах.

Послідовність роботи установки, представлена на рисунку 2.10, полягає в наступному: перед початком електрохімічної обробки з додаванням

абразивного наповнювача виробляють вимір витрати рідини через щілинний канал. Для цього оброблювану деталь поміщають в пристрій для комбінованої обробки 1, вентилі 4 переводять в положення I, включають насос 7, далі подається рідина до досягнення необхідного напору, який відстежують за манометром 2. Знімають показники з витратоміра 5. За отриманим витратом вибирають режими і час обробки.

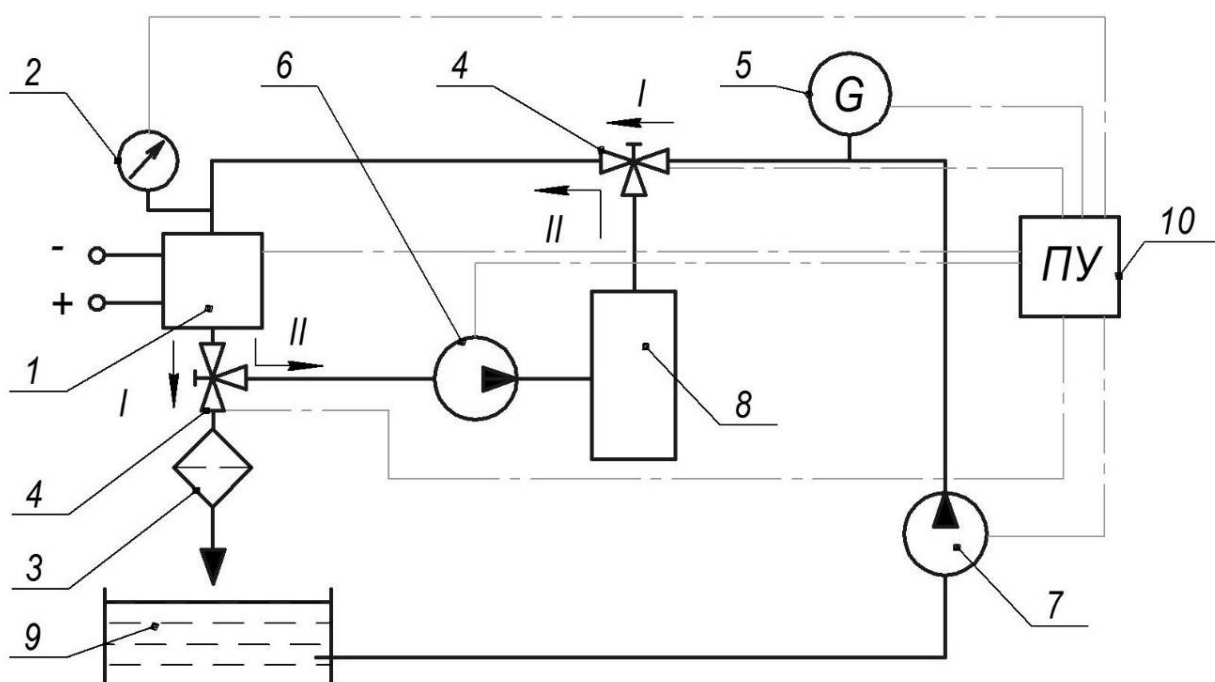


Рисунок 2.10 - Робоча схема установки для комбінованої електрохімічної доведення деталей з малорозмірних щілинними каналами:
 1 - установка для комбінованої обробки; 2 - манометр; 3 - фільтр; 4 - вентиль стендова триходовий; 5 - датчик витрати; 6, 7 - насоси;
 8 - ємність з абразивом; 9 - ємність з технічною рідиною; 10 - пульт управління

Для проведення комбінованої обробки вентилі 4 переводять в положення II, включають насос 6, поєднуючи магістраль з ємністю з додаванням абразиву 8, і включають установку для комбінованої обробки 1. За протягом розрахункового часу установку 1 вимикають, стендові вентилі 4

переводять в положення I і проводять промивання системи. Включення насосів 6 і 7, перемикання вентилів 4 відбуваються автоматизовано за допомогою пульта управління 10. На пульті також відображаються параметри тиску і витрати.

Після проведення обробки необхідний контрольний вимір витрати. При відхиленні значень отриманої витрати від заданого проводять повторну комбіновану обробку на скоригованих режимах.

Після закінчення обробки виробляють контроль на сертифіцірованному стенді.

Замір витрати проходить через канал електроліту при комбінованій обробці дозволяє контролювати масову витрату рідини в режимі онлайн (рис. 2.11) і при досягненні потрібного показника припиняти обробку. Це забезпечує отримання каналу з точним, заздалегідь встановленим витратом. Поєднання в одному процесі двох видів впливів: механікоабразивного і електрохімічного з виміром витрати абразивонасиченого електроліту дозволяє одночасно забезпечувати необхідну геометричну форму перетину отвору, необхідну шорсткість і задані витрати. За рахунок зміни концентрації абразиву і напруги струму можна керувати процесом формування мікрогеометрії поверхні із заданими характеристиками [90] .

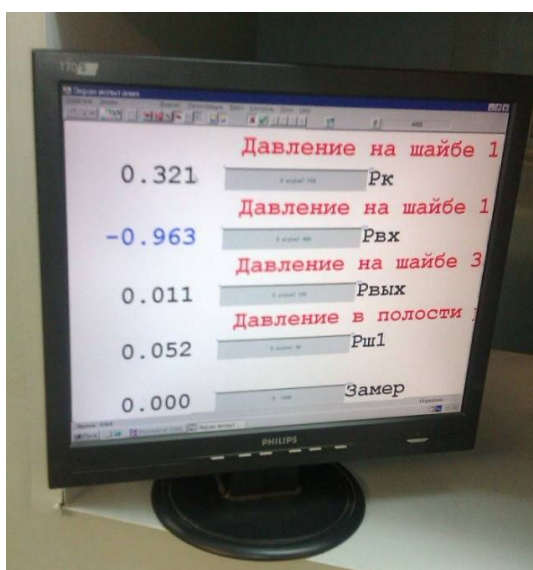


Рисунок 2.11 - Візуалізація під час випробування

Ця технологічна схема обладнання є унікальною, оскільки дозволяє поєднати комбінований процес обробки з контролем витратних характеристик оброблюваних деталей. Причому контроль проходить безпосередньо під час обробки. Дана технологічна схема дозволяє значно скоротити трудомісткість виготовлення технологічно складних виробів нової техніки.

2.6 Програма виконання роботи

Теоретична частина дисертації включає моделювання процесів руху абразиву з накладенням механізму електрохімічної взаємодії, їх впливу на поверхню каналу деталі. Результатом цього етапу роботи є створення методики управління показниками якості поверхневого шару, що дозволяє оптимізувати технологічні режими обробки поверхонь деталей з щілинними каналами.

Отримані закономірності процесу підтверджуються на лабораторному і експериментальному обладнанні. Збіжність результатів розрахунку і експерименту обмежується за критерієм імовірності не нижче 0,9. Для розробленого технологічного процесу повинні бути створені дослідні установки і засоби технологічного оснащення, визначені параметри абразиву, які в даному випадку є режимами комбінованої обробки.

Наступна частина роботи включає обґрунтування можливості використання отриманих результатів для деталей з щілинними малорозмірними каналами типу кілець завіси, золотників, щілинних форсунок. Для цього виконано ряд досліджень експлуатаційних властивостей виробів, оброблених комбінованими методами.

Заключною частиною роботи є реалізація отриманих результатів і впровадження розробленої технології, обладнання, засобів оснащення для виготовлення деталей з щілинними каналами і прогнозування області застосування комбінованого методу для різних видів деталей з такими каналами.

3 МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ КОМБІНОВАНОЇ ОБРОБКИ

3.1 Механізм процесу комбінованої обробки каналів

На базі висунутих гіпотез і розробленого способу досліджено механізм обробки, в якому розглядаються вплив як узагальнений керований процес формування необхідних стабільних показників систем охолодження з постійним параметричним контролем.

Суть методу полягає в проходженні потоку токопровідної рідини з додаванням низької концентрації абразиву через проточний канал оброблюваної деталі. На технологічну систему подають струм напругою 8-10 В, і вона витримується при постійному тиску робочої рідини, до моменту отримання заданої витрати. Абразивом виступає тонкий мікропорошок електрокорунду білого М3-М5.

Доведення потоком рідини, що містить абразив, дозволяє виправляти локальні похибки мікропрофілю, тому що абразивні зерна активніше знімають матеріал в місцях зменшення перерізу, що дає виправлення і вирівнювання мікропрофілю. Електрохімічний вплив прискорює процес зняття матеріалу з мікровиступів, це скорочує час доведення деталей наукомісткої техніки.

При механічній дії абразивних гранул на виступи, зняття матеріалу відбувається за рахунок мікрорізання, продуктивність процесу залежить від концентрації абразиву, розмірів гранул і профілю каналу. У разі анодного розчинення зусилля контакту буде знижуватися за рахунок рідини і оксидної плівки яка виникла між матеріалом і абразивним зерном, а також як наслідок анодного розчинення мікровиступів на поверхні в місцях контакту з абразивом, що зменшує опір тертя [67].

Схема контакту абразивних часток обробного середовища з поверхнею каналу показана на рисунку 3.1, аналіз якого показує, що для забезпечення видалення припуску при механічному контакті необхідно наступне:

– сила напору потоку робочого середовища $F_{прс}$ повинна бути більше опору тертя F_C ;

– результуюча сила опору F_{Ca} , орієнтована на потік, залежить від кута нахилу дотичній α до хвилястості мікропрофілю по довжині утвореного каналу і вимагає адаптивної стабілізації потоку токопровідної рідини з абразивом відповідної об'ємної концентрації [68, 70].

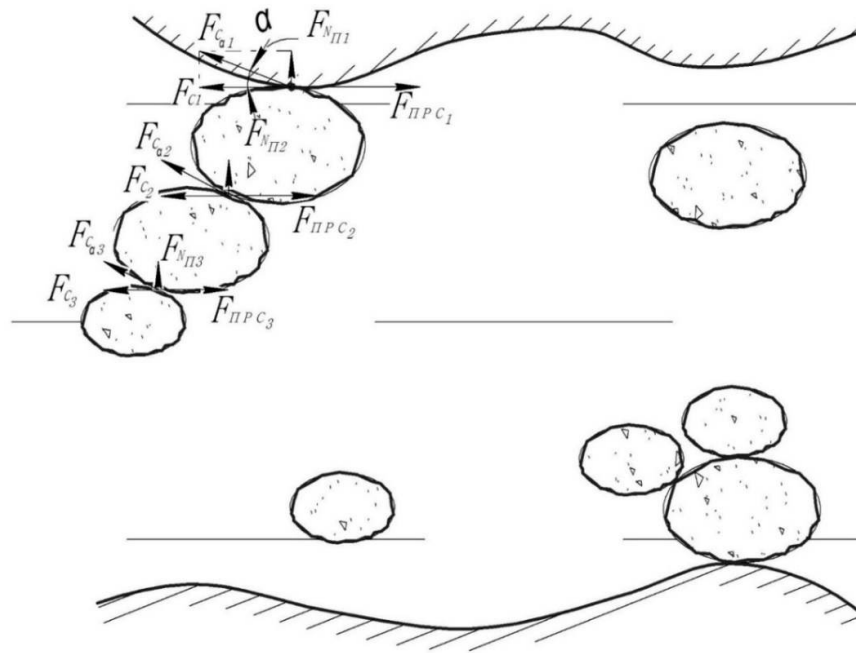


Рисунок 3.1 - Схема контакту гранул оброблювального середовища з поверхнею каналу

Це так, але сила нормального тиску $F_{нр}$ залежить, крім фізико-механічних умов контакту гранули з поверхнею, ще й від енергії приєднуються при співударенні абразивних гранул в потоці.

Сили мікрорізання абразивом підкоряються теорії імовірнісного закону і з великим ступенем вірогідності можуть вимірюватися здебільшого експериментально. Випадок, що виникає в обмеженому обсязі щільного каналу, специфічний тим, що є ефект приєднання маси зіткнення. Це також призводить і до часткового зміцнення матеріалу в зоні контакту.

3.2 Моделювання процесу комбінованої обробки каналів

Для отримання рішень, що відповідають умовам завдання моделювання, використаний підхід, що враховує фізичну сутність процесу [91]. У порівнянні з безрозмірною електрохімічною обробкою зовнішніх поверхонь механізм комбінованого доведення наскрізного малорозмірного щілинного каналу з перерізом прямокутної форми відрізняється меншою інерційністю оброблювального середовища через малий обсяг зони обробки. Однак до огляду дефектів вихідної форми, що виникають з технологічних причин, спостерігається явище закручування потоку з якоюсь кутовою швидкістю по поточному радіусу хвилястості яка утворює поверхні каналу щодо початку системи координат (рис. 3.2).

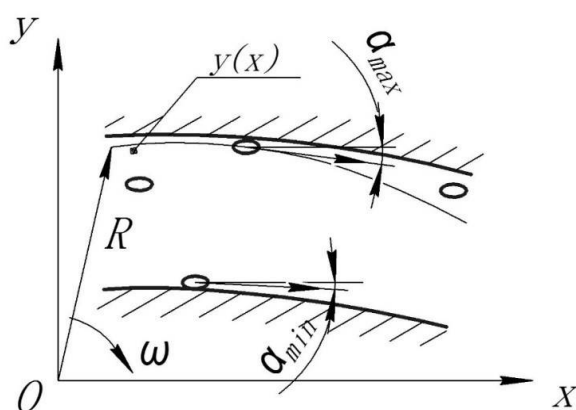


Рисунок 3.2 - Рух обробного середовища, насиченого абразивом, через елементарну ділянку щілинного каналу

При стаціонарних режимах комбінованого доведення рух потоку оброблювального середовища в каналі має бути сталим. Крім цього, існує критичне значення швидкості контактування, при якій збільшується швидкість відскоку частинок абразиву від оброблюваної поверхні і зростає ефект екранування в каналі. Відскочивши частки перешкоджають подальшим зіткненням і викликають формування застійних зон перед оброблюваною поверхнею. Щільність цих утворень зростає зі збільшенням швидкості руху

робочого середовища. Частота надання такої дії зростає при відхиленні від нормалі результуючого вектора впливу скомкованих абразивних зерен на оброблювану поверхню, що має місце при обробки каналів в технологічно важкодоступних зонах.

Складемо систему рівнянь стійкої рівноваги абразивних частинок масою m , що належать потоку всередині каналу, в проекціях на дотичний і нормальний напрямки до кривої $y(x)$ (рис. 3.3):

$$\begin{cases} mg \sin \alpha - F_{\text{тр}} - F_{\text{и}} \cos \alpha = 0 \\ mg \cos \alpha - N - F_{\text{и}} \sin \alpha = 0 \end{cases} \quad (3.1)$$

де N - елементне контактне зусилля нормального тиску;

$F_{\text{тр}} = \mu_{\text{рс}} N$ - сила тертя яка виникає між абразивними частинками, що перешкоджає їх осипанню вниз;

$F_{\text{и}} = m v^2 / x$ - інерційна сила, що відхиляє оброблювальну середу від прямої яка утворюється в каналі;

α - кут між віссю OX і напрямком дотичної до поверхні;

$\mu_{\text{рс}}$ - коефіцієнт тертя;

v - лінійна швидкість руху абразивних часток.

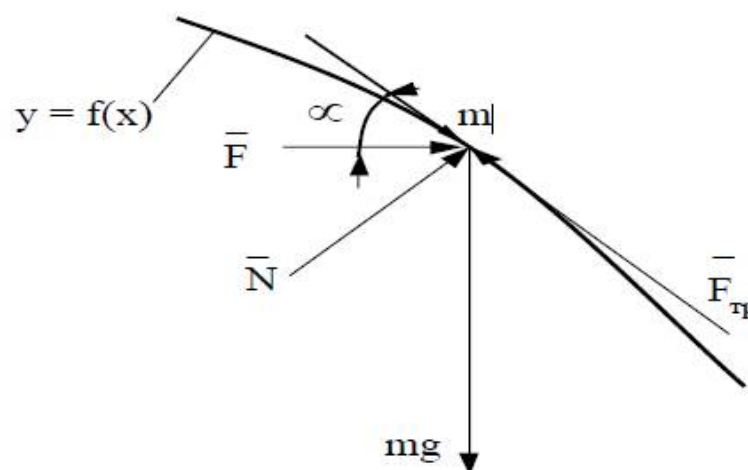


Рисунок 3.3 - Схема сил, що діють на одиничну частку абразиву в каналі

Таким чином:

$$\begin{cases} mg \sin \alpha - \mu_{\text{pc}} N - mv^2/x \cos \alpha = 0 \\ mg \cos \alpha - N + mv^2/x \sin \alpha = 0 \end{cases} \quad (3.2)$$

З урахуванням цього рівняння траєкторії руху гранули:

$$\frac{d(y)}{d(x)} = \frac{\mu_{\text{pc}} + v^2/gx}{1 - \mu_1 v^2/gx} \quad (3.3)$$

Провівши диференціювання (3.3) отримуємо:

$$\frac{d^2 y}{dx^2} = \frac{1 + \mu^2}{g(1 - \mu v^2/gx)} * \frac{d}{dx} \left(\frac{v^2}{x} \right) \quad (3.4)$$

Для стаціонарної фази процесу руху, коли кордон потоку частинок умовно приймаємо прямолінійним, тобто при $d^2 y / dx^2 = 0$

$$\frac{d}{dx} \left(\frac{v^2}{x} \right) = 0$$

звідки

$$y^2 = \frac{1}{\psi} x^{\frac{1}{2}} \quad (3.5)$$

де ψ – постійна, що враховує фізичні властивості робочого середовища.

Існує швидкість потоку, при якій рух абразивних частинок стає прямолінійним, назвемо її критичної v_k . Такий стан є критичним і він залежить від конструктивних особливостей каналу. v визначається опуклою або увігнутою формою оброблювальної поверхні, відповідно збільшуючись або зменшуючись з урахуванням кута розкриття каналу через хвилястість мікропрофілю його поверхні. Критична швидкість є інтегральною характеристикою як умов взаємодії абразивних частинок з оброблюваною поверхнею, так і фізико-механічними властивостями робочого середовища. Оцінюючи рух цих частинок, вводимо допущення:

- оброблювальне середовище є нестискаємим;
- при $v > v_k$ відбувається динамічний удар частинок об поверхню.

Для вирішення одновимірної задачі приймаємо окружну лінійну швидкість абразивних частинок у кожному елементною ділянці; окружні швидкості залежать тільки від однієї радіальної координати (наприклад x) і не змінюються по іншій. Тоді швидкості потоку розподіляються за степеневим законом:

$$v = \psi R \omega Q^n, \quad (3.6)$$

де R – поточний радіус хвилястості мікропрофілю, що визначає рух абразивної частинки потоку щодо поточного центру координати утворює профіль поверхні;

ω – кутова швидкість закручування по радіусу частинки потоку щодо поточного центру координат;

$Q = x / R$ – безрозмірна координата;

n – показник ступеня.

Прийmemo як безрозмірну кутову швидкості частинки потоку величину $\omega_e = \omega / \omega_{\text{до}}$, тоді n слід вважати функцією ω . У критичному стані (3.6) при $n = 0,5$ має вигляд:

$$v = \psi R \omega_k Q^{0.5}, \quad (3.7)$$

де $\omega_{\text{до}}$ – критична кутова швидкість закручування потоку.

З урахуванням (3.4) і (3.5) вираз (3.2) приймає вигляд

$$\frac{dy}{dx} = \frac{\mu_{pc} + aQ^t}{1 - \mu_{pc}Q^t}; \left(\frac{dy}{dx}\right)_k = \frac{\mu_{pc} + a_k}{1 - \mu_{pc}a_k}, \quad (3.8)$$

де

$$a = \frac{C^2 \omega^2 R}{g}; a_k = \frac{C^2 \omega_k^2 R}{g}; t = 2n - 1 \quad (3.9)$$

Для певного кута нахилу прямої $y(x)$ в критичному стані:

$$tg\alpha_{max} = \frac{\mu_{pc} + a_k}{1 - \mu_{pc}a_k}, \text{ а } a_k = tg(\alpha_{max} - \alpha_{min}), \mu_{pc} = tg\alpha_{min}. \quad (3.10)$$

де α_{max} і α_{min} - максимальне і мінімальне значення кута нахилу касательної до хвилястості мікропрофілю по довжині утворювального каналу.

З урахуванням (3.9) і (3.10):

$$a = \left(\frac{\omega_3}{\omega_{3K}} \right)^2 * tg(\alpha_{max} - \alpha_{\beta}) \quad (3.11)$$

Так як для кутових швидкостей частинок робочого середовища щодо текучої системи координат параметри ω/ω_k і ω_3/ω_{3K} можливо прийняти взаємно пропорційними, тоді функція $\gamma = \gamma(\omega)$ може бути представлена у вигляді:

$$y(\omega) = \left(\frac{\omega}{\omega_k} \right)^2$$

З (3.8):

$$\frac{dy}{dx} = \frac{\mu_{mp} + Q^t y tg(\alpha_{max} - \alpha_{min})}{1 - \mu_{mp} Q^t y tg(\alpha_{max} - \alpha_{min})} \quad (3.12)$$

У теорії вільного руху потоку щодо оброблюваної поверхні визначається, в залежності від кутової швидкості частки ω , функціями: $n = n(\omega)$ і $\gamma = \gamma(\omega)$. Функція $n(\omega)$ відображає залежність положення вектора окружної швидкості робочого середовища по координаті x від зміни рівня закручування потоку абразивних частинок в оброблюваному каналі, тобто - зміни його мікропрофілю. При $\omega > \omega_{do}$ значення n знаходяться в межі $-1 < n < 0,5$, причому нижня межа відповідає вільному станом (падіння) робочого середовища, а верхня визначається виразом 3.6.

Швидкість v абразивних частинок в потоці при $n = 0$ стаціонарне уздовж всього утворювального каналу. Функція $\gamma(\omega)$, обумовлює кутову швидкість ω , вона залежить від сили тертя між оброблювальним середовищем і поверхнею деталі, і від зміни мікропрофілю каналу, тобто - кривої $y = f(x)$.

За аналогією з завданнями руху тіл при силах опору, пропорційних швидкості в квадраті, γ це повільно зростаюча функція аргументу з асимптотою у вигляді прямої: $\lim_{n \rightarrow \infty} \gamma = \gamma_0$, тоді

$$\gamma = \gamma_0 \operatorname{th}(0.5k\omega), \quad (3.13)$$

де k – коефіцієнт, що враховує реологічні і абразивні властивості гранульованого середовища (отримують експериментально).

З виразі (3.12) при $n = 0$ і $dy/dx = \pi/2$:

$$y_0 \leq \frac{1}{\mu_{pc} \operatorname{tg}(a_{max} - a_{min})} \quad (3.14)$$

Якщо (3.12) розкласти μ_{pc} у ряд Тейлора з урахуванням, що $\mu_{pc} \ll 1$:

$$\frac{dy}{dx} = \mu_{pc} + bx^t + \mu_{pc} b^2 x^{2t} \quad (3.15)$$

де $b = aR^{-t}$.

Рівномірне доведення каналу відбувається при постійній по перетину каналу швидкості руху абразивних частинок в потоці, тому переміщення частинки має відбуватися при $n = 0$, тобто коли $t = -1$. Інтегруючи вираз (3.15), отримуємо:

$$y = b \ln x + \mu_{pc} x - \mu_{pc} \frac{b^2}{x} + B \quad (3.16)$$

Постійна інтегрування B у виразі (3.12) обчислюється за умови збереження в зоні обробки певного обсягу оброблювального середовища, тобто в межах загального обсягу всіх каналів деталі.

Використання персонального комп'ютера при вирішенні поставленого завдання показало хороший збіг розрахункових величин з визначення параметрів граничного тертя. А розрахункове взаємодія гранул робочого середовища один з одним дійсно мале. Однак реальні експерименти іноді показують (в залежності від реології середовища) збільшення абразивного опору до 20%. Очевидно, що це наслідок багатьох чинників [31, 85, 86], однак, незважаючи на накладення струму, мінливості фізико-механічних властивостей поверхневого шару каналу і подавання насосного обладнання,

геометрія які описується кривими другого порядку, умова (3.14) і вищевказаний 20% бар'єр, умови обробки все ж дотримуються при концентрації абразиву не більше 2%, що підтверджується експериментально.

При використанні ефекту анодного розчинення в зоні контакту можна знайти зусилля опору F_{Ca} :

$$F_{Ca} = l_x * F_{NП} z \left(1 + \frac{f}{tg\alpha} \right) k_{np} \quad (3.17)$$

де l_x - довжина оброблювального каналу;

$F_{NП}$ - сила нормального тиску в зоні контакту;

f - коефіцієнт підвищеного тертя;

z - припуск на обробку;

k_{np} - коефіцієнт взаємного контактного уповільнення гранул ($k_{np} = 1,0$ - $1,1$ в залежності від концентрації абразиву; дивись рис. 3.4).

Тут

$$z = h_B - h_{Ra}, \quad (3.18)$$

де h_B - висота мікровиступів, що залишилися від попередньої обробки (рис. 2.4);

h_{Ra} - допустима висота мікровиступів по конструкторській документації.

З урахуванням (3.14):

$$F_{Ca} = l_x * F_{NП} z \left(1 + \frac{f}{tg\alpha} \right) k_{np} + m * g * \mu * tg(\alpha_{max} - \alpha_{min}) \quad (3.19)$$

де μ - коефіцієнт Пуассона.

Тобто у виразі (3.19) в правій частині додався значний елемент опору від зіткнень зерен. Також важливий коефіцієнт зростання швидкості анодного розчинення при зіткненні $k_{ан}$. Для різних матеріалів він змінюється в діапазоні $k_{ан} = 1,15$ - $1,3$.

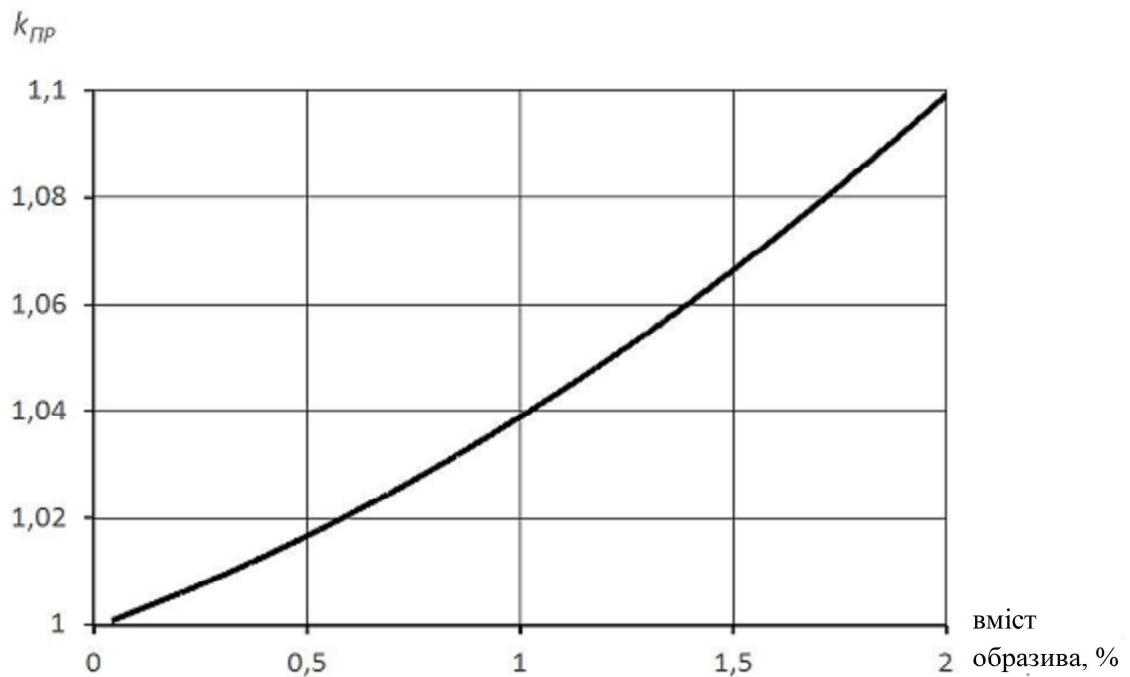


Рисунок 3.4 - Залежність контактної уповільнення гранул від концентрації абразиву

Спрощено час $t_{пр}$ видалення припуску z залежить від швидкості переміщення гранул v_r і їх діаметра d_r . При досить високій концентрації абразивних гранул

$$t_{пр} \approx d_r / v_r \quad (3.20)$$

Але в нашому випадку концентрація мала (не більше 2%). Тоді середня швидкість $V_{ср}$ знімання матеріалу, яка враховує тільки анодне розчинення:

$$V_{ср} = \frac{z}{t_{пр}} * k_{ан} , \quad (3.21)$$

Вираз (3.21) має бути доповнений відповідними складовими з (3.19), що сильно ускладнює роботу з нею. Для зручності роботи технології приймаємо уточнену інженерну формулу, що враховує комбінований вплив всіх впливів

$$V_{ср} = \frac{Z k_{ан}}{t_{пр} k_{гр}} \quad (3.22)$$

Де Z визначаються з (3.19); t_{np} визначають експериментально на зразках-свідках; $k_{дН}$ беруть для сталі 1,15, для нержавіючої сталі 1,3 [29]; k_{np} беруть з графіка (рис. 3.4). Отримані залежності дозволяють отримувати ефективні режими видалення припуску за допомогою комбінованого оброблення. З урахуванням збільшення абразивного опору, описаного вище, тиск потоку $F_{прс}$ беруть на 20% більше розрахункового зусилля опору $F_{са}$

4 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ КОМБІНОВАНОЇ ОБРОБКИ

4.1 Вимоги до параметричних випробувань деталей з щілинними каналами

Метою випробувань є визначення фактичного стану деталей з щілинними каналами після комбінованої електрохімікоабразивної обробки.

Випробування проводяться перед прийманням їх в експлуатацію або перед складанням в складі агрегату.

Тиск початку уприскування, якість розпилення палива, витрата перевіряють на стенді з ручним (механічним) приводом, обладнаним пристроєм для кріплення деталі, манометром по ГОСТ 2405-88 і приладом відліку часу.

Пропускную здатність перевіряють на стенді прокачуванням технологічної рідини через випробувану деталь, при подачі кількості, встановленого в технічних умовах і (або) робочих кресленнях на деталі конкретних типів.

Випробування проводилися на технологічних рідинах. В'язкість рідини вибрали за технічними умовами на деталі конкретних типів і (або) робочим кресленням, затвердженим у встановленому порядку.

Температура навколишнього середовища при випробуванні деталей повинна бути обрана за технічними умовами на деталі конкретних типів. У разі проведення випробувань в температурних умовах, відмінних від зазначених, результати випробувань слід порівняти з результатами вимірювання контрольної деталі, одержуваних в тих же температурних умовах.

Тиск початку уприскування перевіряють візуально по манометру стенду при нагнітанні випробувальної рідини в момент впорскування.

Відхилення струменів випробувальної рідини від заданих напрямів визначають у напрямку струменів технологічної рідини з розпилюванням

отворів деталі при тиску і в'язкості рідини, що забезпечують на вимірюваній ділянці суцільність і прямолінійність струменів при візуальному спостереженні.

Пропускнну здатність оцінюють за значенням об'ємної або масовної витрати, що фіксується датчиком витрати.

При подачі води фіксуються показання манометра, встановленого перед випробуваною деталлю.

4.2 Засоби технологічного оснащення для випробувань

Контроль видаткових характеристик роблять після остаточним комбінованим доведення на паспортизованому стенді, загальний вигляд якого представлений на рисунку 4.2, а схема - на рисунку 4.1.

Суть роботи установки, представленої на рисунку 4.1, полягає в наступному: встановлюється випробувана деталь 3, відкривається кран 16, подається робоча рідина, відбувається її нагрів в підігрівачі 15. Температура контролюється за допомогою термометрів опору 9 і 11.

Перетворювачі тиску 10 і 12 підтримують заданий тиск. При цьому йде вимірювання витрати за допомогою витратоміра 1. У разі необхідності змінити тиск на вході і виході з випробуваної деталі відкривають крани 14 і в роботу включається перетворювач різниці тиску 13

Послідовність при проведенні випробувань:

1. Підготовка до випробувань

При підготовці до випробувань необхідно:

- визначити по документації необхідну витрату рідини для даної деталі;
- перевірити справність стенду за допомогою візуального огляду;
- перевірити герметичність стенду, для чого встановлюють по черзі заглушки 6, 7, 8 (рис. 4.1) в систему стенда. Спочатку заглушку 6, потім відкривають запірний кран 16 і створюють насосом тиск близько 30 МПа.

Потім, включивши секундомір, спостерігають за падінням тиску, який не повинен перевищувати 0,5 МПа в хвилину. Потім теж саме повторюють з заглушкою 7, потім 8. Застосування трьох заглушок дозволяє знайти не тільки не герметичність в системі, а й конкретне місце порушення герметичності.

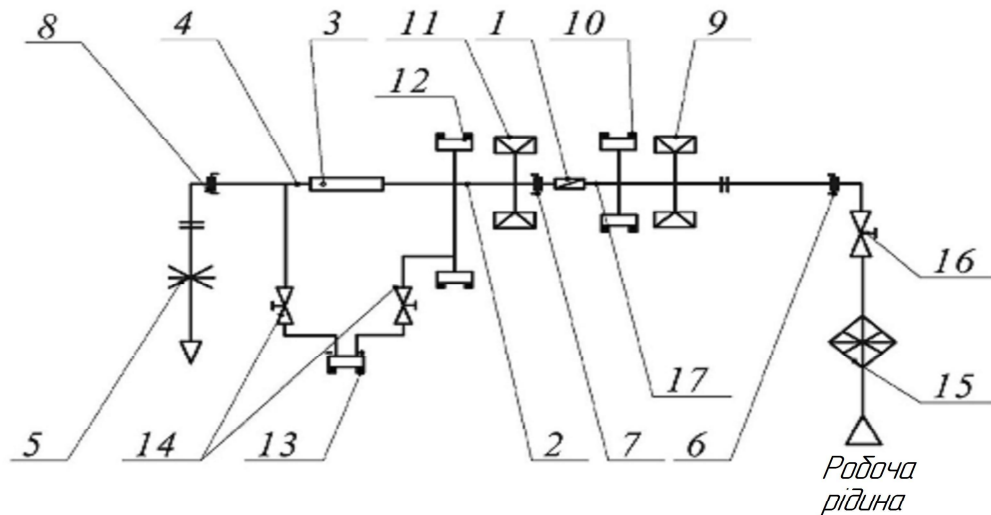


Рисунок 4.1 - Схема стенду для випробувань деталей з малорозмірних проточними каналами:

1 - витратомір; 2 - перехідник входу; 3 - випробувана деталь; 4 - перехідник виходу; 5 – дросель стендовий d_y 10; 6, 7, 8 - заглушка для перевірки герметичності; 9 – термометр опори 2 шт ; 10 - перетворювач тиску 2 шт .; 11 – термометр опору 2 шт .; 12 - перетворювач тиску 2 шт .; 13 - перетворювач різниці тиску; 14, - кран стендовий d_y 4; 15 - підігрівач стендовий, 16 - кран стендовий d_y 10; 17 – витратомірна ділянка

2. Обробка результатів

Визначають похибки вимірюваних величин.

Вони залежать від характеристик використовуваного манометра (класу точності, шкали вимірювання), а також від способу вимірювання витрати. При об'ємному способі вона не перевищує 1-2%.



Рисунок 4.2 - Робоча зона стану для виміру витрати робочої рідини через проточні канали

3. Оформлення підсумкових документів

За результатами складаються акти проведених випробувань. Проводиться оцінка відповідності отриманих результатів вимогам нормативних документів.

У разі невідповідності отриманих результатів необхідним, відомості передаються в установленому порядку відділу технічного контролю для вжиття ними заходів щодо усунення виявлених недоліків.

4.3 Експериментальна перевірка розрахункових режимів обробки

Для експериментального дослідження режимів електрохімікоабразивної обробки канали імітаторів типових деталей були піддані комбінованому доведенню з подальшим виміром зміни витрати від часу обробки. Імітатори випробовувалися із застосуванням спеціального розробленого оснащення (рис. 2.9).



Рисунок 4.3 - Збільшений вигляд щілинного каналу імітатора

Великий вид щілинного каналу імітатора наведено на рисунку 4.3, а вид каналів після ЕХО показаний на рисунку 4.4. Аналіз результатів експерименту, показаних на рисунку 4.5, дозволив визначити оптимальні інтервали часу електрохімікоабразивної обробки з урахуванням забезпечення витрати, заданою технічною документацією.

На рисунку 4.6 представлені результати вимірювання витрати типових деталей з щілинними каналами до і після ЕХО отворів і після електрохімікоабразивної обробки в порівнянні з заданим інтервалом значень. Очевидно, що використання електрохімікоабразивної обробки забезпечує значно більший відсоток попадання каналів в задану область видаткової характеристики навіть після одноразової комбінованої обробки отворів.

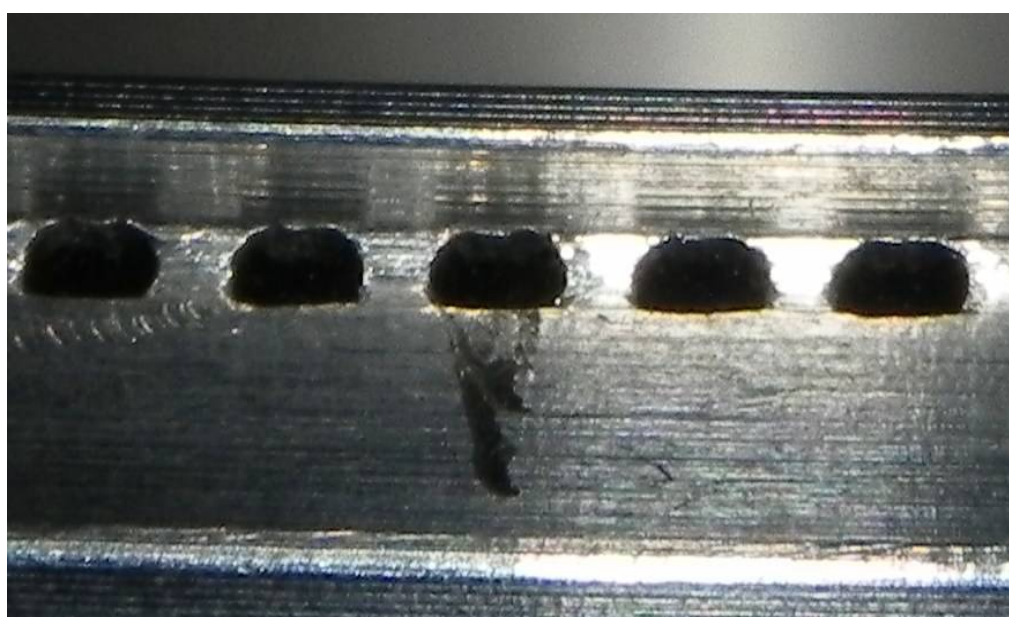


Рисунок 4.4 - Щілинні канали після ЕХО

Значний вплив на ефективність обробки надає швидкість знімання матеріалу $V_{\text{ср}}$ для визначення якої ми використовували вираз (3.22).

При проведенні експериментів було відмічено, що коефіцієнт, що враховує швидкість лінійного розчинення, перевершує раніше встановлений інтервал. Це може бути пояснено тим, що попереднє формоутворення отворів викликає наклеп його поверхні. Було встановлено, що поверхня, що має наклеп, розчиняється в 1,2-1,5 рази швидше, ніж поверхня, яка наклепу не має.

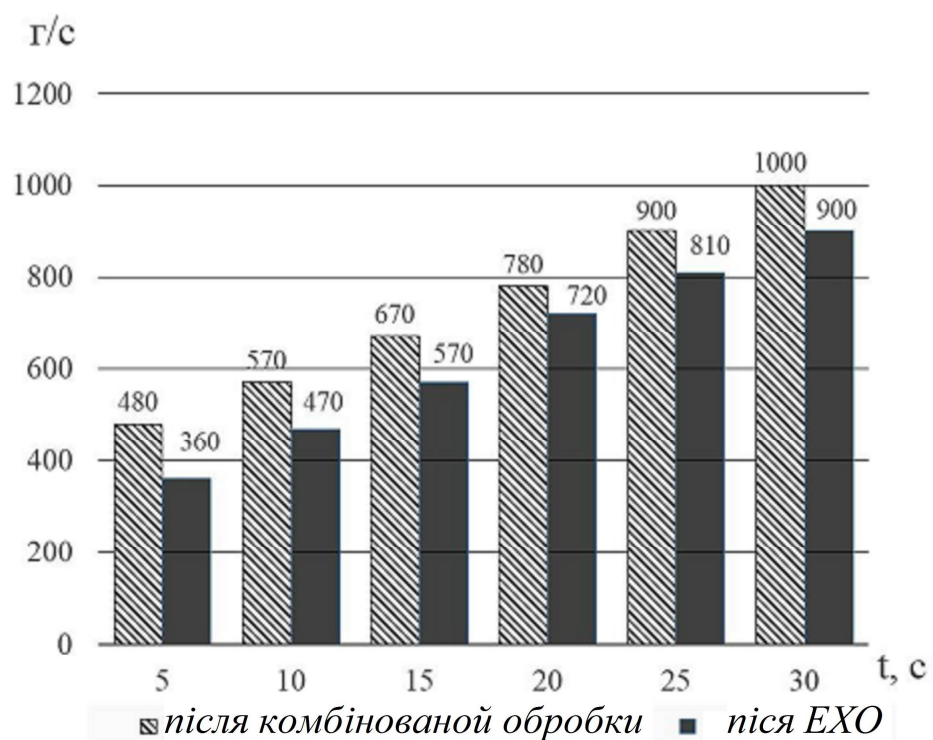


Рисунок 4.5 - Залежність зміни витрат від часу обробки каналів

Введення в вираз (3.22) коефіцієнта k_n , що враховує наявність у оброблюваної поверхні наклепаного шару, дозволило отримати уточнену формулу для визначення швидкості лінійного розчинення:

$$V_{\text{ср}} = \frac{Z k_{\text{ан}} k_n}{t_{\text{пр}} k_{\text{пр}}}$$

Для нашого випадку, після механічного формування каналу $k_n = 1,1$ а після електроерозійної обробки $k_n = 1,2$.

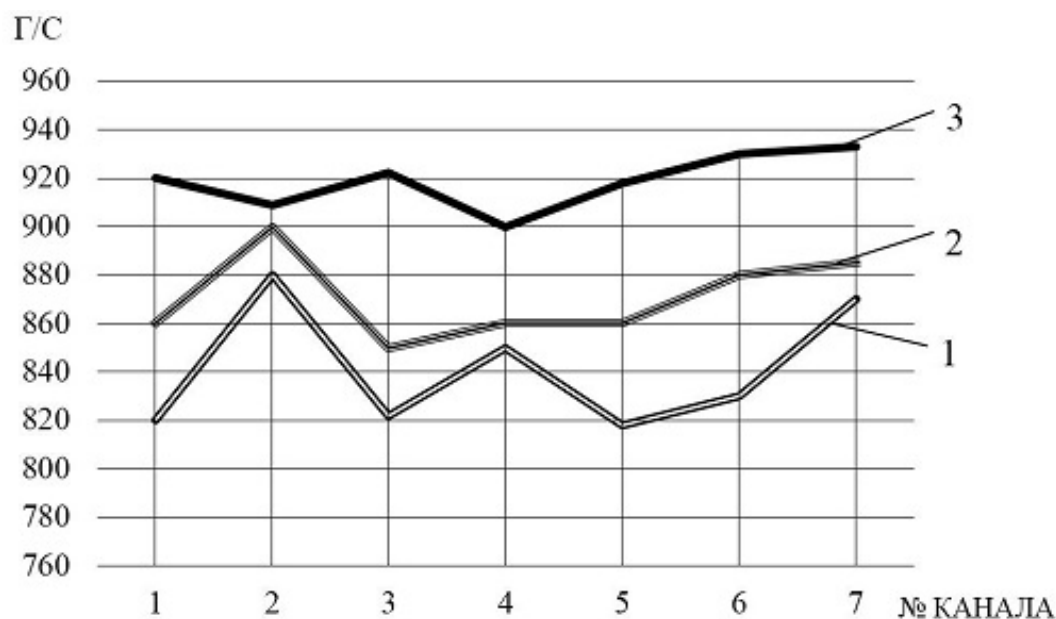


Рисунок 4.6 - Результати вимірювання витрати для типових деталей з малорозмірних щілинними каналами:

1 – до ЕХО; 2 - після ЕХО; 3 - після комбінованої обробки

Розрахунковим шляхом з подальшим експериментальним підтвердженням встановлені режими комбінованої обробки: напруга $U = 8-10$ В, анодна щільність струму $500-1000$ А / м², концентрація абразиву $1,8-2\%$, тиск робочої рідини $1 \pm 0,2$ МПа, час обробки 18 с, витрата $0,79$ кг / с.

Як струмопровідних хімічно активних компонентів робочих середовищ традиційно використовуються кислоти і луги, що входять до складу розчинів і електролітів (H_2SO_4 ; $NaNO$; Na_2SO_4 ; CrO_3), склад яких коригується залежно від марки оброблюваного матеріалу. Ці речовини чинять негативний вплив на обладнання, тому при суміщенні декількох видів обробки з використанням технологічно точного і складного обладнання, необхідно використовувати менш агресивні рідини, а саме слабо проводить технічну воду.

Наведені вище склади доцільно використовувати при попередньому профілювання електрохімічним методом.

Проведені роботи в частині ЕХО з додаванням абразиву при обробці деталей з малорозмірними щілинними каналами дозволили отримати:

- вимкнення розкиду значень витратних характеристик деталей з малорозмірними проточними каналами за рахунок поєднання процесів виготовлення і випробування;
- скоротити трудомісткість при наступних випробуваннях і налаштування витрати за рахунок гідروпневмосистеми ЖРД;
- підвищення точності (до $\pm 0,06$ мм) і стабільності геометричних розмірів каналів за рахунок додавання абразиву в процесі ЕХО;
- збільшення ресурсу проточних каналів за рахунок зниження гідродинамічних втрат і кавітації.

5 РОЗРОБКА ТЕХНОЛОГІЇ КОМБІНОВАНОЇ ОБРОБКИ ЩІЛЬНИХ КАНАЛІВ ТА ШЛЯХИ ЇХ РЕАЛІЗАЦІЇ

5.1 Основні завдання проектування технології комбінованої обробки

Розробка схеми технологічного забезпечення заданих витратних характеристик деталей з малорозмірних щілинними каналами відбувалася поетапно:

- вибір методу або комбінації послідовно застосовуваних способів доведення каналу стосовно конструктивних особливостей деталей з малорозмірними проточними каналами;

- вибір ефективних режимів обробки, що забезпечують стабільність експлуатаційних показників поверхневого шару деталей в щілинних каналах малого перетину.

Рішення завдання в першу чергу було пов'язано із забезпеченням необхідної витрати, а також відпрацюванням механізованого способу видалення задирок і похибок мікрогеометрії поверхні малорозмірних щілинних каналів з використанням комбінованої електрохімічної обробки з додаванням абразиву, що дозволило спроектувати новий процес замість ручних операцій.

Оптимізація робочих параметрів досягалася тим, що після попереднього формування щілинного каналу в деталях здійснювали їх струминну електрохімічну обробку з додаванням абразиву, яка полягала в подачі токопровідної рідини з абразивом через оброблювані канали, після чого включали струм і витримували на встановленому режимі і постійному тиску рідини до отримання необхідного перетину каналу, забезпечує задану витрату робочого середовища [66]. Для цієї мети був розроблений дослідний технологічний процес, який дозволив отримати стабільні витратні характеристики деталей типу кілець завіси і щілинних форсунок на випробувальних і доводочних стендах.

5.2 Основні етапи проектування технологічного процесу комбінованої обробки малорозмірних проточних каналів

Побудова технологічного процесу комбінованої обробки малорозмірних проточних пазів включає:

1. Підготовчий етап:

- відпрацювання технологічності конструкції, де оцінюється принципова можливість комбінованої обробки щілинних каналів деталі;
- розрахунок технологічних режимів і їх аналіз з урахуванням вимог до витрати і якості поверхневого шару проточних каналів;
- вибір технологічного обладнання та засобів технологічного оснащення;
- контроль рівня підготовки виконавців;
- контроль стану техніки безпеки і охорони навколишнього середовища
- оформлення документації.

2. Етап обробки:

- попередній вимір витрати і розрахунок часу обробки;
- комбінована обробка деталі;
- промивка системи;
- контроль витрати;
- при необхідності коригування технологічних режимів і повторна обробка деталі;
- при необхідності введення і узгодження змін в процес комбінованої обробки;
- висновок про введення в виробництво процесу комбінованої обробки.

3. Заключний етап:

- контроль параметрів деталі в складі агрегату;

- обґрунтування умов зберігання готових деталей (метод зберігання, консервація, розробка (при необхідності) технологій виконання допоміжних операцій);

- розробка нормативних документів (технологічних процесів, інструкцій).

5.3 Вибір параметрів абразиву

Абразив в сучасному поданні - це сипучий матеріал, отриманим шляхом дроблення і розсівання природних кристалічних мінералів або штучних (синтетичних) речовин.

Головним параметром абразивного матеріалу вважається його твердість, яка оцінюється по мікротвердості, за 10-бальною шкалою Мооса і ряду альтернативних шкал твердості (таблиця 5.1). Так твердість менше 5 буде низькою, від 5 до 7 - середньої, а понад 7, відповідно, високою.

Таблиця 5.1 - Різні шкали твердості матеріалів

Матеріал	Шкала твердості			
	Мооса	Ріджуея	Вудделла	Кнупа
пісок	-	7	-	475
ортоклаз	6	6	-	560
кварц	7	8	7	820
оксидцирконію	8	11	-	1160
Топаз	8	9	-	1250
гранат	7-7,5	10	-	1360
Корунд	9	-	9	1635
Плавлений глинозем	9	12	10-11	2000
карбід титану	-	-	-	2300
карбід кремнію	9	13	13,4-14	2450
карбід бору	9	14	20	2750

Продовження таблиці 5.1

нітридкремнію	-	-	-	3000
алмаз	10	15	40-42	8000-9000

Важливу роль відіграє форма абразивних часток. Форма абразивних частинок, що застосовуються в абразивній обробці, досить складна, тому необхідно вирішувати проблему моделювання та обґрунтування їх форми при вирішенні задач про рух і взаємодію частинок в потоці. В основному, частинки розглядаються як утворення, що мають регулярну геометричну форму (сферу, еліпсоїди, диски, циліндри).

Стабільність технологічних показників гідроабразивної обробки визначає процентний зміст функцій і зернистість абразивного матеріалу. Згідно ДСТУ 3647-80 матеріали для гідроабразивної обробки діляться на 4 групи, у кожній з яких свій номер зернистості. Цей номер відрізняється основними фракціями - дрібною, комплексною, великої основної, граничної.

Номери зернистості абразивних матеріалів за ДСТУ 3647-80 задаються довжиною сторони чарунки сита в сотих частках міліметра. Великі розміри зерен відповідають тому розміру отворів сита, крізь які вони проходять, а менші розміри, на якому зерна затримуються.

Абразивні матеріали за величиною зерен поділяються на 4 групи з наступними номерами зернистості:

- 1) шліф зерно - 200; 160; 125; 100; 80; 63; 50; 40; 32; 25; 20; 16;
- 2) шліфпорошки - 12; 10; 8; 6; 5; 4; 3;
- 3) мікропорошки - M63; M50; M40; M28; M20; M14;
- 4) тонкі мікропорошки - M10; M7; M5; M3; M1.

Розмір зерен вибирають в залежності від геометричних параметрів оброблюваного каналу і від режимів обробки.

Твердість матеріалу для гідроабразивної обробки, його міцність і будова об'єднані в загальну характеристику працездатності - абразивну

працездатність, яку визначають показником сумарного знімання матеріалу аж до абсолютної втрати його працездатності. Дана величина в першу чергу залежить від фізико-механічних характеристик (таблиця 5.2) і зношування оброблюваного матеріалу [14, 26,79].

Таблиця 5.2 - Фізико-механічні властивості абразивних матеріалів

Марка матеріалу	Щільність, г / см ³	Мікро-твердість, ГПа	Механічна міцність, Н	Абразивна здатність, г	Ріжуча здатність, г / хв	Насипна щільність г / см ³
Карбід кремня зелений	3,15-3,25	32,4-35,3	11,0-14,7	0,09	0,057	1,49
Карбід кремня чорний	3,15-3,25	32,4-35,3	11,0-14,7	0,08	0,060	11,43
електрокорунд нормальний	3,85-3,95	18,9-19,6	8,6-19,9	0,06	0,036	11,78
електрокорунд білий	3,90-3,95	19,6-20,9	8,3-10,8	0,05	0,035	11,83
електрокорунд хром-титанистий	3,95-4,0	19,6-22,6	9,3-10,4	0,05	0,035	11,85
електрокорунд цирконієвий	4,05-4,15	22,6-23,5	589	0,05	0,035	21,12

В якості критерію оцінки придатності даного способу обробки була обрана кінцева шорсткість оброблюваного каналу.

Для встановлення технологічної залежності впливу зернистості абразиву δ (мкм) на шорсткість поверхні R_a (мкм) були проведені пошукові

однофакторні експерименти. Час випробування - 20 секунд, концентрація абразиву 2%.

При проведенні однофакторних експериментів використовувалися зразки, виготовлені з різних матеріалів: 12Х18Н10Т, 07Х16Н6. Вибір марок матеріалу зразків обумовлений найбільш широким їх застосуванням у виробках ракетно-космічної техніки, а також в базових галузях промисловості. Вихідна поверхня каналів зразків свідків була отримана шляхом електроерозійного прошивання.

У даній роботі застосовується абразив на основі електрокорунду білого. Електрокорунд - дуже твердий, вогнетривкий і хімічно стійкий твердий матеріал на основі оксиду алюмінію (Al_2O_3), щільність - $3,85-3,95 \text{ г / см}^3$, мікротвердість - $18,9-19,6 \text{ ГПа}$. Частинки при явно вираженій кристалічній структурі мають форму досить близько до сферичної. Тому в першому наближенні будемо вважати форму абразивних зерен сферичної. Результати експерименту наведені на рисунку 5.1. Користуючись отриманими графіком, можна вибрати зернистість абразиву в залежності від необхідної шорсткості щілинного каналу.

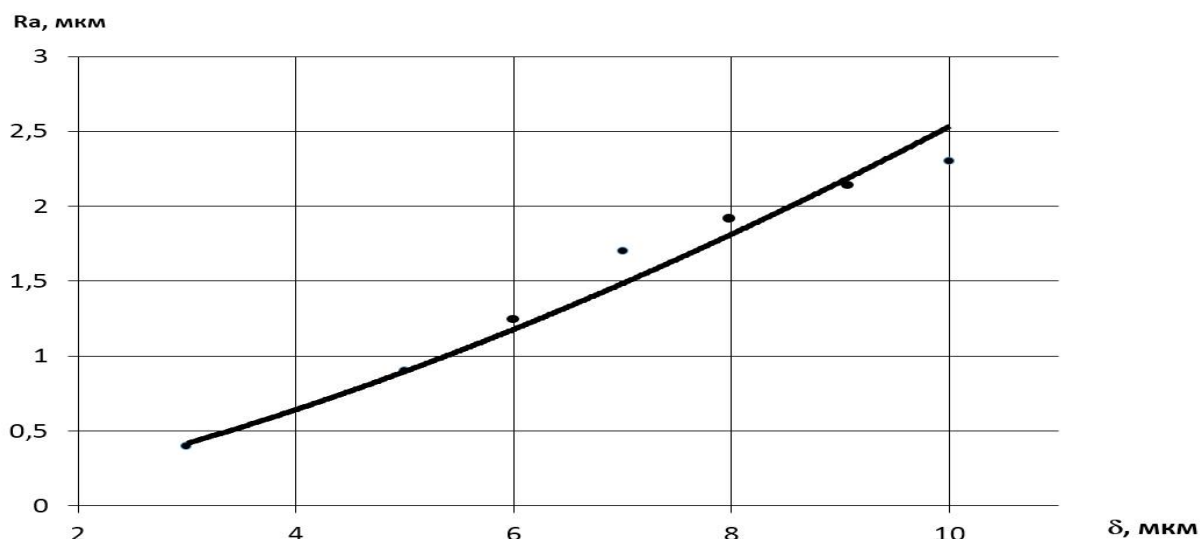


Рисунок 5.1 - Залежність шорсткості обробленої поверхні від розміру абразивних частинок

5.4 Розробка рекомендацій по створенню дослідного устаткування і проектування серійних верстатів

В даний час існує безліч пристроїв і стендів для випробування деталей з малорозмірними проточними каналами.

Створення серійного обладнання для реалізації комбінованої електрохімікоабразивної обробки, яка буде проводитися паралельно з контролем високонапірних витратних характеристик, можливо за двома напрямками. Перше має на увазі створення принципово нового обладнання, що не зовсім економічно вигідно в багато-виробництві, яким є ракетобудування. Друге передбачає модернізацію існуючого обладнання за схемою наведеною на рисунку 4.1. Модернізування обладнання може мати блочну конструкцію для швидкої реновації та використання для інших завдань і в інших стендах.

Суть роботи такої технологічної системи полягає в наступному:

- перед початком електрохімічної обробки з додаванням абразивного наповнювача виробляють вимір витрати рідини через проточні канали;
- для проведення комбінованої обробки заповнюють магістраль токопровідною рідиною з додаванням абразиву і включають установку для комбінованої обробки. Після закінчення розрахункового часу установку вимикають і проводять промивання системи;
- після проведення обробки необхідний контрольний вимір витрати. При відхиленні значень отриманого витрати від заданих значень проводять повторну комбіновану обробку на скоригованих режимах.

Вимір витрати проходить через отвір електроліту при електрохімічної обробці дозволяє контролювати масову витрату рідини, і при досягненні потрібного показника припиняти прокачування електроліту. Це забезпечить отримання одночасно всіх каналів з рівномірним, задалегідь встановленим витратом всіх перетинів. Поєднання в одному процесі двох видів впливів: механіко-абразивної і електрохімічної з одночасним виміром.

Витрати абразивонасиченого електроліту дозволяє одночасно зберігати необхідну геометричну форму перетину каналу і задану витрату. За рахунок зміни концентрації абразиву і напруги струму можна керувати процесом формування мікрогеометрії поверхні із заданими характеристиками.

5.5 Розширення області використання розробленої технології в машинобудуванні

У нафтогазовій галузі та енергетиці існує велика кількість обладнання і агрегатів, які мають соплові і охолоджуючі елементи з щілинними каналами, де розроблений метод може бути застосований.

Інший перспективною сферою застосування розробленої технології є обробка каналів, отриманих на 3D принтерах. Доведення електрохімічними методами щілинних каналів змінного перерізу у заготовках, одержуваних з порошків методами швидкісного прототипування, не дає необхідного ефекту внаслідок виборчого характеру анодного розчинення матеріалу в місцях підвищеної концентрації рихлоти, мікротріщин і пор. В даний час проводяться дослідження з використання робочих середовищ з абразивної складової для малорозмірних каналів, отриманих по АF-технологіям, що дозволяє вирівнювати параметри формоутворення в процесі доведення внутрішньої поверхні [38].

Використання показаних вищого рішення дозволяє підвищити стабільність і розширити можливості технологічних процесів виготовлення деталей з щілинними каналами, підвищити їх якість і значно знизити виробничі витрати [18].

6 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА ТЕХНІКА БЕЗПЕКИ ПРИ ПРОВЕДЕННІ НАУКОВО-ДОСЛІДНИХ РОБІТ

6.1 Загальні заходи щодо безпеки життєдіяльності

Всі дослідницькі роботи, представлені в даній роботі, проводилися в металографічних лабораторіях. У зв'язку з цим необхідно передбачити створення сприятливих умов для проведення експериментів на робочому місці.

Створення комфортних метеоумов. Мікроклімат на робочому місці в приміщенні лабораторії нормується з урахуванням температури повітря, його відносної вологості і швидкості руху. Основним показником є температура; вологість і вентиляція - супутні показники, що підсилюють її дію. Рекомендується періодично коригувати параметри системи опалення з урахуванням пори року [102]. Регулювання повітряного середовища здійснюється за допомогою вентиляції. Для зменшення рухливості повітря усуваються можливі причини виникнення протягів (відкриті кватирки, зазори між рамами тощо.).

Умови освітлення. Для створення сприятливих умов праці важливе значення має раціональне освітлення. Незадовільне освітлення ускладнює проведення робіт, веде до зниження продуктивності праці і працездатності очей. Для створення природного освітлення в приміщенні використовують світлові прорізи в стінах (вікна). Електричне освітлення необхідно для проведення робіт в темний час доби або в місцях без достатнього природного освітлення. У якості штучних джерел світла рекомендується використовувати лампи розжарювання і люмінесцентні лампи. Приймаємо освітлення двох видів: робоче (для проведення робіт в звичайних умовах) і аварійне (для тимчасового продовження робіт або евакуації працюючих при раптовому відключенні робочого освітлення) [102, 104]. Аварійне освітлення передбачається з незалежним джерелом живлення або при автоматичному перемиканні на нього у випадку аварії.

Захист від шуму. При проведенні металографічних досліджень використовується різне обладнання (шліфувальні і полірувальні верстати, електронний мікроскоп), експлуатація якого супроводжується шумом. Шум викликає зміни в нервовій системі, впливає на психіку людини, серцево-судинну систему, погіршує сон [101 – 104]. Робота в умовах постійного шуму може викликати головний біль, запаморочення, ослаблення уваги. Шум є причиною швидкого розвитку втоми і зниження працездатності. Встановлений в лабораторії рівень звукового тиску при частоті 1000 Гц складає 60 дБ - при шумі, що виникає всередині приміщення, і 45 дБ - при шумі, проникаючому ззовні [104]. Для захисту від шумових впливів застосовують звукоізолюючі огорожі установок, які відображають більшу частину світлової енергії, що падає на них. Наприклад, верстати розташовуються в місцях, відгороджених глухими перегородками від решти лабораторії. Також для зниження шуму агрегатів використовують звукоізолюючі кожухи, в які укладають їх шумливі вузли. Люди, які безпосередньо працюють біля верстатів, повинні використовувати спеціальні вкладиші, типу беруші.

Захист від шкідливих речовин і пилу. При проведенні дослідницьких робіт виникає потенційна небезпека небажаної дії на організм речовин, що застосовуються в роботі. Всі забруднюючі повітря речовини надають шкідливої дії, якщо вони потрапляють в організм в кількостях, що перевищують деяку порогову величину; але навіть і в менших кількостях вони шкідливі, якщо знаходяться в організмі в незвичайних концентраціях або станах. Також при роботі може виникнути і безпосередній контакт зі шкідливими речовинами. При шліфуванні і поліруванні зразків повітря забруднюється металевим пилом. У зв'язку з багатоконпонентним складом досліджуваної сталі забруднення повітря може викликати різні реакції. Ряд металів (хром в даній сталі) може привести до алергічних захворювань - бронхіальна астма, ураження шкіри, очей, носа тощо [103 – 104]. Багато металу, в тому числі, залізо, ванадій, молібден, кремній, марганець, а також

фосфор є біологічними мікроелементами, що знаходяться в крові, печінці, м'язах в дуже невеликих кількостях (10^{-3} - $10^{-2}\%$) [103]. Недолік або надлишок мікроелементів у порівнянні з нормальним вмістом призводить до порушень тих чи інших функцій організму. Для запобігання розповсюдження пилу дослідна лабораторія розташовується в окремому приміщенні, ізольованому дверима від сусідніх робочих місць. Також передбачене регулярне вологе прибирання для видалення осілих частинок пилу. При проведенні робіт виникає необхідність в застосуванні хімічних сполук різної небезпеки, зокрема для травлення зразків (трихлористе залізо, пікринова кислота). Для захисту від шкідливих випарів передбачена місцева витяжна вентиляція, призначена для видалення забрудненого повітря безпосередньо від джерела утворення виділень. Даний вид вентиляції представлений в лабораторіях у вигляді укриттів і витяжних шаф. Для очищення повітря від шкідливих виділень і продуктів дихання людей передбачена загальнообмінна припливно-витяжна вентиляція, повітря для якої забирається з чистої зони. Додатково використовуються засоби індивідуального захисту. Для захисту рук при роботі з травителями застосовують кислототривкі рукавички, які повинні тісно прилягати до шкіри.

Захист від електричного струму. Причинами ураження електричним струмом є зіткнення з відкритими струмоведучими частинами і проводами; дотик до струмоведучих частин, ізоляція яких пошкоджена; дотик до струмоведучих частин через предмети з низьким опором ізоляції; дотик до металевих частин обладнання, випадково опинилися під напругою [102 – 104]. Небезпека електричних поразок створює працююче від мережі обладнання, освітлювальні прилади і електрична проводка. Дія електричного струму на організм може викликати різні електричні травми (електричний опік, металізацію шкіри, електричний знак та ін.), тому передбачають заходи захисту від ураження електричним струмом. Для мережі загального освітлення допускається напруга не вище 220 В. Для захисту від дотику здійснюють недоступне розташування струмоведучих частин (на висоті, під

підлогою або приховано в стінах). Незахищені струмоведучі частини, до яких можливий дотик людей надійно захищають. Застосовувані проводи та кабелі повинні відповідати умовам експлуатації обладнання. Для виключення мережі при короткому замиканні використовують швидкодіючий релейний захист і вимикачі, настановні автомати і плавкі запобіжники. Для захисту працюючого в разі дотику до металевих частин електричної установки, випадково опинилися під напругою, застосовують захисне заземлення.

Захист від електромагнітних випромінювань. Виникаючі при використанні струмів високої частоти електромагнітні поля різних частотних діапазонів представляють певну професійну шкідливість, тому необхідно вживати заходів щодо захисту від їх впливу на організм. Надійним методом захисту є екранування [104]. Металеві частини установок і систем водоохолодження заземляють, щоб не допустити ураження струмом. Проводи, кабелі та інші струмопровідні частини огорожують. Повинна бути виключена можливість їх нагріву. Передбачають пристрої (рубильники, вимикачі), що забезпечують відключення від мережі. Обов'язкова загальна вентиляція приміщень (з витяжкою з верхньої зони приміщення в робочу зону). Приміщення високочастотних установок забороняється захарашувати металевими предметами. Повинні бути дотримані вимоги електробезпеки.

Захист від пожежі. Пожежі становлять значну небезпеку, так як заподіюють великі пошкодження і матеріальний збиток, тому запобігання пожеж є важливим завданням. Для зменшення небезпеки виникнення і поширення пожеж велике значення має раціональне пристосування і розташування лабораторій і виходів з них [105]. Обов'язкова наявність вентиляції, так як її відсутність може стати причиною задимлення приміщень і ускладнює боротьбу з пожежею. У вентиляційних пристроях не повинен накопичуватися пил; швидкість руху повітря повинна бути такою, щоб зважені в повітрі частки не осідали. Обов'язкова наявність повідомлюючої пожежної сигналізації в будівлі. Кожна лабораторія повинна бути оснащена вогнегасником для усунення пожежі, що починається. У будівлі

забезпечують можливість швидкої безпечної евакуації людей у разі виникнення загоряння. З коридору рекомендується проектувати, як правило, не менше двох евакуаційних виходів. Пожежну небезпеку можуть представляти електричні пристрої в разі перевантаження або короткого замикання. Для запобігання цього необхідні: правильний монтаж і експлуатація мереж і агрегатів, дотримання правил їх експлуатації.

6.2 Заходи безпеки при проведенні технологічних процесів механообробки металів

При розробці і проведенні технологічних процесів механообробки металів слід керуватися ГОСТ 12.1.010-76, ГОСТ 12.3.002-75, СП 1042-73 та іншими чинними нормативними актами.

Відповідно до НПАОП 28.5-1.02-07 технологічні процеси термічної і хіміко-термічної обробки металів повинні передбачати [105]:

- усунення безпосереднього контакту працівників з хімічними речовинами, матеріалами, деталями і відходами виробництва, які здійснюють на них шкідливий вплив;
- заміну операцій, при яких виникають небезпечні і шкідливі виробничі фактори, на операції, де зазначені фактори відсутні або мають меншу інтенсивність;
- використання автоматизованих методів визначення концентрації речовин 1 класу небезпеки в повітрі робочої зони;
- оптимальні режими роботи устаткування, що забезпечують безперервність технологічного процесу;
- раціональний ритм роботи людей, які виконують окремі технологічні операції;
- унеможливлення створення аварійних ситуацій;
- застосування комплексної механізації та автоматизації, дистанційного керування, контролю і регулювання параметрів технологічних процесів

(температури, інфрачервоного випромінювання, тиску в робочому просторі печі, вмісту компонентів у газовому середовищі та ін.);

- використання блокувальних пристроїв (з метою унеможливлення виникнення аварійних ситуацій) і засобів світлової і звукової сигналізації про порушення технологічного процесу;

- герметизацію устаткування, з якого можливе виділення шкідливих речовин;

- своєчасне видалення і знешкодження відходів виробництва, які є джерелами небезпечних і шкідливих виробничих факторів;

- захист від надмірного опромінення робочих місць;

- дотримання встановленої періодичності чищення гартівних баків, ємностей і нагрівальних печей;

- механізацію ручної праці.

Для всіх термічних процесів, де це можливо за умовами технології, слід виключати полум'яне нагрівання, замінюючи його електричним. При неможливості цього для нагрівання слід використовувати газоподібне паливо. Застосування твердого або рідкого палива допускається тільки в технічно обґрунтованих випадках.

Технологічні процеси, при яких застосовуються або утворюються шкідливі речовини, повинні проводитися на устаткуванні з герметичними і надійними в експлуатації арматурою і комунікаціями. Внутрішні поверхні апаратів і ємностей для агресивних речовин, мішалки і труби слід виготовляти з антикорозійних матеріалів або захищати антикорозійними покриттями. Для безпечного транспортування технологічних рідин і газів слід максимально використовувати трубопроводи.

ВИСНОВКИ

В ході роботи була спроектована і реалізована технологія, що забезпечує підвищення експлуатаційних характеристик щілинних каналів і поєднує в одній операції виборчу комбіновану обробку вузьких каналів середовищем, що проводить струм та володіє абразивними властивостями, з одночасним параметричним контролем робочого тіла.

1. Науково-обґрунтований вибір схеми технологічного забезпечення експлуатаційних показників щілинних каналів на основі поєднання параметричного випробування з комбінованою обробкою довів, що механізм формування орієнтованого потоку абразивних часток низької концентрації ефективний для стабілізації експлуатаційних показників проточних каналів при одночасному впливі низьковольтного електричного поля.

2. Створено новий спосіб комбінованої електрохімікоабразивної обробки вузьких щілинних каналів, що підвищує стабільність видаткових характеристик деталей після комбінованої обробки, що реалізовується в експериментально обґрунтованих граничних значеннях концентрації абразивного наповнювача. Це забезпечує ефективність анодного впливу при комбінованій обробці середовищем з керованою енергією її механічного впливу за рахунок дозованих абразивних властивостей.

3. Обґрунтування робочих діапазонів технологічних режимів комбінованої обробки вузьких проточних каналів абразивно-насиченою середою низької концентрації в умовах анодного розчинення матеріалу, що дозволило розробити режими процесу комбінованої обробки щілинних каналів з комбінованим електрохімікоабразивним впливом, що забезпечує вибірковість видалення мікровиступів поверхні для забезпечення експлуатаційних показників, недосяжних раніше, при зниженні технічних витрат, а саме: шорсткість поверхні в щілинному каналі циліндра склала 1,2-1,4 мкм, наклеп поверхневого шару - $3,3 \div 3,4\%$, стабільність вихідних

характеристик по каналах однієї деталі 2-3%, в партії деталей - 4-7%, що відповідає заданим технічним вимогам до проточних поверхонь деталей досліджуваних виробів.

4. Розроблені закономірності технологічного управління комбінованим впливом потоку струмопровідного середовища з абразивом низької концентрації в електричному полі дозволили розрахувати ефективні режими протікання процесів комбінованої обробки з урахуванням обмежених умов переміщення робочого середовища в щілинному каналі, а саме: при напрузі $U = 8-10 \text{ В}$, анодній щільності струму $500-1000 \text{ А/м}^2$. Як абразив використовували тонкий мікропорошок електрокорунду білого МЗ з концентрацією 2%.

5. Розроблено засоби технологічного забезпечення якості комбінованої обробки щілинних каналів з комбінованим електрохімікоабразивним впливом, що дозволяють поєднати операції доведення щілинного каналу і контролю високонапірних витратних характеристик, що враховують закономірності проектування спеціальних пристроїв для випробування деталей з проточними каналами, які мають блокову конструкцію, що забезпечує швидку реновацію і забезпечує використання результатів для вирішення інших завдань.

6. Розроблено та впроваджено технологічний процес комбінованого формування каналів деталей сучасних енергетичних установок з малорозмірними щілинними каналами шляхом виборчого механічного впливу на мікровиступи і локально підсилюється анодним розчиненням в зоні обробки, що дозволило підвищити надійність і ресурс складних машин нових поколінь.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. А. с. 1641591 СРСР, МПК В24 В 31/116. Спосіб обробки деталей абразивної масою [Текст] / С.К. Сисоєв, М.А. Лубнін, В.Ф. Калінін // Бюлетень винаходів. - 1991. - No 14.
2. А. с. 143735 СРСР, Щілинна форсунка [Текст] / Б.Г. Занин // - Бюлетень винаходів. - 1961. - No 24.
3. А. с. 1085734 СРСР, МКІЗ 53 0 В 23 Р 1/04. Спосіб електрохіміко-механічної обробки [Текст] / А.І. Болдирєв, В.П. Смоленцев // Відкриття. Винаходи. - 1984. - No 14.
4. Агаміров, Л.В. Методи статистичного аналізу механічних випробувань [Текст] / Л.В. Агаміров. - М.: Інтернет Інженерінг, 2004. - 128 с.
5. Алтинбаєв, А.К. Електроерозійні методи обробки глибоких прецизійних отворів в деталях авіаційних двигунів [Текст] / А.К. Алтинбаєв, В.А. Гейкін // Металообробка: науково-виробничий журнал. - М.: НТЦ «НІД» ФГУП Московське машинобудівне виробниче підприємство «Салют», 2003. - No 6 (18). - С. 47-49.
6. Без'язичний, В.Ф. Формування функціональної якості і надійності машин на основі системного підходу до складного процесу [Текст] / В.Ф. Без'язичний, А.Н. Семенов, А.А. Сазанів // Довідник. Інженерний журнал. - М.: ТОВ «Видавничий дім «Спектр», 2012. - No 8 (185) - С. 14-17.
7. Біргер, І. А. Розрахунок на міцність авіаційних газотурбінних двигунів [Текст] / І.А. Біргер, В.М. Дарєєвській, І.В. Дем'янушко і ін. Під ред. І. А. Біргера, Н. І. Котєровим. - М.: Машинобудування, 1984. - 208 с.
8. Бойцов, В.Б., Технологічні методи підвищення міцності і довговічності [Текст] / В.Б. Бойцов, А.О. Чернявський. - М.: Машинобудування, 2005. - 128 с.
9. Болдирєв, А.І. Формоутворення якості поверхні каналів після комбінованої обробки [Текст] / А.І. Болдирєв // гнучко структурні 119

нетрадиційні технології в машинобудуванні і приладобудуванні: Зб. науч. тр. - Воронеж: ВДТУ, 1996. - С. 48-53

10. Вакутін, А.П. Прогресивні конструкції і технології виробництва форсунок для струменевих моніторів [Електронний ресурс] / А.П. Вакутін, А.Г. Малінін, А.Н. Смирнов. Режим доступу: http://www.cctdrill.ru/assets/files/articles/2011_MiT_03_Tehnologiya_proizvodstva_forsunok.pdf.

11. Вітман, Л.А. Розпилення рідини форсунками [Текст] / Л.А. Вітман, Б.Д. Кацнельсон, І.І. Палеев; під редакцією С.С. Кутателадзе, М.: Державне енергетичне видавництво, 1962. - 265 с.

12. Владикін, А.В., Підвищення ефективності обробки отворів малих діаметрів в деталях з жароміцних сплавів на основі застосування методу електроерозійного свердління [Текст] / А.В. Владикін, В.Ф. Макаров // Вісник Харківської державної авіаційної технологічної академії ім. П.А. Соловйова. - 2010. - №2 (17). - С. 29-37

13. Воробей, В.В. Технологія виробництва рідинних ракетних двигунів: Підручник [Текст] / В.В. Воробей, В.Є. Логінов. - М.: Изд-во МАІ, 2001. - 496 с.

14. Второв, Е.Л. Вплив режимів гідроабразивної обробки жароміцних і титанових сплавів на продуктивність і шорсткість [Текст] / О.Л. Второв, А.В. Мещеряков, Л.С. Попов, В.Г. Никифоров // Прогресивні методи проектування технологічних процесів і виробництва двигунів літальних апаратів. - Куйбишев: Куаі, 1983. - С. 41-47.

15. Второв, Е.Л. Підвищення технологічної надійності деталей ГТД за рахунок впровадження гідроабразивної обробки на остаточних операціях виготовлення [Текст] / О.Л. Второв, А.В. Мещеряков, М.А. Беляєв, В.Л. Шманьов // Матеріали ІХ Всесоюзної науково-технічної конференції «Конструктивна міцність двигунів». - Куйбишев, 1983. - С. 66-73.

16. Газізуллін, Р.М. Комбіноване зміцнення металевих виробів [Текст] / Р.М. Газізуллін. - М.: Металообробка, 2004. - №3. - С. 29-34.

17. Геселев, Б.А. Абразивно-рідинна обробка важкодоступних місць об'ємних поверхонь складного профілю [Текст] / Б.А. Геселев // Передовий виробничо-технічний досвід, сер. Т1, 1983, No 2. - С. 65-66.

18. Гончаров, Е.В. Застосування електрохімічної обробки отворів форсунок ЖРД для забезпечення витрат робочого тіла, заданих КД [Текст] / Є.В. Гончаров, Г.А. Сухочев, А.М. Романюк // Науково-технічний ювілейний збірник. КБ Хімавтоматика: У 3-х томах / Под ред. В.С. Рачук - Воронеж: "Кварта", 2012. - Т.3. - С. 90-95

19. ГОСТ 17655-89. Двигуни ракетні рідинні. Терміни та визначення. [Текст] - Київ: Вид-во стандартів, 1990. - 58 с.

20. Григорьянц, А.Г. Технологічні процеси лазерної обробки [Текст] / А.Г. Григорьянц, І.М. Шигані, А.І. Місюров. М. : вид-во МГТУ ім. Н. Е. Баумана, 2006. - 664 с.

21. Єгоричев, В.С. Розрахунок і проектування сумішоутворення в камері ЖРД: навч. посібник [Текст] / В.С. Єгоричев. - Самара: Вид-во СГАУ, 2011. - 100 с.

22. Ємельянов, С.Г. Забезпечення високопродуктивної обробки в умовах переривчастого різання [Текст] / С.Г. Ємельянов, Е.А. Кудряшов, О.Г. Локтіонов // Известия Курського державного технічного університету. - Курськ, 2009. - No 2 (27). - С. 71-74.

23. Рідинні ракетні двигуни. Основи проектування [Текст] / за ред. Добровольського М.В. - М. : Машинобудування, 1968 - 397 с.

24. Зленко, М.А. Адитивні технології в дослідному ливарному виробництві. Технології лиття металів і пластмас з використанням синтез-моделей і синтез-форм [Текст] / М.А. Зленко П.В. Забеднов // Металургія машинобудування - 2013. - No2. - С. 45-54

25. Виготовлення основних деталей і вузлів авіадвигунів [Текст] / М.І.Евстігнеев, І. О. Морозов, А.В.Подзей і ін. ; За заг. ред. А.В.Подзея. - М. : Машинобудування, 1964. - 456 с.

26. Ікрамов, У.А. Розрахункові методи оцінки абразивного зносу [Текст] / У.А. Ікрамов. - М.: Машинобудування. 1987, - 288 с
27. Інженерія поверхні деталей машин [Текст] / А.Г. Суслов, В.Ф. Без'язичний, Ю.В. Панфілов; Під ред. А.Г. Суслова. - М.: Машинобудування, 2008. - 318 с
28. Киричок, А.В. Технологія і обладнання статико-імпульсної обробки поверхневим пластичним деформуванням [Текст] / А.В. Киричок, Д.Л. Соловійов, А.Г. Лазуткін. - М.: Машинобудування, 2004. - 296 с.
29. Коденцов, С.Н. Технологічні можливості комбінованої обробки в забезпеченні витратних характеристик деталей з малорозмірних проточними каналами [Текст] / С.М. Коденцов, Г.А. Сухочев, А.О. Родіонов // Зміцнюючі технології та покриття. - 2013. - №7 - С. 45-48.
30. Коденцов, С.Н. Технологія комбінованої електроерозійної обробки порожнин і каналів складного профілю [Текст] / С.М. Коденцов, Г.А. Сухочев, Є.Г. Смольянікова // Високі технології в машинобудуванні. - 2012. - № 5. - С. 31-35
31. Коденцов, С.Н. Експериментальне дослідження електрохімічної доведення форсунок [Текст] / С.М. Коденцов, Г.А. Сухочев, А.О. Родіонов // Забезпечення якості продукції на етапах конструкторської та технологічної підготовки виробництва: межвуз. зб. науч. тр. - Воронеж: ВДТУ, 2013. - вип. 12. - С. 65-69.
32. Комбіновані методи обробки [Текст] / Под. ред. В.П. Смоленцева. - Воронеж: ВДТУ, 1996. - 168 с.
33. Конструювання і проектування рідинних ракетних двигунів: Підручник для студентів вузів [Текст] / Г.Г.Гахуна, В.І.Баулін, 1 В.А.Володін і ін.; За заг. ред. Г.Г.Гахуна. - М.: Машинобудування, 1989 424 с.
34. Костенецький, Б.І. Зносостійкість металів [Текст] / Б.І. Костенецький. - М.: Машинобудування, 1980. - 230 с

35. Крагельський, І.В. Основи розрахунків на тертя і знос [Текст] / І.В. Крагельський, М.Н. Добичін, В.С. Комбалу. - М .: Машинобудування. 1977. 526 с.
36. Короткий довідник металіста [Текст] / За заг. ред. Е.А. Древаля. М .: Машинобудування, 2004. - 960 с
37. Кузовкін, А.В. Комбінована обробка непов'язаним електродом [Текст] / А.В. Кузовкін. - Воронеж: ВДТУ, 2001. - 180 с.
38. Кузовкін, А.В. Технологічні можливості комбінованих і адитивних процесів в формоутворенні проточних поверхонь гідро-обладнання [Текст] / А.В. Кузовкін, А.І. Суворов, Г.А. Сухочев, А.О. Родіонов // Насоси. Турбіни. Системи. - Воронеж: ТОВ ІСЦ «Наукова книга», 2014. - №1. - С. 53-58.
39. Левко В.А. Технологія абразивно-екструзійної обробки поверхонь каналів із застосуванням вирівнювального пристрою [Текст] / В.А. Левко, Є.Б. Пшенко // Металообробка. - 2008.- №2 (43) - С. 7-10.
40. Машинобудування. Енциклопедія. Т.3: Технологія виготовлення деталей машин [Текст] / А. М. Дальський, А. Г. Суслов, Ю. Ф. Назаров та ін .; Подбщ. ред. А. Г.Суслова. - М .: Машинобудування, 2002. - 840 с.
41. Мельников, В.П. Управління якістю [Текст] / В.П. Мельников, В.П. Смоленцев, А.Г. Схиртладзе. - М .: Машинобудування, 2005. - 352 с.
42. Направлене формування властивостей виробів машинобудування [Текст] / А.С. Васильєв, А.М. Дальський, Ю.М. Золотаревський, А.І. Кондаков. - М .: Машинобудування, 2005. - 352 с.
43. Небольсин, Д.М. Технологічні параметри комбінованої струменево-динамічної обробки внутрішніх поверхонь [Текст] / Д.М. Небольсин, Г.А. Сухочев, С.Н. Коденцов, Є.Г., Смольяннікова // Зміцнюючі технології та покриття. - 2012. - № 5. - С. 41-46.
44. Небольсин, Д.М. Управління процесом комбінованої обробки деталей мобільних бурових установок [Електронний ресурс] / Д.М. Небольсин, Г.А. Сухочев, А.О. Родіонов // Воронежський науково-технічний

вісник: електронний науковий журнал. - Воронеж: ВГЛТА, 2013 - No2 (4). - С. 89-96. Режим доступу: http://vestnikvglta.ru/index/arkhiv_nomerov/0-19.

45. Небольсин, Д.М. Експериментальне дослідження комбінованої обробки глибоких порожнин і отворів [Текст] / Д.М. Небольсин, Г.А. Сухочев, А.О. Родіонов // Забезпечення якості продукції на етапах конструкторської та технологічної підготовки виробництва: межвуз. зб. науч. тр.- Воронеж: ВДТУ, 2011. - вип. 4. - С. 60-64.

46. Ніцше, К. Збірник статей [Текст] / К. Ніцше. - М.: Металургія, 1967. - 452 с.

47. Основи трибології (тертя, знос, змащування) [Текст] / А.В. Чичинадзе, Е.Д. Браун, Н.А. Буше та ін. - М.: Машинобудування, 2001. - 664 с.

48. Остафьев, В.А. Обработка точных отверстий в приладобудуванні [Текст] / В.А. Остафьев, А.І. Пономаренко. - Київ: Техніка, 1972. - 136 с.

49. Пат. 1210905 А1 СРСР, МПК4 В05В12 / 08. Стенд для випробування розпилювальних форсунок [Текст] / О.М. Мінков, С.Ш. Татаркулов, Н.Г. Верхолаб, В.В. Чижик // Бюлетень винаходів. - 1986. No 6.

50. Пат. 1599177 А1 СРСР, МПК5 В05В12 / 08. Спосіб перевірки конуса розпилу форсунки [Текст] / А.С. Романцов, В.І. Корнієнко // Бюлетень винаходів. - 1990. No 38 (71).

51. Пат. 2022662 С1 Російська Федерація, МПК5 В05В15 / 00. Пристрій для випробування форсунок [Текст] / А.Я. Шенфельд; Н.П. Сточек; В.А. Кандрікіна; А.В. Ільяшевіч; А.С. Федюков // Бюлетень винаходів. - 1994.

52. Пат. 2117177 Російська Федерація, F02К9 / 52, В23Р15 / 16. Спосіб виготовлення струменевої форсунки [Текст] / Ю.З. Андреев // Бюлетень винаходів. - тисяча дев'ятсот дев'яносто вісім.

53. Пат. 2149077 Російська Федерація, В23В1 / 00 Спосіб виготовлення деталі з переривчастими поверхнями з жароміцного сплаву [Текст] / І.Ф. Молохов, М.М. Євстаф'єв // Бюлетень винаходів. - 2000.

54. Пат. 2154694 Російська Федерація, С23С4 / 02, С23С24 / 04, В05В1 / 02. Спосіб обробки поверхні виробів і пристрій для його здійснення [Текст] / Ю.В. Дикун // Бюлетень винаходів. - 2000.

55. Пат. 2162394 Російська Федерація, В23Н3 / 10, В23Н9 / 14, В23Р15 / 00. Спосіб доведення форсунок [Текст] / В.П. Смоленцев, Г.П. Смоленцев, Е.В. Смоленцев, А.А. Дорофєєв, І.Т. Коптєв // Бюлетень винаходів. - 2001.

56. Пат. 2283747 Російська Федерація, В24В39 / 02. Спосіб обробки переривчастих поверхонь поверхнево-пластичним деформуванням [Текст] / А.М. Фірсов, В.Є. Васильєв, В.М. Беляєв // Бюлетень винаходів. - 2000.

57. Пат. 2433900 Російська Федерація, В24В3. Інструмент для вигладжування переривчастих поверхонь [Текст] / В.П. Кузнецов, В. Г. Горгоц // Бюлетень винаходів. - 2010 року.

58. Пат. 2489596 С1 Російська Федерація, МПК F02М65 / 00 Пристрій для визначення ефективного прохідного перерізу форсунок і паливо-проводів високого тиску [Текст] / Д.А. Уханов, А.П. Уханов, Є.Г. Ротанов, А.С. Авер'янов // Бюлетень винаходів. - 2013. №22.

59. Пат. 2491155 Російська Федерація, В23Н5 / 06. Спосіб зміцнюючої обробки внутрішніх поверхонь деталей [Текст] / Г.А. Сухочев, Є.Г. Смоляннікова, Д.М. Небольсин // Бюлетень винаходів. - 2013.

60. Пат. 2176325 С2 Російська Федерація, МПК 7 F02М65 / 00, G01М15 / 00. Спосіб випробування форсунок [Текст] / В.С. Волков, Н.А. Мурій, В.А. Смирнов, Н.П. Швецова // Бюлетень винаходів. - 2001.

61. Патент США 4578164 [Текст], В 23 Н 9/02, 25.03.1986 р

62. Попов, В.Г. Рідинні ракетні двигуни [Текст] / В.Г. Попов, Н.Л. Ярославцев. -М .: Видавничо-друкарський центр - «МАТИ» - КТУ ім. К.Е. Цюлковського, 2001. - 171 с.

63. Розпилювання рідин [Текст] / Ю.Ф. Дітякін, Л.А. Клячко, Б.В. Новиков, В.І. Ягодкин. - М .: Машинобудування, 1977. - 208 с.

64. Рижов, Е.В. Технологічне забезпечення експлуатаційних властивостей деталей машин [Текст] / Е.В. Рижов, А.Г. Суслов, В.П. Федоров. - М.: Машинобудування, 1979. - 176 с.

65. Родіонов, А.О. Комбінована обробка внутрішніх поверхонь прецизійних деталей гідроапаратури [Текст] / А.О. Родіонов, Г.А. Сухочев // XVII Макіївські читання: праці Російської наук.-техн. конф., присвяченій 87-річчю від дня народження академіка В.П.Макеєва. - Воронеж: ВАТ КБХА, 2011. - С. 45-47.

66. Родіонов, А.О. Комбінована обробка поверхонь щілинних каналів [Текст] / А.О. Родіонов, Г.А. Сухочев, С.Н. Коденцов, А.Л. Онищенко // Сучасні технології виробництва в машинобудуванні: зб. науч. тр. - Воронеж: ГОУВПО ВГТУ, 2014. - вип. 8 - С. 32-35.

67. Родионов, А.О. Комбинированная обработка щелевых каналов деталей ракетных двигателей [Текст] / А.О. Родионов, Г.А. Сухочев, С.Н. Коденцев // Конструктивные особенности и технология изготовления деталей ракетных двигателей нового поколения: сборник научных трудов отраслевой конференции; Под ред. И.Т. Коптева, В.П. Смоленцева. – Воронеж: ВМЗ, 2014. – С. 189-197.

68. Родіонов, А.О. Механізм комбінованої електрохімікоабразивної обробки щілинних каналів [Електронний ресурс] / А.О. Родіонов // Воронежський науково-технічний вісник: електронний науковий журнал. - Воронеж: ВГЛТА, 2014. - No2 (8). - С. 63-68. Режим доступу: http://vestnikvglta.ru/index/arkhiv_nomerov/0-19.

69. Родіонов, А.О. Технологічні можливості обробки переривчастих поверхонь комбінованими методами [Текст] / А.О. Родіонов, Г.А. Сухочев, А.С. Рекецькій // Забезпечення якості продукції на етапах конструкторської та технологічної підготовки виробництва: межвуз. зб. науч. тр. - Воронеж: ВДТУ, 2011. - вип. 4. - С.82-86.

70. Родіонов, А.О. Технологія комбінованої доведення щілинних каналів систем охолодження [Текст] / А.О. Родіонов, Г.А. Сухочев, С.Н. Коденцов, Є.Г. Смоляннікова // Вісник СГАУ, 2014 року, - №5 (47) - С.91-95.

71. Родіонов, А.О. Експлуатаційно орієнтована комбінована обробка щілинних каналів [Текст] / А.О. Родіонов, Г.А. Сухочев, Є.Г. Смоляннікова, С.Н. Коденцов // Зміцнюючі технології та покриття. - 2014. - №6. - С. 45-48.

72. Родіонов, А.О. Формування крайок пазів і отворів в високоточних деталях ракетних двигунів комбінованими методами обробки [Текст] / А.О. Родіонов, Є.Г. Смоляннікова // Матеріали ХІХ науково-технічної конференції молодих вчених і спеціалістів. - Корольов: РКК «Енергія», 2013. - ч.5. - С. 110-114.

73. Семенов, А.Н. Підвищення ефективності технології збирання паливних форсунок ГТД шляхом управління функціональними параметрами деталей розпилювального пакета [Текст] / О.М. Семенов, А.А. Сазанів // Ізвестія МГТУ МАМІ. - М.: МГТУ "МАМИ", 2014. - №1 (19). - С. 79 - 84.

74. Скворцов, В.Ф. Дорнованіє глибоких отворів малого діаметра: монографія [Текст] / В.Ф. Скворцов, А.Ю. Арляпов. - Томськ: Вид-во ТПУ, 2005. - 92 с.

75. Смілянський, В.М. Механіка зміцнення деталей поверхневим пластичним деформуванням [Текст] / В.М. Смілянський. - М.: Машинобудування, 2002. - 300 с.

76. Смоленцев, В.П. Механізм управління процесом базування індивідуальних заготовок в реологічні рідини [Текст] / В.П. Смоленцев, А.А. Болдирев // Фундаментальні та прикладні проблеми техніки і технології. - 2012. - № 2/3 (292). - С. 56-60.

77. Смоленцев, Е.В. Проектування електричних і комбінованих методів обробки [Текст] / Є.В. Смоленцев. М.: Машинобудування, 2005. 511 с.

78. Довідник по електрохімічним і електрофізичним методів обробки [Текст] / Г.Л.Амітан, І.А.Байсупов, Ю.М.Барон і ін.; За заг. ред. В.А.Волосатова. - Л.: Машинобудування, 1988. - 719 с.

79. Довідник технолога-машинобудівника: у 2-х т. [Текст] / Под ред. А.М. Дальського, А. Г. Косилової, Р. К. Мещерякова, А. Г. Сулова. - 5-е вид., Перероб. і доп. - М.: Машинобудування, 2001. - 905 с. - 2 т
80. Стратієвській, І.Х. Абразивна обробка: довідник [Текст] / І.Х. Стратієвській, В.Г. Юр'єв, Ю.М. Зубарєв. - М.: Машинобудування, 2010. - 352 с.
81. Сулов, А.Г. Інженерія поверхні деталей [Текст] / А.Г. Сулов, В.Ф. Без'язичний, Ю.В. Панфілов. - М.: Машинобудування, 2008. - 320 с.
82. Сулов, А.Г. Експериментально-статистичний метод забезпечення якості поверхні деталей машин [Текст] / А.Г. Сулов, О.А. Горленко. М.: Машинобудування, 2003. - 303 с.
83. Сулов, А.Г. Якість поверхневого шару деталей [Текст] / А.Г. Сулов. - М.: Машинобудування, 2000. - 302 с.
84. Сухочев, Г.А. Автоматизація процесів комбінованої обробно-зміцнюючої обробки важкодоступних пазів і каналів [Текст] / Г.А. Сухочев, А.О. Родіонов, С.Н. Коденцов, Є.Г. Смоляннікова, Ю.Є. Фролов // Сучасні технології виробництва в машинобудуванні: зб. науч. тр. - Воронеж: ГОУВПО ВГТУ, 2013. - вип. 7. - С.4-10.
85. Сухочев, Г.А. Комбінована обробка деталей з щілинними проточними каналами [Текст] / Г.А. Сухочев, А.О. Родіонов // Всеросійська науково-технічна конференція «Тенденції та інновації сучасної науки»: статті, тези доповідей. - Трехгорний: ТТІ НІЯУ МІФІ, 2014. - С. 79-81.
86. Сухочев, Г.А. Технологічні можливості комбінованої обробки в забезпеченні витратних характеристик деталей з малорозмірних проточними каналами [Текст] / Г.А. Сухочев, С.Н. Коденцов, А.О. Родіонов // Зміцнюючі технології та покриття. - 2013. - №7. - С. 45-48.
87. Сухочев, Г.А. Технологічні можливості електрохімічної обробки малорозмірних отворів [Текст] / Г.А. Сухочев, А.О. Родіонов // Забезпечення якості продукції на етапах конструкторської та технологічної підготовки

виробництва: межвуз. зб. науч. тр. - Воронеж: ВДТУ, 2013. - вип. 12 - С. 70-74.

88. Сухочев, Г.А. Технологічне забезпечення якості переривчастих поверхонь гідрооборудовання [Текст] / Г.А. Сухочев, А.В. Капустін, А.О. Родіонов // Праці VII міжнародної науково-технічної конференції «СІНТ'13» - Воронеж, 2013. - С. 160-164.

89. Сухочев, Г.А. Технологічне забезпечення якості переривчастих поверхонь гідрооборудовання [Текст] / Г.А. Сухочев, А.В. Капустін, А.О. Родіонов // Насоси та обладнання. - Київ: ДП ИПЦ «Такі Справи», 2013. - №4 (81) -5 (82). - С. 78-81.

90. Сухочев, Г.А. Технологічне забезпечення експлуатаційних характеристик деталей з щілинними каналами [Текст] / Г.А. Сухочев, А.О. Родіонов, С.Н. Коденцов, Є.Г. Смоляннікова // Високі технології в машинобудуванні. - 2014. - № 4 (34). - С. 20-25.

91. Сухочев, Г.А. Управління якістю виробів, що працюють в екстремальних умовах при нестационарних навантаженнях [Текст] / Г.А. Сухочев. - М.: Машинобудування, 2004. - 287 с.

92. Сисоєв, А.С. Застосування абразивно-екструзії обробки для зняття напружень поверхневого шару каналів в деталях [Текст] / А.С. Сисоєв, С.К. Сисоєв, М.А. Лубнін // Технологія машинобудування. - 2003. - №3. - С. 38-42.

93. Фізико-технологічні основи методів обробки [Текст] / за ред. А.П. Бабічева. - Ростов н / Д: Фенікс, 2006. - 409 с.

94. Хавкін, Ю.І. Відцентрові форсунки [Текст] / Ю.І. Хавкін. - Л.: Машинобудування, 1976. - 168 с.

95. Хансуваров, К.І. Техніка вимірювання тиску, витрати, кількості і рівня рідини, газу та пара: Навчальний посібник для технікумів [Текст] / К.І. Хансуваров. - М.: Видавництво стандартів, 1990. - 287 с.

96. Хейфец, М.П. Проектування процесів комбінованої обробки [Текст] / М.П. Хейфец. - М.: Машинобудування, 2004. - 320 с

97. Електрофізичні та електрохімічні методи обробки матеріалів: в 2-х т. [Текст] / за ред. В. П. Смоленцева. - М.: Вища. шк., 1983. - 247с. - 2 т.
98. Pokhmursky, V.I. Investigation of hydrogen influence on metals in Karpenko physico-mechanical institute / V.I. Pokhmursky // Phys.-chem. mechanics of materials. – 1997. – No 4. – С. 77-76.
99. Smolenzev, V. Scientific Principles of Metal Glass Plating / V. Smolenzev, S. Zhachkin, G. Smolenzev // Materialy konferencyjne EM-94: Budgoszcz, Polska, 1994, – С. 104–108.
100. Fischer A. Reibung und Verschleiss / A. Fischer, Berlin: Wiley-VCH, 2002. – S. 170.
101. НПАОП 28.5-1.02-07. Правила охорони праці при термічній обробці металів.
102. Основи охорони праці: підручник / М.С. Одарченко, А.М. Одарченко, В.І. Степанов, Я.М. Черненко. – Х.: Стиль-Издат, 2017. – 334 с.
103. Основи охорони праці: Підручник. 2-ге видання, доповнене та перероблене. / К. Н. Ткачук, М. О. Халі мовський, В. В. Зацарний, Д. В. Зеркалов, Р. В. Сабарно, О. І. Полукаров, В. С. Коз'яков, Л. О. Мітюк. За ред. К. Н. Ткачука і М. О. Халімовського. — К.: Основа, 2006 — 448 с.
104. Гандзюк М.П., Желібо Є.П., Халімовський М.О. Основи охорони праці: підручник для студентів вищих навч. закладів / За ред. М.П. Гандзюка – К.: Каравела, 2004. – 408 с.
105. Голінько В.І. Г 60 Основи охорони праці: підручник / В.І. Голінько; МОН України; Нац. гірн. ун-т. – 2-ге вид. – Д.: НГУ, 2014. – 271 с.