

Центральноукраїнський національний технічний університет

Механіко-технологічний факультет

Кафедра “Машинобудування, мехатроніки і робототехніки”

«Допущено до захисту»

Завідувач кафедри ММіР

к.т.н., доцент

_____ Андрій ГРЕЧКА

«_____» _____ 2025 р.

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

за другим (магістерським) рівнем вищої освіти

на тему:

**«Забезпечення необхідної вихідної якості гідроабразивної
обробки шляхом визначення параметрів процесу»**

**«Ensuring the required output quality of hydroabrasive processing by determining
the process parameters»**

Виконав здобувач вищої освіти 2-го року
магістратури групи ПМ-24М-3

ОПП «Прикладна механіка»

спеціальності 131 «Прикладна механіка»

_____ Олександр БЕСЧАСНИЙ

Керівник роботи к.т.н., доцент

_____ Олександр ЛИСЕНКО

Рецензент: к.т.н., доцент

_____ Олег БЕВЗ

Центральноукраїнський національний технічний університет

Факультет	Механіко-технологічний
Кафедра	Машинобудування, мехатроніки і робототехніки
Рівень вищої освіти	другий (магістерський)
Галузь знань	13 Механічна інженерія
Спеціальність	131 Прикладна механіка
Освітньо-професійна програма	Прикладна механіка

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри ММіР
Андрій ГРЕЧКА

«___» _____ 2025 р.

ЗАВДАННЯ НА ВИПУСКНУ КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ ЗА ДРУГИМ (МАГІСТЕРСЬКИМ) РІВНЕМ ВИЩОЇ ОСВІТИ ЗДОБУВАЧА ВИЩОЇ ОСВІТИ

Олександр БЕСЧАСНИЙ

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи: «Забезпечення необхідної вихідної якості гідроабразивної обробки шляхом визначення параметрів процесу»
«Ensuring the required output quality of hydroabrasive processing by determining the process parameters»

2. Керівник роботи: к.т.н., доц. Олександр ЛИСЕНКО

3. Строк подання роботи до захисту 10 грудня 2025 р.

4. Мета та завдання випускної кваліфікаційної роботи:

Метою роботи є забезпечення можливості визначення раціональних технологічних параметрів процесу гідроабразивної обробки на основі розробки адекватних теоретичних моделей формування шорсткості поверхні деталей, знімання металу з урахуванням тиску суміші, кута падіння струменя, відстані від сопла до оброблюваної поверхні, характеристик абразиву і часу обробки.

Завдання:

1. Теоретичні дослідження одиничної взаємодії частки середовища з поверхнею деталі.
2. Теоретичні дослідження залежності зрізання матеріалу з оброблюваної поверхні заготовки від технологічних параметрів процесу.
3. Розробка моделі формування шорсткості поверхні в залежності від параметрів обробки.
4. Розробка методики прогнозування результатів гідроабразивної обробки.
5. Створення підходу до оптимізації технологічних процесів для розв'язання різних виробничих задач.

5. Консультанти по роботі, із зазначенням розділів

Розділ	Консультант	Підпис, дата	
		Завдання видав	Завдання прийняв
Дослідно-конструкторський	Олександр ЛИСЕНКО		
Організаційно-економічний	Ірина ЖУРИЛО		

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1.	Огляд літературних джерел	Вересень-жовтень 2025	
2.	Вступ	Вересень-жовтень 2025	
3.	Мета та задачі роботи	Вересень-жовтень 2025	
4.	Методика роботи	Жовтень-листопад 2025	
5.	Теоретична робота	Жовтень-листопад 2025	
6.	Визначення економічної ефективності	Листопад-грудень 2025	
7.	Висновки	Грудень 2025	
8.	Оформлення роботи	Грудень 2025	
9.	Підготовка презентації роботи	Грудень 2025	
10.	Перевірка роботи на антиплагіат	Грудень 2025	

Дата видачі завдання

«27» серпня 2025 р.

Керівник роботи

Олександр ЛИСЕНКО

(підпис)

Завдання прийнято до виконання

«27» серпня 2025 р.

Здобувач вищої освіти

Олександр БЕСЧАСНИЙ

(підпис)

Анотація

БЕСЧАСНИЙ Олександр. Забезпечення необхідної вихідної якості гідроабразивної обробки шляхом визначення параметрів процесу. Випускна кваліфікаційна робота для освітнього ступеня «магістр»: ЦНТУ, 2025. – 94 с. Матеріали презентації 9 іл.

Актуальність: Обробка зернами абразиву дозволяє забезпечити необхідну якість обробки (точність та шорсткість оброблених поверхонь) при високій продуктивності, та також високу надійність і довговічність машин у процесі експлуатації. Розробка і впровадження нових технологічних процесів абразивної обробки дозволяє підвищити якість виробів при забезпеченні високої ефективності виробництва.

Гідроабразивна обробка, як один з різновидів обробки деталей вільними абразивами, дозволяє обробляти фасонні деталі, які складно обробити на верстатах.

Питання розробки моделей, що дозволять встановити однозначний зв'язок між технологічними параметрами гідроабразивної обробки та її якісними характеристиками є актуальним науково-технічним завданням.

Практичне значення:

Отримані залежності для визначення середнього арифметичного відхилення профілю усталеної шорсткості поверхні в результаті гідроабразивного різання, що враховують режими обробки і властивості матеріалу оброблюваної деталі.

Проведено дослідження процесу, що дозволяють установити вплив технологічних режимів обробки на величину і час досягнення усталеної шорсткості поверхні заготовок з різних матеріалів, знімання металу з поверхні деталі. Визначені коефіцієнти, що враховують вплив кута обробки, відстані від сопла до оброблюваної поверхні, тиску струменя на формування шорсткості поверхні і знімання металу з поверхні деталі.

Ключові слова: гідроабразивна обробка, абразивне зерно, шорсткість.

Summary

BESCHASNYI Oleksandr. Ensuring the required output quality of hydroabrasive processing by determining the process parameters. Graduation thesis for the educational degree "Master": CNTU, 2025. – 94 p. Presentation materials 9 slides.

Relevance: Processing with abrasive grains allows to ensure the required quality of processing (accuracy and roughness of the processed surfaces) with high productivity, as well as high reliability and durability of machines during operation. Development and implementation of new technological processes of abrasive processing allows to improve the quality of products while ensuring high production efficiency.

Hydroabrasive processing, as one of the types of processing of parts with free abrasives, allows to process shaped parts that are difficult to process on machine tools.

The issue of developing models that will allow to establish an unambiguous connection between the technological parameters of hydroabrasive processing and its qualitative characteristics is an urgent scientific and technical task.

Practical meaning: Dependencies were obtained for determining the arithmetic mean deviation of the profile of the steady-state surface roughness as a result of hydroabrasive cutting, taking into account the processing modes and the properties of the material of the workpiece.

A study of the process was conducted to determine the influence of technological processing modes on the magnitude and time of achieving the steady-state surface roughness of workpieces made of different materials, metal removal from the surface of the workpiece. Coefficients were determined that take into account the influence of the processing angle, the distance from the nozzle to the processed surface, and the jet pressure on the formation of surface roughness and metal removal from the surface of the workpiece.

Key words: waterjet processing, abrasive grain, roughness

ЗМІСТ

ВСТУП	7
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЧНИХ МОЖЛИВОСТЕЙ ГІДРОАБРАЗИВНОГО РІЗАННЯ, МЕТА І ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕННЯ.....	9
1.1. Сутність процесу гідроабразивного різання	9
1.2. Переваги та недоліки існуючого гідроабразивного обладнання	16
1.3. Технологічні властивості сумішей для гідроабразивної обробки.....	21
1.4. Методи підвищення ефективності гідроабразивного різання.....	23
1.5. Висновки по першому розділу.....	32
РОЗДІЛ 2. ТЕОРЕТИЧНО-ДОСЛІДНА ЧАСТИНА.....	34
2.1. Механізм взаємодії часток абразивної суміші з поверхнею заготовки	34
2.2. Визначення об'єму видалення металу абразивною часткою	51
2.3. Механізм формування профілю шорсткості при гідроабразивній обробці.....	55
2.4. Визначення часу обробки гідроабразивної операції.....	66
2.5. Оптимізація технологічних процесів гідроабразивної обробки	73
РОЗДІЛ 3. ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ЗАПРОПОНОВАНОЇ МЕТОДИКИ ПРОЄКТУВАННЯ ТЕХНОЛОГІЇ ГІДРОАБРАЗИВНОЇ ОБРОБКИ	79
3.1. Загальні вихідні дані.....	79
3.2. Визначення витрат на виготовлення сопла	81
3.3. Розрахунок показників економічної ефективності роботи	86
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ ПО РОБОТІ	88
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	90

ВСТУП

Актуальність роботи. Обробка зернами абразиву дозволяє забезпечити необхідну якість обробки (точність та шорсткість оброблених поверхонь) при високій продуктивності, та також високу надійність і довговічність машин у процесі експлуатації. Розробка і впровадження нових технологічних процесів абразивної обробки дозволяє підвищити якість виробів при забезпеченні високої ефективності виробництва.

Гідроабразивна обробка, як один з різновидів обробки деталей вільними абразивами, дозволяє обробляти фасонні деталі, які складно обробити на верстатах.

На зараз, в результаті проведених досліджень гідроабразивної обробки, а також досліджень у суміжних галузях виявлені основні технологічні можливості гідроабразивної обробки, визначені основні елементи конструктивних параметрів гідроабразивних верстатів. На зараз залишаються проблеми, що стримують широке впровадження процесу гідроабразивної обробки у виробництво: відсутні теоретичні моделі формування шорсткості поверхні при гідроабразивній обробці, знімання металу, не розроблена методика вибору і розрахунку технологічних параметрів при вирішенні різних технологічних задач, відсутня методика оптимізації технологічних процесів.

Тому питання розробки моделей, що дозволять встановити однозначний зв'язок між технологічними параметрами гідроабразивної обробки та її якісними характеристиками є актуальним науково-технічним завданням.

Мета і задачі дослідження. Як мету у роботі можна формулювати наступне: забезпечення можливості визначення раціональних технологічних параметрів процесу гідроабразивної обробки на основі розробки адекватних теоретичних моделей формування шорсткості поверхні деталей, знімання металу з урахуванням тиску суміші, кута падіння струменя, відстані від сопла до оброблюваної поверхні, характеристик абразиву і часу обробки.

Досягнути зазначеної вище мети можливо шляхом вирішення наступних **задач:**

1. Теоретичні дослідження одиничної взаємодії частки середовища з поверхнею деталі.
2. Теоретичні дослідження залежності зрізання матеріалу з оброблюваної поверхні заготовки від технологічних параметрів процесу.
3. Розробка моделі формування шорсткості поверхні в залежності від параметрів обробки.
4. Розробка методики прогнозування результатів гідроабразивної обробки.
5. Створення підходу до оптимізації технологічних процесів для розв'язання різних виробничих задач.

Об'єкт дослідження – взаємодія частки абразиву та оброблюваної поверхні в процесі гідроабразивного різання.

Предмет дослідження – формування профілю усталеної шорсткості поверхні заготовки в результаті гідроабразивного різання.

Наукова новизна.

1. Запропоновано теоретичну модель формування усталеної шорсткості поверхні при гідроабразивній обробці, яка враховує комплексний вплив тиску абразивної суміші, кута падіння струменя, відстані від сопла до поверхні, характеристик абразиву та часу обробки на параметри шорсткості.

2. Отримано залежності для визначення знімання металу під дією гідроабразивного струменя, що кількісно описують взаємозв'язок між технологічними параметрами процесу та інтенсивністю ерозійного руйнування поверхні для різних матеріалів деталей.

Практичне значення роботи. Отримані залежності для визначення середнього арифметичного відхилення профілю усталеної шорсткості поверхні в результаті гідроабразивного різання, що враховують режими обробки і властивості матеріалу оброблюваної деталі.

Проведено дослідження процесу, що дозволяють установити вплив технологічних режимів обробки на величину і час досягнення усталеної шорсткості поверхні заготовок з різних матеріалів, знімання металу з поверхні деталі. Визначені коефіцієнти, що враховують вплив кута обробки, відстані від сопла до оброблюваної поверхні, тиску струменя на формування шорсткості поверхні і знімання металу з поверхні деталі.

РОЗДІЛ 1.

АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЧНИХ МОЖЛИВОСТЕЙ ГІДРОАБРАЗИВНОГО РІЗАННЯ, МЕТА І ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕННЯ

1.1. Сутність процесу гідроабразивного різання

У машинобудівному виробництві більшого поширення набувають методи обробки гідроабразивним інструментом. Абразивна обробка взагалі, та її підвид гідроабразивна обробка дозволяють забезпечити необхідну якість обробки деталей при високій продуктивності, а також високу надійність і довговічність машин у процесі експлуатації, тому роль абразивних операцій в сучасному машинобудуванні безупинно зростає. Розробка і впровадження нових технологічних процесів абразивної та гідроабразивної обробки підпорядковані загальній задачі подальшого підвищення якості виробів при забезпеченні високої ефективності виробництва.

У машинобудівному виробництві необхідність обробки складних фасонних поверхонь призвела до створення нових методів обробки. У цих методах у якості інструменту виступає або електричне поле (електрохімічна розмірна обробка, електрополірування), або спрямований потік різних матеріалів (піскоструминна, дрібоструменна обробки, обробка кульками і т.д.) на заготовку.

Процеси, що використовують ефект удару абразивних часток об оброблювану поверхню заготовки здійснюються такими способами:

- 1) удар відбувається власне абразивною часткою (піскоструминна обробка);
- 2) удар відбувається абразивно-рідинним струменем (струминна гідроабразивна обробка);
- 3) вплив на поверхню заготовки різальних абразивних зерен, що подаються у зону обробки струменем стисненого повітря (турбоабразивна обробка) або під дією магнітного поля (магнітоабразивна обробка).

Струминна гідроабразивна обробка (ГАО) ґрунтується на подачі до поверхні заготовки високошвидкісного потоку рідинно-абразивної суміші,

утвореної водою та твердими частками абразиву. Перед виходом із сопла суміш додатково прискорюється завдяки впливу стисненого повітря, що збільшує її кінетичну енергію та інтенсивність взаємодії з матеріалом деталі. За таких умов на поверхні формується рівномірна матова фактура, яка не містить орієнтованих слідів, притаманних традиційним методам лезової обробки. Вплив абразивних частинок має імпульсний, ударний характер і триває надзвичайно короткий час.

За значних швидкостей струменя механізм руйнування матеріалу поверхні подібний до процесів піскоструминного очищення: відокремлення частинок металу здійснюється за рахунок передачі поверхневому шару енергії рухомих абразивів. Додавання до робочої суміші активних хімічних компонентів сприяє підсиленню дії абразивів, прискорює перебіг ерозійного процесу та збільшує інтенсивність знімання матеріалу.

Ступінь компактності струменя визначається розміром його поперечного перерізу в момент контакту з поверхнею, і саме цей параметр є ключовим чинником, що визначає величину питомого тиску на заготовку. У процесі обробки поверхня зазнає множинного ударного впливу абразивних частинок, що безперервно надходять разом зі струменем суміші. На відміну від процесів різання зв'язаним абразивом (шліфувальними кругами), після яких на обробленій поверхні залишаються риски та мікротріщини, струминна гідроабразивна обробка не створює направленої шорсткості, забезпечує зміцнення оброблюваної поверхні, унаслідок чого підвищується втомлювана міцність оброблених деталей.

У традиційних процесах механічної обробки металів у зоні різання виникають значні механічні зусилля та інтенсивне тепловиділення, що призводить до помітної пластичної деформації поверхневих шарів матеріалу. На відміну від цих методів, під час струминної гідроабразивної обробки температура деталі практично залишається незмінною. Локальне підвищення температури, яке може виникати в момент відокремлення мікрочастинок матеріалу під дією абразивної частки, ефективно нівелюється потоком рідинно-абразивної суміші, що безперервно охолоджує зону контакту.

Струминну гідроабразивну обробку доцільно застосовувати для обробки складних поверхонь: крім значного зниження часу обробки цей спосіб дозволяє

здійснити механізацію процесу оздоблювальних операцій і поліпшити умови праці.

Сутністю процесу гідроабразивної обробки є наступною на поверхню заготовки, що підлягає обробці направляється зі значною швидкістю струмів абразивних зерен і суміші, що маючи визначену кінетичну енергію, при зіткненні з поверхнею виконують роботу, змінюючи стан цієї поверхні.

Особливості взаємодії абразивних зерен струменя з поверхнею заготовки безпосередньо визначають основні результати процесу обробки, а саме його продуктивність і досягваний рівень якості обробленої поверхні. У плані абразивного впливу струминну гідроабразивну обробку можна, розглядати як процес ерозії потоком абразивних часток оброблюваної поверхні. Для установлення фізичної картини явищ, що відбуваються при зношуванні пластичного матеріалу потоком абразивних часток, необхідно спочатку розглянути спрацювання, що викликане ударом одиночної частки.

Удар частки об поверхню приводить до виникнення кратера. Дослідження кратерів, що утворюються при ударах частки під різними кутами атаки, показало, що витиснутий із кратера матеріал тече в напрямку падіння частки з утворенням хвилі доти, поки він не розтріскується через значні швидкодіючі накопичені деформації. При ударах під кутом більше 90° хвиля розташовується навколо кратера рівномірно, при менших кутах атаки вал утвориться з боків кратера і по напрямку руху частки. Характер деформацій і утворення хвилі залежать від форми частки, її орієнтації при контакті з поверхнею, швидкості частки, кута її падіння, а також від властивостей матеріалів частки і поверхні. Було виявлене існування критичної швидкості частки, вище якої матеріал оброблюваної поверхні витісняється у хвилю кратера, а також наявність навколо кратера, що утворився при ударі, зони високої щільності дислокацій (звичайно товщиною в кілька мікрометрів) [50].

При ударі об поверхню абразивної частки спостерігається процес мікрорізання матеріалу. Мікрорізання відбувається тільки вершинами абразивних часток (зерен) і через швидкоплинність і спрямованість ударного впливу воно носить дуже специфічний характер. При ударах абразивної частки або витісняють

більше матеріалу у хвилю кратера, де він стає вразливим для подальшої ерозії, або відокремлюють матеріал від поверхні (у залежності від куту скосу частки при контакті).

Видалення матеріалу при впливі на оброблювану поверхню потоку абразивних часток відбувається в результаті взаємодії декількох одночасно протікаючих процесів, обумовлених окремим або спільним впливом компонентів потоку цих часток. При розгляді ерозії матеріалу струменем абразивних часток необхідно враховувати: зіткнення часток між собою всередині набігаючого потоку; дроблення окремих часток; екранування оброблюваної поверхні частками, що відскакують від неї; широкий діапазон кутів падіння часток у визначений момент часу; вплив оброблюваної поверхні на траєкторію руху абразивних часток; підповерхневе ушкодження матеріалу внаслідок багаторазових ударів абразивними частками; адсорбційний ефект зменшення міцності матеріалу заготовки на межі поділу оброблюваної поверхні і потоку і т.п. [39].

Достеменно процеси деформації і руйнування матеріалу, що протікають при багаторазових ударах часток по оброблюваній поверхні, усе ще до кінця не вивчені. На підставі окремих досліджень осколків, що утворилися в результаті ерозії пластичних матеріалів, було зроблене припущення, що шляхом безпосереднього зрізання матеріалу при ударі про нього абразивної частки переміщається лише невелика кількість матеріалу. Велика пластична деформація викликається впливами проорюючого типу (утворення хвилі), при цьому зміщений матеріал створює топографію поверхні, з яким метал може бути вилучений наступними ударами часток [11].

Спостерігається різке кількісне і якісне розходження між процесами ерозії в присутності рідини та без неї. При видаленні матеріалу абразивним струменем відбуваються наступні процеси: руйнування оброблюваної поверхні в результаті високих контактних напружень; зрізання мікростружки з поверхні; утворення клиноподібних тріщин у поверхневому шарі оброблюваної поверхні; гідроудар; контактна втома. Відносна роль кожного з цих явищ визначається фізико-механічними властивостями матеріалу оброблюваної деталі й абразивних часток, швидкістю і кутом атаки абразивного струменя [43].

Галузі можливого застосування гідроабразивної обробки при виготовленні деталей приведені на рис. 1.1. Доцільно гідроабразивну обробку застосовувати і для остаточної обробки канавок різальних інструментів (свердел, зенкерів і ін.), порожнин матриць і т.п.

Гідроабразивна обробка застосовується при обробці крильчаток компресорів, кілець підшипників, шатунних болтів, зубів коліс, лопаток турбін і напрямних апаратів, деталей приладів, різального інструмента, штампів, постійних форм для лиття, волочильних фільтрів, шатунів двигунів внутрішнього згоряння і т.п.

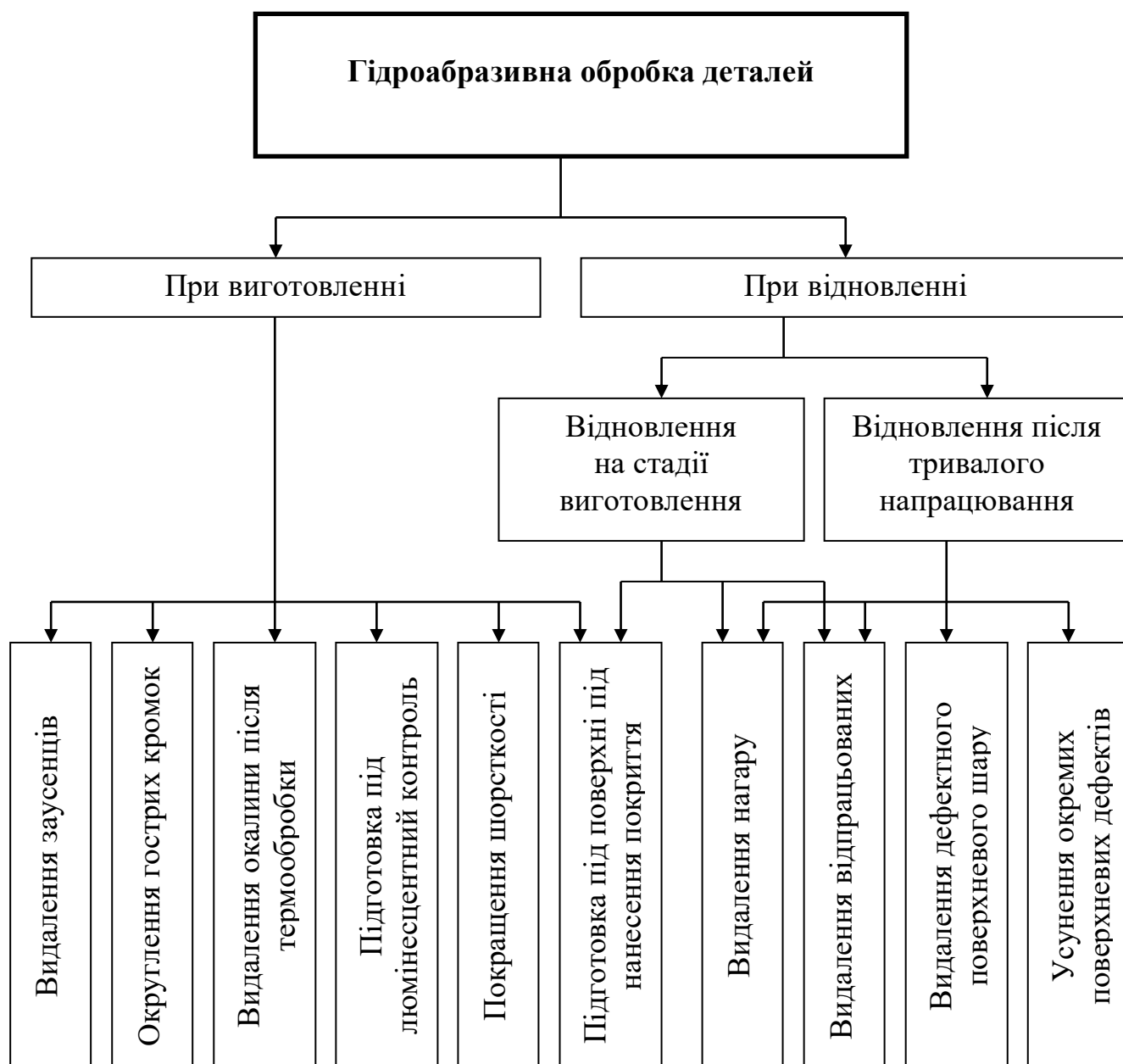


Рис. 1.1. Галузі можливого застосування струминної гідроабразивної обробки

Мікрозаглиблення на обробленій поверхні підвищують її капілярні властивості, сприяючи затримуванню змащення під високим питомим тиском у тяжких умовах експлуатації. Тому цей вид обробки доцільно застосовувати після шевінгування зубів коліс і остаточної обробки робочих поверхонь циліндрів автомобільних і авіаційних двигунів. У цьому випадку час припрацювання циліндрів скорочується і термін їхньої служби збільшується. Гідроабразивна обробка підшипників ковзання сприяє утриманню масляної плівки і знижує спрацювання тертьових поверхонь [50].

Гідроабразивна обробка сприяє поліпшенню зчеплення нанесених на поверхню деталі шарів металевих покриттів, фарби, гуми, клею [50, 55].

Гідроабразивну обробку застосовують також після зварювання і пайки, для зачищення швів і видалення забруднень. Ефективний процес очищення пружин без небезпеки появи водневої крихкості, що виникає при кислотному травленні. Заусенці, окалину і грубу шорсткість у внутрішніх порожнинах складних поковок і виливків можна ефективно видалити шляхом гідроабразивної обробки. При застосуванні цієї обробки можна усунути ризики, що виникли в процесі штампування або шліфування, залишки шліфувального матеріалу, очистити поверхні деталей з легких сплавів, відлитих у піщаних формах.

При гідроабразивній обробці макропрофіль повільно змінюється і лише переміщається як би паралельно самому собі, у глиб деталі. Якщо частина поверхні залишити незахищеною і піддати дії струменя, то весь макропрофіль, зберігши свій контур у трохи розмитому виді, опуститься. Величина цього опускання пропорційна часу дії струменя [5].

При гідроабразивній підготовці під покриття деталі металами з її поверхні усувається оксидна плівка і забруднення, віддаляються нерівності й утворюються дрібні кратери, що створюють добре підготовлену поверхню для нанесення хрому або іншого металу покриття.

Можна вказати наступні основні напрями застосування гідроабразивної обробки:

- 1) обробка деталей особливо складної конфігурації;

- 2) зменшення шорсткості поверхні при дотриманні високої точності виготовлення деталі;
- 3) одержання чистої поверхні без спрямованих слідів обробки, зі створенням наклепу для підвищення втомлюваної міцності;
- 4) одержання поверхонь з високою капілярністю для підвищення зносостійкості і зчеплення з покриттями і фарбами;
- 5) збільшення стійкості інструмента усуненням слідів механічної обробки;
- 6) видалення окалини, іржі й очищення поверхонь від забруднення;
- 7) зняття заусенців.

Обладнання для обробки заготовок потоком вільного абразиву, застосовувані в даний час, мають саму різноманітну конструкцію.

Типові схеми, в основу яких покладені оздоблювальні методи обробки потоком вільного абразиву представлені на рис. 1.2.



Рис. 1.2. Класифікація обладнання для обробки струменем вільного абразиву

1.2. Переваги та недоліки існуючого гідроабразивного обладнання

У виробництві застосовуються гідроабразивне обладнання з багатьма варіантами способів подачі суміші і прискорення ним.

Гідроабразивні установки класифікують за принципом подачі робочої суміші до струминного апарата та на заготовку. Залежно від способу подачі суміші розрізняють такі типи обладнання: системи, у яких суміш подається шляхом інжекції в струминний апарат і надалі прискорюється потоком газу або води; установки, де суміш нагнітається газом, водою чи насосом і потім викидається через сопло; а також системи, що забезпечують нагнітання суміші газом, водою або насосом із подальшим її додатковим прискоренням за допомогою роторних лопаток, газового або водяного потоку [26].

Схеми обладнання для струминної гідроабразивної різання на рис. 1.3.

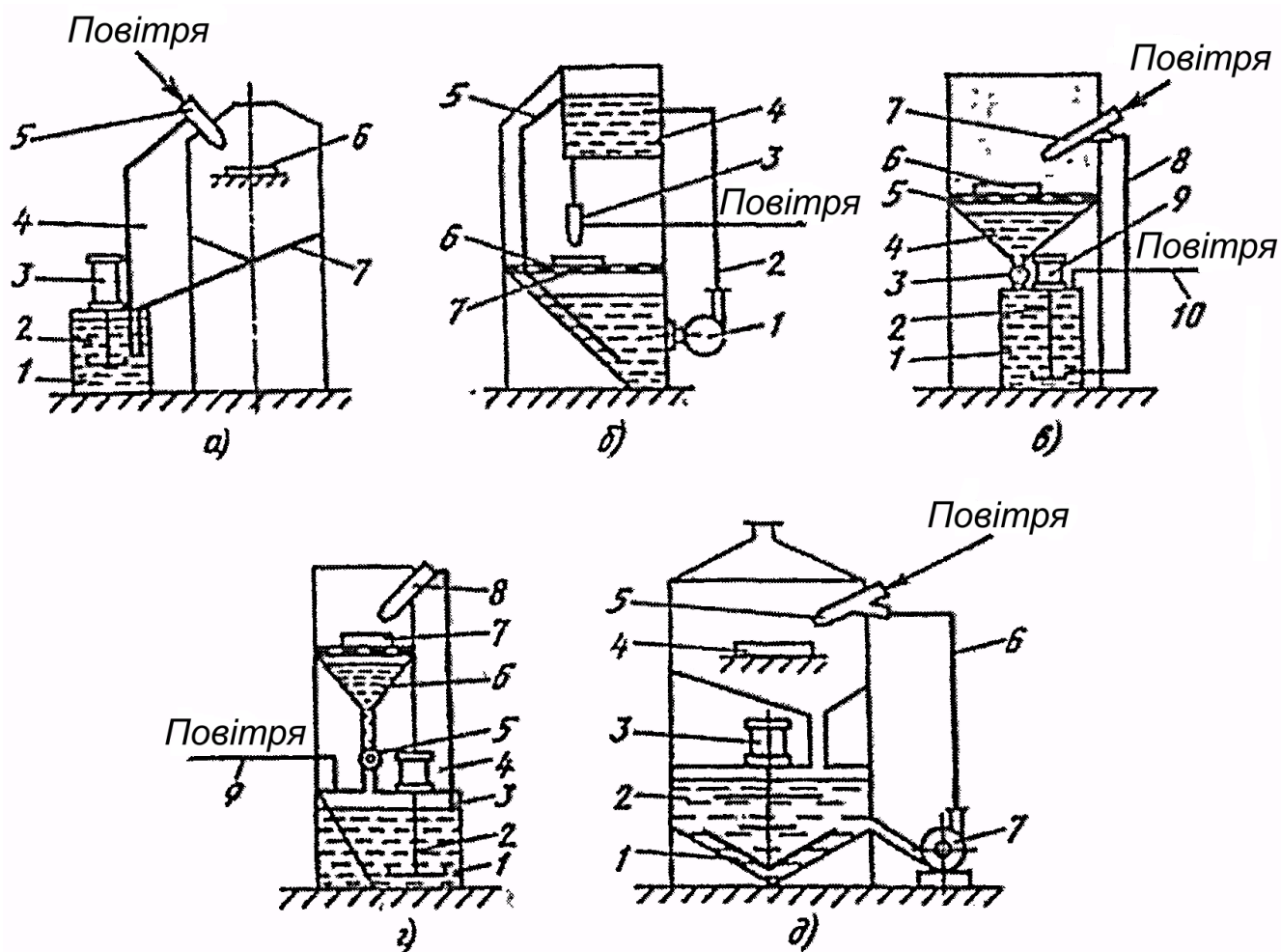


Рис. 1.3. Схеми обладнання для струминної гідроабразивної обробки

Схема обладнання з засмоктуванням суміші приведена на рис. 1.3, а. Для підтримки абразивних часток у рідині в зваженому стані резервуар 1 обладнаний пропелерною мішалкою 2, що обертається електродвигуном 3. Суміш по шлангу 4 подається до струминного апарата 5 за рахунок інжекції її стисненим повітрям і направляється на поверхню обробки 6. Суміш стікає в нижню частину камери 7 і самопливом повертається в резервуар 1.

Обладнання, що працює за такою схемою, набутили промислового застосування там, де не потрібно інтенсивного знімання металу.

Схема обладнання, у якій суміш самопливом надходить до струминного апарата (рис. 1.3, б). Насосом 1 суміш подається по трубі 2 у бак 4, розташований у верхній частині робочої камери. З бака 4 суміш стікає до струминного апарата 3 і викидається на оброблювану заготовку 7 стисненим повітрям. Більш 50 % суміші, подаваної насосом у бак 4, зливається по трубі 5 у нижню частину камери, чим забезпечується інтенсивне перемішування абразивних часток і рідини. Суміш, що пройшла через струминний апарат крізь перфорований стіл 6, також повертається в нижню частину камери.

В обладнанні (рис. 1.3, в), суміш знаходиться в герметично закритому баці 1, тиск у якому підтримується автоматично в межах 0,12...0,2 МПа. Стиснене повітря в бак підводиться по трубі 10. Під дією цього тиску суміш по трубі 8 надходить до струминного апарата 7, у якому розганяється стисненим повітрям з тиском 0,4...0,6 МПа, і направляється на оброблювану заготовку 6. Суміш, що відпрацювала, через перфорований стіл 5 попадає в нижню частину камери 4. Рідина й абразивні частки перемішуються в баці 1 мішалкою 2, що приводиться в обертання електродвигуном 9. Недоліком такого обладнання є переривчастість процесу внаслідок необхідності перезарядження (перепуск суміші з робочої камери 4 у бак 1 через вентиль 3).

Досить низьку продуктивність обробки забезпечує обладнання, що працює за схемою, показаної на рис. 1.3, г. Суміш у баці 1 знаходиться під тиском стиснутого повітря, що надходить по трубі 9. Суміш перемішується пропелерною мішалкою 2, що приводиться в обертання електродвигуном 4, і подається по шлангу 3 через сопло 8 на оброблювану заготовку 7 без інжекції. Суміш, що

відпрацювала, стікає в нижню частину камери 6 і потім при перерві в роботі через вентиль 5 перепускається в бак 1. Якщо в конструкції обладнання передбачено два баки, то вони працюють по черзі і перерви для їхнього перезарядження не потрібно.

Найбільшого поширення в машинобудуванні отримало обладнання, виконане за схемою, показаної на рис. 1.3, д. У нього суміш подається з бака 1 насосом 7 по трубопроводу 6 до струминного апарата 5. У струминному апараті суміш прискорюється стисненням повітрям і викидається на оброблювану поверхню заготовки 4. Суміш, що відпрацювала, стікає з камери в бак, де абразивні частки підтримуються в зваженому стані мішалкою 2, що приводиться в обертання електродвигуном 3. Процес протікає ефективніше, якщо насос подає суміш під тиском, рівним або майже рівним тискові інжектваного повітря (0,4...0,6 МПа).

Абразивно-відцентрові установки використовуються, як правило, для очищення окислених поверхонь і відливок. Випускаються в основному два типи установок: періодичної і безперервної дії. Установки періодичної дії бувають непрохідні (тупикові) і прохідні. Непрохідні установки виготовляються в різних варіантах у залежності від транспортуючого органа: з обертовим столом і тарілками; з човниковим рухом столу; з рольгангами, спареними зі столами; з висувним столом, закріпленим на двері; з викочувальним візком; з візком на поворотному колі і двома рейковими напрямними; з обертовим столом.

Прохідні установки виготовляються з візком на поворотному колі, човникові з викочувальним візком, карусельні з обертовими підвісками.

Установки періодичної дії для очищення фасонних виливків не знайшли широкого застосування через швидкий вихід з ладу деталей відцентрових апаратів. Крім того, при очищенні середнього і великого фасонного лиття залишається пригар у важкодоступних місцях і на внутрішніх порожнинах виливків.

На рис. 1.4 представлена схема установки, широко використовуваної в промисловості. Абразивний матеріал з робочої камери 6 надходить в елеватор 1, потім у сепаратор 3, у якому відбувається відділення абразивних часток від

відходів, що надходять по патрубку в очисні пристрої. Абразивний матеріал по ковзалу 4 попадає в прийомну лійку відцентрового апарата 5 і направляється на оброблювану поверхню заготовки 2.

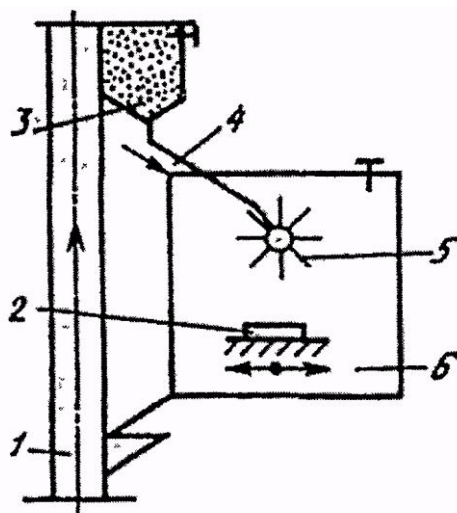


Рис. 1.4. Схема надходження абразивних зерен елеватором на лопаті ротора

Основним недоліком обладнання на принципі абразивно-відцентрової подачі – недостатня стійкість крильчаток і лопаток відцентрових апаратів.

Гравітаційні установки одержали обмежене поширення в промисловості через невелику кінетичну енергію, що надається абразивним часткам, і недостатньої гнучкості керування струминним апаратом. У гравітаційній установці (рис. 1.5, а), абразивний матеріал, засипаний у резервуар 3, самопливом надходить у струминний апарат 4 і направляється на оброблювану поверхню заготовки 7 струменем стиснутого повітря, що надходить по трубі 5 і мінає через сопло 6. Потім абразивний матеріал з робочої камери 8 надходить в елеватор 9, далі в сепаратор 1, трубу 2 і знову в резервуар 3.

На рис. 1.5, б показана гравітаційна установка, у якій у якості носія абразивного матеріалу використана вода. У баці 2 пропелерної мішалкою 1, що приводиться в рух електродвигуном 3, абразивні частки підтримуються в рідині в зваженому стані. За допомогою насоса 4 суміш по трубі 5 подається в резервуар 7, розташований у верхній частині робочої камери 8, з якого стікає до струминного апарата 9, і стисненим повітрям, що надходить по трубі 6, викидається на оброблювану поверхню заготовки 10, після чого по трубі 11 повертається в бак.

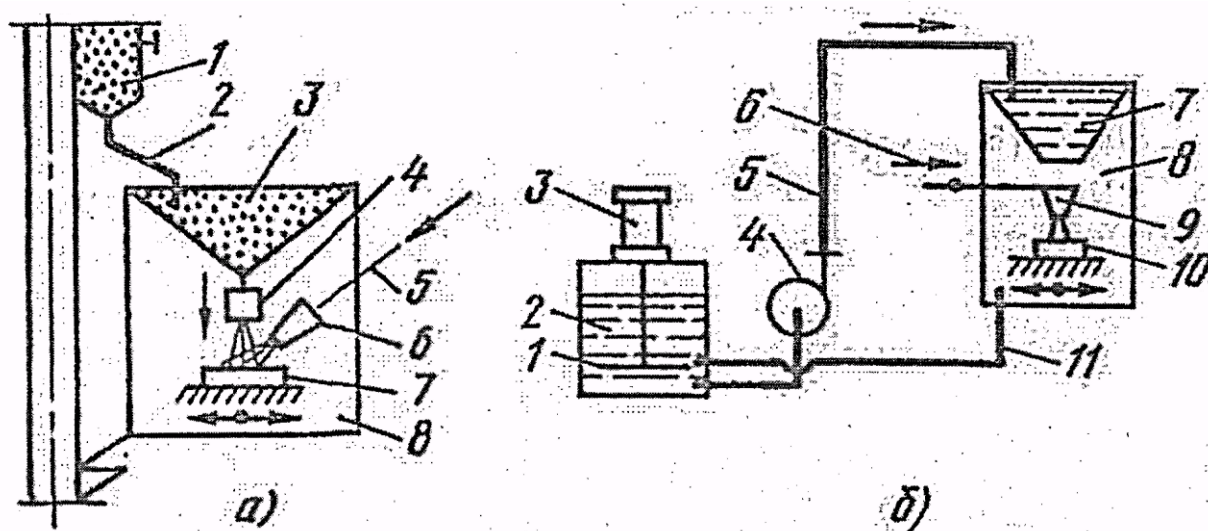


Рис. 1.5 Схема установки з подачею абразивного матеріалу (а) і суміші (б) самопливом і прискоренням їхнім стисненим повітрям

Гравітаційні установки відрізняються одна від одної лише схемою подачі абразивного матеріалу в резервуар, що не впливає на процес обробки.

Розроблено велику кількість дослідних і промислових установок для струминної ГАО різних заготовок. Обов'язковим при розробці конструкції є забезпечення надійної герметизації робочої камери з метою виключення виділення при роботі пилу. Це значно поліпшує умови праці (у порівнянні з піскоструминною обробкою), а також дозволяє розташовувати такі установок у загальній лінії верстатного устаткування і тим самим скоротити транспортні переміщення оброблюваних заготовок.

Апарат, що безпосередньо формує струмінь і направляє його на оброблювану поверхню, є одним з основних механізмів гідроабразивної установки і дуже впливає на інтенсивність процесу і ступінь використання енергії струменя суміші. Конструкція і розміри апарата залежать від характеру операції, конфігурації і габаритних розмірів оброблюваної деталі.

Дослідження [6] показують, що на малій відстані від сопла струмінь зберігає суцільність, а потім у ній утворюються розриви неправильної форми, іноді відбувається розподіл на окремі струмки і, нарешті, струмінь розпадається на окремі краплі. Процес розсіювання струменя дуже складний і залежить від:

аерації струменя при турбулентному перемішуванні рідини з повітрям унаслідок подолання поверхневого натягу струменя, дії сили ваги, тертя поверхні струменя об повітря і розпаду струменя унаслідок втрати стійкості рухам. Навколо основного тіла струменя, що представляє змішаний потік газу, рідини і твердих часток, утвориться хмара пилу, що випадає у виді крапель, що знижує ефективність струменя.

З матеріалів [5, 6] можливо встановити, що основними факторами, що визначають структуру і властивості струменя, є: умови руху суміші на ділянці, що передуює викидові із сопла; вплив основної частини струменнотвірного апарата – сопла й особливості характеру руху струменя суміші від сопла до оброблюваної поверхні.

Струмінь, що впливає на тверде тіло, повинний мати достатній запас енергії при виході зі струминного апарата і досягати оброблюваної поверхні з мінімальними втратами.

1.3. Технологічні властивості сумішей для гідроабразивної обробки

Технологічні параметри струминної гідроабразивної обробки знаходяться в залежності від характеристик та властивостей абразивних зерен. Промисловість виробляє різноманітні шліфувальні матеріали в зерні і порошках, що відрізняються будовою матеріалу, його міцністю, вмістом і характером домішок. Для струминної ГАО найчастіше застосовують мінеральні абразивні матеріали, що поділяються на дві категорії: природні і штучні.

Основними компонентами суміші для струминної гідроабразивної обробки є робоча рідина й абразивний матеріал. Особливість струминної гідроабразивної обробки складається в поєднанні процесу знімання матеріалу і процесу змащення й охолодження оброблюваної поверхні, тобто ці процеси поєднанні у часі і здійснюються одночасно і безупинно. Обробка відбувається не просто в середовищі робочої рідини, а в струмені, що має велику швидкість та контактує з оброблюваною поверхнею.

Робоча рідина дещо знижує швидкість абразивних часток при струминній гідроабразивній обробці, однак вона виконує наступні функції: забезпечує

транспортування абразивних часток матеріалу від розхідної ємності до оброблюваної поверхні; безупинно очищає оброблювану поверхню, видаляючи абразивні частки, що відпрацювали, і часточки знятого матеріалу; виключає утворення пилу; є носієм поверхнево-активних речовин, що створюють адсорбуючі шари полярних молекул і що зменшують міжатомні зв'язки в поверхневому шарі оброблюваного матеріалу, і знижує в такий спосіб твердість і опір матеріалу руйнуванню; регулює тепловий режим у зоні обробки.

До робочої рідини висувають вимоги: ефективний вплив на оброблювану поверхню, не бути занадто в'язкою щоб уникнути нерівномірного розподілу абразивних часток у потоці, не мати великого опору при проходженні по трубопроводах і через соплові апарати; не повинна легко випаровуватися; не повинна піддаватися мимовільному хімічному розпадові під дією кисню повітря; повинна виконувати високі пасуючі та інгібуючі дії; у розпиленому стані і при сильному ударі об поверхню не повинна бути вогнебезпечною.

Склад робочої рідини підбирають у залежності від вихідного стану оброблюваної поверхні і необхідної якості обробки. При цьому враховують також механічні властивості оброблюваного матеріалу, умови обробки і схему установки для струминній гідроабразивній обробці.

Робоча рідина повинна не тільки збільшувати інтенсивність обробки поверхні, але і запобігати налипанню часток знятого матеріалу до оброблюваної поверхні, а також виявляти антикорозійні властивості.

Як правило, основним компонентом абразивної суміші є вода. Недоліком застосування води є корозія деталей після обробки. Для зменшення корозії в суміш додають поверхново-активні речовини на основі сульфоз'єднань: сульфофрезол, тринатрій-фосфат, кальциновану соду, хромпик і інші, котрі здійснюють пасивуючу дію на поверхню, підвищують корозійну стійкість деталей і установок для струминної гідроабразивної обробки. При застосуванні поверхнево-активних речовин питома робота різання при струминній гідроабразивній обробці зменшується в 2...3 рази, у той же час поліпшуються миючі властивості робочої рідини. Рекомендується до складу суміші додавати поверхнево-активні речовини в межах 0,5...3,5 %.

Об'ємний вміст абразивних часток у суміші зазвичай підбирається дослідним шляхом. Рекомендується об'ємна концентрація абразивних часток у суміші 20...30 %. Збільшення концентрації понад зазначені межі, як правило, порушує нормальну роботу установок для струминної гідроабразивної обробки. Витримуючи оптимальні співвідношення компонентів суміші, забезпечують найкращі технологічні показники процесу обробки.

1.4. Методи підвищення ефективності гідроабразивного різання

Метод гідроабразивної обробки на сьогодні вивчений недостатньо, що в значній мірі стримує його застосування. Існуюча інформація про закономірності процесу є досить розрізною та не дозволяє сформулювати емпіричні залежності для визначення основних параметрів якості обробки при даному методі. У роботах присвячених вивченню методу ГАО, як правило, досліджується один або кілька технологічних параметрів, що впливають на процес обробки є швидкість струменя, зернистість абразиву, кут нахилу струменя, відстань від сопла до оброблюваної поверхні.

На зараз відома певна кількість робіт присвячених вивченню процесу гідроабразивної обробки, дослідженню його основних закономірностей і технологічних можливостей.

Найбільший інтерес в галузі вивчення методу гідроабразивної обробки представляють роботи Непомнящего Е.Ф., Проволоцкого А.Е., Шманева В.А., Шулепова А.П. та ін. [33, 38, 50]. Ці роботи присвячені вивченню сутності методу гідроабразивної обробки.

Білик Ш.М. [5] показав, що при малій швидкості струмись рідини, спрямований на поверхню металу протягом короткого проміжку часу, не залишає на ній помітного сліду. Цей вплив не може бути виявлено навіть зважуванням зразка, тому що спрацювання поверхні не мав місця. Якщо ту ж поверхню піддати дії струменя кварцового піску, що має таку ж малу швидкість і протягом такого ж проміжку часу, знайдемо на металі заглиблення. При цьому зважуванням зразків може бути встановлена кількість металу, віднесеного струменем. Спрямований на аналогічні зразки струмись суміші, що складається з рідини і кварцового піску

(або часток іншого абразиву), при тих же режимах і часі обробки залишить на поверхні металу великі заглиблення, а кількість металу, віднесеного струменем, значно зростає.

Сила тертя між водою й абразивними зернами більше, ніж між повітрям і цими ж зернами. Тому вдається додати абразивним часткам більші швидкості, чим безпосередньо повітрям.

При ударі протягом малого проміжку часу, діють великі сили, які називають миттєвими. Величина цих сил P характеризується зміною кількості руху за час удару, тобто [5]:

$$m(v - v_0) = \int_0^t P dt,$$

де m – маса абразивної частки в $\text{кг} \cdot \text{с}^2/\text{м}$;

v та v_0 – швидкості абразивної частки до удару і безпосередньо після удару, м/с ;

t – час удару, с .

Розміри абразивного зерна, а отже його маса, не можуть вибиратися довільно, тому величина кінетичної енергії різальної частки абразиву, практично залежить винятково від швидкості.

Силу дії абразивної частки A можна визначити за формулою [5]:

$$A = \frac{mv^2}{2}.$$

Зі збільшенням швидкості удару миттєвий тиск досягає такої величини, при якій відбувається пластична деформація або відривання часток матеріалу, або: обидва процеси разом, тобто досягається межа міцності матеріалу. Процес деформування твердого тіла починається з пружної деформації, що передуює пластичній деформації і руйнуванню твердого тіла. Пружна деформація поширюється зі швидкістю звуку (для м'якої сталі 5130 м/с). На протікання пластичної деформації, що забезпечує переміщення кристалів, потрібне більший час.

Сили і тиск, що виникають при ударі абразивних часток нормально до поверхні твердого тіла, можна обчислити за формулами Герця – максимальна

сила удару твердої частки круглою форми об гладку поверхню тіла [6] визначається:

$$P_{\max} = \frac{0,24r^2 c^{\frac{6}{5}} \gamma^{\frac{3}{5}}}{\left(\frac{1-\mu_1^2}{E_1} + \frac{1-\mu_2^2}{E_2} \right)^{\frac{2}{5}}}, H/cm^2$$

та максимальний тиск абразивних часток на тверде тіло:

$$P_{\max} = \frac{1,67r^2 c^{\frac{2}{5}} \gamma^{\frac{1}{5}}}{\left(\frac{1-\mu_1^2}{E_1} + \frac{1-\mu_2^2}{E_2} \right)^{\frac{4}{5}}}, H/cm^2$$

де γ – питома вага абразивної частки, $кг/см^3$;

μ_1 і μ_2 – відповідно коефіцієнти Пуассона для твердої круглої частки і гладкої поверхні;

E_1 та E_2 – відповідно модулі пружності твердої круглої частки і гладкої поверхні в $кг/см^2$;

c – швидкість часток, $см/с$;

r – радіус частки, $см$.

Таким чином, P не залежить від величини абразивної частки. Вплив абразивного матеріалу і матеріалу оброблюваної деталі враховуються модулями пружності E .

У дослідженнях Непомнящого Е. Ф. [34] розглянуто механізм взаємодії абразивної частинки з оброблюваною поверхнею. Автор припустив, що при зіткненні під певним кутом тверда частинка проникає у матеріал заготовки та, рухаючись по поверхні, проходить певну траєкторію. У процесі ковзання частинка послідовно деформує низку локальних ділянок поверхневого шару. Якщо під такою ділянкою розуміти зону контакту частинки з матеріалом, то кожен удар частинки спричиняє кілька впливів, але на різних мікроділянках поверхні.

Оскільки площа контакту змінюється протягом її взаємодії з поверхнею, то навіть за умови, що всі частинки мають однакові розміри, масу та сферичну

форму і потрапляють на поверхню під сталістю кута та швидкості, розмір контактної плями буде описуватися певним спектром значень. На основі цих припущень було отримано аналітичний вираз для визначення максимального впровадження частинки в матеріал.

$$h_{\max} = R \left[4 \frac{5\pi\rho_r(1-\mu^2)v_0^2 \sin^2 \alpha}{4 \cdot E} \right]^{\frac{2}{5}},$$

де R – радіус частки;

ρ_r – щільність матеріалу частки;

μ – коефіцієнт для матеріалу заготовки Пуассона;

v_0 – швидкість руху абразивних зерен у потоці струменю;

α – кут атаки руху абразивних зерен у соплі;

E – для матеріалу заготовки модуль пружності.

Поданий аналітичний вираз дає можливість описати характер взаємодії абразивних частинок із поверхнею, враховуючи властивості як оброблюваного матеріалу, так і самого абразиву, а також вплив окремих технологічних параметрів процесу. Згідно з даними [50], при ударній взаємодії абразивних частинок із поверхневими шарами матеріалу відбувається ряд змін.

1. Формування мікро- та макрогеометрії поверхні. Уже на початковій стадії обробки внаслідок пружно-пластичної деформації поверхневого шару на заготовці утворюються характерні лунки (вм'ятини). У разі обробки пластичних матеріалів ці локальні пошкодження можуть приводити до формування хвилястої структури поверхні, фронт якої орієнтований перпендикулярно проекції вектора швидкості влучання частинки.

2. Зміна напруженого стану деталі.

3. Структурні і фазові зміни в поверхневому шарі деталі.

4. Руйнування абразивних часток.

5. Перенесення абразивних матеріалів, що спостерігається при високих тисках і температурах у процесі удару.

Проволоцький А. Е. [38] показав, що при бомбардуванні металевих поверхонь потоком абразивних часток прояв хвилястості збільшується з підвищенням пластичності матеріалів, при цьому помітно росте і фронт поширення хвиль деформації.

Виникнення хвиль викликане характером ударної дії струменя по оброблюваній поверхні, а також властивостями оброблюваного матеріалу. Потік абразивних часток з рідиною має велику турбулентність, крім того, при змішуванні його з повітрям збільшуються розриви суцільності струменя, що і визначає імпульсний характер сили удару струменя, що був також встановлений при зміні сили удару гідроабразивного струменя методом осцилографування.

Процес мікрорізання, як основний вид руйнування при гідроабразивній обробці, настає тоді, коли абразивна частка впроваджується в матеріал більш ніж на половину радіуса округлення різальної кромки. Дослідженнями [30, 38] установлені наступні залежності (h – глибина впровадження абразивного зерна в метал; r – радіус округлення різальної ромки абразивного зерна):

- $h/r \geq 0,5$ – процес мікрорізання;
- $0,01 < h/r < 0,5$ – процес пластичного відтискування;
- $h/r < 0,01$ – процес пружного відтискування.

При струминній гідроабразивній обробці наявність рідкої фази значно змінює характер протікання процесу взаємодії абразивних часток з поверхнею. Струминну ГАО можна розглядати як ерозійно-корозійний процес, причому руйнуючий: дія рідини пояснюється проявом ефекту Ребиндера [40]. Відсутність інформації про основні параметри ударного впливу гідроабразивного струменя на оброблювану поверхню, більшість з яких взаємозалежні і їх важко контролювати і вимірювати перешкоджає створенню математичної моделі струминної ГАО. С. П. Козирєвим [21] зроблена спроба теоретично описати процес видалення металу під дією гідроабразивного струменя: Розглядаючи роботу абразивної частки при її динамічному вдавненні в поверхню під прямим кутом і сили гідродинамічного опору, він одержав формулу для визначення вагового знімання металу

$$\Delta G = \frac{k\alpha\gamma_1\gamma_2V\Pi N_1^2(1-k_1^2)}{2gH_m}$$

де k – постійний коефіцієнт;

a – коефіцієнт, що враховує міжзерновий простір;

γ_1, γ_2 – питома вага абразивного матеріалу і металу відповідно;

v – об'єм струменя води, що вдаряє по поверхні;

Π – вміст абразивних часток у воді у відсотках до обсягу;

N – кількість ударів часток по поверхні;

v_1, k_1 – швидкість абразивної частки і коефіцієнт відновлення її швидкості;

H_m – динамічна твердість металу по Мейеру.

Результати розрахунків, виконаних за даною формулою, досить добре збігаються з експериментальними даними. Однак ця формула не враховує впливи на масове знімання металу таких параметрів, як розміри абразивних часток, кути атаки часток, тиск повітря, довжина струменя й інші.

А. Е. Проволоцкий [38] припустив, що характер руйнування поверхні гідроабразивним струменем нагадує схему різання клином, що впроваджується, а процес видалення може бути описаний згідно [47, 48] наступним диференціальним рівнянням:

$$\frac{dx}{dt} = k(Q - x)$$

Звідкіля:

$$x = Q[1 - e^{-kt(1-0,5\beta t)}]$$

де x – поточне лінійне знімання металу за час 1;

Q – загальний лінійний припуск;

k – коефіцієнт руйнування металу;

β – коефіцієнт убування абразивної здатності визначеного обсягу суміші.

Останнє рівняння, також, як і попереднє, не враховує більшості параметрів струминної гідроабразивної обробки.

Шманев В. А. [50] припустив що в залежності від максимальної глибини впровадження можливі два випадки руху частки на етапі впровадження. У першому випадку максимальна глибина впровадження не перевищує величини $h = R \cdot (1 - \cos \alpha)$ і рух частки можна розглядати як впровадження сфери по нормалі до поверхні (рис. 1.6, а) і в другому випадку якщо максимальна глибина впровадження більше, ніж $R \cdot (1 - \cos \alpha)$ (рис. 1.6, б).

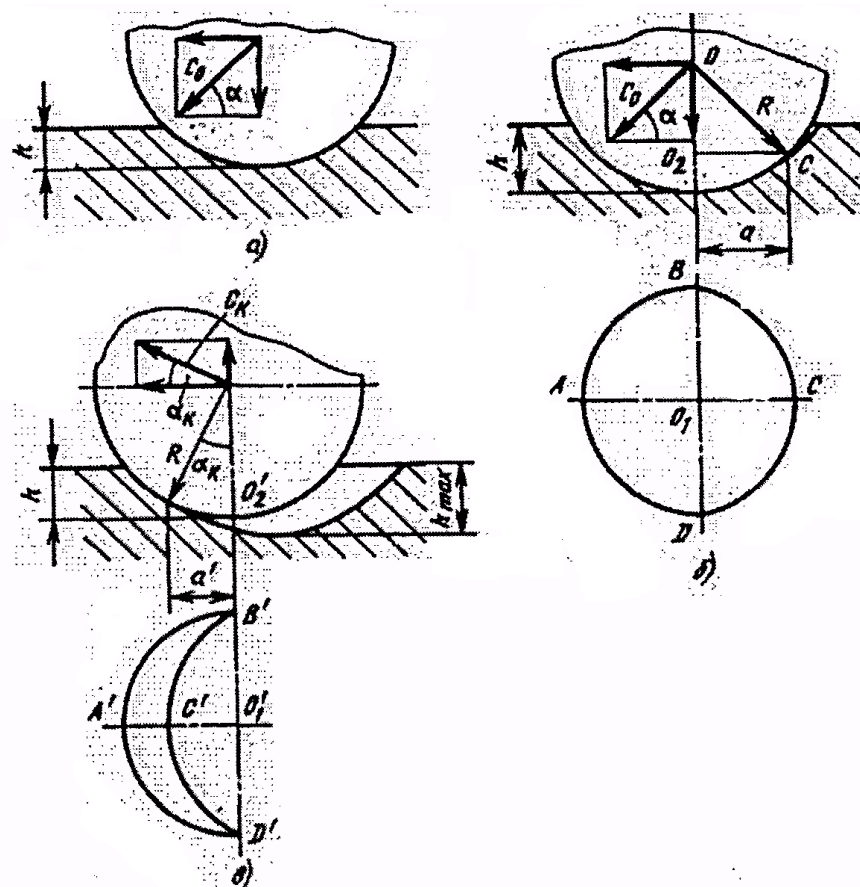


Рис. 1.6. Схема руху абразивної частки по пластичному півпросторі

Була отримана формула для визначення масового знімання матеріалу для першого випадку впровадження:

$$C_1 = k_{a,R} S \frac{K m_c \rho_{аб.н.} \rho_m \left[3R h_{\max}^3 + 2\sqrt{2R h_{\max}^3} \frac{R - \cos \alpha_k (R - h_{\max})}{\sin \alpha_k} \right]}{8R^3 \rho_{аб} \left[\rho_{жс} + K(\rho_{аб} - \rho_{жс}) \frac{\rho_{аб.н.}}{\rho_{аб}} \right]}.$$

Для другого випадку впровадження абразивного зерна:

$$C_1 = k_{a,R} S \frac{K m_c \rho_{аб.н.} \rho_m 2\sqrt{2R h_{\max}^3} [R(\sin \alpha_k + \cos \alpha) + (h_{\max} - R)\sin(\alpha + \alpha_k)]}{4R^3 \rho_{аб} \left[\rho_{жс} + K(\rho_{аб} - \rho_{жс}) \frac{\rho_{аб.н.}}{\rho_{аб}} \right] \sin \alpha_k \sin \alpha},$$

де K – кількість абразивних зерен в одиниці обсягу струменевої суміші;

m_c – витрати суміші робочої рідини з абразивними зернами по масі;

$\rho_{аб.н.}$ – вихідна щільність абразивних зерен;

R – радіус частки;

$h_{\max}$ – максимальна глибина впровадження;

$\rho_{аб}$ – щільність абразивного матеріалу;

$\rho_{жс}$ – характеристика робочої рідини по щільності;

S – коефіцієнт площі поверхні, що враховує можливе невлучення частини гідроабразивного струменя на оброблювану поверхню;

ρ_m – щільність оброблюваного матеріалу.

Для опису процесу формування мікрорельєфу поверхневого шару запропоновано спеціальну модель, що дозволяє кількісно оцінювати зміни, які виникають під дією абразивних частинок [50]. Висотні параметри мікропрофілю у точках локальної деформації визначаються на основі наступного аналітичного виразу:

$$M'_{j \pm n} = M_{i=j} - h_{\max} + R - \sqrt{R^2 - (n\delta)^2},$$

де $M_{i=j}$ – в точці j профілю значення висоти вихідної;

$h_{\max}$ – глибина максимального врізання/вдавлення абразивного зерна;

δ – крок поділу профілю на елементарні відрізки;

$n = 1$ – кількість кроків поділу δ , що вміщуються в радіус зерна R .

Для подальшого відтворення оновленого профілю поверхні, сформованого за результатами моделювання, виконується уточнення положення середньої лінії мікропрофілю. Її нові координати визначають за такою залежністю:

$$\Delta h = \frac{1}{N_0} \sum_{j=1}^{N_0} M'_j,$$

де Δh – величина відхилення положення середньої лінії;

M_j – величина висоти утвореного профілю до середньої лінії початкового профілю.

Значення висоти утвореного профілю:

$$M_j = M'_j - \Delta h, \quad j \in (1, N_0),$$

де N_0 – кількість точок профілю

Отримані емпіричні формули для розрахунку шорсткості поверхні, що мають наступний вигляд:

Для кута атаки $\alpha = 15...45^\circ$

$$Ra = 5,5 \cdot 10^{-2} N \rho_{\epsilon}^{*0,87+0,14 \ln \rho_B^*} L^{-0,45} \alpha^{0,48},$$

Для кута атаки $\alpha = 45...90^\circ$

$$Ra = 0,325 N \rho_{\epsilon}^{*0,88+0,142 \ln \rho_B^*} L^{-0,44}.$$

Аналіз теоретичних і експериментальних досліджень гідроабразивної обробки, а також досвіду її використання в різних секторах промисловості дає змогу виокремити низку характерних закономірностей цього методу:

1. Робоче середовище, що виконує роль інструмента, являє собою потік вільних абразивних зерен.

2. Вилучення матеріалу відбувається завдяки виступам зерен, які здійснюють мікрорізання поверхневого шару.

3. Між інструментом і заготовкою відсутній жорсткий кінематичний зв'язок.
4. Процес характеризується сприятливими умовами для відведення мікростружки.
5. Обробка відбувається з порівняно низькими температурами.
6. Є можливість додавання до робочого середовища хімічно або поверхнево активних компонентів.
7. У обробленому шарі не виникають температурні дефекти, такі як підпалини чи мікротріщини.
8. Формування шорсткості відбувається через багаторазове накладання та перетинання слідів, залишених абразивними зернами.
9. Зміна параметрів шорсткості оброблюваної поверхні має експоненційний вигляд і з часом стабілізується.
10. У переважній більшості випадків усталена шорсткість характеризується ізотропністю.
11. Метод забезпечує оброблення заготовок складної геометрії.
12. Процес практично не обмежений типом матеріалу заготовки.
13. Загальний об'єм зрізу матеріалу можна визначати через зріз матеріалу одним зерном, враховуючи ймовірність реалізації в одиницю часу мікрорізання на одиниці площі.
14. Збільшення тривалості обробки приводить до пропорційного зростання об'єму знятого матеріалу.

1.5. Висновки по першому розділу

Результати, отримані для гідроабразивної обробки недостатньо повно описують процес обробки; носять емпіричний характер або розглядають приватні питання. Суттєвою проблемою під час проєктування технологічних процесів гідроабразивної обробки залишається недостатній рівень дослідженості механізмів формування шорсткості обробленої поверхні. Немає інформації по розробці раціональних технологічних режимів стосовно до процесу формування

параметрів якості поверхневого шару деталей, слабо вивчений вплив механічних характеристик оброблюваного матеріалу.

Ураховуючи зазначені вище фактори, подальше поширення гідроабразивної обробки та її повноцінне впровадження у промисловість ускладнюється й стає неможливим без ґрунтовного дослідження фізичної природи процесів, що відбуваються, а також без встановлення ключових закономірностей, які визначають перебіг обробки. Необхідним є також створення моделей процесу, на основі яких можуть розроблятися типові технологічні режими та виконуватися оптимізація основних параметрів обробки.

Аналіз приведених вище результатів досліджень процесу гідроабразивної обробки, дозволив сформулювати мету і задачі досліджень.

Отже, **метою досліджень даної роботи** є забезпечення можливості визначення раціональних технологічних параметрів процесу гідроабразивної обробки на основі розробки адекватних теоретичних моделей формування шорсткості поверхні деталей, знімання металу з урахуванням тиску суміші, кута падіння струменя, відстані від сопла до оброблюваної поверхні, характеристик абразиву і часу обробки.

Реалізувати зазначену мети дозволить розв'язок таких **задач**:

1. Теоретичні дослідження одиничної взаємодії частки середовища з поверхнею деталі.
2. Теоретичні дослідження залежності зрізання матеріалу з оброблюваної поверхні заготовки від технологічних параметрів процесу.
3. Розробка моделі формування шорсткості поверхні в залежності від параметрів обробки.
4. Розробка методики прогнозування результатів гідроабразивної обробки.
5. Створення підходу до оптимізації технологічних процесів для розв'язання різних виробничих задач.

РОЗДІЛ 2.

ТЕОРЕТИЧНО-ДОСЛІДНА ЧАСТИНА

2.1. Механізм взаємодії часток абразивної суміші з поверхнею заготовки

Під час аналізу технологічних параметрів обробки вільними абразивами однією з ключових наукових задач є побудова теоретичної моделі одиничної взаємодії абразивної частинки з поверхнею заготовки. Отримання аналітичних залежностей, що описують геометрію та масштаб слідів, залишених окремою часткою, створює підґрунтя для подальшого імовірнісного моделювання їхнього розподілу по поверхні деталі. Це, у свою чергу, відкриває можливість формування узагальненої моделі знімання матеріалу, прогнозування шорсткості профілю та оцінки фізико-механічного стану поверхневих шарів.

Залежно від складу робочого середовища та застосовуваних технологічних рідин гідроабразивна обробка може реалізовуватися як механічний або механо-хімічний спосіб видалення малих порцій металу та продуктів його окиснення з поверхні деталі. Процес супроводжується вирівнюванням мікронерівностей, що деформуються під дією абразивних частинок, та послідовним нанесенням великої кількості мікроподряпин, які перекривають одна одну та перетинаються, формуючи характерну структуру поверхні.

Технологічна рідина забезпечує видалення продуктів спрацювання (часток металу й абразиву) з поверхні деталей і абразивних часток, змащує і охолоджує оброблювану поверхню.

На інтенсивність гідроабразивної обробки основний вплив здійснюють такі параметри як час обробку розмір абразивних часток, концентрація абразивних часток у суміші, тиск ежектуючого повітря, кут атаки часток, відстані від сопла до оброблюваної поверхні, марка абразивного матеріалу, механічних властивостей оброблюваного матеріалу.

Загальною особливістю методів обробки вільними абразивами є те, що різальний інструмент формується безпосередньо в процесі обробки як абразивне середовище з особливими властивостями. Абразивний матеріал за межами

розглянутого методу обробки не несе всієї необхідної інформації для досліджень, тому вивчення його властивостей можливо тільки стосовно до конкретного виду обробки.

При багаторазовій взаємодії абразивних часток з поверхнею деталі, визначена кількість зіткнень приводить до мікрорізання. У результаті утворюються абразивні подряпини з поперечною шорсткістю. Утворення мікрорельєфу поверхні в процесі обробки відбувається шляхом багаторазового накладення і перетинання абразивних подряпин, що залишаються абразивними частками. Очевидно, що в першу чергу абразивні частки, будуть контактувати з виступами вихідної шорсткості при цьому буде відбуватися поступове округлення виступів. У процесі обробки висотні параметри профілю вихідної шорсткості будуть зменшуватися, а крокові параметри будуть змінюватися незначно.

Якщо закінчити процес обробки, зберігши частину вихідного мікрорельєфу, то шорсткість поверхні деталі буде складатися зі згладжених виступів, при цьому опорна поверхня обробленої деталі на рівні 10-40% буде значно збільшена в порівнянні з вихідної, а западини мікрорельєфу залишаться без змін і можуть служити мастилоємними канавками при експлуатації в умовах граничного тертя.

Продовження процесу обробки призведе до повного видалення виступів вихідної шорсткості. При цьому на поверхні деталі утвориться новий рельєф, специфічний для гідроабразивної обробки. Для гідроабразивної обробки цей рельєф характеризується однорідністю властивостей в усіх напрямках. Встановлено, що при продовженні процесу обробки цей рельєф буде постійно відтворюватися, його параметри не будуть змінюватися з часом, а будуть визначатися режимами обробки і зернистістю абразивних часток. Це явище характерне для більшості методів обробки вільними абразивами [3, 47], і для гідроабразивної обробки. Профіль такої "сталої" шорсткості не залежить від вихідного, а визначається тільки технологічними параметрами процесу. Подальше поліпшення шорсткості поверхні деталі можна отримати або зміною режимів обробки, або заміною абразивного матеріалу на більш дрібнозернистий.

Усі застосовувані абразивні матеріали мають твердість, що значно перевищує твердість оброблюваних деталей, а також загальну природу

руйнування і спрацювання при взаємодії з оброблюваною поверхнею. При одиничній взаємодії під дією навантаження відбувається деформування мікронерівностей, що приводить до збільшення дискретних контактних зон, сумарна площа яких утворить фактичну площу торкання. Щільність розташування і розміри окремих ділянок фактичного торкання двох тіл залежать від розподілу нерівностей по висоті, механічних характеристик контактуючих тіл, значення навантажень, що діють на ці тіла і напружений стан у зоні контакту.

Згідно з положеннями теорії тертя [10, 11, 20, 22, 25, 31], фактична площа контакту між двома поверхнями визначається переважно фізико-механічними характеристиками матеріалу з меншою твердістю та геометричними параметрами поверхні твердішого матеріалу. Тому під час гідроабразивної обробки, де взаємодія відбувається в середовищі абразивних частинок, реальна площа контакту насамперед залежить від зернистості абразиву та механічних властивостей оброблюваного матеріалу. Вплив початкової шорсткості поверхні деталі проявляється незначною мірою і переважно на ранній стадії процесу.

Визначенню рельєфу абразивних різальних інструментів присвячена значна кількість досліджень [1, 3, 23, 41, 42, 44]. Геометричну форму профілю частини різальних часток, описують і трикутником, і трикутником з радіусом округлення при вершині, і трапецією, і гіперболою і параболою. Форму профілю частки в цілому представляють і у вигляді еліпсоїда, і у вигляді кола, і у вигляді набору декількох кіл.

Відомо, що абразивна частка представляє собою тіло складної форми, що має нерівності (вершини). При вивченні під мікроскопом на виступах у свою чергу можна виділяти мікрорельєф і субмікрорельєф, обумовлені кристалічною будовою абразиву. Відповідно, при різних видах абразивного впливу з поверхнею деталі можуть контактувати як вершини, так і мікрорельєф і субмікрорельєф окремих часток.

Для визначення такого характеру взаємодії запропоновані різні моделі опису абразивних часток. Одна з найбільш зроблених моделей представлена в роботі [23], у якій за допомогою теорії випадкових функцій абразивна частка представлена у вигляді тіла, поверхня якого утвориться набором гармонік різного

порядку, що складають нерівності абразивних часток, а його полярний радіус є випадковою величиною, описуваної кінцевим набором гармонік. Гармоніки 1 і 2 порядки описують форму частки і її вершин. Гармоніки більш високих порядків описують форму мікровиступів і субмікровиступів поверхні абразивної частки, що дозволяє одержати модель найбільш близьку до реальної поверхні абразивів. При цьому розподіл радіальних і діаметральних розмірів частки підкоряється нормальному закону.

З теорії тертя і спрацювання [10, 11], а також робіт в галузі абразивної обробки [23, 53] відомо, що в залежності від співвідношення глибини впровадження і радіуса округлення абразивної частки $\frac{h_i}{r_z}$ при взаємодії його з поверхнею оброблюваної деталі, частка може пружно деформувати локальний об'єм металу, пластично деформувати цей об'єм, або здійснювати процес мікрорізання, знімаючи стружку. При цьому критичні значення співвідношення $\frac{h_i}{r_z}$ при переході від одного виду взаємодії до іншого, отриманими різними дослідженнями, не завжди збігаються.

Використовуючи приведений вище підхід до будови абразивної частки, можна стверджувати, що при тому самому значенні глибини впровадження вершини частки можуть пружно деформувати метал, а її мікровиступи знімати стружку, тобто взаємодія абразивів з поверхнею деталей носить досить складний, комплексний характер. Кількісний облік цієї особливості абразивної обробки можливий з використанням методів теорії ймовірності і буде використаний надалі при побудові теоретичної моделі процесу обробки.

Проведені дослідження, [1, 23, 24, 27, 44], дозволили встановити, що при різних процесах абразивної обробки профіль подряпин має специфічну форму, незалежну від радіуса округлення вершин частки. Це явище можна пояснити загальною природою крихкого руйнування різних абразивних матеріалів і специфікою процесів абразивного різання. У роботі [23] встановлено, що форму абразивної подряпини, залишеною одною часткою, можна апроксимувати функцією виду

$$b_i = n \cdot a_i^m, \quad (2.1)$$

де b_i – ширина подряпини;

a_i – глибина подряпини.

При цьому показник апроксимуючої функції m не залежить від глибини впровадження часток в оброблювану поверхню і дорівнює в середньому 0,54. Коефіцієнт n зі зменшенням глибини врізання знижується. Одночасне зменшення a_i і n призводить до суттєвої зміни величини при цьому збільшення співвідношення глибини подряпини і радіуса округлення частки $\frac{a_i}{r_3}$ від 0,01 до 0,123 (тобто в 12 разів) практично не змінює співвідношення $\frac{b_i}{a_i}$, так що

$$b_i \approx 3,8a_i, \quad (2.2)$$

Тобто відношення ширини абразивних подряпин до глибини мало залежить від розмірів часток. Подібні результати підтверджуються дослідженнями С.Г. Редько, що одержав величину відносини $\frac{b_i}{a_i} = 3,7$ та дослідженнями [24], що приводить величину відносини після виправлення шліфувального кола $\frac{b_i}{a_i} = 4,0$ та даними інших досліджень.

Відношення ширини до глибини канавок практично не залежить від умов виправлення шліфувального круга, а по величині близько до значення відносини ширини різальної частини, до її висоти, визначених для вільних часток [23]. Механізм руйнування абразивних зерен у процесі виправлення шліфувального круга ідентичний механізму їхнього руйнування при подрібнюванні в процесі виготовлення. Таким чином, відношення ширини до висоти частини різальної частки, практично не залежить від розміру часток, тому що більш дрібні абразивні

частки утворюються розподілом більш великих і кожен мікронерівність великої частки можна розглядати як вершину або нерівність майбутньої дрібної частки. У цьому випадку ширина канавки, залишена будь-якою нерівністю частки при даній глибині її впровадження в поверхню не буде залежати від того, великій чи отриманій розподілом великої більш дрібній частці належить вершина.

У роботі [23] показано також, що абразивні частки не мають постійних радіусів скруглення: вершин. Радіус частини різальних зерен, залежить як від матеріалу зерен, так і від їх висоти, а інакше від глибини впровадження часток в оброблювану поверхню заготовки. Це пояснюється тим, що як зазначено у матеріалах [1, 20, 23, 29], абразивні частки мають шорсткувату поверхню і при дряпанні полірованої поверхні від однієї частки може утворитися декілька рисок. Природно, що радіус округлення однієї риски дуже малий. Зі збільшенням глибини подряпини, окремі малі риски зливаються в один велику, внаслідок чого середній радіус до її округлення збільшується. А якщо, наприклад, абразивна частка впровадилася б у поверхню на половину свого розміру, то середній радіус округлення подряпини наблизився б до радіуса частки.

З огляду на те, що все зазначене можна віднести до будь-якого абразивного інструмента, у тому числі і застосовуваному при обробці вільними абразивами, надалі при описі профілю подряпини, від часток використовуємо співвідношення (2.2).

Як при обробці зв'язаним абразивом (шліфування, хонінгування і т.п.), так і при гідроабразивній обробці, описання процесу різання можливо застосуванням методів теорії ймовірності.

Гідроабразивній обробці відповідає визначена кількість контактів абразивних часток з поверхнею деталі в одиницю часу. При цьому кількість і характер таких контактів визначають продуктивність процесу і якість обробленої поверхні. Змінюючи режими обробки можна значною мірою впливати на результати обробки.

Розглядається потік випадкових подій, кожна з яких полягає в реалізації одиничного акта прямого руйнування (мікрорізання). Оскільки ймовірність здійснення мікрорізання в певний фіксований інтервал часу залежить лише від

тривалості цього інтервалу і не залежить ні від початку його відліку, ні від можливості реалізації попередніх або наступних аналогічних процесів, то є підстави вважати розглянутий потік подій, що відповідають розподілу Пуассона. Тому в подальшому буде застосовуватись саме закон Пуассона.

Для створення ефективної теоретичної моделі гідроабразивної обробки необхідно з високою точністю визначити кількісні характеристики процесу одиничної взаємодії частки робочого середовища з поверхнею оброблюваної заготовки, що у свою чергу вимагає чіткої уяви про механізм видалення металу і формування абразивної подряпини.

Процес одиничного різання при абразивній обробці (в основному зв'язаним абразивним зерном при шліфуванні) розглядається у матеріалах [1, 23, 24, 30, 51, 52], оскільки він розкриває сутність абразивного впливу і дає можливість визначити оптимальні технологічні режими обробки деталей машин.

Визначення об'єму знімання металу при одиничній взаємодії представляє значні труднощі внаслідок складності процесів взаємодії абразивних часток і деталей і впливу великого числа факторів на процес мікрорізання. Аналіз робіт [2, 3, 10, 11, 31, 34, 35] дозволяє припустити наступну картину взаємодії абразивної частки з поверхнею деталі.

При впровадженні частки, що рухається під певним кутом α до поверхні деталі, на неї діє сила опору F_z , яку можна розкласти на нормальну F_N і дотичну F_T складові. Впровадження абразивної частки в оброблювану поверхню під гострим кутом супроводжується виникненням крутильного моменту навколо центру ваги частки. При цьому енергія обертання частки при ударі складає менш 1 % енергії її поступального руху. Тому при розрахунках енергії, витраченої часткою при ударі, її обертанням можна зневажити.

Відомо [14, 31], що при нормальному заглибленні одинична частка буде охоплюватися деформованим матеріалом рівномірно з усіх боків. При додаванні тангенціального навантаження напруги з боку дії тангенціальної сили зростають і абразивна частка почне рухатися, пластично відтискуючи матеріал. При цьому задня напівповерхня по напрямку руху цієї частки виявиться цілком розвантаженою, тобто вона відірветься від раніше деформуємого матеріалу.

Оскільки. середні нормальні напруги на контакті в статичі приблизно однакові та дорівнюють середнім нормальним напругам при русі, то очевидно, що момент початку ковзання площі на передній напівповерхні частки повинний зрости, тим самим компенсується відсутність її на задній напівповерхні. Це приведе до заглибленню частки доти, поки площа передньої напівповерхні не досягне визначеного значення. Відповідно буде зростати тангенціальна сила, що при рівності поверхонь досягає свого максимального значення. Інші дослідження [16, 31, 45] також вказують на перерозподіл площі контакту частки, що впровадилася в пластичний півпростір під впливом тангенціальних сил. У результаті цього відбувається додаткове поглиблення частки h .

При такому переміщенні частки на неї діє реакція з боку матеріалу деталі, одна складова якої дотична, тобто сила тертя, гальмує рух, а інша нормальна, прагне виштовхнути частку з матеріалу. При зіткненні твердих тіл обидві складові звичайно врівноважуються зовнішніми силами, тобто динамічними силами, обумовленими прискоренням і масою частки. Внаслідок збільшення сили взаємодії F контактні напруга або деформації зростають і можуть досягти величин, що руйнують, у цьому випадку відбувається перехід до мікрорізання. Граничне навантаження, що приводить до порушення зовнішнього тертя визначається на підставі відносного впровадження нерівностей $\frac{h}{\rho}$, починаючи з якого матеріал перед поверхнею, що рухається, не відтискується, а блокується перед часткою і починається мікрорізання.

Як показано в роботах [52, 53], процес утворення стружки можливий лише тоді, коли напруження вздовж лінії потенційного сколювання перевищують опір матеріалу зрізуванню. Встановлено, що під час заглиблення сферичної абразивної частинки матеріал поверхневого шару витісняється до країв зони контакту, формуючи опуклу ділянку. Подальше проникнення частинки продовжується доти, доки напруга на поверхні контакту не досягне значення $c\sigma_s$, де σ_s – границя текучості матеріалу деталі, а c – коефіцієнт, що характеризує несучу здатність контактної поверхні. За результатами досліджень [49, 52, 53] величина коефіцієнта c для металів у звичайному стані змінюється в межах 1-6, а в разі наявності наклепу може зростати до 10.

При визначеному заглибленні, коли напруга на контактній поверхні досягає вище зазначених значень, настає загальмування металу перед часткою, обтікання припиняється і починається нагрівання металу тобто йде процес мікрорізання. Зрушення металу відбувається в напрямку руху в площині торкання. З матеріалів робіт [10, 27, 31, 33, 34] пропонується наступна методика визначення знімання металу з поверхні деталі при одиничній взаємодії.

Нехай абразивне зерно, розміром D (діаметр описаного кола), що рухається зі швидкістю V_c під кутом α до поверхні деталі, вдаряється об неї із силою, достатньої для зняття стружки (тут розглядаються тільки ті випадки взаємодії, що приводять до мікрорізання). Якщо прийняти за dV – обсяг матеріалу, знятого на відрізуку руху зерна dx , V_d – обсяг деформованого матеріалу в процесі взаємодії зерна з обробним шаром.

$$dV = \frac{V_d}{L} dx, \quad (2.3)$$

де L – середнє значення величини діаметру зони дотику в процесі удару.

З залежності з теорії ковзання твердої сфери по пластично деформованому півпросторі [31]:

$$L = \sqrt{2Dh}, \quad (2.4)$$

$$V = \frac{1}{2} \pi D h^2. \quad (2.5)$$

Тоді

$$dV = \frac{\frac{1}{2} \pi D h^2}{\sqrt{2Dh}} dx,$$

$$dV = \frac{\pi}{2} \sqrt{\frac{1}{2} D} \cdot h^{\frac{3}{2}} dx. \quad (2.6)$$

Проінтегрувавши (2.6) по шляху руху зерна, одержимо залежність:

$$V = \frac{\pi}{2} \sqrt{\frac{1}{2} D} \cdot \int_0^{x_0} h^{\frac{3}{2}} dx, \quad (2.7)$$

Відомо [44], що при тих самих умовах мікрорізання одиничною абразивним зерном, яке має великі пластичні властивості металу зростає його обсяг, який витискається пластичним чином на межі подряпин, і зменшується частка металу, що віддаляється у виді мікростружки. Кількісна оцінка цього явища коефіцієнт стружкоутворення:

$$k_c = \frac{V_c}{V_{\text{ц}}},$$

де V_c – об’єм металу, вилученого у вигляді мікростружки;

$V_{\text{ц}}$ – теоретичний об’єм подряпини.

З наведених залежностей, після перетворень можна записати:

$$V = \frac{\pi}{2} k_c \sqrt{\frac{1}{2} D} \cdot \int_0^{x_0} h^{\frac{3}{2}} dx. \quad (2.8)$$

Для визначення межі інтегрування введемо безрозмірні координати:

$$\varepsilon = \frac{h}{h_{\max}} \quad \text{та} \quad \xi = \frac{x}{h_{\max}},$$

де $h_{\max}$ – максимальна глибина впровадження частки.

Після перетворень отримаємо:

$$V = \frac{\pi}{2} k_c \sqrt{\frac{1}{2} D} \cdot h^{\frac{5}{2}} \int_0^{\varepsilon_{\phi}(\xi_{\phi})} \varepsilon^{\frac{3}{2}} \quad (2.9)$$

Для подальшого аналізу скористаємося тим, що удар твердої сферичної частки об деформований півпростір обмежений площиною, описується системою рівнянь:

$$\begin{cases} m \frac{d^2 h}{dt^2} = -F_N; \\ m \frac{d^2 x}{dt^2} = -F_\tau, \end{cases} \quad (2.10)$$

де m – маса частки;

$$m = \frac{1}{6} \pi D^3 \rho_q, \quad (2.11)$$

де D – діаметр частки, m ;

ρ_q – щільність абразивного матеріалу зерна, кг/м^3 ;

t – час взаємодії, s .

Інтегрування рівнянь системи (2.10) відбувалось протягом часу взаємодії частки з деформованим півпростором, причому тривалість контакту визначалася з умови $\frac{dh}{dt} \geq 0$.

Рішення першого рівняння системи (2.10) можна знайти з залежності теорії пластичного контакту сферичного тіла з деформованим півпростором [31]:

$$F_N = \frac{1}{2} \pi D h c \sigma_s k_s, \quad (2.12)$$

де k_s – коефіцієнт впливу мікронерівностей поверхні заготовки на площу контакту, що виникає в процесі обробки.

Необхідно зазначити, що реальна поверхня зерна абразиву суттєво відрізняється від ідеальної поверхні сферичного тіла.

З роботи [44] виходить, що при зіткненні твердих тіл під дією навантаження відбувається деформування мікронерівностей їхніх поверхонь, що приводить до збільшення числа дискретних контактних зон, сумарна площа яких утворить фактичну площу торкання. Щільність розташування і розміри окремих ділянок фактичного торкання залежать від розподілу нерівностей по висоті, механічних характеристик контактуючих тіл, величини навантаження, що діє на ці тіла і напружений стан у зоні контакту.

У зоні контакту зерна з заготовкою переважною деформацією є впровадження одних мікронерівностей в інші. Впровадження відбувається в результаті різниці у фізико-механічних, мікрогеометричних характеристиках контактуючих тіл. Фактична площа контакту між двома тілами залежить переважно від фізико-механічних характеристик матеріалу з меншою твердістю та від геометрії поверхні більш твердого елемента. Оскільки твердість абразивних частинок значно перевищує твердість оброблюваного матеріалу, можна вважати, що реальна контактна площа у зоні взаємодії визначатиметься насамперед мікрогеометрією самих абразивних частинок.

Рішення рівнянь (2.10) у загальному виді з врахуванням залежностей (2.11) та (2.12) буде:

$$m \frac{d^2 h}{dt^2} = -\frac{1}{2} \pi D h c k_s \sigma_s,$$

або

$$\frac{d^2 h}{dt^2} = -3 \frac{c k_s \sigma_s h}{\rho_q D^2},$$

де ρ_q – щільність абразивного матеріалу зерна.

Звідки, з врахуванням, що при $t = 0$, $h = 0$ та $\frac{dh}{dt} = 0$, отримаємо

$$\frac{dh}{dt} = \pm \sqrt{v_q^2 \sin^2 \alpha - 3 \frac{c k_s \sigma_s}{\rho_q D^2} h^2}.$$

При $t=0$, $h=0$ та $\frac{dh}{dt}=0$, отримаємо формулу для визначення глибини максимального втискання зерна:

$$h_{\max} = Dv_q \sin \alpha \frac{\rho_q}{3ck_s \sigma_s} \quad (2.13)$$

Змінивши координати на безрозмірні, отримаємо:

$$\frac{dh}{dt} = \pm v_q \sin \alpha \sqrt{1 - \varepsilon^2};$$

$$dt = \pm \frac{h_{\max} d\varepsilon}{v_q \sin \alpha \sqrt{1 - \varepsilon^2}}.$$

З залежності $F_\tau = f \cdot F_N$, де f – пропорційний коефіцієнт, маємо

$$d\xi = \left(f \pm \frac{ctg \alpha - f}{\sqrt{1 - \varepsilon^2}} \right) d\varepsilon. \quad (2.14)$$

У залежності додатний знак означає зростання втиснення ($d\varepsilon > 0$), а від'ємний – зменшенню ($d\varepsilon < 0$). Використовуючи (2.14), можна проінтегрувати (2.9). Межу інтегрування ε_* визначаємо для припинення ковзання або коли $\frac{dh}{dt} = 0$, або коли $\varepsilon = 0$. У одному випадку з (2.14) буде:

$$\varepsilon_* = \sqrt{1 - \left(\frac{1}{ftg \alpha} - 1 \right)^2}, \quad (2.15)$$

у іншому $\varepsilon_* = 0$.

Вид інтеграла

$$A' = \int_0^{\varepsilon_*} \varepsilon^{\frac{3}{2}} d\xi.$$

який входить у залежність (2.9), залежить від чисельного значення ε_* тобто від величини добутку $f \cdot tga$.

За даними роботи [44], коефіцієнт тертя абразивного зерна по матеріалу метал 0,25, а значення середнього куту падіння струменя на оброблювану поверхню деталі для гідроабразивної обробки не більше 45° , тоді:

$$f \cdot \operatorname{tg} \alpha \prec \frac{1}{2}.$$

Тоді інтеграл $A' = \int_0^{\varepsilon_*} \varepsilon^{\frac{3}{2}} d\varepsilon$ приведе́ться до вигляду [34]:

$$A' = 2(\operatorname{ctg} \alpha - 1) \int_0^1 \frac{\varepsilon^{\frac{3}{2}} d\varepsilon}{\sqrt{1 - \varepsilon^2}}. \quad (2.16)$$

Інтеграл, представлений у залежності (2.16) не повністю не розв'язується, але виражається через гамма-функцію:

$$A' = \sqrt{\pi} \frac{\Gamma\left(\frac{5}{4}\right)}{\Gamma\left(\frac{7}{4}\right)} (\operatorname{ctg} \alpha - f) \quad (2.17)$$

Враховуючи результати гамма-функції, буде:

$$A' = 1,75(\operatorname{ctg} \alpha - f). \quad (2.18)$$

Підставляючи (2.18) у залежність (2.9), після перетворень одержимо формулу для визначення кількості матеріалу, що зрізаний за удар абразивного зерна:

$$V = 1,9k_c D^3 \left(v_q \sin \alpha \sqrt{\frac{\rho_q}{3ck_s \sigma_s}} \right)^{\frac{5}{2}} (\operatorname{ctg} \alpha - f). \quad (2.19)$$

Зрізання матеріалу за удар абразивного зерна:

$$q = 1,9k_c D^3 \left(v_q \sin \alpha \sqrt{\frac{\rho_q}{3ck_s \sigma_s}} \right)^{\frac{5}{2}} (\operatorname{ctg} \alpha - f) \rho_\partial, \quad (2.20)$$

де ρ_∂ – щільність металу заготовки.

Для визначення швидкості часток при їхньому русі в потоці рідини застосовуються закони гідродинаміки [17].

На рис. 2.1 представлена схема гідроабразивної обробки заготовки.

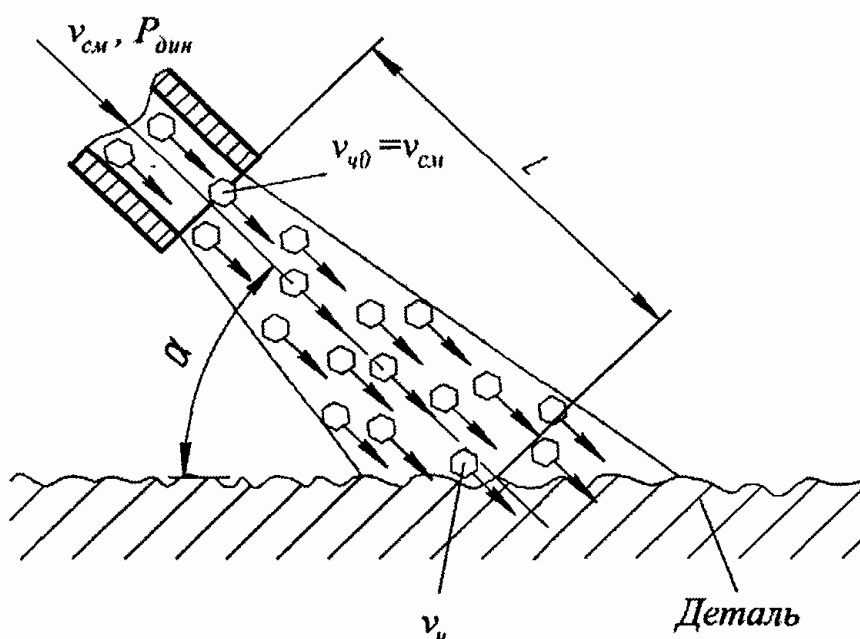


Рис. 2.1. Схема гідроабразивної обробки

Використовуючи відому залежність гідродинаміки, величину швидкості витікання суміші через отвір або насадок під тиском можна представити в наступному виді:

$$v_{cm} = \sqrt{\frac{2P_{дин}}{\rho_{cm}}} = v_{q0}, \quad (2.21)$$

де v_{q0} – швидкість частки в потоці суміші на вильоті із сопла, м/с;

$P_{дин}$ – динамічний тиск суміші, Па;

ρ_{cm} – щільність робочої суміші рідини і часток кг/м³.

З огляду на відстань від сопла до поверхні деталі швидкість частки, що рухається в потоці рідини, при підльоті до поверхні деталі визначимо по залежності:

$$v_q = K_L \sqrt{\frac{2P_{дин}}{\rho_{см}}}, \quad (2.22)$$

де K_L – коефіцієнт втрат, що враховує відстань від сопла до поверхні оброблюваної деталі.

З робіт [36, 50] відомо, що величина коефіцієнта втрат K_L значно залежить від відстані до оброблюваної деталі, а параметри робочої суміші впливають на неї незначно. Після проведення попередніх досліджень встановлено, що найбільша продуктивність при ГАО досягається на відстані до поверхні деталі 60-70 мм. На відстані менш 60 мм продуктивність знижується, хоча швидкість струменя зростає. Зниження продуктивності в даному випадку відбувається через те, що площа плями контакту струменя мала, а щільність потоку часток велика. У результаті виникає ефект «екранування», тобто частина часток, відскакуючи від поверхні деталі і зіштовхуючись з іншими, не дозволяє їм контактувати з оброблюваною поверхнею. Зі збільшенням довжини струменя більш 80-120 мм відбувається значне збільшення діаметра струменя і зниження енергії взаємодії. Таким чином, збільшується час обробки, а іноді стає зовсім неможливим одержати задані параметри поверхневого шару деталі.

Щільність робочої суміші рідини і часток $\rho_{см}$ можна визначити за залежностями відповідно [50]:

$$\rho_{см.жс.} = \rho_{жс} + K(\rho_q - \rho_{жс}) \frac{\rho_{ч.н.}}{\rho_q},$$

$$\rho_{см.в.} = \rho_v + K(\rho_q - \rho_v) \frac{\rho_{ч.н.}}{\rho_q},$$

де $\rho_{жс}(\rho_в)$ – щільність рідини, що використовується як рушій часток, $кг/м^3$;

$\rho_ч$ – щільність абразивного матеріалу зерен, $кг/м^3$;

$\rho_{ч.н.}$ – насипна щільність часток, $кг/м^3$;

K – об'ємна концентрація часток у робочій рідині.

Об'ємна концентрація K визначається як відношення об'єму часток $V_{ч.с.}$ до об'єму робочої суміші $V_{см}$:

$$K = \frac{V_{ч.с.}}{V_{см}},$$

Тоді максимальна глибина впровадження частки визначиться за залежністю:

$$h_{max} = DK_L \sin \alpha \sqrt{\frac{2P_{дин}\rho_ч}{3c\rho_{см}k_s\sigma_s}},$$

Обсяг металу, зрізаний за удар абразивного зерна визначиться за залежністю:

$$V = 1,9k_c D^3 \left(K_L \cdot \sin \alpha \sqrt{\frac{2P_{дин}\rho_ч}{3c\rho_{см}k_s\sigma_s}} \right)^{\frac{5}{2}} (ctg \alpha - f).$$

Обсяг металу, зрізаний за удар абразивного зерна визначається за залежністю:

$$q = 1,9k_c D^3 \left(K_L \sin \alpha \sqrt{\frac{2P_{дин}\rho_ч}{3c\rho_{см}k_s\sigma_s}} \right)^{\frac{5}{2}} (ctg \alpha - f) \rho_\delta.$$

2.2. Визначення об'єму видалення металу абразивною часткою

При дослідженні гідроабразивної обробки одним з основних питань є визначення знімання металу з поверхні деталі за час обробки для того щоб визначити час обробки:

- при видаленні дефектного шару;
- при зміні шорсткості поверхні до заданого значення;
- при округлення гострих кромek;
- при видаленні заусенців.

У відомих роботах з цією метою пропонуються залежності, що мають емпіричну природу і враховують головним чином кінематичні параметри обробки.

З різних можливих варіантів розрахунку найбільш доцільним, що відповідає реальному процесу видалення металу, пропонується метод, що полягає у визначенні знімання металу при одиничній взаємодії абразивної частки з обробною поверхнею заготовки, з наступним множенням на кількість таких взаємодій за час обробки. При цьому необхідно враховувати, що не усі взаємодії супроводжуються видаленням металу (мікрорізанням), частина з них приводить до пластичного і пружного деформування локальних об'ємів металу і їх потрібно розглядати окремо, щоб розкрити механізм видалення металу з поверхні деталі.

У процесі обробки поверхня деталі безупинно піддається динамічному впливу абразивних часток. При цьому кількість взаємодій, що приходяться на одиницю поверхні деталі в одиницю часу, носить випадковий характер і його неможливо функціонально зв'язати з технологічними параметрами процесу обробки. Відомо [7, 9, 13], що характер протікання подібних процесів можна описати користуючись методами теорії ймовірностей.

Загальна кількість взаємодій на площі квадрата упакування (у випадку упакування абразивних часток на поверхні деталі по квадрату, зі стороною, що дорівнює діаметру описаного кола), що приводять до мікрорізання; можна визначити в такий спосіб

$$n_p = P_1 P_2 t, \quad (2.23)$$

де P_1 – геометрична ймовірність події, що полягає в тому, що будь-яка точка квадрата упакування покривається прямою контакту в одиницю часу;

P_2 – ймовірність події, що полягає в тому, що взаємодія абразивного зерна з обробною поверхнею заготовки приведе до мікрорізання;

t – час обробки.

Як показано в [3, 47], більшість взаємодій абразивних зерен з обробною поверхнею заготовки відбувається під гострим кутом, отже пляма контакту при одиничній взаємодії можна представити у виді еліпса.

Для імовірнісної оцінки кількості взаємодій, що припадають на одиницю площі деталі в одиницю часу, приймемо наступні припущення щодо умов протікання процесу обробки:

1. Обробка плоскої деталі ведеться частками однакового діаметра D ($D = 2R$);

2. Упакування часток на оброблюваній поверхні є упакування по квадрату зі стороною, що дорівнює діаметрові частки.

3. Кожне зіткнення абразивного зерна з обробною поверхнею заготовки супроводжується утворенням плями контакту.

4. Розглянута одиниця площі оброблюваної деталі цілком перекривається робочим середовищем в одиницю часу.

Процес обробки відбувається в такий спосіб: на квадрат упакування випадково наносяться еліптичні плями; безліч точок квадрата упакування, покритих одним або більшою кількістю еліпсів, є випадковою безліччю.

Задача полягає у визначенні ймовірності того, що будь-яка точка усередині квадрата упакування може бути покрита одним еліпсом.

Для процесу ГАО визначення частоти впливу часток представляє значних труднощів, тому що в даному випадку ведеться обробка деталі потоком часток абразиву. Логічно припустити, що поява випадкових точок взаємодії на поверхні деталі при ГАО (потік подій) підкоряється закону Пуассона. Припустимо, що P_1

для гідроабразивної обробки це ймовірність події, що полягає в тому, що кожна точка квадрата упакування покривається прямою контакту в одиницю часу.

Щоб поява випадкових точок (плям контакту) на площині відповідала законові Пуассона, поле точок повинне задовольняти трьом умовам: однорідності, ординарності, відсутності взаємодії [8]. Однорідність поля означає, що ймовірність влучення тої або іншої кількості точок у певну фігуру не залежить від того, де ця фігура знаходиться, а залежить тільки від її площі. Для ГАО ця умова виконується. Ординарність поля означає, що точки на площині з'являються по одній, а не по двох, по трьох і т.д., тобто, що ймовірність влучення в елементарну ділянку площини двох і більш точок зневажливо мала, у порівнянні з ймовірністю влучення однієї точки. При ГАО на квадрат упакування може одноразово потрапити тільки одна точка, тому що одночасне влучення декількох часток на квадрат упакування неможливо. Відсутність взаємодії в полі означає, що ймовірність влучення тої або, іншої кількості точок у плоску фігуру не залежить від того, скільки точок потрапило в будь-яку іншу непересічну з нею фігуру. Очевидно, що при ГАО ця умова також виконується.

У звичайному випадку, коли площа поверхні деталі більше квадрата упакування, загальне число взаємодій, що приводять до мікрорізання:

$$N_p = n_p \frac{S_{det}}{S_{kv.yp.}}, \quad (2.24)$$

де S_{det} — площа поверхні деталі;

$S_{kv.yp.}$ — площа квадрата упакування.

Прийнявши $S_{kv.yp.} = D^2$, одержимо:

$$N_p = P_1 P_2 t \frac{S_{det}}{D^2} \quad (2.25)$$

Руйнування поверхневого шару обробної поверхні заготовок зернами відбувається переважно шляхом мікрорізання. Отже, при розрахунку знімання

металу досить враховувати тільки число взаємодій N_p , що приводять до мікрорізання:

$$Q = N_p q,$$

де Q – знімання металу з поверхні деталі.

Підставивши значення N_p з (2.25) отримаємо залежність:

$$Q = P_1 P_2 t q \frac{S_{\text{dem}}}{D^2}. \quad (2.26)$$

При гідроабразивній обробці поява плям контакту на деталі підкоряється законові Пуассона. При цьому ймовірність появи k події за час t :

$$P_{(k)} = \frac{(\lambda t)^k e^{-k}}{k!}, \quad (2.27)$$

де λ – інтенсивність потоку, тобто середнє число взаємодій в одиницю часу на площі квадрата упакування.

При ймовірності однієї події $k = 1$, за одиницю часу $t = 1$:

$$P_1 = \frac{\lambda}{e}.$$

Залежність для знаходження обсягу матеріалу при гідроабразивній обробці прийме вигляд:

$$Q = P_2 \lambda k_a^Q t q \frac{S_{\text{dem}}}{e D^2}, \quad (2.28)$$

де k_a^Q – коефіцієнт, що враховує кут падіння струменя.

Величина λ залежить від технологічних параметрів ГАО (тиск повітря, зернистість абразивних часток) і може бути визначена при моделюванні.

Отримані формули дозволяють прогнозувати видалення металу з поверхні деталі при гідроабразивній обробці від вихідних технологічних факторів. Ці залежності можуть бути покладені в основу розробки методики визначення часу обробки, необхідного для рішення необхідних технологічних задач.

2.3. Механізм формування профілю шорсткості при гідроабразивній обробці

2.3.1. Геометрична схема утворення профілю сталої шорсткості

Коректне формування геометричної моделі, що описує механізм взаємодії вільних абразивних частинок із поверхнею деталі, дає змогу визначити якісний вплив основних факторів на процес формування шорсткості та отримати теоретичні залежності, які адекватно відображають реальні умови обробки [12, 19, 28, 46, 48].

У процесі обробки відбувається перекриття подряпин, залишених абразивними частками, у результаті чого ширина контакту кожної частки з оброблюваною поверхнею неоднакова, а краї подряпин розташовані на різному рівні (рис. 2.2). Схема утворення профілю сталої шорсткості при різанні вільними зернами, з урахуванням неповних зрізів металом чинених абразивними частками, аналогічна схемам утворення шліфованої поверхні, пропонуваним Ящеріциним П.І. [53], Корольовим А.В. [23].

Глибина впровадження сусідніх часток також неоднакова. Це обумовлює складність опису функції розподілу глибин впровадження часток в оброблювану поверхню. У роботах Корольова А.В. [23] встановлено, що невелика кількість часток від їхнього загального числа, що бере участь у взаємодії, буде залишати сліди глибиною близької до h_{max} . Апроксимуємо функцію їхнього розподілу ступеневою залежністю:

$$z_i = 0,5z_0 \left(\frac{h_i}{H_0} \right)^k, \text{ при } 0 \leq h_i \leq H_0, \quad (2.29)$$

де z_i – кількість лунок на рівні l_i від відбитка найбільшої глибини – h_{max} ;

z_0 – номінальна кількість взаємодіючих часток над квадратом упакування робочого середовища;

H_0 – різниця глибин слідів;

k – показник розподілу глибини відбитків.

Величина H_0 відповідає глибині залягання половини з усіх подряпин, вимірюваної від дна найбільш глибокої подряпини, за умови, що функція розподілу глибин подряпин у початковій частині була справедлива для шару подряпин.

У роботі [23], для опису процесу утворення мікропрофілю обробленої поверхні в процесі шліфування й інших видах абразивної обробки, як критерій пропонується параметр H_{yc} , названий "умовна висота нерівностей обробленої поверхні", і розглядається методика визначення стандартних параметрів мікропрофіля обробленої поверхні.

З огляду на загальні особливості взаємодії абразивного інструмента з обробною поверхнею заготовки, приймемо аналогічний критерій для гідроабразивної обробки. Нехай, у процесі обробки через нормальний перетин профілю шорсткості поверхні деталі пройшло деяку кількість абразивних часток. Кожна i -а частка залишає подряпину глибиною a_i і шириною b_i . Подряпини від часток частково перекривають подряпини від попередніх часток, при цьому частки здійснюють неповні зрізи. При цьому відбувається поступовий зсув профілю, у процесі якого віддаляються виступи вихідної шорсткості. При формуванні профілю сталої шорсткості (рис. 2.2) його западини представляють собою дно найбільш глибоких подряпин, а виступи утворюються перетинанням бічних сторін подряпин від окремих часток.

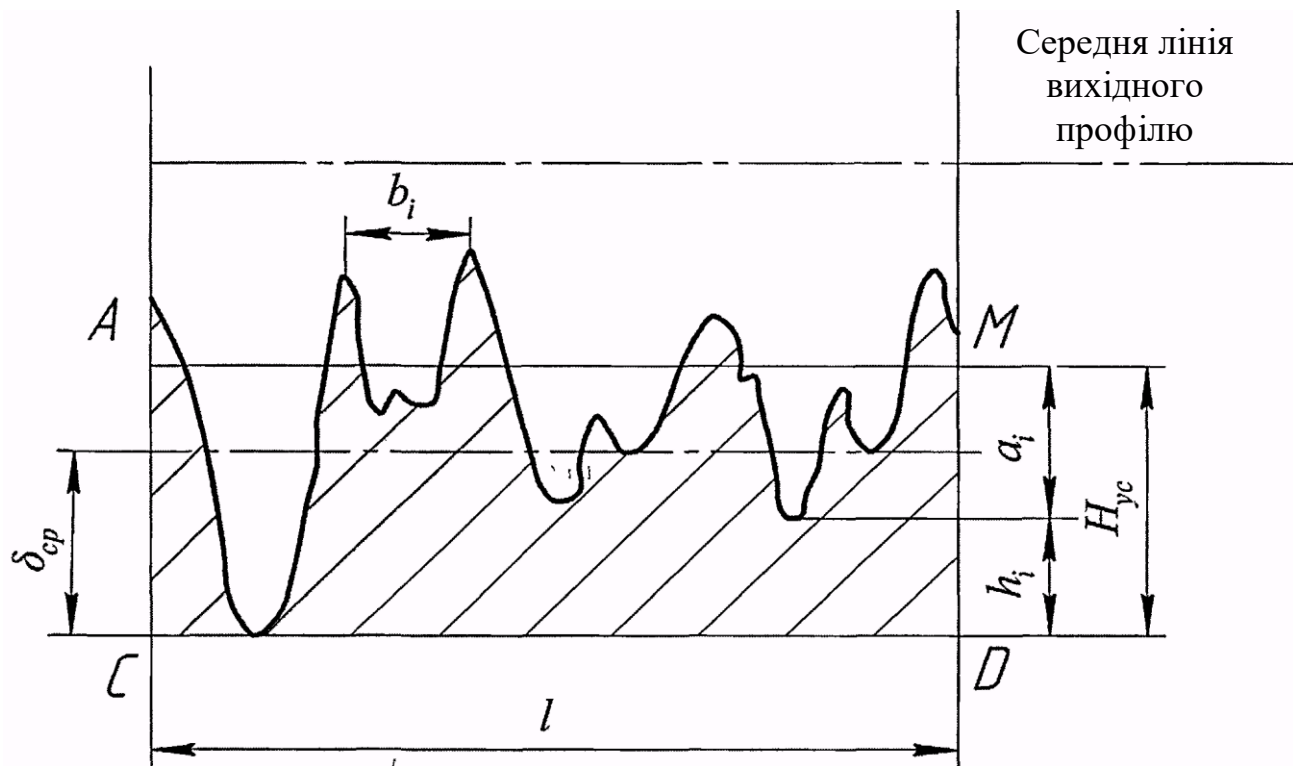


Рис. 2.2. Схема утворення профілю шорсткості поверхні при обробці вільними абразивами

Під умовною висотою мікронерівностей обробленої поверхні будемо розуміти відстань від середньої лінії AM , проведеної між вершинами нерівностей у нормальному перетині деталі, до рівня найглибших западин, що мають на цій поверхні CD . При цьому, з огляду на те, що края подряпин від часток приблизно рівномірно зміщуються нагору і униз від лінії AM , за глибину впровадження зерен у даному поперечному перерізі будемо приймати глибину, розраховану від цієї лінії.

2.3.2. Визначення параметрів шорсткості

З огляду на експонентний характер зміни висотних параметрів шорсткості поверхні деталі при обробці вільними абразивами [3, 4, 18, 32, 44, 47], можна розробити математичну модель зміни значень цих параметрів у залежності від часу обробки. Для одержання такої моделі необхідно насамперед розробити методику розрахунку сталої шорсткості для конкретних значень вихідних даних

(технологічних факторів), що дозволить визначити асимптоту експонентної функції $Ra = f(t)$.

Нормальний перетин шорсткості поверхні деталі після обробки вільними абразивами представляє собою сукупність абразивних подряпин, залишених частками. При цьому подряпини частково накладені один на одного і тому мають нерівні краї (див. рис. 2.2), однак, якби частки виконували тільки повні зрізи, то на деякому рівні нормального перетину деталі сума ширини всіх повних зрізів дорівнювала б ширині оброблюваної ділянки:

$$\sum_{i=1}^{z_{nep}} b_i = L_{e0}, \quad (2.30)$$

де z_{nep} – кількість зерен, що залишили свій слід у даному нормальному перетині деталі, а вершини всіх нерівностей у перетині $AMCD$ розташовувалися б на одній лінії (аналогічно процесові шліфування при глибині різання більшої H_{yc} [23]).

У дійсності за рахунок перекриття подряпин по ширині, вершини нерівностей зміщаються нагору і униз від лінії AM , а тому що вони зміщаються від цієї лінії приблизно рівномірно нагору і вниз, те цю лінію можна розглядати як середню між вершинами всіх нерівностей.

Таким чином, середня лінія між вершинами всіх нерівностей у даному нормальному перетині деталі знаходиться на рівні, де сума ширини всіх часток, що пройшли через даний перетин деталі, дорівнює ширині оброблюваної ділянки. Подальші розрахунки будемо робити на одиниці довжини нормального перетину деталі, тому що величини z_{nep} і L_{e0} зв'язані між собою.

Величину H_{yc} визначимо за умови, що саме на цій висоті виконується рівність (2.39). З огляду на співвідношення (2.2), для рівня H_{yc} можна записати:

$$\sum_{i=1}^{z_{nep}} b_i = \sum_{i=1}^{z_{nep}} 3,8a_i = 3,8 \sum_{i=1}^{z_{nep}} a_i = L_{e0}. \quad (2.31)$$

Для визначення глибини подряпини a_i в розглянутому нормальному перетині деталі звернемося до форми одиничного сліду при обробці вільними абразивами (рис. 2.3).

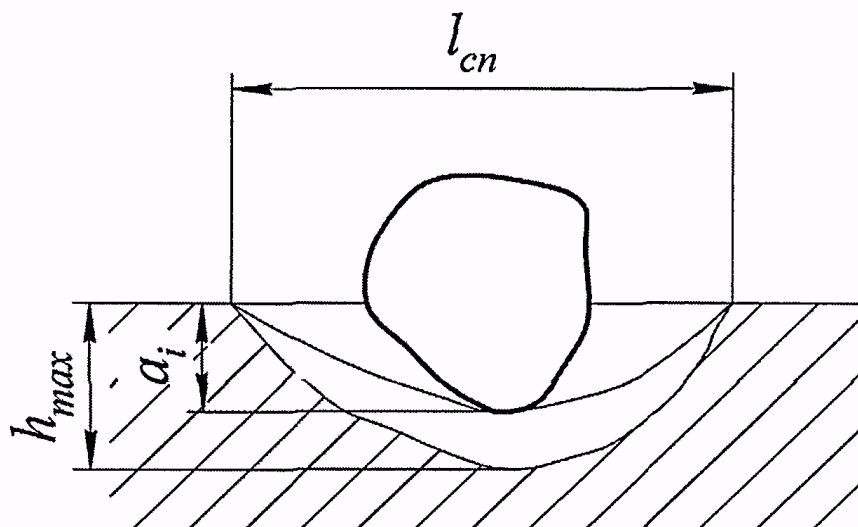


Рис. 2.3. Схема поздовжнього перетину одиничного сліду абразивної частки

За розрахункову глибину впровадження a_i частки можна взяти добуток максимально можливої глибини $(h_{max} - h_i)$ (див. рис. 2.1) на ймовірність P_{BH} впровадження частки з цією глибиною. Виходячи з геометричної ймовірності випадкової події, шукана ймовірність дорівнює відношенню площі, обмеженою подовжньою траєкторією даної частки при її впровадженні, до площі, обмеженою подовжньою траєкторією руху частки з максимальною глибиною впровадження:

$$P_{BH} = \frac{L_{cn}(h_{max} - h_i)}{L_{cn} h_{max}} = \frac{h_{max} - h_i}{h_{max}}$$

$$a_i = \frac{(h_{max} - h_i)^2}{h_{max}}; \quad a_i = h_{max} \left(1 - \frac{h_i}{h_{max}} \right)^2. \quad (2.32)$$

Тоді сума глибин усіх подряпин, залишених частками в нормальному перетині $AMCD$, буде визначатись:

$$\sum_{i=1}^{z_{nep}} a_i = h_{\max} \sum_{i=1}^z \left(1 - \frac{h_i}{h_{\max}}\right)^2, \quad (2.33)$$

де z_{nep} – загальна кількість всіх зерен, контакт яких можливий з даним нормальним перетином деталі.

При досить великому значенні z_{nep} (при проходженні декількох часток через даний нормальний перетин деталі) від підсумовування можна перейти до інтегрування. Для цього виразимо величину h_i через відповідну кількість зерен z_i , контакт яких можливий з перетином $AMCD$ на глибині h_i . При цьому скористаємося залежністю (2.29). Після перетворень отримаємо залежність:

$$h_i = H_0 \left(2 \frac{z_i}{z_0}\right)^{\frac{1}{k}}, \quad (2.34)$$

$$\sum_{i=1}^{z_{nep}} \left(1 - \frac{h_i}{h_{\max}}\right)^2 = \int_0^1 \left(1 - \frac{H_0}{h_{\max}} \left(2 \frac{z_i}{z_0}\right)^{\frac{1}{k}}\right)^2 dz_i. \quad (2.35)$$

Проведемо заміну:

$$\frac{H_0}{h_{\max}} \left(2 \frac{z_i}{z_0}\right)^{\frac{1}{k}} = \psi, \quad (2.36)$$

де z_0 – кількість зерен, що проходять через одиничну довжину в одиницю часу.

Після проведення відповідних перетворень одержимо:

$$\sum_{i=1}^{z_{nep}} \left(1 - \frac{h_i}{h_{\max}}\right)^2 = k z_{nep} \int_0^1 (1 - \psi) \psi^{k-1} d\psi.$$

Інтеграл представляє собою бета-функцію. Виразивши її через гамма-функцію отримаємо:

$$\sum_{i=1}^{z_{nep}} \left(1 - \frac{h_i}{h_{\max}}\right)^2 = kz_{nep} \frac{\Gamma_{(3)} \Gamma_{(\kappa)}}{\Gamma_{(\kappa+3)}} = 2kz_{nep} \frac{\Gamma_{(\kappa)}}{\Gamma_{(\kappa+3)}}.$$

Підставивши отримане вираження в (2.33) отримаємо:

$$\sum_{i=1}^{z_{nep}} a_i = 2kz_{nep} h_{\max} \frac{\Gamma_{(\kappa)}}{\Gamma_{(\kappa+3)}}. \quad (2.37)$$

З врахуванням попередніх залежностей:

$$\sum_{i=1}^{z_{nep}} b_i = 7,6kz_{nep} h_{\max} \frac{\Gamma_{(\kappa)}}{\Gamma_{(\kappa+3)}} = L_{ed} \quad (2.38)$$

При цьому, на рівні АМ (див. рис. 2.2) визначиться z_{nep} у такий спосіб:

$$z_{nep} = 0,5z_0 \left(\frac{H_{yc}}{H_0} \right)^k$$

Підставивши отримане вираження в (2.38) одержимо:

$$3,8kz_0 \left(\frac{H_{yc}}{H_0} \right)^k \frac{\Gamma_{(\kappa)}}{\Gamma_{(\kappa+3)}} = L_{ed}.$$

З огляду на, що значення показника ступеня для усіх видів абразивної обробки лежать у межах $1 \leq k \leq 3$ [23], зробимо припущення, що при гідроабразивній обробці можна прийняти $k = 2$. При цьому отримаємо:

$$7,6z_0 \left(\frac{H_{yc}}{H_0} \right)^2 \frac{\Gamma_{(2)}}{\Gamma_{(5)}} h_{\max} = L_{e\partial}.$$

Після відповідних перетворень отримаємо залежність:

$$H_{yc} = H_0 \sqrt{\frac{L_{e\partial}}{0,32h_{\max}z_0}} \quad (2.39)$$

Знаючи величину H_{yc} можна визначити відносну опорну довжину профілю. Встановлено [23, 24], що для різних видів абразивної обробки опорна крива профілю обробленої поверхні добре описується рівнянням:

$$\frac{\sum L_i}{L} = e^{-\left(\frac{\delta_i}{H_{yc}}\right)^{f_0}}, \quad (2.40)$$

де δ_i – висотний рівень, на якому здійснюється перетин профілю відносно лінії западин;

$\sum L_i$ – сукупна довжина ділянок профілю, які на рівні δ_i відсікаються лінією, що є еквідистантною до середньої лінії, у межах заданої базової довжини.

$$\begin{aligned} f_0 &= k + m + 0,5 \text{ при } t_{piz} > H_{yc}, \\ f_0 &= k + m + 1,5 \text{ при } t_{piz} < H_{yc}, \end{aligned} \quad (2.41)$$

де t_{piz} – глибина різання.

При обробці вільними абразивами, коли $t_{piz} = h_{\max} > H_{yc}$, для профілю сталої шорсткості рівняння опорної кривої буде мати вигляд:

$$\frac{\sum L_i}{L} = e^{-\left(\frac{\delta_i}{H_{yc}}\right)^{k+m+0,5}}. \quad (2.42)$$

З огляду на прийняте допущення $k = 2$ і прийнявши в середньому, для гідроабразивної обробки $m = 0,54$, можна записати:

$$\frac{\sum L_i}{L} = e^{-\left(\frac{\delta_i}{H_{yc}}\right)^3} \quad (2.43)$$

Тепер можна перейти до визначення величини середнього арифметичного відхилення мікропрофілю обробної поверхні Ra при гідроабразивній обробці. Встановлено [23, 24], що параметри Ra і H_{yc} характеризують вид опорної кривої шорсткості поверхні. Дійсно, згідно (2.40):

$$\frac{\sum L_i}{L} = e^{-\left(\frac{\delta_i}{H_{yc}}\right)^{f_0}},$$

але f_0 у свою чергу, визначається співвідношенням $\frac{H_{yc}}{Ra}$.

Відомі дані [23], про одержання адекватних теоретичних залежностей, для опису кривих опорних поверхонь після шліфування, точіння, суперфінішування, хонінгування за допомогою залежності (2.40), а також таблиця значень (табл. 2.1) відношення $\frac{H_{yc}}{Ra}$ в залежності від f_0 .

Таблиця 2.1.

Значення співвідношення $\frac{H_{yc}}{Ra}$ в залежності від f_0

f_0	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0	4,5	5,0	5,5
$\frac{H_{yc}}{Ra}$	3,25	4,26	5,36	6,36	7,32	8,12	9,0	10,1	10,9

Поширивши цю залежність на процес гідроабразивної обробки при $f_0 = 3$, можна прийняти $\frac{H_{yc}}{Ra} = 6,4$. Використовуючи співвідношення (2.33), після перетворень отримаємо наступну залежність:

$$Ra = \frac{H_0}{3,6} \sqrt{\frac{L_{e0}}{h_{\max} z_0}}. \quad (2.44)$$

Для користування формулами (2.39) і (2.44) необхідно визначити величину різновисотності активних зерен H_0 . При гідроабразивній обробці значення H_0 не може бути визначене експериментально. Однак, величина H_0 залежить від зернистості абразивних часток, режимів обробки і механічних властивостей матеріалу оброблюваної деталі, тобто від тих же параметрів, що і h_{max} . При цьому, відповідно до визначення, її значення повинне бути менше h_{max} . Для проведення теоретичних розрахунків, з врахуванням результатів, наведених у роботах [3, 23, 24, 44], зробимо припущення, що при гідроабразивній обробці:

$$H_0 = \frac{h_{max}}{3} \quad (2.45)$$

Тоді залежності для розрахунку умовної висоти і середнього арифметичного відхилення профілю сталої шорсткості будуть виглядати наступним чином:

$$H_{yc} = 0,58 \sqrt{\frac{h_{max} L_{ed}}{z_0}}$$

$$Ra = 0,09 \sqrt{\frac{h_{max} L_{ed}}{z_0}}$$

Оскільки z_0 це кількість зерен, що проходять через одиничну довжину в одиницю часу, а λ це кількість взаємодій в одиницю часу на площі квадрата упакування, то через сторону квадрата упакування $2R$ буде проходити $\sqrt{\lambda}$ часток, а через одиничну довжину буде проходити в $\frac{L_{ed}}{2R}$ більше часток:

$$H_{yc} = 0,84 \sqrt{\frac{h_{max} R}{\sqrt{\lambda}}}, \quad (2.46)$$

$$Ra = 0,13 k_a^{Ra} \sqrt{\frac{h_{max} R}{\sqrt{\lambda}}}, \quad (2.47)$$

де k_a^{Ra} – коефіцієнт, що враховує кут падіння струменя.

Для оцінювання впливу розмірних характеристик робочого середовища, динамічного тиску гідроабразивної суміші та механічних властивостей матеріалу заготовки на параметр шорсткості Ra при гідроабразивній обробці проведемо розрахунки за формулою (2.47). Результати розрахунку наведені у табл. 2.2-2.4.

Таблиця 2.2

Значення середнього арифметичного відхилення профілю сталої шорсткості $Ra_{уст}$ (мкм) при гідроабразивній обробці в залежності від тиску струменя $P_{дин}$ ($L = 60$ мм, $\alpha = 90^\circ$)

$P_{дин}$, МПа	Мідь М06 $\sigma_s = 70$ МПа	Сталь 45 $\sigma_s = 350$ МПа
0,1	4,19	2,75
0,2	4,98	3,28
0,3	5,51	3,62
0,4	5,92	3,89

Таблиця 2.3.

Значення середнього арифметичного відхилення профілю сталої шорсткості $Ra_{уст}$ (мкм) при гідроабразивній обробці в залежності від відстані до оброблюваної поверхні L ($P_{дин} = 0,4$ МПа, $\alpha = 90^\circ$)

L , мм	Сталь 12X18H10T $\sigma_s = 230$ МПа	Алюмінієвий сплав Д16 $\sigma_s = 90$ МПа
30	3,99	4,91
60	4,13	5,02
90	4,01	4,79
120	3,77	4,61

Таблиця 2.4.

Значення середнього арифметичного відхилення профілю сталої шорсткості $Ra_{уст}$ (мкм) при гідроабразивній обробці в залежності від кута обробки α ($P_{дин} = 0,4$ МПа, $L = 60$)

α°	Латунь ЛС 59-1 $\sigma_s = 133$ МПа	Сталь 45 $\sigma_s = 350$ МПа
20	3,23	2,37
45	4,64	3,40
65	5,25	3,85

Проаналізувавши результати теоретичних досліджень, можна зазначити:

1. Застосування обробного середовища (часток) меншого розміру, а також зменшення тиску струменя дозволяє одержати шорсткість поверхні з меншим значенням Ra .
2. При обробці більш м'яких матеріалів утвориться більша шорсткість.
3. Отримані результати мають фізичний сенс і не суперечать сталим представленням про процес гідроабразивної обробки.

2.4. Визначення часу обробки гідроабразивної операції

Отримана система моделей ГАО буде неповної без теоретичної моделі розрахунку часу обробки. Визначення часу обробки є однією з найважливіших задач технології машинобудування, без рішення якої неможливе проєктування технологічних процесів.

При проведенні оптимізації технологічних параметрів обробки, як цільову функцію найчастіше використовують продуктивність або собівартість процесу, що у свою чергу викликає необхідність одержання як можна більш точної математичної моделі розрахунку часу обробки. Отримані вище моделі видалення металу і формування шорсткості обробленої поверхні, слугують для визначення методології визначення часу гідроабразивної обробки деталі при рішенні різних технологічних задач.

2.4.1. Видалення дефектного шару

Нехай з поверхні деталі потрібно видалити дефектний шар товщиною ΔL . Маса металу, вилученого з площі квадрата упакування

$$Q = D^2 \Delta L \rho_{\delta}. \quad (2.48)$$

Користуючись залежностями (2.28), після перетворень одержимо час обробки:

$$t_{\Delta L} = \frac{D^2 \Delta L}{P_1 P_2 V}. \quad (2.49)$$

Підставляючи значення P_1 після перетворень отримаємо:

$$t_{\Delta L} = \frac{e D^2 \Delta L}{\lambda P_2 V}. \quad (2.50)$$

Отримані залежності дозволяють визначити час обробки, необхідний для видалення дефектного шару. Це час прямий пропорційно товщині дефектного шару.

2.4.2. Досягнення сталої шорсткості

Для досягнення сталої шорсткості поверхні при ГАО необхідно цілком видалити профіль вихідної мікронерівності.

Об'єм металу, вилученого над площею квадрата упакування, визначається

$$W = k_{np} R_{z_{вих}} D^2,$$

де k_{np} – коефіцієнт, що враховує вид профілю вихідної шорсткості.

Якщо розглядати профілограму вихідної шорсткості, записану на базовій довжині, то k_{np} буде визначатися відношенням площі, між профілограмою та лінією западин, до площі, між лінією виступів і лінією западин. При вихідній обробці точінням або шліфуванням $k_{np} = 0,5$.

З урахуванням залежностей (2.26) після перетворень отримаємо час, що витратиться для отримання сталої шорсткості

$$t_{Ra_{ум}} = \frac{k_{np} R_{z_{вих}} D^2}{P_1 P_2 V}. \quad (2.51)$$

Підставляючи значення P_1 після перетворень отримаємо:

$$t_{Ra\ ycm} = \frac{k_{np} e R z_{vux} D^2}{\lambda P_2 V}$$

Слід зазначити, що час досягнення сталої шорсткості прямо пропорційно висоті нерівностей вихідної шорсткості.

2.4.3. Еволюція мікронерівності обробної поверхні

Еволюція параметрів мікронерівності поверхні під час гідроабразивної обробки характеризується експоненційною залежністю. На початковій стадії процесу формування мікрорельєфу відбувається з максимальною інтенсивністю, однак зі збільшенням тривалості обробки швидкість появи нових елементів рельєфу $\frac{dRa}{dt}$ поступово зменшується й наближається до нуля. Це свідчить про досягнення стану усталеної шорсткості, коли рельєф поверхні практично відтворюється у незмінному вигляді.

Кожному поєднанню технологічних параметрів відповідає певна питома щільність ударних взаємодій абразивних частинок і відповідний рівень їх кінетичної енергії, які однозначно визначають як тривалість перехідного періоду $t_{Ra\ ycm}$, так і величини висотних параметрів усталеного рельєфу. При цьому слід підкреслити, що остаточні значення параметрів шорсткості не залежать від початкового стану поверхні.

Це обставина важлива для правильної апроксимації залежності $Ra(t)$. Зазначені умови реалізуються залежністю

$$Ra = (Ra^e - Ra_{ycm}) e^{-k_u t} + Ra_{ycm}, \quad (2.52)$$

де Ra^e – середнє арифметичне відхилення профілю початкової мікронерівності,

k_u – коефіцієнт, що характеризує швидкість спадання параметрів мікронерівності.

Якщо стане можливо визначити значення k_u та $Ra_{уст}$ для конкретних умов обробки, то підставляючи в (2.52) замість Ra задане значення цього параметра Ra^3 за умови $Ra^3 > Ra_{уст}$ отримаємо необхідну тривалість обробки для зміни шорсткості від Ra^6 до Ra^3 .

$$t = -\frac{1}{k_u} \ln \left(\frac{Ra^3 - Ra_{уст}}{Ra^6 - Ra_{уст}} \right). \quad (2.53)$$

Величина k_u як можна помітити з залежностей (2.52) і (2.53) залежить від співвідношення $\frac{Ra^3}{Ra_{уст}}$ і $\frac{Ra^6}{Ra_{уст}}$. Змінюючи зазначені співвідношення, можна отримати різні значення k_u для тих самих режимів обробки і характеристик робочих середовищ. Щоб виключити різні тлумачення коефіцієнта інтенсивності обробки необхідна чітка методика його розрахунку.

Для однозначного визначення величини k_u , з огляду на властивості натуральних логарифмів, зробимо наступні припущення:

- 1) Величина k_u визначається при $Ra^3 = 1,2Ra_{уст}$.
 - 2) Величина k_u визначається при $Ra^6 = 5Ra_{уст}$.
 - 3) При цьому час досягнення Ra^3 близько до часу досягнення $Ra_{уст}$.
- Тоді з (2.52) і (2.53) після перетворень отримаємо

$$k_u = \frac{P_1 P_2 V \ln \left(\frac{Ra^3 - Ra_{уст}}{Ra^6 - Ra_{уст}} \right)}{k_{np} Rz_{вих} D^2}.$$

Враховуючи прийняті припущення

$$k_u = \frac{0,75 P_1 P_2 V}{k_{np} Rz_{вих} D^2} \quad (2.54)$$

Підставляючи значення P_1 після перетворень отримаємо:

$$k_u = \frac{0,75\lambda P_2 V}{ek_{np} Rz_{вих} D^2} \quad (2.55)$$

Тоді з (2.53) і (2.55) після перетворень отримаємо:

$$t = -\frac{ek_{np} Rz_{вих} D^2}{0,75\lambda P_2 V} \ln \left(\frac{Ra^3 - Ra_{уст}}{Ra^6 - Ra_{уст}} \right).$$

2.4.4. Видалення заусенців

Як встановлено в роботах [3, 31] при обробці вільними абразивами заусенець, наявний на деталі в початковий період обробки, або обламується в основі, або деформується і притискається до поверхні деталі. Потім відбувається підрізання його в основі, основна частина заусенцю відвалюється, а основа поступова віддаляється з подальшим округленням гострої кромки. Прийmemo умовно, що в середньому висота такого заусенцю дорівнює його товщині. З врахуванням цього пропонується наступна методика розрахунку часу, необхідного для видалення заусенців.

Нехай товщина заусенця в основі дорівнює L_0 . Тоді об'єм металу, який необхідно видалити на ділянці, довжина якого дорівнює діаметрові абразивної частки D .

$$W_3 = DL_0^2.$$

Оскільки, згідно (2.26) за час видаляється об'єм металу

$$W_3 = P_1 P_2 t_3 V.$$

можна записати

$$DL_0^2 = P_1 P_2 t_3 V$$

Увівши коефіцієнт $k_{зayc}$, що враховує особливе розташування заусенця на деталі і специфічні умови взаємодії абразивної частки з його поверхнею, після перетворень отримаємо залежність для визначення часу видалення заусенця.

$$t_3 = k_{зayc} \frac{L_0^2 D}{P_1 P_2 V}. \quad (2.56)$$

Величина $k_{зayc}$ може бути визначена при проведенні подальших досліджень.

Підставляючи значення P_1 після перетворень отримаємо залежність:

$$t_3 = k_{зayc} \frac{e L_0^2 D}{\lambda P_2 V}$$

Отримана модель дозволяє розраховувати час видалення заусенців, причому цей час прямо пропорційно квадратові товщини заусенця в основі.

2.4.5. Заокруглення гострих крайок

В процесі обробки заготовок на металорізальних верстатах утворюються заусенці або гострі кромки на виході інструмента з контакту з поверхнею заготовки. Поряд з такими важливими характеристиками якості поверхні, як шорсткість і фізико-механічні властивості, велику роль у поліпшенні експлуатаційних властивостей деталей і збільшенні їхньої довговічності грає ретельне виконання операцій округлення гострих кромки, тому що ці елементи поверхонь є концентраторами напруг, у цих місцях зазвичай утворюються первинні втомлювальні тріщини. Гострі кромки виникають у зонах переходу між окремими елементами поверхонь (наприклад, у місцях перетину двох площин; перетину площини і циліндричного отвору т.п.). Необхідність видалення

округлення і полірування кромки викликана вимогами умов експлуатації або необхідністю створення необхідного товарного виду деталей.

Усунення гострих кромки шляхом утворення фаски не завжди є достатньою мірою, а іноді навіть погіршує положення, тому що при цьому утворюються дві гострі кромки, замість однієї. Тому округлення кромки по радіусу є найкращим конструктивним виконанням місць поєднання різних елементів поверхні деталі.

Нехай гостру кромку, що є на деталі необхідно округлити радіусом r . Тоді площа вилученої ділянки металу в поперечному перерізі:

$$S_{y\partial} = r^2 - \frac{\pi r^2}{4} = 0,215r^2.$$

Об'єм металу, вилучений на ділянці кромки довжина якого дорівнює діаметрові абразивної частки D .

Тоді об'єм металу, який необхідно видалити на ділянці, довжина якого дорівнює діаметрові абразивної частки D :

$$V_{y\partial} = 0,215Dr^2.$$

Згідно (2.26) за час t_r віддаляється об'єму металу:

$$V_{y\partial} = P_1 P_2 V,$$

$$0,215Dr^2 = P_1 P_2 t_r V.$$

Увівши коефіцієнт k_r враховуючі специфічні умови взаємодії абразивної частки з кромкою деталі, після перетворень отримаємо залежність для визначення часу округлення гострої кромки:

$$t_r = k_r \frac{0,215Dr^2}{P_1P_2V}. \quad (2.57)$$

Величина k_r може бути визначена при проведенні експериментальних досліджень.

Підставляючи значення P_1 після перетворень отримаємо:

$$t_r = k_r \frac{0,215eDr^2}{\lambda P_2V}.$$

Отримана модель дозволяє розраховувати час, необхідне для округлення гострої крайки при гідроабразивній обробці, причому цей час прямо пропорційно квадратові радіуса округлення.

Таким чином, користуючись отриманими залежностями, можна визначити час досягнення заданої шорсткості для різних методів гідроабразивної обробки.

З визначеного виходить наступне:

1. Запропоновано математичні моделі розрахунку шорсткості обробленої поверхні з урахуванням параметрів обробки, що впливають на продуктивність і якість.

2. Виведено аналітичні залежності, що дають змогу визначати обсяг знятого металу з поверхні деталі під час обробки.

3. Отримано залежності для розрахунку часу обробки при рішенні різних технологічних задач.

2.5. Оптимізація технологічних процесів гідроабразивної обробки

Створена на основі теоретичних досліджень інтегрована система моделей, що описує процеси гідроабразивної обробки, відкриває можливість переходу до вирішення наступного ключового етапу — проєктування та оптимізації технологічних процесів. Проєктування охоплює комплекс робіт з аналізу, пошуку та розрахункового обґрунтування, спрямованих на формування такого опису

технологічного процесу, який є необхідним і достатнім для його подальшого впровадження та забезпечення відповідності встановленим вимогам.

З огляду на складність процедури проєктування, наявність великої кількості альтернативних технологічних рішень і значні витрати часу на пошук оптимального варіанта, виникає об'єктивна потреба у використанні засобів автоматизації для підтримки проєктних рішень.

Відповідно до вимог сучасного виробництва щодо автоматизації процесів проєктування необхідно визначити сукупність властивостей об'єктів, які відображають зміст технологічного проєктування, а також сформулювати принципи побудови елементів технологічних рішень. Саме ці елементи мають бути структуровані таким чином, щоб операції з ними могли виконуватися засобами програмного забезпечення.

Завдання технології в цьому контексті полягає у виявленні фізичних, механічних та інших закономірностей, що визначають перебіг обробки, з метою подальшого використання їх у практиці для вибору найбільш ефективних і економічно доцільних виробничих процесів. Саме такі закономірності становлять наукову основу автоматизованого проєктування технологій.

Для створення математичного апарата, придатного для опису процесу проєктування технологічних режимів гідроабразивної обробки, необхідно здійснити формалізацію як самих досліджуваних залежностей, так і характеру взаємозв'язків між ними. Така формалізація забезпечує можливість відтворення складної структури технологічних процесів у вигляді системи алгоритмів і процедур, що застосовуються для побудови проєктних рішень.

У якості основи цього математичного апарата може бути використано комплекс моделей, розроблений у межах проведеного дослідження. Запропонована система моделей відображає повний спектр технологічних ситуацій, характерних для гідроабразивної обробки, містить формалізований опис властивостей процесу та є адекватною базою для подальшого синтезу алгоритмів розрахунку, прогнозування й оптимізації технологічних параметрів.

Для формування процедур розв'язання проєктних задач необхідно виокремити такі властивості процесу проєктування, які можуть бути однозначно

інтерпретовані та реалізовані засобами програмного забезпечення. Зміст проектування передбачає здатність оцінювати широкий спектр виробничих ситуацій, зумовлених впливом різних технологічних параметрів, та обґрунтовувати вибір оптимальних рішень.

При цьому математична модель, що описує фізичну сутність процесу, дає можливість відмежуватися від другорядних ознак та зосередитися на ключових закономірностях, які визначають перебіг гідроабразивної обробки. Завдяки цьому моделі слугують не лише засобом аналізу, але й інструментом формалізації знань про процес.

Сформований у ході дослідження математичний апарат забезпечує можливість вирішення задач аналізу сучасних технологічних концепцій та створення формальної теорії автоматизованого проектування процесів гідроабразивної обробки, що є основою для подальшої побудови алгоритмів синтезу та оптимізації технологічних режимів.

Розроблені моделі можуть бути застосовані як для розв'язання задач оптимізації та керування технологічним процесом, так і для дослідження впливу регульованих технологічних параметрів на кінцеві результати гідроабразивної обробки. При цьому окремі ключові елементи оптимізаційної моделі, зокрема цільова функція та система обмежень, можуть включати показники, що характеризують фізико-механічні властивості поверхневого шару та інші параметри, критично важливі для забезпечення заданої якості.

Проблематика узгодження теоретичного моделювання з експериментальними даними в межах оптимізаційного підходу, аналогічно до обробки закріпленим абразивом [37], потребує всебічного фізичного, технологічного та математичного аналізу.

Ефект гідроабразивної обробки може бути охарактеризований широким спектром критеріїв, серед яких: повнота видалення дефектного шару, інтенсивність знімання металу, ступінь притуплення гострих кромek, параметри шорсткості сформованої поверхні, а також тривалість процесу або його продуктивність.

Сформована система моделей дає можливість подати кожен технологічний показник (критерій) у вигляді функціональної залежності від сукупності вихідних факторів, що включають керовані параметри процесу та фізико-механічні властивості матеріалу деталі ν , L , α , D , σ_m , $P_{дин}$ і т.п.

У межах традиційного підходу кожному з отриманих залежностей розглядають окремо, що дає змогу оцінити вплив окремих вхідних факторів, проте розглядає їх як незалежні параметри. Такий спосіб аналізу не дозволяє встановити взаємозв'язки між показниками, охопити широкий спектр можливих технологічних ситуацій та сформулювати стратегію оптимізації процесу. Розв'язання цих задач можливе лише на основі системного підходу, за якого складний процес розглядається не як сума окремих елементів, а через структуру взаємодій і відношень між ними. Застосування такого підходу має суттєву інформаційну та технологічну цінність.

Інформативна цінність підходу полягає в можливості інтегрувати різноманітні за природою отримання та формою подання дані, розглядати простір станів оброблюваної деталі як відображення множини можливих технологічних ситуацій, а також виявляти функціональні та кореляційні залежності між показниками процесу і сукупністю вхідних параметрів. Це забезпечує можливість вилучення фізично значущої інформації з формалізованих технологічних моделей.

Технологічна цінність запропонованого підходу полягає в тому, що він забезпечує можливість визначення раціональних умов обробки шляхом формування оптимізаційної моделі процесу. Сукупність показників, що аналізуються, дає змогу побудувати цільову економічну функцію, де параметри на кшталт знімання металу, часу чи продуктивності можуть виступати складовими критерієм оптимізації, тоді як інші характеристики, зокрема шорсткість поверхні, виконують роль обмежень.

У практичних умовах інтерес часто зосереджений не на всій множині показників, а лише на їх окремому піднаборі, який є визначальним для конкретної технологічної задачі.

Для оптимізації технологічних процесів гідроабразивної обробки як цільову економічну функцію доцільно використовувати продуктивність. Це означає, що з множини можливих проєктних рішень слід вибрати те, яке за певного поєднання технологічних параметрів (вхідних даних) забезпечує мінімальний час обробки окремої деталі або партії деталей. Водночас обмежувальною функцією можуть виступати вимоги до якості поверхні — наприклад, задане значення параметра шорсткості або необхідний радіус притуплення гострої кромки.

Таким чином, у процесі перебору та оцінювання варіантів до розгляду включається лише підмножина проєктних рішень, що відповідає технічним умовам, наприклад $Ra \leq Ra_z$. Сформована система моделей дає можливість визначати оптимальне рішення й для більш складних комплексних задач — зокрема, забезпечення округлення гострих кромки за одночасного досягнення або збереження спектра необхідних параметрів шорсткості поверхні.

Однією з ключових задач є оптимізація багатоступінчастих процесів гідроабразивної обробки, у яких необхідно враховувати не лише основний час, але й витрати допоміжного часу. У таких умовах важливо обрати з множини можливих проєктних рішень таку кількість ступенів обробки та такі технологічні параметри для кожного ступеня, за яких загальна продуктивність процесу досягає максимуму. При цьому слід урахувати додаткові часові витрати, пов'язані зі зміною режимів під час переходу між окремими етапами обробки.

Перш ніж переходити до розроблення методики оптимізації технологічних процесів гідроабразивної обробки, необхідно проаналізувати вплив вихідних факторів на основні показники процесу. Такий аналіз дає змогу здійснити ранжування технологічних параметрів, виокремити найбільш значущі з них, а також визначити, які параметри доцільно задавати фіксованими значеннями, а які — у вигляді масиву даних для формування множини можливих проєктних рішень.

Швидкість руху абразивних часток є одним із ключових чинників, що визначають як продуктивність, так і якість гідроабразивної обробки. Її вплив прямо відображається у залежностях (2.62)-(2.77) та підтверджується результатами експериментального моделювання. Зі збільшенням швидкості

зростають глибина та об'єм мікроподряпини при одиничній взаємодії частки з поверхнею, що приводить до підвищення продуктивності процесу. Разом з тим зростання швидкості супроводжується погіршенням якості поверхні, оскільки збільшуються висотні параметри її шорсткості.

Таким чином, швидкість часток є одним із головних параметрів, що підлягають оптимізації під час проєктування технологічних процесів гідроабразивної обробки. Відповідно, вихідний набір даних повинен включати можливий діапазон значень швидкості абразивних часток.

У гідроабразивних технологіях швидкість формування часток визначається поєднанням кількох технологічних чинників, передусім тиском струменя та відстанню від сопла до поверхні деталі.

Окрім технологічних параметрів, що визначають режими гідроабразивної обробки, набір вихідних даних повинен включати інформацію щодо фізико-механічних характеристик матеріалу деталі, зокрема значення границі текучості та твердості.

Під час розв'язання окремих задач автоматизованого технологічного проєктування, таких як вибір обладнання, визначення необхідної кількості верстатів чи робочих середовищ, вихідні дані мають охоплювати відомості про тип виробництва, програму випуску, строки виготовлення, а також конструктивні та технологічні особливості оброблюваних заготовок.

У межах системи має бути сформовано відповідний банк даних, що містить характеристики доступного обладнання, робочих середовищ та інших елементів технологічної інфраструктури, які залучаються до процесу проєктування.

РОЗДІЛ 3.

ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ЗАПРОПОНОВАНОЇ МЕТОДИКИ ПРОЄКТУВАННЯ ТЕХНОЛОГІЇ ГІДРОАБРАЗИВНОЇ ОБРОБКИ

3.1. Загальні вихідні дані

На виробництві для реалізації гідроабразивної обробки застосовують сопла, що виготовляють за технологією спікання із твердосплавного матеріалу з наступною обробкою до заданих параметрів точності та шорсткості. Багато в чому від якості внутрішньої поверхні сопла залежать різальні властивості гідроабразивної суміші при різанні. Однак саме сопла піддаються максимальному руйнуванню у процесі гідроабразивного різання. Тому пропонується разом з визначенням раціональних параметрів технологічної операції гідроабразивного різання, підвищити фізико-механічні якості сопла, а саме – виготовлення сопла з наступним осадженням захисних покриттів.

Економічний ефект від використання технології виготовлення сопел з покриттям пов'язаний з підвищенням працездатності зміцненого сопла мінімум в 1,5-1,8 рази при незначному зростанні собівартості їх виготовлення, і визначається:

1. Зменшення потреби у соплах для виконання заданої виробничої програми мінімум в 1,6-1,8 рази та пов'язаною із цим економією закуповуваного інструментального матеріалу.
2. Зменшення кількості операцій, необхідних для виготовлення сопел.
3. Можливістю підвищення інтенсифікації режимів обробки і відповідно збільшення продуктивності праці з використанням сопла.
4. Зменшення витрат, пов'язаних з налаштуванням і переналадкою гідрорізного верстату при виконанні конкретної виробничої програми у зв'язку з використанням більш зносостійкого сопла.

Для розрахунку показників економічної ефективності виконаємо порівняння витрат на виробництво сопел, прийнявши, у якості базової, технологію спікання із

твердосплавного матеріалу з наступною обробкою до заданих параметрів точності та шорсткості [54].

Розрахуємо річну потребу у соплах для виконання конкретної річної програми за формулою:

$$N_p = \frac{N_{\partial} \cdot T_{\text{нор}} \cdot \gamma \cdot \kappa_{\text{вт}}}{t_e}, \quad (3.1)$$

де N_p – умовна річна програма різання листа з титану товщиною 1 мм, м/рік;

$T_{\text{нор}}$ – норма штучного часу різання однієї деталі, хв./м;

γ – питома значення машинного часу в загальному його варіанті;

$\kappa_{\text{вт}}$ – коефіцієнт випадкової втрати інструменту.

t_e – економічна стійкість твердосплавного сопла, хв.;

Потреба у соплах:

– у базовому варіанті:

$$N_{p.\delta} = \frac{240000 \cdot 2,0 \cdot 0,5 \cdot 1,08}{900} = 288 \text{ шт.};$$

– в проєктному варіанті:

$$N_{p.\text{пр}} = \frac{240000 \cdot 2,0 \cdot 0,5 \cdot 1,08}{1800} = 144 \text{ шт.}$$

Дані про базовий та проєктний варіанти твердосплавних сопел наведено у табл. 3.1.

Таблиця 3.1

Загальні техніко-економічні показники базового та проєктного варіантів

№ п/ п	Показник	Одини- ця	Варіанти	
			базовий	проєкт
1.	Умовна річна програма різання плит	м/рік	240000	240000
2.	Потреба у соплах	шт./рік	288	144
3.	Час нанесення альтернативних шарів	хв.	35	40
4.	Площа, яку займає обладнання	м ²	2,35	5,87
5.	Сумарна потужність електродвигунів обладнання для нанесення альтернативних шарів	кВт	27	60
6.	Сумарна категорія ремонтної складності механічної/електричної частин обладнання	УРО	10/18	35/31
7.	Середній розряд робітників	розряд	5	5
8.	Оптова ціна обладнання:			
	- ВИПА-1	грн.	-	926400
	- Булат ННВ	грн.	-	648000
	- ЛСК-5-200	грн.	5383000	5383000

3.2. Визначення витрат на виготовлення сопла

У загальному випадку, витрати на виробництво сопел визначаємо на основі методики, викладеної в [54] за формулою:

$$C = B_{cm} + B_z + B_e + B_{yn} + B_p + B_a, \quad (3.2)$$

де B_{cm} – витрати на сировину та матеріали, грн.;

B_z , – витрати на заробітну плату основну, додаткову з відрахуваннями у соціальні фонди, грн.;

B_e – витрати на електроенергію технологічну, грн.;

B_{yn} - витрати на утримання приміщень, грн.;

B_p - витрати на ремонт обладнання, грн.

B_a – витрати на амортизацію устаткування, грн.

Затрати на сировину та матеріали визначають прямим розрахунком, виходячи із норм витрат матеріалів на одиницю продукції і діючих оптових цін з врахуванням транспортно-заготівельних витрат, за формулою:

$$B_{cm} = \sum_{i=1}^n N_{\epsilon} \cdot C_{\mu} \cdot K_{mp} - Q_{\epsilon} \cdot C_{\epsilon}, \quad (3.3)$$

де n – кількість матеріалів, що використовується;

N_{ϵ} – норма витрат матеріалів, кг;

C_{μ} – ціна матеріалу, грн./кг;

K_{mp} – коефіцієнт, який враховує транспортно-заготівельні витрати;

Q_{ϵ} – обсяг реалізованих відходів матеріалу, кг;

C_{ϵ} – ціна реалізації відходів матеріалу, грн./кг.

Оскільки сопла пропонується виготовляти методом спікання з регенованих твердосплавних порошкових матеріалів, що характеризується незначною кількістю відходів, вартістю зворотних відходів можна знехтувати. Розрахунок витрат на матеріали зведемо до табл. 3.2.

Таблиця 3.2

Розрахунок витрат на матеріали

№ з/п	Найменування та марка матеріалів	Норма витрат на виріб, кг	Ціна, грн./кг	K_{mp}	Сума витрат, грн.
Базовий варіант					
1.	Сплав твердий ВК8	0,055	1300,0	1,1	78,650
Проектний варіант					
1.	Регенований твердий сплав ВК8	0,055	840,0	1,1	50,820
2.	Нітрид титана TiN	0,016	600,0	1,1	10,560
3.	Нікель Ni	0,003	1048,0	1,1	3,458
	Всього	-	-	-	64,838

Витрати на заробітну плату основну, додаткову з відрахуваннями на соціальні потреби (єдиний соціальний внесок):

$$B_3 = C_r \frac{T_{шт}}{60} \cdot (1 + K_d) \cdot (1 + K_c) \quad (3.4)$$

де C_r - годинна тарифна ставка робітника, грн./год.;

$T_{шт}$ – норма часу на виготовлення сопла, хв.;

K_d, K_c – відповідно коефіцієнти додаткової зарплати та відрахувань на соціальні потреби.

У базовому варіанті:

$$B_{3.б} = 104,283 \cdot \frac{35,0}{60} \cdot (1 + 0,1) \cdot (1 + 0,22) = 81,636 \text{ грн.}$$

В проєктному варіанті:

$$B_{3.пр} = 104,283 \cdot \frac{40,0}{60} \cdot (1 + 0,1) \cdot (1 + 0,22) = 93,299 \text{ грн.}$$

Витрати на електроенергію технологічну:

$$B_{em} = \frac{N_e \cdot K_d \cdot K_N \cdot K_W \cdot T_{шт}}{\eta \cdot 60} \cdot C_e, \quad (3.5)$$

де N_e – встановлена потужність електродвигунів;

K_d – середній коефіцієнт завантаження електродвигунів за часом, $K_d = 0,3 \dots 0,5$;

K_N – середній коефіцієнт завантаження електродвигунів за потужністю, $K_N = 0,6 \dots 0,7$;

K_W – коефіцієнт, що враховує втрати електроенергії в мережі, $K_W = 1,05$;

η – ККД установки, $\eta = 0,85$;

C_e – вартість однієї кВт-год електроенергії, $C_e = 2,80$ грн/кВт-год.

$$B_{em.б} = \frac{27 \cdot 0,4 \cdot 0,6 \cdot 1,05 \cdot 35}{0,85 \cdot 60} \cdot 18,1 = 84,514 \text{ грн.}$$

$$B_{em.пр} = \frac{60 \cdot 0,4 \cdot 0,6 \cdot 1,05 \cdot 40}{0,85 \cdot 60} \cdot 18,1 = 214,647 \text{ грн.}$$

Витрати на ремонт обладнання:

$$B_p = \frac{R_m \cdot \Gamma_{\text{вм}} + R_e \cdot \Gamma_{\text{вс}}}{F_{\text{дрм}}} \cdot \frac{T_{\text{шт}}}{60}, \quad (3.6)$$

де $\Gamma_{\text{вм}}, \Gamma_{\text{вс}}$ – відповідні річні витрати на всі види ремонту на 1 УРО механічної та електричної частин обладнання, грн./рік;

$F_{\text{дрм}}$ – дійсний річний фонд часу роботи обладнання.

$$B_{\text{р.б}} = \frac{10 \cdot 980 + 18 \cdot 857,5}{1850} \cdot \frac{35,0}{60} = 7,957 \text{ грн.};$$

$$B_{\text{р.пр}} = \frac{35 \cdot 980 + 31 \cdot 857,5}{1850} \cdot \frac{40,0}{60} = 21,939 \text{ грн.}$$

Витрати на утримання приміщення:

$$B_{\text{уп}} = \frac{F_o \cdot K_d \cdot C}{F_{\text{дрм}}} \cdot \frac{T_{\text{шт}}}{60}, \quad (3.7)$$

де F_o – виробнича площа, яку займає одиниця обладнання, м²;

K_d – коефіцієнт, який враховує додаткову площу (на проходи, проїзди, побутові та службові приміщення):

C – річні витрати, пов'язані з використанням 1 м² виробничого приміщення, грн./м².

$$B_{\text{уп.б}} = \frac{2,35 \cdot 3,5 \cdot 35,0}{1850 \cdot 60} \cdot 780 = 2,023 \text{ грн.}$$

$$B_{\text{уп.пр}} = \frac{5,87 \cdot 3,0 \cdot 40,0}{1850 \cdot 60} \cdot 780 = 4,950 \text{ грн.}$$

Витрати на амортизацію обладнання:

$$B_a = \frac{\Phi_{\text{бал}} \cdot H_a}{F_{\text{дрм}} \cdot 100} \cdot \frac{T_{\text{шт}}}{60}, \quad (3.8)$$

де H_a – норма амортизації, %;

$\Phi_{\text{бал}}$ – балансова вартість обладнання, грн.

Балансову вартість обладнання знайдемо за формулою:

$$\Phi_{\text{бал}} = \Pi_{\text{опт}} \cdot (1 + K_{\text{тр}} + K_{\text{м}} + K_{\text{ф}}), \quad (3.9)$$

де $\Pi_{\text{опт}}$ – оптова ціна одиниці обладнання, грн.;

$K_{\text{тр}}$, $K_{\text{м}}$, $K_{\text{ф}}$ – відповідно коефіцієнти, які враховують транспортування (0,05...0,1), монтаж (0,04...0,06), влаштування фундаменту (0,02...0,08).

Оскільки в порівнюваних варіантах модель обладнання для спікання сопла співпадає, доцільно розраховувати лише амортизаційні відрахування обладнання для нанесення покриття в проєктному варіанті. Таким чином, балансова вартість

$$\Phi_{\text{бал.пр}} = (926400 + 648000) \cdot (1 + 0,07 + 0,05 + 0,04) = 1826304 \text{ грн.},$$

$$B_{\text{а.пр}} = \frac{1826304 \cdot 20 \cdot 5,0}{1850 \cdot 60 \cdot 100} = 16,453 \text{ грн.}$$

Результати розрахунків зводимо до табл. 3.3.

Таблиця 3.3

Витрати на виготовлення сопла

№ п/п	Експлуатаційні витрати	Умовне позначення	Варіанти	
			Базовий	Проєктний
1.	Сировина та матеріали	$B_{\text{см}}$	78,650	64,838
2.	Заробітна плата основна, додаткова з єдиним соціальним внеском	$B_{\text{з}}$	81,636	93,299
3.	Електроенергія технологічна	$B_{\text{ет}}$	84,614	214,647
4.	Ремонт обладнання	$B_{\text{р}}$	7,957	21,939
5.	Утримання приміщення	$B_{\text{уп}}$	2,023	4,950
6.	Амортизація обладнання	$B_{\text{а}}$	-	16,453
Загальна сума		$B_{\text{є}}$	254,880	416,126

3.3. Розрахунок показників економічної ефективності роботи

Річний економічний ефект, який отримує підприємство від виготовлення сопел з покриттям розраховуємо за формулою [54]:

$$E_p = B_{e.б} \cdot N_{p.б} - B_{e.нр} \cdot N_{p.нр} - E_n \cdot K_\delta, \quad (3.10)$$

де $B_{e.б}$, $B_{e.нр}$ – річні витрати на виготовлення сопел відповідно у базовому та проектному варіантах, грн.;

$N_{p.б}$, $N_{p.нр}$ – річна програма випуску сопел, грн.;

E_n – нормативний коефіцієнт ефективності капітальних вкладень, $E_n=0,16$;

K_δ – додаткові капітальні витрати, грн.

$$K_\delta = \Phi_{бал.нр} \cdot Q_{нр} - \Phi_{бал.б} \cdot Q_\delta, \quad (3.11)$$

де $\Phi_{бал.нр}$, $\Phi_{бал.б}$ – балансова вартість обладнання відповідно в проектному та базовому варіантах, грн.;

Q – потреба в обладнанні для виконання річної програми випуску сопел, відкоригована на коефіцієнт його використання, одиниць:

Розрахункову потребу в обладнанні визначаємо за формулою:

$$Q_p = \frac{N_p \cdot T_{ум}}{F_{дрм} \cdot 60 \cdot K_\epsilon}, \quad (3.12)$$

де K_ϵ – коефіцієнт виконання норм (за даними підприємства).

Так, наприклад, потреба в іоно-плазмених вакуумних камерах Булат ННВ в проектному варіанті складає:

$$Q_{p.нр} = \frac{144 \cdot 5,0}{1850 \cdot 60 \cdot 1,0} = 0,006;$$

Тобто, одну камеру буде завантажено річною програмою випуску сопел на 0,06%.

Оскільки в порівнюваних варіантах модель обладнання для спікання сопел співпадає, додаткові капітальні витрати дорівнюватимуть балансовій вартості обладнання для нанесення покриття в проектному варіанті, відкориговані на коефіцієнт їх завантаження. Тобто,

$$K_\delta = 1826304 \cdot 0,006 = 10958 \text{ грн.} \quad (3.13)$$

$$E_p = 254,88 \cdot 288 - 416,126 \cdot 144 - 0,16 \cdot 10958 = 11730 \text{ грн.}$$

Строк окупності додаткових капітальних вкладень:

$$T_{ок} = \frac{K_{\delta}}{B_{e.б} \cdot N_{p.б} - B_{e.пр} \cdot N_{p.пр}} = \frac{10958}{254,88 \cdot 288 - 416,126 \cdot 144} = 0,8 \text{ року} = 10 \text{ міс.} \quad (3.14)$$

У підсумку складаємо зведену таблицю техніко-економічних показників (табл. 3.4).

Таблиця 3.4

Підсумкові техніко-економічні показники базового та проектного варіантів

№	Показники	Одиниця	Варіанти	
			Базовий	Проект
1.	Річна програма різання плит	м/рік	240000	240000
2.	Потреба у соплах	шт./рік	288	144
3.	Штучний час виготовлення сопла	хв.	35	40
4.	Коефіцієнт завантаження обладнання для нанесення покриття	η_z	-	0,006
5.	Оптова ціна обладнання:			
	- для нанесення покриття ВИПА-1	грн.	-	926400
	- для нанесення покриття Булат ННВ	грн.	-	648000
	- для спікання сопла ЛСК-5-200	грн.	5383000	5383000
6.	Балансова вартість обладнання для нанесення покриття	грн.	-	1846304
7.	Додаткові капітальні витрати	грн.	-	10958
8.	Технологічна собівартість виготовлення сопла	грн.	254,88	416,13
9.	Технологічна собівартість річної програми виробництва сопел	грн.	73405	59922
10.	Строк окупності додаткових капітальних витрат	міс.	-	10
11.	Річний економічний ефект	грн.	-	11730

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ ПО РОБОТІ

У представленій роботі проведені теоретичні дослідження процесу гідроабразивної обробки. Дано аналіз одиничної взаємодії частки обробної, середовища з поверхнею деталі. Проведено аналіз формування профілю шорсткості обробленої поверхні. Досліджено знімання металу за один удар абразивної гранули і загальне знімання металу з поверхні деталі. Отримано залежність для визначення середнього арифметичного відхилення профілю сталої шорсткості поверхні, що враховують режими обробки і властивості матеріалу оброблюваної деталі.

Проведено дослідження процесу, що дозволяють установити вплив режиму оброблення на значення і час досягнення сталої шорсткості поверхні заготовок з різних матеріалів, знімання металу з поверхні деталі. Визначені коефіцієнти, що враховують вплив кута обробки, відстані від сопла до оброблюваної поверхні, тиску струменя на формування шорсткості поверхні і знімання металу з поверхні деталі. Таким чином, за результатами роботи:

1. Вирішено задачу, що полягає в розкритті закономірностей контактної взаємодії зерен з оброблюваною поверхнею заготовки, особливостей видалення металу і формування поверхневого шару деталі з урахуванням режимів обробки і впливу властивостей матеріалу деталі.

2. Розроблено модель одиничної взаємодії часток з поверхнею деталі при гідроабразивній обробці, що дозволяє визначити знімання металу за один удар абразивної частки.

3. На основі моделі процесу формування мікронерівності обробної поверхні заготовки при гідроабразивній обробці деталей отримані теоретичні залежності для розрахунку величини сталої шорсткості, що враховують технологічні параметри обробки і властивості матеріалу деталі.

4. Отримано теоретичні залежності для розрахунку величини знімання металу, а також часу обробки при гідроабразивній обробці.

5. Розроблені рекомендації для оптимізації процесу гідроабразивної обробки, що дозволяють значно розширити область застосування існуючої системи автоматизованого проєктування.

6. За результатами роботи проведені попередні економічні розрахунки, що показали економічне ефективність від впровадження запропонованих методик проєктування технологічних операцій гідроабразивної обробки.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Абразивная и алмазная обработка материалов: Справочник / Под ред. А.Н. Резникова.- М.: Машиностроение, 1977.- 391 с.
2. Александров Е.В. Соколинский Б.В. Прикладная теория и расчеты ударных систем.- М.: Наука, 1969.- 199 с.
3. Бабичев А.П. Основы вибрационной технологии: Учеб. пособие.- Ростов на Д., 1994.- 187 с.
4. Барон Ю.М. Магнитно-абразивная и магнитная обработка изделий и режущих инструментов.- Л.: Машиностроение, 1988.- 176 с.
5. Білик Ш.М. Абразивно-жидкостная обработка металлов. - М.:Машгиз, 1960. - 198 с.
6. Билик Ш.М. Образование поперечных периодических неровностей на поверхностях твердых тел в процессе трения//Трение и износ.- 1972.- Т. 17.- С. 90-96.
7. Вентцель Е.С. Теория вероятностей. - М.: Наука, 1969.- 576 с.
8. Вентцель Е.С. Овчаров Л.А. Теория вероятностей и ее инженерные приложения.- М: Наука, 1988.- 480 с.
9. Вероятностно-статистические основы процессов шлифования и доводки.- Л.: Изд-во СЗПИ, 1974.- 154 с.
10. Виноградов В.Н. и др. Абразивное изнашивание / Виноградов В.Н., Сорокин Т.М., Колокольников М.Г.- М.: Машиностроение, 1990.- 224 с.
11. Виноградов В.Н. Сорокин Г.М., Албагагиев А.Ю. Изнашивание при ударе.- М.: Машиностроение, 1982.- 192 с.
12. Виттенберг Ю.Г. Шероховатость и методы её оценки.- Л.: Судостроение, 1971 -108 с.
13. Гмурман В.Е. Теория вероятностей и математическая статистика.- М.: Высшая школа, 1972. - 368 с.
14. Григорович В.К. Твердость и микротвердость металлов.- М.:Наука, 1976.- 230 с.

15. Девкин М. М., Севастьянов М. Д. Очистка поверхностей деталей металлическим песком.- М. : Машиностроение, 1968.- 67 с.
16. Демкин Н. Б. Контактное шлифование шероховатых поверхностей,- М. : Наука, 1970.- 227 с.
17. Дейч М.Е., Филиппов Г.А. Газодинамика двухфазных сред. М.: Энергоиздат, 1981.- 267 с.
18. Дудюк В. О. Забезпечення надійності процесу гідроабразивного різання на основі ідентифікованих моделей власних і параметричних відмов // автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук. – Севастополь: СевНТУ, 2011. – 23 с.
19. Дунин-Барковский И.В. Карташова А.Н: Измерения и анализ шероховатости, волнистости и некруглости поверхности. - М.: Машиностроение, 1978. - 232 с.
20. Кащеев В.Н. Процессы в зоне фрикционного контакта металлов. М. Машиностроение, 1978.- 213 с.
21. Козырев С .П. Гидроабразивный износ металлов при кавитации. - М.: Машиностроение, 1971. - 240 с.
22. Комбалов В.С. Влияние шероховатости твердых тел на трение и износ.- М.:Наука, 1974.- 112 с.
23. Королев А.В. Исследование процессов образования поверхностей инструмента и детали при абразивной обработке.- Саратов: Изд-во Саратов. ун-та, 1975.- 191 с.
24. Королев А.В. Новоселов Ю.К. Теоретико-вероятностные основы абразивной обработки.- Саратов: Изд-во Саратов.ун-та, 1989.- 320 с.
25. Костецкий Б.Н. Колисниченко Н.Ф. Качество поверхности и трение в машинах.- Киев:Техника, 1969.- 215 с.
26. Кошелёв А.А., Эйзиер Л.А. Технология и оборудование для автоматизированной гидроабразивной обработки деталей// Автоматизация технологических процессов в области машиностроения для животноводства; и кормопроизводства. Ростов-на-Дону: НИИТМ, 1981. С. 37-47.

27. Кремень З.И. Павлючук А.И. Абразивная доводка. М.: Машиностроение, 1967.- 114 с.
28. Лукьянов В.С. Рудзит Я.А. Параметры шероховатости; поверхности. - М.: Изд-во стандартов, 1979.- 162 с.
29. Мартынов А.Н: Основы метода обработки деталей свободным абразивом, уплотненным инерционными силами,- Саратов: Изд-во Саратов: унта, 1981.- 212 с.
30. Маслов Е.Н. Теория шлифования материалов.-М.: Машиностроение, 1974.- 319 с.
31. Михин Н.М. Внешнее трение твердых тел.- М.:Наука, 1977.- 222 с.
32. Наладка и эксплуатация станков для вибрационной обработки/ Бабичев А.П., Рысева Т.Н., Самадуров В. А., Тамаркин М.А.- М. Машиностроение, 1988.- 64 с.
33. Непомнящий Е.А. Кремень З.И. Массарский М.Л. О закономерностях образования микрорельефа поверхностей при обработке потоком абразивных частиц// Изв. вузов. Машиностроение.-1984.- N2.- С. 117-121.
34. Непомнящий Е.Ф. Трение и износ под воздействием струи твердых сферических частиц.// Контактное взаимодействие твердых тел и расчет сил трения и износа.- М.:Наука, 1971.- С. 190-200.
35. Пановко Я.Г. Основы прикладной теории колебаний и удара.- Л.: Машиностроение, 1976.- 320 с.
36. Петросов В.В. Гидродробеструйное упрочнение деталей и инструмента.- М.: Машиностроение, 1977.- 166 с.
37. Пляскин И.И. Оптимизация технических решений в машиностроении.- М.Машиностроение, 1982.- 176 с.
38. Проволоцкий А.Е. Струйно-абразивная обработка деталей машин. - Киев.: Техника, 1989.- 177 с.
39. Hashish, M. "Mixing Tube Material Effects and Wear Patterns" (1997), Proceedings of the 9th American Water Jet Conference, Dearborn, MI, August, pp. 211-222.

40. Ребиндер П.А. Поверхностно-активные вещества.- М.: Знание, 1961.- 46 с.
41. Саленко О. Ф. Поліпшення стабільності процесу гідро абразивного різання конструктивними засобами / О. Ф. Саленко, В. О. Дудюк // Вісник СевНТУ. – Вип. 107: Машиноприладобудування та транспорт: зб. наук. пр. – Севастополь: Вид-во СевНТУ, 2010. – С. 197–202
42. Ситник О.О. Підвищення продуктивності гідроабразивного різання з врахуванням впливу фракцій гранатового концентрату Заваллівського родовища на працездатність твердосплавних сопел / О.О. Ситник, О.В. Лисенко, С.М. Павлушин // Збірник праць молодих науковців КНТУ.– Вип. 2. – Кіровоград: КНТУ, 2013. – С. 782-789.
43. Табаков В., Балан С. Изучение механизма разрушения поверхности материалов под действием эрозии // Труды американского общества инженеров - механиков. Сер. Энергетические машины и установки. 1983. № 4. С. 106-110.
44. Тамаркин М.А., Шевцов С.Н., Клименко А.А. Моделирование процесса единичного взаимодействия гранулы свободного абразива и обрабатываемой детали // Автоматизация и современные технологии. - 2005.-№5.
45. Тененбаум М. М. Сопротивление абразивному изнашиванию / М. М. Тененбаум. – М.: Машиностроение, 1976. – 271 с.
46. Технологическая наследственность в машиностроительном производстве/ Дальский А.М., Базров Б.М.у: Васильев А.С. и др./Под ред. А.М. Дальского. - М.: Изд-во МАИ, 2000. - 364 с.
47. Триласский В.Д. и др.Объемная центробежно-ротационная обработка деталей / НИИмаш; М., 1983. – 53 с.
48. Хусу А.П. и др. Шероховатость поверхностей. Теоретико-вероятностный подход / Хусу А.П., Виттенберг Ю.Р., Пальмов В.А. - М.: Наука, 1975. – 343 с.
49. Чеповецкий И.Х. Механика контактного взаимодействия при алмазной обработке.- Киев: Наук, думка, 1978. - 228 с.
50. Шманев В. А., Шулёпов А.П., Мещеряков А.В. Струйная гидроабразивная обработка деталей ГТД - М.: Машиностроение, 1995.- 144 с.

51. Ящерицын П.И. Зайцев А.Г. Повышение качества шлифованных поверхностей и режущих свойств абразивно-алмазного инструмента. - Минск.: Наука и техника, 1972.- 480 с.

52. Ящерицын П.И. Теория резания. Физические и тепловые процессы в технологических системах. - Минск.: Высшей, шк., 1990. – 512 с.

53. Ящерицын П.И. и др. Финишная обработка деталей уплотненным потоком свободного абразива / Ящерицын П.И., Мартынов А.Н., Гридин А.Д. - Минск: Наука и техника, 1978.- 224 с.

54. Економічні та організаційно-планові розрахунки при обґрунтуванні доцільності розробки нових виробів //Укладачі: Журило І.В., Полтавець М.М. - Кропивницький: ЦНТУ, 2017.- 40 с.

55. Moisejenko M.S. Application of wear-resistant coatings for increasing efficiency of elements of hydrocutting devices / M.S. Moisejenko, O.F. Salenko, O.U. Kumurgy et all // Journal of Mechanical Engineering National Technical University of Ukraine „Kyiv Polytechnic Institute”. – Kyiv, 2012. – No. 65. – pp. 19–25.