

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ОДЕСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ**

Анділахай Олександр Олександрович

УДК 621.92.001.5

**НАУКОВІ ОСНОВИ ЕФЕКТИВНОЇ ОЗДОБЛЮВАЛЬНОЇ АБРАЗИВНОЇ
ОБРОБКИ ДЕТАЛЕЙ ЗАТОПЛЕНИМИ СТРУМЕНЯМИ**

05.02.08 – технологія машинобудування

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
доктора технічних наук

Одеса – 2013

Дисертацією є рукопис

Робота виконана в ДВНЗ “ Приазовський державний технічний університет ”
Міністерства освіти і науки України

Науковий консультант доктор технічних наук, професор
Новіков Федір Васильович,
Харківський національний економічний університет,
завідувач кафедри “Техніка і технології”

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Братан Сергій Михайлович,
Севастопольський національний технічний
університет, завідувач кафедри
“Технологія машинобудування”

доктор технічних наук, старший науковий
співробітник **Лавріненко Валерій Іванович,**
Інститут надтвердих матеріалів ім. В.М. Бакуля
Національної академії наук України,
завідувач відділу

доктор технічних наук, професор
Марчук Віктор Іванович,
Луцький національний технічний університет,
завідувач кафедри “Приладобудування”

Захист відбудеться “22” листопада 2013 р. о 14.00 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 41.052.02 в Одеському національному політехнічному університеті за адресою: 65044, м. Одеса, пр. Шевченка, 1, ауд. 400-А

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Одеського національного політехнічного університету за адресою: 65044, м. Одеса, пр. Шевченка, 1

Автореферат розісланий “17” жовтня 2013 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради

Ю.М. Свінар'юв

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. В поточний час машинобудування має достатньо великий арсенал технологій оздоблювальної обробки деталей машин. Однак, операції зачищення дрібних точних деталей (масою до 3 г) малої жорсткості й складної конфігурації залишилися не механізованими, досить часто здійснюються вручну й вимагають нових технологічних рішень. Це обумовлено в першу чергу низькою ефективністю застосування на даних операціях прогресивних методів оздоблювальної струминно-абразивної обробки, тому що, з однієї сторони, через великі сили, що прикладаються до деталей, відбувається їхня деформація, а з іншої сторони, ці методи нетехнологічні, оскільки абразивним потоком руйнуються сопла, що вимагає їхньої частотої заміни й приводить до нестабільності процесу обробки. Тому в даній дисертаційній роботі запропоновано принципово новий метод абразивної обробки, здійснюваний за допомогою струменів стисненого повітря, затоплених абразивною суспензією, оскільки при цьому забезпечується схоронність (довговічність) сопел, через які подають стиснене повітря, і стабільність процесу обробки. Сутність даного методу обробки полягає в тому, що в робочу камеру, яка містить вільно поміщені оброблювані деталі й абразивну суспензію, подають стиснене повітря у вигляді струменів, спрямованих таким чином, щоб досягалися оптимальні обробка й перемішування деталей, а також забезпечувалася схоронність внутрішніх поверхонь робочої камери. Забезпечення рівномірного перемішування оброблюваних деталей і всебічної дії абразивних зерен на їхній поверхні є найважливішими умовами досягнення високих показників якості й продуктивності обробки. Однак, у даний час відсутня загальноприйнята теорія оздоблювальної абразивної обробки деталей затопленими струменями, яка відображає взаємодію незакріпленого абразивного зерна й оброблюваної деталі, що рухаються в повітряному струмені з рідиною. Таким чином, необхідність рішення проблеми підвищення якості, продуктивності й стабільності обробки вимагає розкриття технологічних закономірностей знімання матеріалу й формоутворення поверхонь деталей, визначення раціональних параметрів обробки.

Традиційно основні теоретичні положення струминно-абразивної обробки розглядаються з позиції розрахунків деталей машин на тертя й зношування. Однак, це не відображає закономірності формування параметрів якості обробки й вимагає застосування нових підходів, заснованих, насамперед, на положеннях теорії різання матеріалів, які визначають фізичну сутність процесу знімання матеріалу й дозволяють обґрунтувати умови істотного підвищення якості й продуктивності оздоблювальної абразивної обробки деталей затопленими струменями. При цьому важливо мати у своєму розпорядженні теоретичні рішення про умови зниження енергоємності обробки, як основного фактора підвищення якості й продуктивності. Важливо також оцінити роль динаміки взаємодії абразивних зерен з оброблюваною деталлю у формуванні параметрів якості обробки й можливості підвищення на цій основі ефективності обробки. Рішення даної проблеми є актуальним як для науки, так і для розвитку вітчизняного машинобудування.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Робота виконана відповідно до Постанови Кабінету Міністрів України № 516 від 18.04.2006 р. “Державна програма розвитку машинобудування на період 2006-2011 р.р.” і Постановою Кабінету Міністрів України № 1130 від 12.09.2011 р. “Державна програма розвитку внутрішнього виробництва”, перший етап реалізації якої розрахований на період 2012–2015 р.р., а також у відповідності з пріоритетним напрямком наукової, науково-технічної та інноваційної діяльності ДВНЗ “Приазовський державний технічний університет” “Теоретичні та експериментальні дослідження процесів обробки матеріалів з метою створення енергозберігаючих технологій, поліпшення якості металопродукції і економії матеріалів” (п. 3.4 Статуту ДВНЗ “ПДТУ”, прийнятого конференцією трудового колективу 03.06.2003 р., протокол № 2) і з тематичним планом робіт ДВУЗ “Приазовський державний технічний університет”, який включає наступні роботи: “Методи й засоби підвищення точності й експлуатаційної надійності деталей машин”, 2010 р. (ДР № 0109U006812); “Методи й засоби підвищення точності й експлуатаційної надійності деталей машин”, 2011 р. (ДР № 0110U006568); “Амортизація динамічних навантажень у металургійних машинах”, 2012 г. (ДР № 0112U005781). Здобувач брав безпосередню участь у виконанні робіт як науковий керівник і виконавець.

Мета і завдання дослідження. Метою роботи є підвищення якості, продуктивності й стабільності оздоблювальної обробки дрібних точних деталей малої жорсткості й складної конфігурації на основі розробки й застосування ефективного методу абразивної обробки затопленими струменями й визначення раціональних технологічних і конструктивних параметрів установок для його здійснення.

Для досягнення поставленої мети в роботі вирішувалися наступні завдання:

- провести систематизацію технологічних і конструктивних рішень по оздоблювальній обробці дрібних точних деталей малої жорсткості й складної конфігурації та сформулювати наукові передумови ефективного застосування методу абразивної обробки затопленими струменями;
- розробити теоретичний підхід до визначення технологічних закономірностей формування й умов підвищення параметрів якості при абразивній обробці деталей затопленими струменями на основі критерію найменшої енергоємності обробки з позиції теорії різання матеріалів;
- розробити математичну модель визначення шорсткості поверхні й продуктивності абразивної обробки деталей затопленими струменями з урахуванням динаміки руху абразивних зерен в оброблюваному матеріалі й на її основі одержати уточнені аналітичні рішення по встановленню закономірностей знімання матеріалу й формоутворення поверхонь деталей, визначенню найбільш перспективних напрямків зменшення шорсткості й підвищення продуктивності обробки;
- провести комплекс експериментальних досліджень по встановленню параметрів якості, продуктивності й стабільності абразивної обробки затопленими струменями й оцінити вірогідність отриманих теоретичних рішень;
- на основі методу планування багатofакторного експерименту розробити узагальнені математичні моделі процесу абразивної обробки деталей затоплени-

ми струменями й за критеріями найбільшої продуктивності та найменшої шорсткості поверхні визначити раціональні параметри обробки;

- розробити конструкції установок для здійснення ефективної абразивної обробки деталей затопленими струменями;

- розробити й впровадити у виробництво ефективні технології абразивної обробки деталей затопленими струменями.

Об'єкт дослідження – технологічні процеси абразивної обробки затопленими струменями дрібних точних деталей малої жорсткості й складної конфігурації.

Предмет дослідження – теоретичне обґрунтування технологічних закономірностей і потенційних можливостей методу абразивної обробки затопленими струменями дрібних точних деталей малої жорсткості й складної конфігурації з метою підвищення якості, продуктивності та стабільності обробки й на цій основі визначення раціональних технологічних і конструктивних параметрів установок для здійснення абразивної обробки деталей затопленими струменями.

Методи дослідження. Методологічною основою роботи є системний підхід до вивчення й аналітичного опису закономірностей знімання матеріалу та формоутворення поверхонь при абразивній обробці деталей затопленими струменями й вибору раціональних параметрів обробки, що забезпечують підвищення якості, продуктивності та стабільності технологічного процесу.

Теоретичні дослідження проводилися з використанням методів, що базуються на фундаментальних положеннях технології машинобудування, теорії різання матеріалів, опору матеріалів, теорії коливань, фізики, математичного аналізу, теорії ймовірностей, а також математичного моделювання. Експериментальні дослідження виконані із застосуванням сучасного електронного мікроскопа-інтерферометра, профілографа-профілометра мод. 201, твердоміра ПМТ-3, мікроскопа МІІІ-4, електронного тахометра, оптичної ділильної головки, горизонтального оптиметра та проведення кінозйомки.

Наукова новизна одержаних результатів. Розроблено наукові основи ефективної оздоблювальної абразивної обробки затопленими струменями дрібних точних деталей малої жорсткості й складної конфігурації, що дозволило виявити, обґрунтувати й реалізувати умови істотного підвищення якості, продуктивності, стабільності обробки й вирішити актуальну для технології машинобудування науково-практичну проблему оздоблювальної обробки цих деталей. При цьому:

- уперше виконана оцінка технологічних закономірностей формування параметрів якості при струминно-абразивній обробці з позиції теорії різання матеріалів з урахуванням умов переходу від процесу пластичного деформування матеріалу до процесу різання абразивними зернами, що дало змогу уточнити відомі теоретичні рішення, отримані на основі використання класичних розрахунків деталей машин на тертя й зношування;

- уперше теоретично на основі критерію найменшої енергоємності обробки обґрунтовані технологічні можливості підвищення якості й продуктивності абразивної обробки деталей затопленими струменями й сформульовані основні на-

прямки її ефективного застосування, які полягають в обробці кромek заготовок, усуненні задирок і зменшенні мікронерівностей на оброблюваних поверхнях;

- розроблена нова математична модель визначення шорсткості поверхні й продуктивності абразивної обробки деталей затопленими струменями з урахуванням динаміки руху абразивних зерен в оброблюваному матеріалі, що дозволило принципово, по-новому, розкрити основні технологічні закономірності знімання припуску й формоутворення поверхонь деталей;

- уперше теоретично обґрунтована можливість підвищення якості й продуктивності абразивної обробки затопленими струменями деталей, виготовлених із пластичних і крихких матеріалів, шляхом забезпечення кутів входу абразивних зерен в оброблюваний матеріал, відповідно рівних $10\text{--}30^\circ$ і 90° . Це узгоджується з відомими експериментальними даними, отриманими при дослідженні традиційних методів струминно-абразивної обробки;

- уперше теоретично й експериментально доведена ефективність застосування надзвукового профільованого сопла Лавалю, що забезпечує підвищення якості й продуктивності обробки за рахунок досягнення подвійного ефекту обробки: збільшення швидкості потоку й кількості абразивних зерен, які інжектуються у затоплений струмінь стисненого повітря;

- розроблені нові узагальнені емпіричні моделі визначення шорсткості поверхні й продуктивності абразивної обробки деталей затопленими струменями, представлені у вигляді степеневих функцій, які в сукупності з отриманими аналітичними рішеннями дають достатньо повне уявлення про технологічні закономірності й можливості процесу й дозволяють за критеріями найменшої шорсткості поверхні та найбільшої продуктивності визначити раціональні умови обробки;

- уперше розроблені науково обґрунтовані принципи вибору технологічних і конструктивних параметрів при проектуванні високопродуктивних установок для здійснення абразивної обробки деталей затопленими струменями.

Практичне значення одержаних результатів полягає в тому, що на основі проведених теоретичних і експериментальних досліджень розроблено ефективно устаткування, представлене гамою установок для оздоблювальної абразивної обробки дрібних деталей затопленими струменями, що дозволяє ліквідувати трудомісткі ручні зачисні операції, підвищити якість, продуктивність і стабільність обробки за рахунок поліпшення товарного виду оброблених деталей при одночасній обробці великої кількості деталей із завантаженням у робочу камеру “навалом”.

Розроблено інженерні методики визначення оптимальних конструктивних і технологічних параметрів установок для абразивної обробки деталей затопленими струменями стисненого повітря, які дозволяють обґрунтовано вибирати кількість і геометричні розміри конструктивних елементів, а також установлювати раціональні умови обробки, що забезпечують підвищення якості, продуктивності й стабільності обробки.

Розроблені технології й устаткування впроваджені в ЗАТ “Медпром” і ТОВ “Азовелектромеханіка” (м. Маріуполь), ДП Харківський машинобудівний завод “ФЕД”, ЗАТ “Азовський машинобудівний завод” (м. Бердянськ), ТОВ

Технічний Центр “ВаріУс” (м. Дніпропетровськ) із загальним економічним ефектом 305135 гривень на рік.

Результати теоретичних і експериментальних досліджень роботи використовуються в навчальному процесі в курсовому й дипломному проектуванні на кафедрі “Технологія машинобудування”, а також у дисциплінах “Сучасні технології обробки” і “Основи робочої професії” на кафедрах “Технологія машинобудування” і “Металорізальні верстати й інструменти” ДВУЗ “Приазовський державний технічний університет”.

Особистий внесок здобувача. Всі основні результати, які виносяться на захист, отримані здобувачем самостійно й опубліковані в 68 наукових працях. Постановка проблеми й наукових завдань, обговорення результатів досліджень проводилися разом з науковим консультантом. У роботах, опублікованих у співавторстві [7, 10, 11, 20, 25, 28 – 35, 47, 48], здобувачеві належать обґрунтування методології досліджень, результати теоретичних і експериментальних досліджень, розроблені практичні рекомендації й промислові впровадження.

Апробація результатів дисертації. Основні положення дисертації доповідалися й обговорювалися на XIV–XVIII Міжнародних науково-технічних конференціях “Фізичні й комп’ютерні технології”, м. Харків, 2008–2012 р.р.; XX Міжнародній науково-практичній конференції “Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров’я”, м. Харків, 2012 р.; V, VII – X регіональних науково-технічних конференціях, м. Маріуполь, 1998, 2000–2003 р.р.; Міжнародній науково-методичній конференції “Сучасні проблеми та перспективи розвитку верстато-інструментального виробництва і вдосконалення підготовки кадрів”, м. Маріуполь, 2003 р.; Міжнародних науково-технічних конференціях “Університетська наука – 2007”, “Університетська наука – 2009”, “Університетська наука – 2011”, м. Маріуполь, 2007, 2009, 2011 р.р.; науково-технічних конференціях “Нові й нетрадиційні технології в ресурсо- і енергозбереженні”, м. Одеса, 2010, 2013 р.р.; 11 і 13 Міжнародних науково-практичних конференціях “Якість, стандартизація, контроль: теорія та практика”, Ялта – Київ, 2011, 2012 р.р.; 12 Міжнародній науково-практичній конференції “Інженерія поверхні та реновація виробів”, Ялта – Київ, 2012 р.; IV науково-технічна конференція “Ресурсозбереження та енергоефективність процесів і обладнання обробки тиском в машинобудуванні й металургії”, м. Харків, 2012 р.; VII – IX Міжнародних науково-технічних конференціях “Сучасні інструментальні системи, інформаційні технології та інновації”, м. Курськ, Росія, 2010–2012 р.р.; I Міжнародній науково-практичній конференції “Інновації, якість та сервіс в техніці та технологіях”, м. Курськ, Росія, 2009 р.; Міжнародній науково-практичній конференції “Актуальні проблеми сучасної промислової безпеки та екології”, м. Курськ, Росія, 2010 р.; V Міжнародній науково-технічній конференції “Машинобудування – основа технологічного розвитку Росії”, м. Курськ, Росія, 2013 р. Роботу в повному обсязі заслухано та схвалено на розширених наукових семінарах кафедри “Технологія машинобудування” ДВНЗ “Приазовський державний технічний університет” (2013 р.), кафедри “Технологія машинобудування” Одеського національного політехнічного університету (2013 р.), кафедри “Техніка та технології” Харківського національного економічного університету (2013 р.) та на Міжнародній нау-

ково-технічній конференції “Сучасні напрямки та перспективи розвитку технології обробки й обладнання в машинобудуванні “Механообробка. Севастополь – 2012” (2012 р.).

Публікації. Основні результати дисертації опубліковано в 68 наукових працях, у тому числі 26 наукових праць – у фахових виданнях, затверджених МОН України, 1 – у закордонному виданні, за переліком б/д Scopus, у 16 винаходах, в тому числі в 4 патентах.

Структура і обсяг роботи. Дисертаційна робота складається із вступу, семи розділів з висновками, загальних висновків, списку використаних літературних джерел та 3 додатків. Загальний обсяг дисертації складає 533 сторінки, з них 247 ілюстрацій на 115 сторінках; 26 таблиць на 17 сторінках, 16 таблиць за текстом; 264 найменування використаних літературних джерел на 30 сторінках; 3 додатки на 47 сторінках.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі дана загальна характеристика роботи, у якій обґрунтована актуальність, новизна і практична значимість одержаних результатів, визначено об'єкт, предмет дослідження, сформульовані мета і задачі досліджень. Наведено особистий внесок здобувача у виконану роботу й результати апробації дисертації.

У першому розділі проведено аналіз сучасного стану проблем оздоблювальної обробки дрібних деталей і обґрунтовані шляхи їхнього рішення. Показано, що оздоблювальна обробка дрібних точних деталей (масою до 3 г) малої жорсткості й складної конфігурації здійснюється багатьма методами (рис. 1). Найбільш перспективним є метод струминної обробки деталей вільним абразивом, який особливо ефективний при обробці деталей кіно-фотоапаратури, оскільки поряд з видаленням задирок і округленням гострих кромek можна одержати рівномірну матову поверхню, яка виключає виникнення відблисків й таким чином підвищує якість обробки. Особливий внесок у розробці методу струминно-абразивної обробки деталей належить професору Проволоцькому О.Є. Однак, даний метод має істотний недолік, пов'язаним з інтенсивним зношуванням сопел, через які прокачується абразивна суспензія. У результаті цього діаметр сопла збільшується, що веде до збільшення витрати стисненого повітря й абразивного матеріалу, а безперервне збільшення діаметра соплового отвору є причиною безперервної зміни режиму обробки поверхні й нестабільності процесу. Заміна зношеного сопла новим веде до стрибкоподібної зміни режиму обробки й зміни площі, охоплюваної потоком абразивних часток, що знижує якість і продуктивність обробки.

В опублікованих роботах пропонуються різні шляхи зменшення інтенсивності зношування сопел струминного апарата: виготовлення сопел з таких матеріалів як гума, капрон, поліуретан, які в меншій мірі піддаються абразивному зношуванню; створення захисного шару сопла, утвореного стікаючою рідиною або стисненим повітрям, які подаються окремо від абразивного порошку тощо. Однак домогтися відчутного результату при цьому не вдалося, тобто оптимізація

елементів конструкції струминного апарата практично вичерпала себе. Тому проблема зношування сопел струминного апарата і відповідно стабільності обробки, як і раніше, залишається актуальною, потребуючою ефективного рішення.

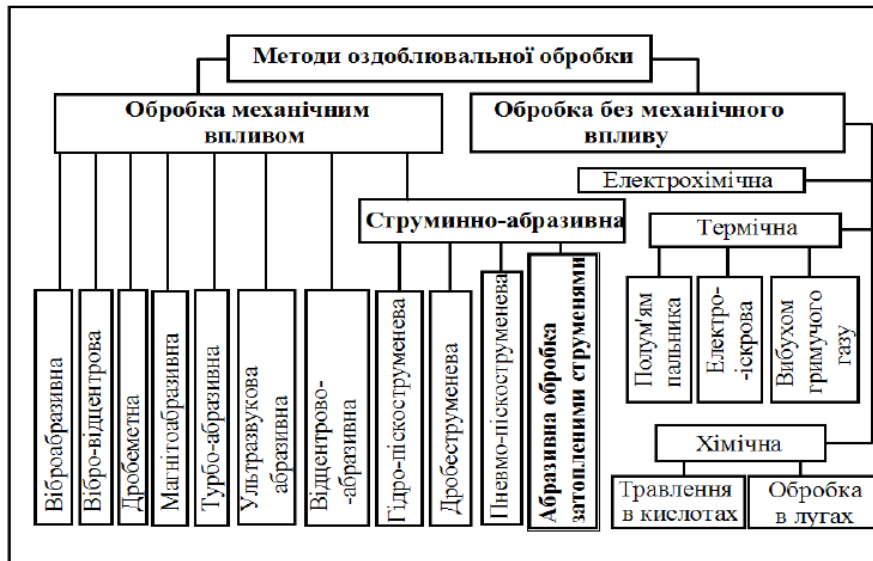


Рисунок 1 – Класифікація методів оздоблювальної обробки деталей

В роботі показано, що кардинальним рішенням даної проблеми може бути зміна принципової схеми струминно-абразивної обробки за рахунок застосування методу абразивної обробки деталей затопленими струменями. Даний метод є подальшим розвитком струминно-абразивної поверхневої обробки й виключає основний недолік струминно-абразивних установок – абразивне зношування каналів сопел або ежекційних насадок, тому що абразивні зерна приєднуються до струменів стисненого повітря за їхніми межами. Ефект обробки досягається в результаті всебічної дії абразивних зерен на поверхні оброблюваних деталей і забезпечення їхнього рівномірного перемішування. Ефективність процесу може бути втрачена через порушення пропорцій (балансу) між цими двома факторами, оскільки при перемішуванні деталей і абразивних зерен з високою швидкістю зникає істотна різниця швидкостей між абразивними зернами й оброблюваними деталями. З іншої сторони, інтенсивна локальна дія абразивних зерен на оброблювані поверхні без належного перемішування приведе до похибок геометричної форми окремих деталей і нерівномірної обробки всієї партії деталей, тобто до зниження якості оброблюваних поверхонь.

Щоб ефективно управляти даним процесом обробки й забезпечувати високі показники якості, продуктивності й стабільності обробки, необхідно знати його фізичні закономірності й технологічні можливості. Однак, у науково-технічній літературі наведено лише практичні рекомендації без розкриття фізичної сутності й технологічних можливостей процесу. Відомі теоретичні підходи до визначення параметрів струминно-абразивної обробки базуються в основному на положеннях теорії розрахунку деталей машин на тертя й зношування й не враховують закономірності процесу різання й стружкоутворення. Із цієї причини відсутня теорія формоутворення поверхонь і знімання матеріалу, яка відо-

бражає взаємодію незакріпленого абразивного зерна й оброблюваної деталі, що рухаються в повітряному струмені з рідиною. Однак, необхідність цілеспрямованого керування процесом, одержання стабільних результатів по якості й продуктивності обробки вимагають розкриття сутності явищ, що супроводжують процес. Це вимагає розробки теоретичних основ струминно-абразивної обробки й у першу чергу методу абразивної обробки деталей затопленими струменями, як найбільш перспективного з точки зору підвищення стабільності, якості й продуктивності методу оздоблювальної обробки дрібних точних деталей малої жорсткості й складної конфігурації.

Відзначається, що на відміну від традиційних методів струминно-абразивної обробки, даний метод забезпечує врізання абразивних зерен в оброблюваний матеріал під різними кутами, що вносить принципові зміни в закономірності знімання матеріалу й формоутворення поверхонь оброблюваних деталей. У зв'язку із цим, важливо теоретично встановити вплив кута входу абразивних зерен в оброблюваний матеріал на енергоємність процесів і сили різання, шорсткість поверхні й продуктивність обробки. Це дозволить оцінити технологічні можливості пропонованого методу для ефективної обробки площин і кромek плоских деталей невеликих розмірів і малої жорсткості, усунення задирок, зменшення значних мікронерівностей поверхонь деталей, утворених на попередніх технологічних операціях тощо.

Надзвичайно важливо оцінити роль динаміки взаємодії абразивних зерен з оброблюваним матеріалом у процесі формоутворення поверхонь, тому що ця проблема в теорії струминно-абразивної обробки фактично не розкрита. Відсутні математичні рівняння для визначення траєкторії руху абразивного зерна в оброблюваному матеріалі з урахуванням динамічного фактора й закономірностей процесу мікрорізання. Крім того, процес взаємодії абразивного зерна з оброблюваним матеріалом і формування шорсткості поверхні обумовлений саме динамічним фактором, у результаті чого зерно при русі втрачає кінетичну енергію аж до нуля й, як правило, зупиняється в оброблюваному матеріалі. В результаті на поверхні утворюється лунка з витиснутим спереду й з боків металом, тобто відсутній повний зріз металу, що веде до збільшення мікронерівностей і зниження інтенсивності знімання металу. Це пов'язано з недостатньою кінетичною енергією абразивного зерна через його відносно низьку початкову швидкість. Всі ці фактори необхідно враховувати при розробці математичної моделі визначення шорсткості поверхні й продуктивності абразивної обробки деталей затопленими струменями, що дозволить більш повно розкрити фізичну сутність даного методу й обґрунтовано підійти до вибору оптимальних умов обробки, що забезпечують підвищення стабільності, якості й продуктивності. Не менш важливо оцінити можливості збільшення швидкості руху абразивних зерен, так як при використанні цього методу обробки вона нижче, ніж при традиційній струминно-абразивній обробці.

Актуальними є питання експериментальних досліджень характеру й кількості мікрорізів, утворених окремими зернами на оброблюваній поверхні, які визначають її шорсткість, а також порівняння результатів теоретичних досліджень із експериментальними даними. Такого роду дослідження дозволять ви-

явити домінуючі технологічні фактори в процесі обробки й можливості керування ними з метою підвищення якості, продуктивності й стабільності обробки, розробки високоефективних технологій абразивної обробки деталей затопленими струменями й устаткування для їхнього здійснення. Основними науковими передумовами рішення даних завдань є теоретичні і експериментальні дослідження Проволоцького О.Є., Ісупова М.Г., Якімова О. В., Новікова Ф.В., Саверіна М.М., Кашеєва В. М., Сорокіна Г. М., Павлова Б. В., а також результати, отримані під керівництвом Сергієва А.П., Шаїнського М. Е. та інших.

У другому розділі теоретично обґрунтовані технологічні можливості підвищення якості й продуктивності абразивної обробки деталей затопленими струменями. Для цього запропоновано теоретичний підхід для визначення закономірностей формування й умов підвищення параметрів якості при абразивній обробці деталей затопленими струменями, основою якого є положення теорії різання матеріалів. В його основу покладена умова рівності кінетичної енергії абразивного зерна, що рухається, $W = m \cdot V_0^2 / 2$ і роботи різання $A = P_z \cdot l$, де m – маса абразивного зерна, кг; V_0 – початкова швидкість руху абразивного зерна, м/с; $P_z = \sigma \cdot a \cdot v$ – тангенціальна складова сили різання, Н; σ – умовне напруження різання, Н/м² (енергоємність обробки, Дж/м³); a , v , l – товщина, ширина й довжина зрізу, м. Об'єм зрізу окремим зерном визначається:

$$\mathcal{G}_{зріз} = a \cdot v \cdot l = \frac{m \cdot V_0^2}{2 \cdot \sigma}. \quad (1)$$

Аналіз залежності (1) показує, що збільшити $\mathcal{G}_{зріз}$ при заданій кінетичній енергії абразивного зерна $W = m \cdot V_0^2 / 2$ можна винятково за рахунок зменшення енергоємності обробки

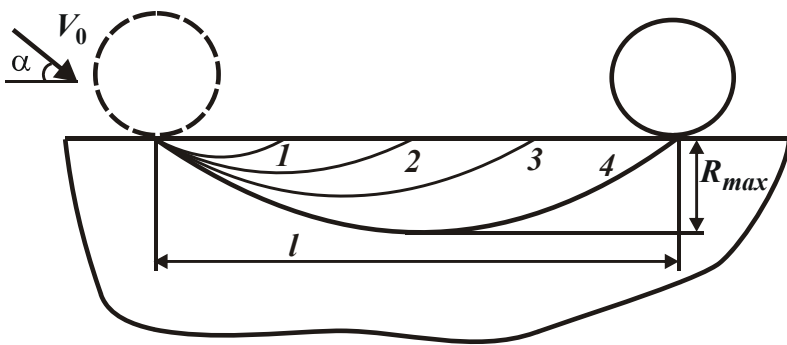


Рисунок 2 – Траєкторії руху абразивного зерна в оброблюваному матеріалі залежно від його кінетичної енергії: $W_1 < W_2 < W_3 < W_4$

енергоємності обробки σ , а зменшити товщину зрізу (параметр шорсткості поверхні $R_{max} \approx a$) при заданому значенні $\mathcal{G}_{зріз} = a \cdot v \cdot l$ можна збільшенням довжини зрізу l (рис. 2):

$$R_{max} = \frac{\mathcal{G}_{зріз}}{v \cdot l}. \quad (2)$$

Для реалізації цих умов необхідно встановити функціональні зв'язки параметрів σ і l залежно від кута входу α зерна в оброблюваний матеріал з позицій теорії різання матеріалів і динаміки взаємодії абразивного зерна з оброблюваним матеріалом. Тому розділ 2 роботи присвячено теоретичному визначенню енергоємності обробки σ , а розділ 3 – теоретичному визначенню умов збільшення параметра l з урахуванням закономірностей зміни σ . На цій основі виконані розрахунки шорсткості поверхні й продуктивності обробки й сформульовані основні напрямки

підвищення ефективності абразивної обробки деталей затопленими струменями. Для вирішення даних завдань розглянуті закономірності знімання матеріалу в момент входу зерна в оброблюваний матеріал (випадок різання з товщиною зрізу, що збільшується в часі) і в момент виходу зерна з контакту з оброблюваним матеріалом (випадок різання зі зменшуваною в часі товщиною зрізу). У першому випадку (рис. 3) дотичне напруження τ , що виникає в умовній площині зсуву OA , описується залежністю:

$$\tau = \frac{P_y}{2 \cdot v \cdot a \cdot \sin \psi_1 \cdot \cos \alpha} \cdot [\sin(2\beta - \alpha + \psi_1) - \sin(\alpha + \psi_1)], \quad (3)$$

де P_y – радіальна складова сили різання, Н; β – умовний кут зсуву оброблюваного матеріалу; $\psi_1 = \psi + \gamma$; ψ – умовний кут тертя зерна з оброблюваним матеріалом; γ – негативний передній кут зерна.

За умови $\sin(2\beta - \alpha + \psi_1) = 1$ дотичне напруження τ приймає максимальне значення τ_{max} , що визначає положення умовної площини зсуву оброблюваного матеріалу, яка розташована під кутом

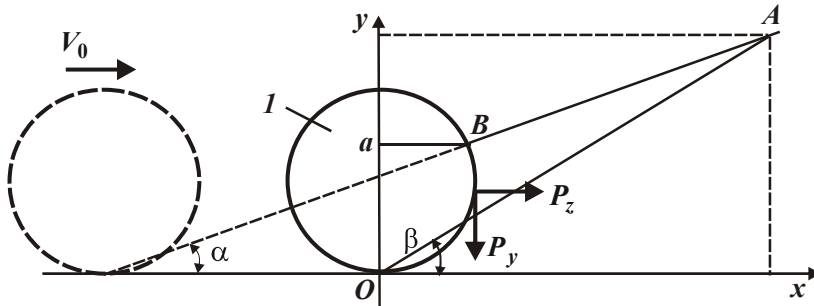


Рисунок 3 – Розрахункова схема процесу різання одиничним абразивним зерном 1

не значення τ_{max} , що визначає положення умовної площини зсуву оброблюваного матеріалу, яка розташована під кутом

$$\beta = \frac{\pi}{4} + \frac{\alpha - \psi_1}{2}. \quad (4)$$

При $\tau_{max} = \tau_{зсув}$ радіальна P_y й тангенціальна P_z складові сили різання, а також умовне напруження різання (енергоємність обробки) $\sigma = P_z / (a \cdot v)$ визначаються:

$$P_y = 2 \cdot a \cdot v \cdot \tau_{зсув} \cdot \sin \psi_1 \cdot \cos \alpha \cdot \frac{1}{[1 - \sin(\alpha + \psi_1)]}; \quad (5)$$

$$P_z = 2 \cdot a \cdot v \cdot \tau_{зсув} \cdot \cos \psi_1 \cdot \cos \alpha \cdot \frac{1}{[1 - \sin(\alpha + \psi_1)]}; \quad (6)$$

$$\sigma = \cos \psi_1 \cdot \cos \alpha \cdot \frac{2 \cdot \tau_{зсув}}{[1 - \sin(\alpha + \psi_1)]}, \quad (7)$$

де $\tau_{зсув}$ – границя міцності на зсув оброблюваного матеріалу, Н/м².

Із залежностей (5), (6) і (7) впливає неоднозначний характер зміни параметрів P_y , P_z і σ зі збільшенням кутів α і ψ_1 . Для залежності (6) за необхідної умови екстремуму $(P_z)'_{\alpha} = 0$ отримано екстремальне значення кута $\alpha = 90^\circ - \psi_1$. Установлено, що в точці екстремуму параметри P_y , P_z і σ наближаються до нескінченності. Це пов'язано з тим, що умовний кут зсуву оброблюваного матеріалу β стає рівним куту α . У результаті умовна площина зсуву OA (рис. 3) не перетинається з поверхнею BA й процес стружкоутворення ві-

дсутній, має місце лише пластичне деформування матеріалу. Виходячи із цього, визначена умова здійснення процесу різання:

$$\psi_1 + \alpha < 90^\circ. \quad (8)$$

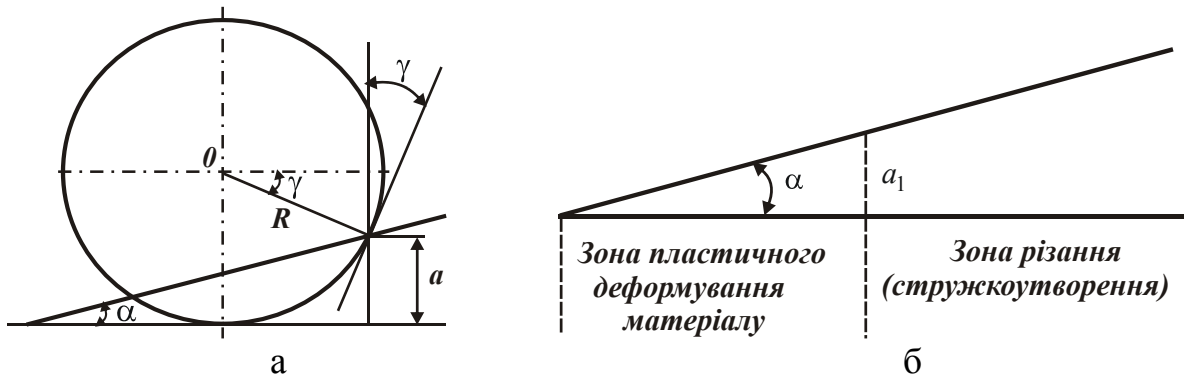


Рисунок 4 – Розрахункова схема мікрорізання окремим зерном (а) і схематичне розташування зони пластичного деформування матеріалу й зони різання (б)

При цьому (див. рис. 4), кут α залежить від кута ψ_1 : чим він менше, тим ширше границі здійснення процесу різання. Передній кут γ визначається із залежності (рис. 4,а): $\sin \gamma = (1 - a/R)$, де a – товщина зрізу, м; R – радіус ріжучого зерна, м. Зі збільшенням товщини зрізу a кут γ безупинно зменшується. Це вказує на те, що при досягненні певного значення кута γ починає виконуватися умова (8) і процес пластичного деформування матеріалу переходить у процес різання (стружкоутворення). Отже, при різанні абразивним зерном на відміну від різання різцем (з фіксованим негативним переднім кутом γ) процес стружкоутворення здійснимий у всьому можливому діапазоні зміни кута $\alpha = 0 \dots 90^\circ$. Однак, для цього необхідно попередньо досягти граничної товщини зрізу a_1 (рис. 4,б), при якій відбувається перехід від пластичного деформування матеріалу до процесу різання. Виражаючи кут γ через відношення a/R , залежність (7) може бути представлена у вигляді

$$\sigma = \frac{2 \cdot \tau_{\text{суб}} \cdot \cos^2 \alpha}{\sqrt{\frac{a}{2R} - \operatorname{tg} \frac{(\alpha + \psi)}{2}}}. \quad (9)$$

Очевидно, за умови

$$\sqrt{\frac{a}{2R} - \operatorname{tg} \frac{(\alpha + \psi)}{2}} = 0 \quad (10)$$

енергоємність обробки $\sigma \rightarrow \infty$, тому процес різання відсутній, відбувається лише пластичне деформування оброблюваного матеріалу. Граничне значення відношення a_1/R (рис. 5), при якому процес пластичного деформування оброблюваного матеріалу переходить у процес різання, визначається на основі залежності (10):

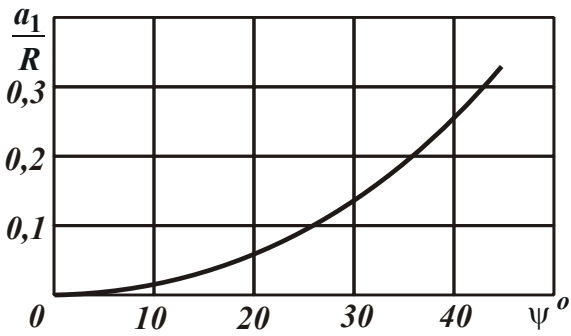


Рисунок 5 – Залежність відношення a_1/R від кута ψ (для $\alpha=0$)

$\alpha > 0$ перехід від пластичного деформування матеріалу до процесу стружкоутворення (різання) відбувається при більшому відношенні a/R (або більшій товщині зрізу), ніж у випадку $\alpha=0$. Так, при $\alpha=40^\circ$ отримано $a/R=0,265$, тоді як при $\alpha=0$ маємо $a/R=0$ (рис. 6).

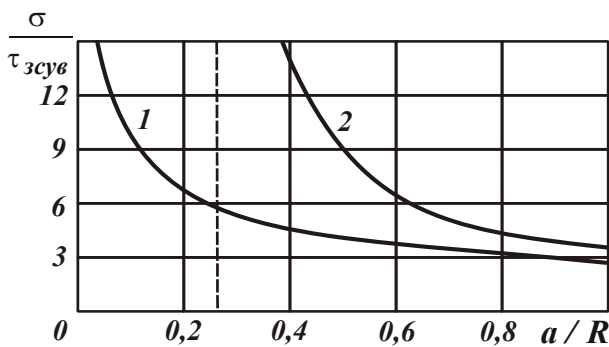


Рисунок 6 – Залежність $\sigma/\tau_{зсув}$ від a/R : 1 – $\alpha=0^\circ$; 2 – $\alpha=40^\circ$ (для $\psi=0^\circ$)

оброблюваним матеріалом, m^2 ; $\sigma_{час} \approx 2\tau_{зсув}$, HV – тимчасовий опір і твердість оброблюваного матеріалу (по Віккерсу), H/m^2 .

Відомо, що для пластичних матеріалів відношення $\sigma_{час}/HV$ більше, ніж для крихких матеріалів. Наприклад, для міді воно дорівнює 0,5, для нікелю – 0,53, для сирової сталі У8 – 0,43, для твердого сплаву ВК8 – 0,09, для сірого чавуну СЧ 18-36 – 0,14. Отже, для пластичних матеріалів величина a_0 завжди більше, ніж для крихких матеріалів, що сприяє поліпшенню умов стружкоутворення при різанні. Тому при обробці пластичних матеріалів перехід від процесу пластичного деформування матеріалу до процесу різання відбувається при менших значеннях кута α , ніж при обробці крихких матеріалів, для яких кут α може приймати значення, близькі або рівні 90° . Це узгоджується з відомими експериментальними даними досліджень струминно-абразивної обробки.

При різанні зі зменшуваною в часі товщиною зрізу, як встановлено розрахунками, у залежностях (5), (6) і (7) кут α необхідно розглядати негативним, рівним куту виходу абразивного зерна з оброблюваного матеріалу α_1 . У цьому випадку ($\alpha < 0$) енергоємність обробки σ буде приймати менші значення в по-

$$\frac{a_1}{R} = 2 \cdot \operatorname{tg}^2 \frac{(\alpha + \psi)}{2}. \quad (11)$$

Таким чином, у роботі отримана узагальнена аналітична залежність (9), що встановлює взаємозв'язок між енергоємністю обробки σ й відношенням a/R . Доведено, що при різанні з постійною товщиною зрізу ($\alpha = 0$) енергоємність обробки σ завжди менша, ніж при різанні з товщиною зрізу, що збільшується в часі ($\alpha > 0$, рис. 6). У випадку

У роботі, виходячи з умови $P_z = \sigma \cdot S = HV \cdot S_0$, з урахуванням залежності (9), визначена фактична довжина контакту зерна з оброблюваним матеріалом

$$a_0 = \frac{\sigma_{час}}{HV} \cdot \frac{a \cdot \cos^2 \alpha}{\left[\sqrt{\frac{a}{2 \cdot R} - \operatorname{tg} \frac{(\alpha + \psi)}{2}} \right]}, \quad (12)$$

де $S = a \cdot v$ – площа поперечного перерізу зрізу, m^2 ; $S_0 = a_0 \cdot v$ – фактична площа контакту ріжучого зерна з об-

рівнянні з випадками $\alpha = 0$ і $\alpha > 0$ (рис. 7). Виходячи із цього зроблено висновок про те, що основний ефект струминно-абразивної обробки й відповідно абразивної обробки деталей затопленими струменями полягає в забезпеченні процесу різання зі зменшеною товщиною зрізу, що досягається при обробці кромок заготовок, усуненні задирок і зменшенні мікронерівностей на оброблюваних поверхнях. Це й визначає основні напрямки ефективного застосування абразивної обробки деталей затопленими струменями.

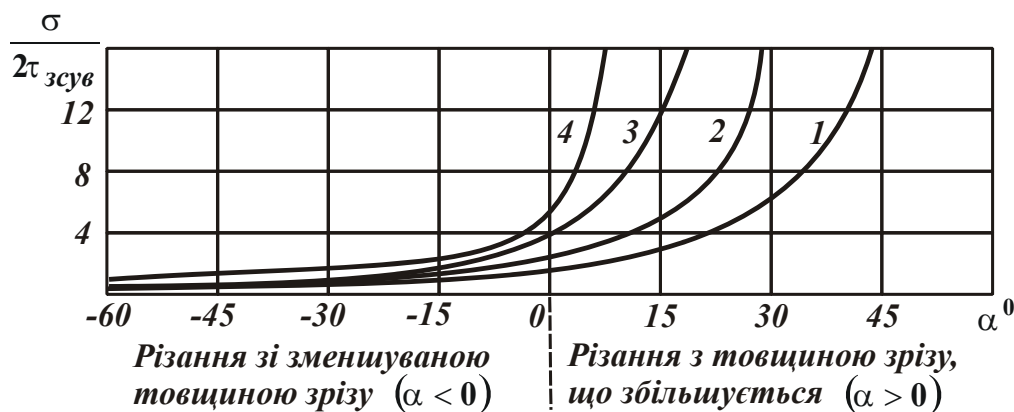


Рисунок 7 – Залежність відношення $\sigma / 2\tau_{зсув}$ від кута α :

1 – $\psi_1 = 30^\circ$; 2 – $\psi_1 = 45^\circ$; 3 – $\psi_1 = 60^\circ$; 4 – $\psi_1 = 70^\circ$

У роботі теоретично обґрунтовані закономірності знімання матеріалу при струминно-абразивній обробці з кутом атаки рівним 90° . Виходячи з розрахункової схеми (рис. 8), встановлено, що дотичне напруження τ , що виникає в умовній площині зсуву ОА, описується аналітичною залежністю (3) за умови

$\alpha = 0$, тобто випадки $\alpha = 0$ і $\alpha = 90^\circ$ по енергоємності обробки σ рівносильні:

$$\sigma = \frac{2 \cdot \tau_{зсув} \cdot \cos \psi_1}{(1 - \sin \psi_1)} \quad (13)$$

У випадку $\alpha = 0$ енергоємність обробки менше, ніж у випадку $\alpha > 0$. Отже, реалізуючи випадок струминно-абразивної обробки, коли кут атаки дорівнює 90° , з'являється можливість зменшення енергоємності й відповідно підвищення продуктивності обробки, що свідчить про ефективність застосування даної схеми для обробки деталей з відносно крихких матеріалів, схильних до

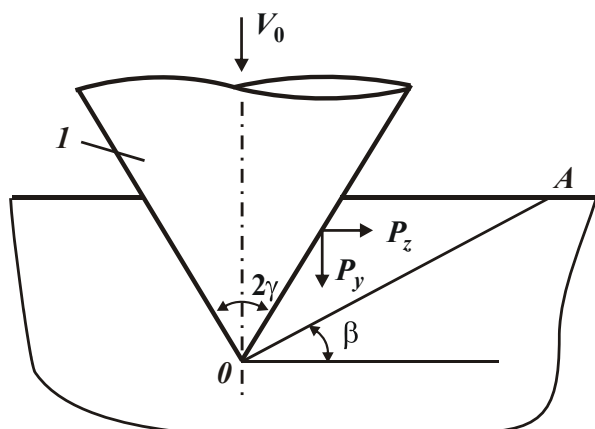


Рисунок 8 – Розрахункова схема параметрів обробки для випадку $\alpha = 90^\circ$: 1 – зерно у формі конуса

стружкоутворення. Це ще одне підтвердження того, що струминно-абразивну обробку й відповідно абразивну обробку затопленими струменями деталей із пластичних матеріалів з точки зору підвищення продуктивності ефективно виконувати з невеликими кутами атаки (на рівні $10^\circ - 30^\circ$), а обробку деталей з крихких матеріалів – з більшими кутами атаки, рівними або близькими 90° . Із залежності (13) також впливає можливість зменшення енергоємності й підви-

щення продуктивності при віброабразивній обробці й ультразвуковому шліфуванню, що узгоджується з відомими експериментальними даними, тобто ефективність застосування цих методів обробки обумовлена зниженням енергоємності процесу.

У третьому розділі розроблена математична модель визначення шорсткості поверхні й продуктивності абразивної обробки деталей затопленими струменями. На її основі обґрунтовані умови зменшення шорсткості поверхні й збільшення продуктивності обробки з урахуванням динаміки руху абразивних зерен в оброблюваному матеріалі й закономірностей зміни енергоємності обробки σ , що дозволило принципово, по-новому, розкрити технологічні закономірності знімання матеріалу й формоутворення поверхонь деталей. У зв'язку із цим, спочатку отримано спрощене диференціальне рівняння руху абразивного зерна в оброблюваному матеріалі з урахуванням дії на нього лише тангенціальної складової сили різання P_z (рис. 9):

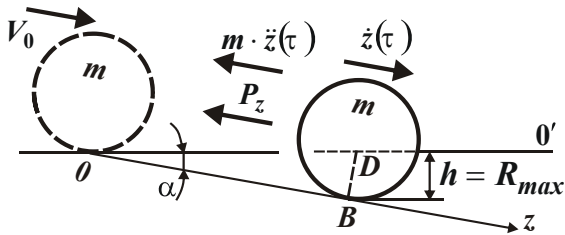


Рисунок 9 – Розрахункова схема динаміки взаємодії зерна з оброблюваним матеріалом

Розв'язуючи рівняння з урахуванням початкових умов $z(0) = 0$; $\dot{z}(0) = V_0$, встановлено: $z(\tau) = V_0 \cdot \sin k\tau / k$. Звідки визначено час $\tau = \pi / 2k$ і довжину шляху зерна в матеріалі $l = z = V_0 \cdot \sqrt{\frac{m}{\sigma \cdot \epsilon \cdot \operatorname{tg} \alpha}}$, а також об'єм матеріалу, що зрізується одним зерном, $\mathcal{G}_{зріз} = \frac{m \cdot V_0^2}{2 \cdot \sigma}$ і глибину риски-подряпини h , рівну параметру шорсткості поверхні R_{max} , що з урахуванням залежності (7) описується

$$R_{max} = V_0 \cdot \sqrt{\frac{m \cdot \sin 2\alpha}{2 \cdot \sigma \cdot \epsilon}} = V_0 \cdot \sqrt{\frac{m}{2 \cdot \tau_{зсуг} \cdot \epsilon}} \cdot \bar{R}_{max}, \quad (14)$$

де $\bar{R}_{max} = \sqrt{\frac{\sin \alpha \cdot [1 - \sin(\alpha + \psi_1)]}{\cos \psi_1}}$ – безрозмірний параметр шорсткості поверхні.

На рис. 10 стосовно до обробки деталі із латуні наведені розрахункові значення величини $\frac{1}{\sigma} = \mathcal{G}_{зріз} \cdot \frac{2}{m \cdot V_0^2}$ (визначаючої $\mathcal{G}_{зріз}$ й відповідно продуктивність обробки) і безрозмірного параметра шорсткості поверхні \bar{R}_{max} . Видно, що домогтися найбільшого значення $\mathcal{G}_{зріз}$ (продуктивності обробки) і найменшої шорсткості поверхні можна за умови $\alpha \rightarrow 0$, тобто за рахунок зменшення енергоємності обробки σ .

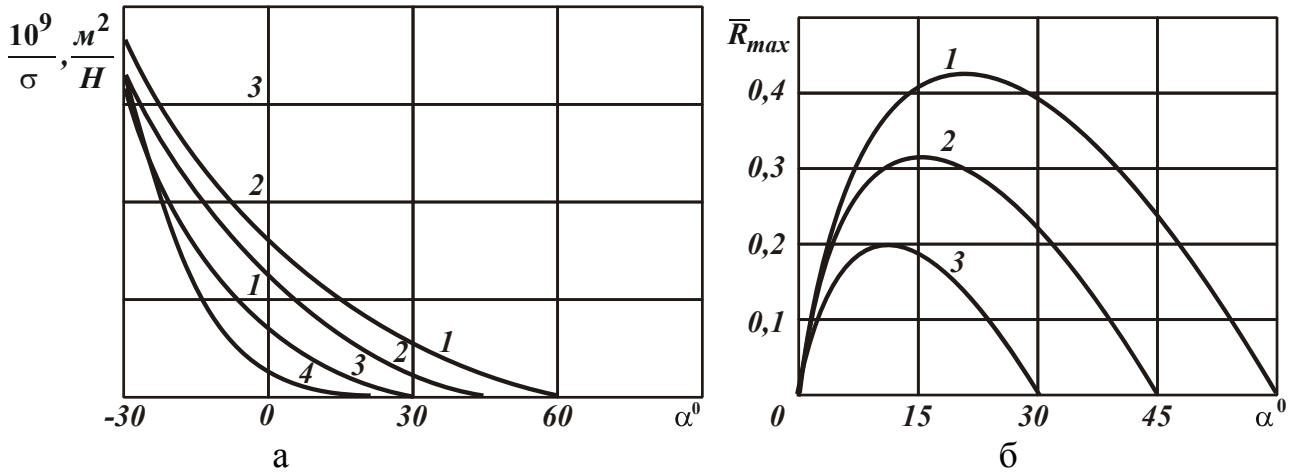


Рисунок 10 – Залежність величини $1/\sigma$ (а) і безрозмірного параметра шорсткості поверхні \bar{R}_{max} (б) від кута α : 1 – $\psi_1=30^\circ$; 2 – $\psi_1=45^\circ$; 3 – $\psi_1=60^\circ$; 4 – $\psi_1=70^\circ$

Дане рішення є спрощеним, тому що не враховує дію на абразивне зерно, що рухається, радіальної складової сили різання P_y , яка “виштовхує” його з оброблюваного матеріалу й змінює траєкторію руху. Тому розглянуто уточнену математичну модель визначення шорсткості поверхні. Для цього запропоновано диференціальні рівняння руху в часі τ в оброблюваному матеріалі зерна масою m з початковою швидкістю V_0 під кутом $\alpha = 0$ у напрямках осей oz і oy під дією тангенціальної P_z й радіальної P_y складових сили різання (рис. 11):

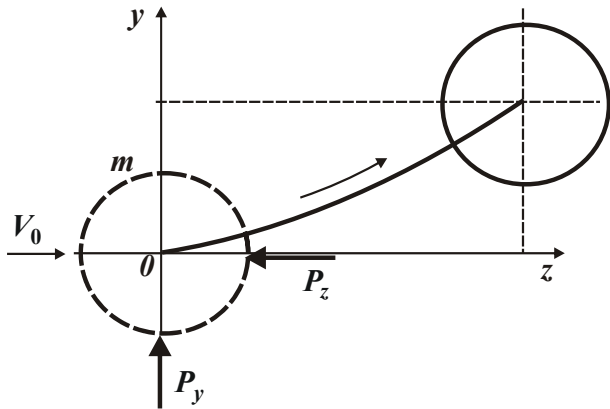


Рисунок 11 – Розрахункова схема траєкторії руху зерна в матеріалі

$$\begin{cases} m \cdot \ddot{z}(\tau) = -P_z; \\ m \cdot \ddot{y}(\tau) = P_y, \end{cases} \quad (15)$$

де $\ddot{z}(\tau)$ й $\ddot{y}(\tau)$ – прискорення руху зерна в напрямках осей oz і oy , m/c^2 .

З урахуванням початкових умов $z(0) = 0$; $\dot{z}(0) = V_0$ рішення рівнянь (15) набувають вигляду:

$$\begin{cases} z(\tau) = -\frac{P_z}{m} \cdot \frac{\tau^2}{2} + V_0 \cdot \tau; \\ y(\tau) = \frac{P_y}{m} \cdot \frac{\tau^2}{2}. \end{cases} \quad (16)$$

Із залежностей (16) видно, що у напрямку осі oy із часом τ зерно рухається рівноприскоренно із прискоренням P_y/m , а в напрямку осі oz – рівноповільнено із прискоренням $-P_z/m$. При виконанні умови $\dot{z}(\tau) = 0$ зерно зупиниться. Час τ_k і координати z_k й y_k у момент його зупинки з урахуванням коефіцієнта $K_{ш} = P_z/P_y$ визначаються:

$$\tau_k = \frac{m \cdot V_0}{P_z}; \quad z_k = \frac{m \cdot V_0^2}{2 \cdot P_z}; \quad y_k = \frac{m \cdot V_0^2}{2 \cdot P_z} \cdot \frac{1}{K_{ш}} = \frac{z_k}{K_{ш}}.$$

За умови $K_{uu} < 1$, що має місце при абразивній обробці, координата y_k зерна буде більше координати z_k (рис. 12). Траєкторія руху зерна в матеріалі, виходячи з рішення системи рівнянь (16), описується рівнянням

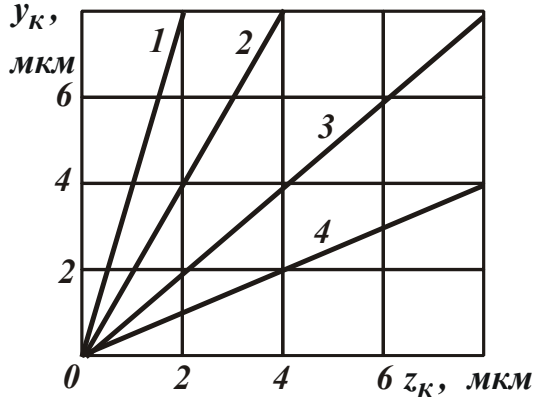


Рисунок 12 – Функціональний зв'язок між координатами y_k й z_k зерна, що рухається: 1 – $K_{uu} = 0,25$;
2 – $K_{uu} = 0,5$; 3 – $K_{uu} = 1,0$;
4 – $K_{uu} = 2,0$

$$z = V_0 \cdot \sqrt{\frac{2m \cdot y}{P_y}} - K_{uu} \cdot y \quad (17)$$

Складові сили різання P_z й P_y залежать від фактичної товщини зрізу, яка у зв'язку з переміщенням абразивного зерна уздовж осі ou буде змінюватися. Тоді

$$\begin{cases} P_z = v \cdot (a - y) \cdot \sigma; \\ P_y = \frac{v \cdot (a - y) \cdot \sigma}{K_{uu}}. \end{cases} \quad (18)$$

З урахуванням уточнених залежностей (18) для початкових умов $z(0) = 0$; $\dot{z}(0) = V_0$ рішення диференціальних рівнянь (15) з урахуванням $k^2 = \frac{v \cdot \sigma}{m \cdot K_{uu}}$ набуває вигляду

$$y = a \cdot (1 - \cos k\tau); \quad (19)$$

$$z = V_0 \cdot \tau - a \cdot K_{uu} \cdot (1 - \cos k\tau). \quad (20)$$

За умови $\dot{z}(\tau) = 0$ абразивне зерно зупиниться. Тоді час контакту абразивного зерна з оброблюваним матеріалом визначиться:

$$k\tau_k = \arcsin \frac{V_0}{a} \cdot \sqrt{\frac{m}{v \cdot \sigma \cdot K_{uu}}}. \quad (21)$$

Аналіз залежності (21) показує, що чим більше параметри V_0 , m і менше a , v , K_{uu} , σ , тим більше $k\tau_k$, тобто час контакту абразивного зерна з оброблюваним матеріалом, і відповідно вище ефективність процесу обробки.

Із залежності (19) випливає, що за умови $k\tau < \pi/2$ (яка відповідає умові $y_k < a$) абразивне зерно зупиниться в оброблюваному матеріалі. За умови $k\tau > \pi/2$, навпаки, кінетичної енергії зерна буде достатньо, щоб вийти з контакту з оброблюваним матеріалом без зупинки й здійснити повний зріз оброблюваного матеріалу. У випадку $y_k = a$ залежність (20) набуває вигляду

$$z_k = V_0 \cdot \tau_k - a \cdot K_{uu}. \quad (22)$$

Для вихідних даних: $V_0 = 30$ м/с; $a = 3$ мкм; $\sigma = 10^4$ Н/мм²; $K_{uu} = 0,5$ з урахуванням залежностей $m = \rho \cdot v$ і $v = 2 \cdot \sqrt{D \cdot a}$ (де ρ – щільність абразивного матеріалу (для алмаза $\rho = 3,5$ г/см³); $v = \pi \cdot D^3 / 6$ – об'єм абразивного зерна у формі сфери діаметром D) отримані розрахункові значення координати z_k

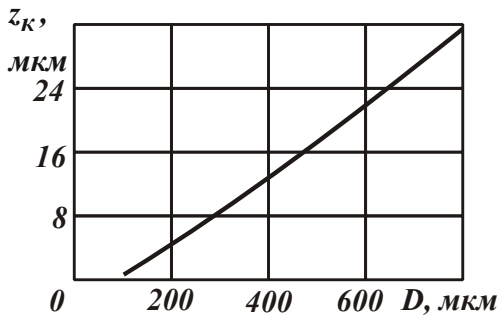


Рисунок 13 – Залежність координати z_k від діаметра зерна D

но відрізняється від прямолінійної, а потім вона стає криволінійною й зерно виходить із контакту з оброблюваним матеріалом при невеликих значеннях z . Наведені рішення справедливі для нульового кута α входу зерна в оброблюваний матеріал (рис. 11) і визначають, по суті, характер утворення мікрорізу при обробці кромки заготовки.

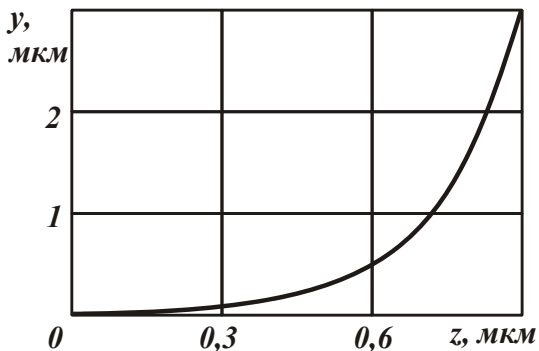


Рисунок 14 – Функціональний зв'язок між координатами y й z абразивного зерна, що рухається в оброблюваному матеріалі

Запропоновані диференціальні рівняння містять по дві невідомі величини y й z . Після відповідних перетворень (26) з урахуванням початкових умов $z(0) = 0$; $\dot{z}(0) = V_0$ отримані наступні рішення:

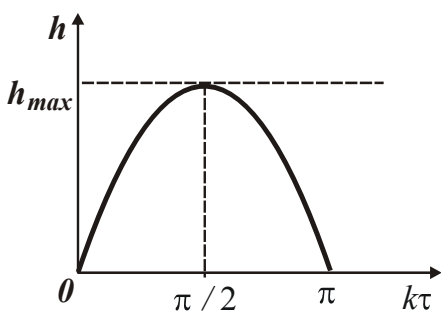


Рисунок 15 – Залежність глибини h від кута $k\tau$

(рис. 13). Зі збільшенням діаметра зерна D координата z_k збільшується, а це веде до збільшення довжини зрізу й інтенсифікації обробки. Траєкторія руху зерна в матеріалі для умови $y_k = a$ й наведених вихідних даних описується перетвореними залежностями (19) і (20):

$$y = 3 \cdot \left[1 - \cos\left(0,67 \cdot 10^6 \cdot \tau\right) \right]; \quad (23)$$

$$z = 10^6 \cdot \tau - 0,5 \cdot y. \quad (24)$$

Розрахунки показали (рис. 14), що на початку траєкторія руху зерна в матеріалі незначно відрізняється від прямолінійної, а потім вона стає криволінійною й зерно виходить із контакту з оброблюваним матеріалом при невеликих значеннях z . Наведені рішення справедливі для нульового кута α входу зерна в оброблюваний матеріал (рис. 11) і визначають, по суті, характер утворення мікрорізу при обробці кромки заготовки. При $\alpha > 0$ складові сили різання P_z й P_y , описувані залежностями (18), з урахуванням $a = \text{tg}\alpha \cdot z$ мають вигляд:

$$\begin{cases} P_z = v \cdot (\text{tg}\alpha \cdot z - y) \cdot \sigma; \\ P_y = \frac{v \cdot (\text{tg}\alpha \cdot z - y) \cdot \sigma}{K_{uw}}. \end{cases} \quad (25)$$

Тоді рівняння (15) опишуться

$$\begin{cases} m \cdot \ddot{z} + v \cdot \sigma \cdot \text{tg}\alpha \cdot z = v \cdot \sigma \cdot y; \\ m \cdot \ddot{y} + \frac{v \cdot \sigma}{K_{uw}} \cdot y = \frac{v \cdot \sigma \cdot \text{tg}\alpha}{K_{uw}} \cdot z. \end{cases} \quad (26)$$

$$y = \frac{V_0 \cdot \text{tg}\alpha}{(1 + \text{tg}\alpha \cdot K_{uw})} \cdot \left(\tau - \frac{1}{k} \cdot \sin k\tau \right); \quad (27)$$

$$z = \frac{V_0}{(1 + \text{tg}\alpha \cdot K_{uw})} \cdot \left(\tau - \frac{\text{tg}\alpha \cdot K_{uw}}{k} \cdot \sin k\tau \right). \quad (28)$$

Тоді глибина впровадження зерна в оброблюваний матеріал, що визначає висоту мікронерівності на оброблюваній поверхні, опишеться рівнянням (рис. 15):

$$h = \frac{V_0 \cdot \sin \alpha}{k} \cdot \sin k\tau. \quad (29)$$

Максимальне значення h_{max} , рівне па-

раметра шорсткості поверхні R_{max} , досягається за умови $\sin k\tau = 1$ або $k\tau = \pi/2$. Тоді з урахуванням відомої залежності $K_{uu} = ctg(\psi + \gamma) = ctg\psi_1$ й $\psi_1 = \psi + \gamma$, отримано

$$h_{max} = R_{max} = V_0 \cdot \sin \alpha \cdot \sqrt{\frac{m}{2 \cdot v \cdot \tau_{зсуг}} \cdot \left[\frac{1}{\sin(\alpha + \psi_1)} - 1 \right]}. \quad (30)$$

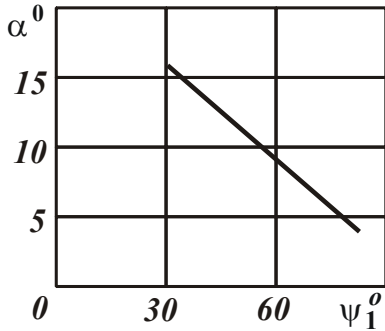


Рисунок 16 – Залежність кута α від кута ψ_1

Кут α неоднозначно впливає на глибину h_{max} . Підкоряючи залежність (30) необхідній умові екстремуму (максимуму): $(h_{max})'_\alpha = 0$, отримано тригонометричне рівняння відносно невідомої величини α :

$$1 - \sin(\alpha + \psi_1) = \frac{tg \alpha}{tg(\alpha + \psi_1)}. \quad (31)$$

Розрахунками встановлено (рис. 16), що зі збільшенням кута $\psi_1 = \psi + \gamma$ (який у реальних умовах обробки наближається до 90°) процес абразивної обробки деталей затопленими струменями ефективно здійснювати з невеликим кутом $\alpha \rightarrow 0$. Це забезпечить найменшу шорсткість R_{max} оброблюваної плоскої поверхні, а також якісну обробку торців заготовки, усуваючи задирки й округляючи кромки. Визначена також довжина риски-подряпини l зерном за умови утворення повного зрізу:

$$l = \frac{\pi \cdot V_0}{\cos \alpha \cdot (1 + tg \alpha \cdot K_{uu})} \cdot \sqrt{\frac{m \cdot K_{uu}}{v \cdot \sigma \cdot (1 + tg \alpha \cdot K_{uu})}}. \quad (32)$$

Кут α неоднозначно впливає на довжину l . Зі збільшенням кута α за рахунок зменшення $\cos \alpha$ довжина l буде збільшуватися нескінченно (при $\alpha \rightarrow \pi/2$, рис. 17), а за рахунок збільшення функції $tg \alpha \rightarrow \infty$ (при $\alpha \rightarrow \pi/2$)

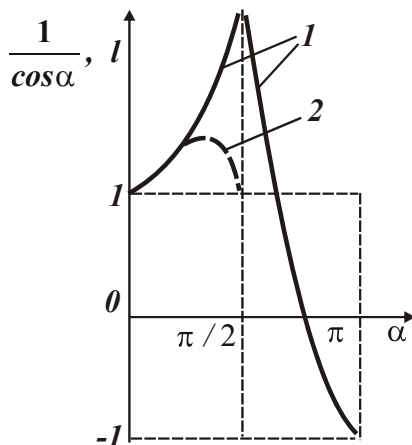


Рисунок 17 – Характер зміни функції $1/\cos \alpha$ (1) і довжини l (2) від кута α

довжина l буде зменшуватися. Отже, існує екстремальне значення кута входу зерна в оброблюваний матеріал α , при якому довжина риски-подряпини зерном l буде максимальною. Підкоряючи функцію l необхідній умові екстремуму: $l'_\alpha = 0$, отримано тригонометричне рівняння:

$$0,5 \cdot \sin 2\alpha + \sin^2 \alpha \cdot K_{uu} = 1,5 \cdot K_{uu}. \quad (33)$$

Розрахунками встановлено (рис. 18), що для реальних умов абразивної обробки ($K_{uu} < 0,35$) кут входу абразивного зерна в оброблюваний матеріал α може змінюватися в межах $0 \dots 30^\circ$.

Очевидно, максимальна глибина впровадження абразивного зерна в оброблюваний матеріал h_{max} і довжина риски-подряпини абразивним зерном l окремо ще не визначають однозначно інте-

нсивність знімання оброблюваного матеріалу й відповідно продуктивність обробки. Критерієм оцінки може бути об'єм матеріалу, що знімається зерном

$$\mathcal{Q}_{зріз} = \frac{m \cdot V_0^2}{2} \cdot \frac{\pi \cdot K_{ш} \cdot \operatorname{tg} \alpha \cdot [1 - \sin(\alpha + \psi_1)]}{3 \cdot \tau_{зсуб} \cdot \cos \alpha \cdot \cos \psi_1 \cdot (1 + \operatorname{tg} \alpha \cdot K_{ш})^2}. \quad (34)$$

Із залежності (34) видно, що кут α неоднозначно впливає на $\mathcal{Q}_{зріз}$. Якщо кут $\psi_1 = \psi + \gamma$ у реальних умовах абразивної обробки близький до 90° , то екстремальні значення кута $\alpha \rightarrow 0$. Отже, найбільший об'єм матеріалу $\mathcal{Q}_{зріз}$ досягається при невеликому куті α . Це узгоджується

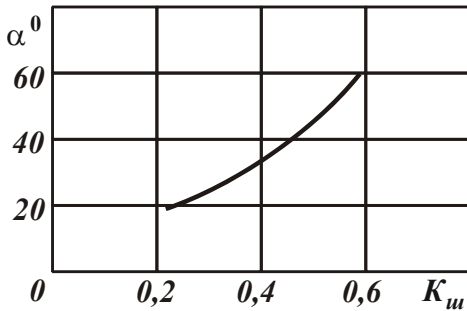


Рисунок 18 – Залежність екстремального значення кута α від $K_{ш}$

з розрахунковими даними, наведеними на рис. 10, і теоретичними рішеннями, отриманими в розділі 2 на основі аналізу енергоємності обробки σ без урахування динаміки взаємодії зерна з оброблюваним матеріалом. Тому метод абразивної обробки деталей затопленими струменями ефективно використовувати для обробки кромки заготовок, усунення задирок і зменшення мікронерівностей на оброблених поверхнях (параметра шорсткості поверхні R_{max}).

Отримані рішення дозволяють обґрунтувати умови підвищення продуктивності Q абразивної обробки затопленими струменями на основі запропонованої залежності:

$$Q = \frac{k_0 \cdot m \cdot V_0^3}{4 \cdot \sigma \cdot H}, \quad (35)$$

де k_0 – кількість абразивних зерен, які беруть участь у процесі обробки; H – відстань від сопла до оброблюваної деталі, м.

Аналіз залежності (35) показує, що основною умовою підвищення продуктивності обробки Q є збільшення кінетичної енергії рухомого абразивного зерна за рахунок збільшення швидкості його руху. Це досягається застосуванням ефективних технологічних рішень по керуванню потоками руху абразивних зерен і оброблених деталей.

Розглядаючи рух абразивного зерна в повітряному струмені рівноприскореним із прискоренням $\bar{a} = P/m$, швидкість V_0 виражається залежністю $V_0 = \bar{a} \cdot \tau_0$, а продуктивність обробки залежністю:

$$Q = \frac{0,68 \cdot k_0 \cdot D^{1,5}}{\sigma} \cdot \sqrt{\frac{H \cdot p}{\rho}}, \quad (36)$$

де P – сила, обумовлена повітряним напором, Н; τ_0 – час руху абразивного зерна від сопла до оброблюваної деталі, с; p – тиск, що діє на абразивне зерно зі сторони повітряного струменя, Н/м².

Збільшити продуктивність обробки Q можна збільшенням параметрів k_0 , D , H , p і зменшенням σ . Очевидно, параметри k_0 й D взаємозалежні між

собою: чим більше D , тим менше k_0 . Тому ефект обробки буде залежати від ступеня збільшення добутку $k_0 \cdot D^{1,5}$ зі збільшенням зернистості абразивного порошку D .

Якщо ж параметр k_0 виразити через загальну масу абразивних зерен $M = k_0 \cdot m$, то залежність (36) видозміниться

$$Q = \frac{1,3 \cdot M}{\rho \cdot D \cdot \sigma} \cdot \sqrt{\frac{H \cdot p}{\rho \cdot D}} \quad (37)$$

У цьому випадку зі збільшенням D продуктивність обробки Q зменшується, що пов'язане зі зменшенням кількості абразивних зерен k_0 , які беруть участь у процесі обробки. Однак, далеко не всі абразивні зерна $k_0 = M / m$ беруть участь у зніманні матеріалу. Тому розрахунок продуктивності обробки Q потрібно виконувати для цілком конкретного числа абразивних зерен k_0 по залежності (36). Для остаточного встановлення взаємозв'язку між параметрами Q й D необхідно провести експериментальні дослідження.

Для оцінки вірогідності отриманих теоретичних рішень у роботі розрахунково-експериментальним шляхом визначена енергоємність обробки σ . Використовуючи експериментальні значення параметрів $m = 0,459 \cdot 10^{-6}$ кг; $V_0 = 2$ м/с; $\mathcal{G}_{зріз} = l \cdot b \cdot a / 6 = 10 \cdot 6 \cdot 6 / 6 = 60$ мкм³ = $60 \cdot 10^{-18}$ м³ (де $l = 10$ мкм; $b = 6$ мкм – ширина зрізу; $a = 6$ мкм – товщина зрізу) при обробці латуні (рис. 19), по залежності

$\sigma = \frac{m \cdot V_0^2}{2 \cdot \mathcal{G}_{зріз}}$ встановлене кількісне значення $\sigma = 15 \cdot 10^3$ Н/мм². Границя міцності

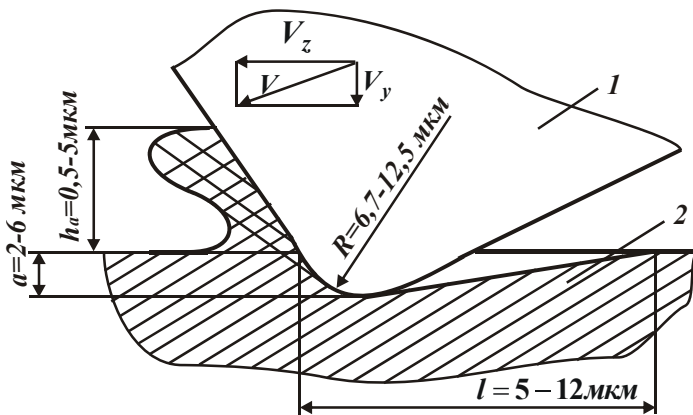


Рисунок 19 – Схема взаємодії абразивного зерна (1) з оброблюваним матеріалом (2)

на розтягання латуні $\sigma_p = 360$ Н/мм², тобто в 41,6 рази менше σ . Відповідно до залежності (7) і розрахованих значень $\sigma / 2\tau_{зсуб} \approx \sigma / \sigma_p$ (рис. 7), таке велике розходження σ й σ_p , по суті, припускає перехід від процесу різання до процесу пластичного деформування оброблюваного матеріалу. Причому, дана закономірність має місце в широких діапазонах зміни кутів α і $\psi_1 = \psi + \gamma$. Так, розрахунками

встановлено, що при куті $\alpha = 10^\circ$ кут $\psi_1 > 70^\circ$, при куті $\alpha = 20^\circ$ кут $\psi_1 > 60^\circ$, при куті $\alpha = 30^\circ$ кут $\psi_1 > 45^\circ$. Аналіз показує, що при обробці деталей з латуні може мати місце як процес різання (з утворенням стружки), так і процес пластичного деформування матеріалу (без утворення стружки), все залежить від суми кутів $\alpha + \psi_1$. Чим вона більша, тим більше розходження значень σ , σ_p і тим імовір-

ніше, що знімання металу в процесі обробки буде відбуватися шляхом його пластичного деформування (без утворення стружки).

Наведене вище значення $\sigma = 15 \cdot 10^3 \text{ Н/мм}^2$ незначно відрізняється від отриманого проф. Сагардою А.О. при мікрорізанні латуні одиничним зерном експериментального значення умовного напруження різання $\sigma = 12 \cdot 10^3 \text{ Н/мм}^2$, що вказує на несприятливі умови стружкоутворення й інтенсивне тертя ріжучого зерна з оброблюваним матеріалом (латунню). Таким чином, встановлено значення енергоємності обробки σ (умовного напруження різання) приводить у відповідність теорію й практику абразивної обробки затопленими струменями й дає змогу розрахунковим шляхом визначити силу різання, шорсткість поверхні, продуктивність й інші параметри обробки.

У четвертому розділі наведені методики проведення експериментальних досліджень абразивної обробки деталей затопленими струменями. Для цього розроблена загальна методика проведення експериментальних досліджень, яка включає визначення на першому етапі закономірностей утворення мікрорізів

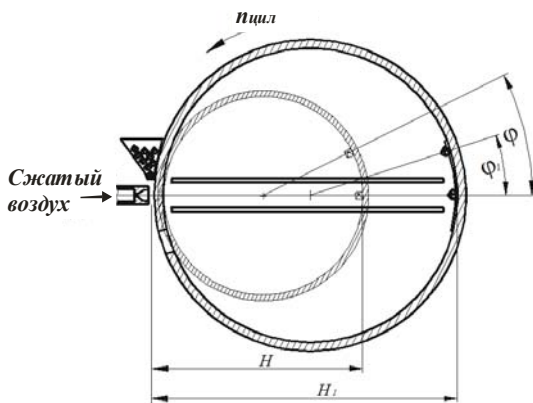


Рисунок 20 – Схема визначення швидкості руху абразивного зерна від віддалення зрізу сопла

на оброблюваній поверхні деталі і формування параметрів якості обробки, а на другому етапі – встановлення емпіричних залежностей для визначення шорсткості оброблюваної поверхні й інтенсивності знімання матеріалу з урахуванням, у тому числі, й тих параметрів процесу, які не були враховані в аналітичних залежностях у зв'язку зі складністю їхнього математичного подання. Спільний аналіз аналітичних і емпіричних залежностей дає змогу більш повно розкрити фізичну сутність процесу і його технологічні можливості, обґрунтовано підійти до вибору раціональних параметрів обробки, які забезпечують підвищення якості й продуктивності.

У роботі розроблена нова методика визначення швидкості руху зерен у струмені стисненого повітря, яка полягає в перерахуванні фіксованої швидкості обертання порожнього циліндра у швидкість польоту через його діаметр абразивного зерна з уловлюванням цього

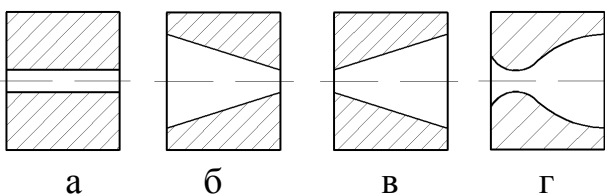


Рисунок 21 – Сопла для абразивної обробки затопленими струменями:

а – циліндричне; б – із прямим конусом; в – зі зворотним конусом; г – надзвукове сопло Лаваля

зерна на протилежній (зі зсувом на деякий кут) внутрішній поверхні циліндра (рис. 20). Розроблено методику вибору конфігурації сопла (рис. 21) для абразивної обробки деталей затопленими струменями, яка базується на дослідженні швидкості руху абразивних зерен і розмірів їхніх відбитків на спеціальних полірованих латунних екранах (рис. 22).

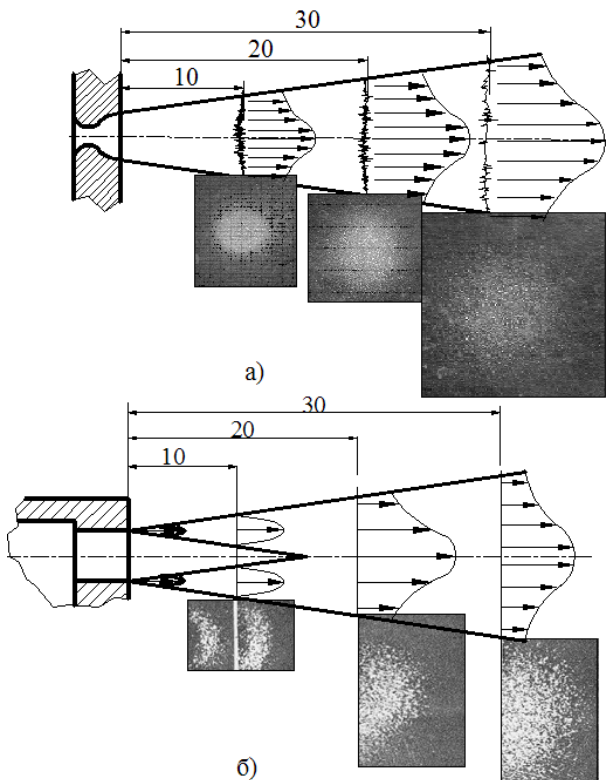


Рисунок 22 – Схеми струменів, побудованих по відбитках зерен на латунних зразках: а – стікаючої із сопла Лаваля; б – стікаючої із циліндричного сопла

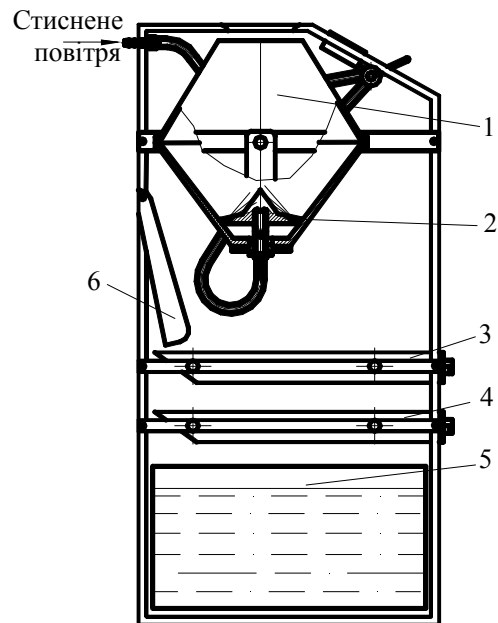


Рисунок 23 – Схема лабораторної струминно-абразивної установки з об'ємом робочої камери 30 л: 1 – робоча камера; 2 – сопловий апарат (завихрювач); 3 – решето для деталей; 4 – решето для абразивного зерна; 5 – бак-відстійник; 6 – ринва для суспензії

Розроблено методику визначення продуктивності абразивної обробки затопленими струменями, що заснована як на вимірі маси контрольних зразків до й після обробки, так і на підрахунку числа слідів абразивних зерен, охоплюваних полем об'єктива мікроскопа на поверхні зразків, оброблених протягом 3-х хвилин (експрес-контроль). Експериментально встановлено, що експрес-контроль дозволяє не тільки порівняти продуктивність при різних режимах обробки, але й визначити, які частини деталей піддаються більш-менш інтенсивній обробці.

Розроблено методику вивчення топографії поверхні зразка після його абразивної обробки затопленими струменями на основі використання методики комп'ютерного тривимірного моделювання в середовищі Helicon 3D Viever за допомогою мікроінтерферометра з електронною камерою ScopeTek MDC 140N. Це дозволило створити ряд моделей поверхонь, отриманих при обробці зразків з латуні ЛС59.1, алюмінію й вольфрамо-тітанового сплаву ВТ-1 через кожні 2 – 5 секунд, а також через 15 – 20 хвилин обробки. Побудовано модель половини сліду (у поздовжній площині), що утворився на границі двох полірованих пластин, які на час експерименту з'єднані гвинтами.

Розроблено методику визначення напруженого стану поверхні методом парної обробки деталей із матеріалів з вираженими пружними властивостями, яка полягає в захисті однієї сторони кожної деталі від абразивної дії з'єднанням

з аналогічною деталлю пайкою по кромках, з наступним роз'єднанням деталей і травленням наклепаного шару до відновлення площинності деталі.

Розроблено й виготовлено експериментальну установку для здійснення абразивної обробки деталей затопленими струменями (з вертикальною віссю сопла, рис. 23) і описані умови проведення експериментальних досліджень основних параметрів обробки, включаючи продуктивність та шорсткість обробки, параметри мікрорізів абразивними зернами й напруженого стану поверхневого шару оброблюваної деталі (залишкові напруження, мікротвердість). Дослідження виконувалися із застосуванням деталей, виготовлених із алюмінію АД, сталі Ст3, латуні ЛС59.1, латуні Л63, берилієвої бронзи БрБ2, сталі 65Г, титанового сплаву ВТ-1 і дюралюмінію Д16. В якості абразивних матеріалів використовувалися електрокорунд нормальний (14А), електрокорунд білий (24А), карбід кремнію чорний (53С), карбід кремнію зелений (63С). Тиск стисненого повітря перед соплом змінювався в межах 0,2 – 1,2 МПа.

У п'ятому розділі наведені результати експериментальних досліджень технологічних закономірностей знімання матеріалу й формування параметрів якості при абразивній обробці затопленими струменями. Експериментально визначені умови утворення мікрорізів і відповідно шорсткості поверхні деталей із пластичних матеріалів, що дозволило перевірити й уточнити отримані теоретичні рішення. У результаті встановлено, що при обробці формуються як повні, так і неповні мікрорізи (рис. 24). Повні мікрорізи утворюються при невеликих кутах входу абразивних зерен в оброблюваний метал ($10 - 30^{\circ}$), а неповні зрізи – при більших кутах внаслідок недостатньої кінетичної енергії рухомих абразивних зерен (рис. 25), що узгоджується з відомими експериментальними даними, отриманими при струминно-абразивній обробці. Установлено також, що відділення металу при обробці відбувається в результаті здійснення процесу різання (з утворенням стружки) і процесу пластичного деформування матеріалу (без утворення стружки). Це також підтверджує вірогідність отриманих в роботі теоретичних рішень.

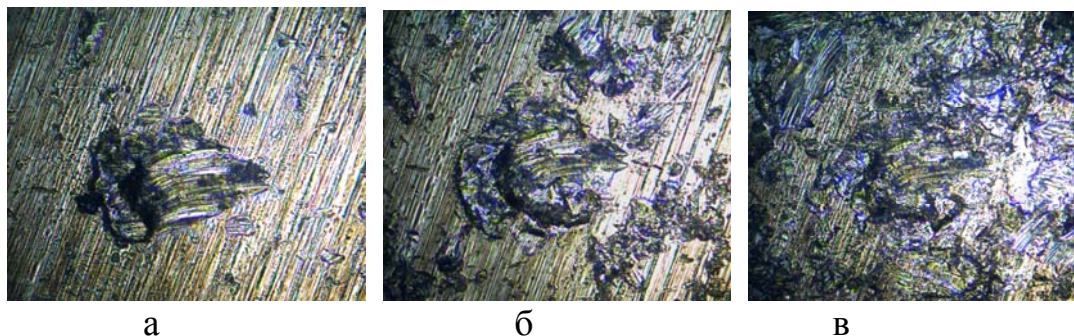


Рисунок 24 – Фрагмент шліфованої поверхні з послідовною зміною сліду абразивного зерна від часу обробки, с: а – 1; б – 2; в – 8

Проведено комплекс експериментальних досліджень закономірностей знімання металу й формування оброблених поверхонь деталей при абразивній обробці затопленими струменями на основі аналізу топографії мікропрофілю оброблених поверхонь (рис. 26).

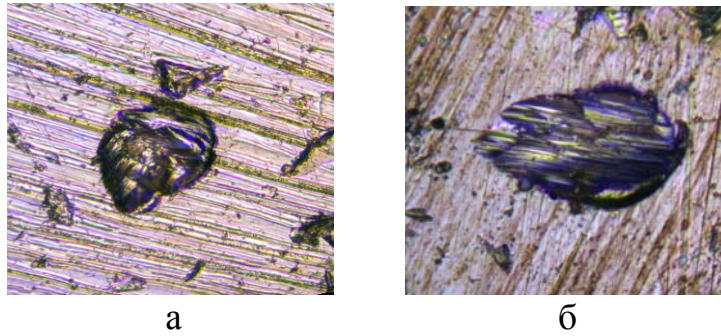


Рисунок 25 – Слід удару абразивного зерна по нормалі (а) і під гострим кутом (б) до поверхні латунного зразка із ЛС59.1. Абразивне зерно 63С (карбід кремнію зелений), зернистість 63П (630 мкм).×625

Установлено, що в процесі обробки відбувається безладне неорієнтоване накладення слідів абразивних зерен на оброблюваній поверхні, у результаті чого формується безформна оброблювана поверхня, яка складається з окремих різних по величині неорієнтованих заглиблень і виступів. За структурою мікрогеометрії ця поверхня відрізняється від поверхонь, утворених при шліфуванні, доведенні й струминно-абразивній обробці. Зроблений висновок про можливість створення принципово нової неорієнтованої мікрогеометрії поверхні при абразивній обробці затопленими струменями, що відкриває нові перспективи підвищення експлуатаційних властивостей поверхонь деталей, наприклад, за рахунок створення матових поверхонь тощо.

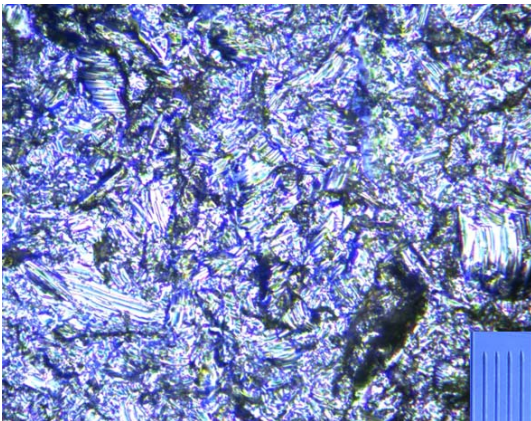


Рисунок 26 – Поверхня латунного зразка після 35 хвилин обробки. Абразивне зерно 63С, зернистість 63П (630 мкм). ×625. Ціна розподілу об'єкта-мікрометра 0,01мм

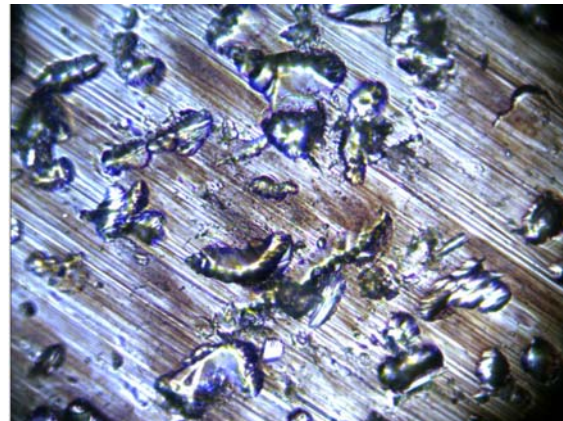


Рисунок 27 – Ділянки поверхні зразка, обмежені полем видимості камери й монітора для підрахунку кількості слідів зерен, які приходяться на одиницю площі

Розрахунково-експериментальним шляхом визначена кількість абразивних зерен, які беруть участь у зніманні металу з оброблюваної поверхні при абразивній обробці затопленими струменями (рис. 27). Установлено, що вони становлять усього 7 % від загальної кількості зерен, які проконтактували з оброблюваною поверхнею. Це дозволило уточнити відомі дані про кількість зерен, які беруть участь у зніманні металу з оброблюваної поверхні, і зробити ви-

сновок про незначне використання можливостей процесу й необхідність пошуку рішень по інтенсифікації обробки.

Експериментально встановлено, що, незважаючи на сприятливі умови експлуатації абразивного матеріалу, його втрати вимагають періодичного поповнення. Це пов'язано з

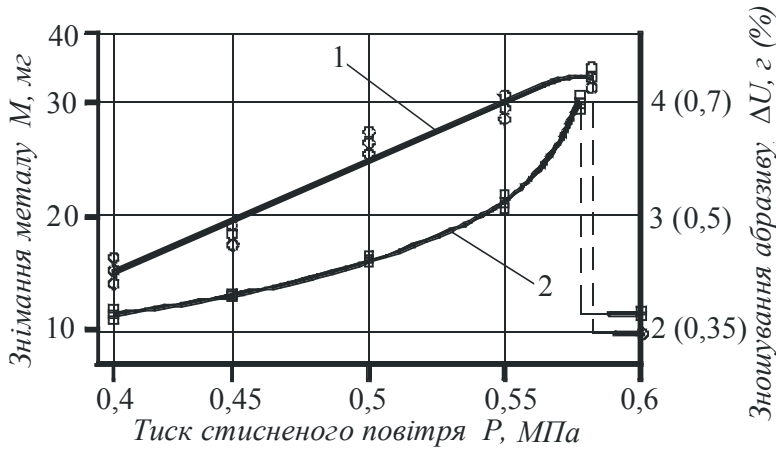


Рисунок 28 – Залежності знімання металу M (1) і зношування абразиву ΔU (2) від тиску стисненого повітря. Оброблюваний метал – латунь ЛС59.1, абразивний матеріал 63С, зернистість 40 (400 мкм), час обробки 30 хвилин

тим, що в розглянутому процесі, хоч і незначно, до 0,7%, спостерігається дроблення абразивних зерен. На рис. 28 показано характер знімання металу M й зношування абразиву ΔU (у зв'язку із дробленням абразивних зерен) від тиску стисненого повітря. Установлено, що при зміні тиску стисненого повітря до значення 0,57 МПа знімання металу M пропорційно збільшується, а дроблення зерен незначно інтенсифікується. Після перевищення цього значення тиску стисненого повітря вміст робочої камери піднімається над зоною роботи струменів, і процес обробки стає фактично нездійсненним. Отже, умовою стабільного протікання процесу обробки є установлення тиску стисненого повітря не вище 0,57 МПа.

На рис. 29 показано характер зміни основних параметрів обробки за час роботи установки (2,5 години), що в 5 разів перевищує час здійснення однієї операції. Виконувалася обробка деталей з латуні ЛС59.1 при тиску стисненого повітря 0,5 МПа. Наведені графіки вказують на високу стабільність основних параметрів процесу обробки, оскільки відхилення, які виражаються в зниженні знімання металу M і збільшенні витрат стисненого повітря A , відсутні. Відхилення, пов'язані зі зношуванням абразиву ΔU за час операції (30 хвилин), становлять 0,5 – 0,7 %, а з віднесенням рідини ΔW – 2 %.

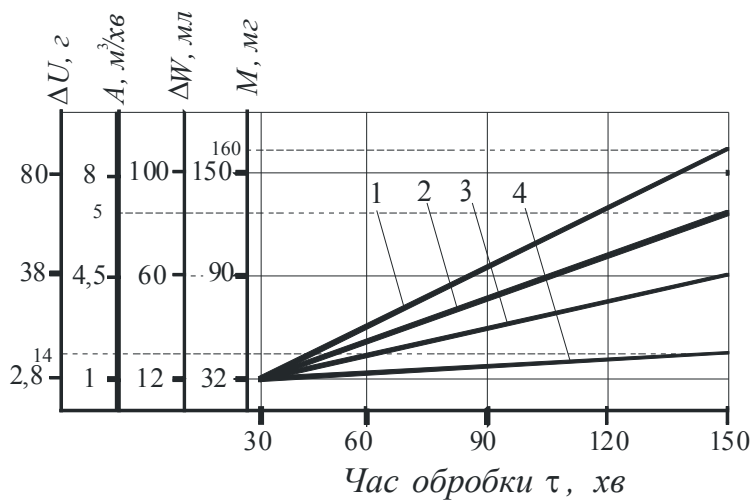


Рисунок 29 – Залежності знімання металу M (1), зношування абразиву ΔU (2), витрати стисненого повітря A (3) і віднесення рідини ΔW (4) від часу обробки τ

Показано, що розглянутий метод обробки, на відміну від відомих методів

струминно-абразивної обробки, за рахунок виключення зношування сопел дозволяє стабілізувати в часі основні параметри обробки.

Експериментально визначена шорсткість поверхні при абразивній обробці затопленими струменями й установлено, що із часом обробки вона стабілізується на одному рівні незалежно від вихідної шорсткості (рис. 30). Так, установлено, що при вихідній шорсткості $R_a=0,5 \dots 1,5$ мм і зернистості абразиву 40 (400 мкм) стабілізація шорсткості поверхні відбувається на рівні $R_a = 1,8$ мкм через 15 ... 25 хвилин обробки.

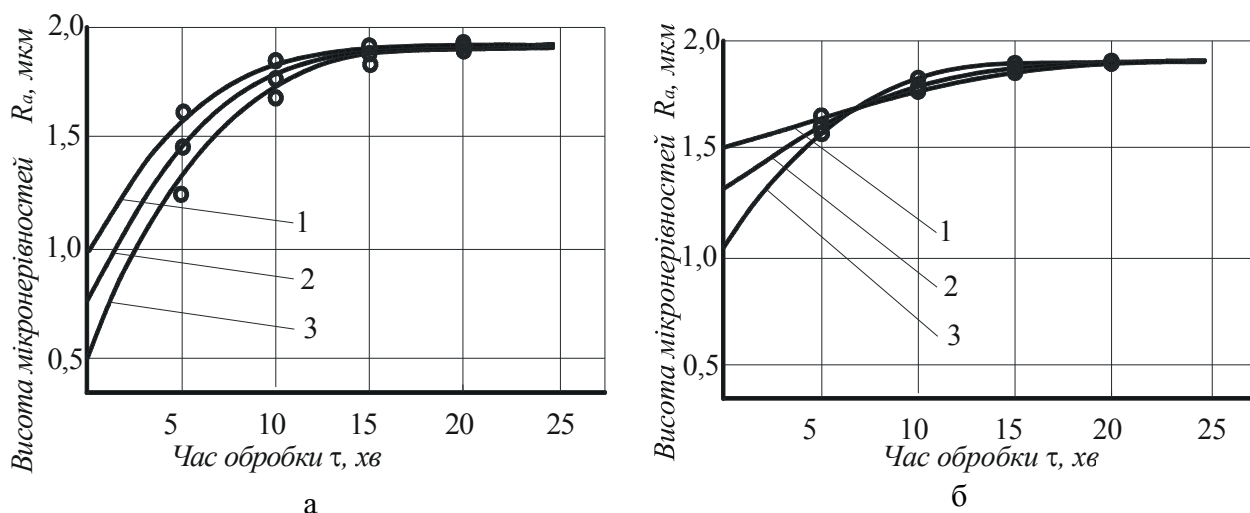


Рисунок 30 – Залежність висоти мікронерівностей поверхні R_a від часу обробки τ при вихідній шорсткості: а – 1 – $R_a=1,0$ мкм; 2 – $R_a=0,75$ мкм; 3 – $R_a=0,5$ мкм; б – 1 – $R_a=1,5$ мкм; 2 – $R_a=1,25$ мкм; 3 – $R_a=1,0$ мкм

Розроблено нову методику визначення залишкових напружень у поверхневому шарі деталі після її абразивної обробки затопленими струменями, яка полягає в захисті однієї сторони деталі (пластини) від абразивного впливу такою ж деталлю, прикріпленої до першої деталі пайкою по кромках (рис. 31).

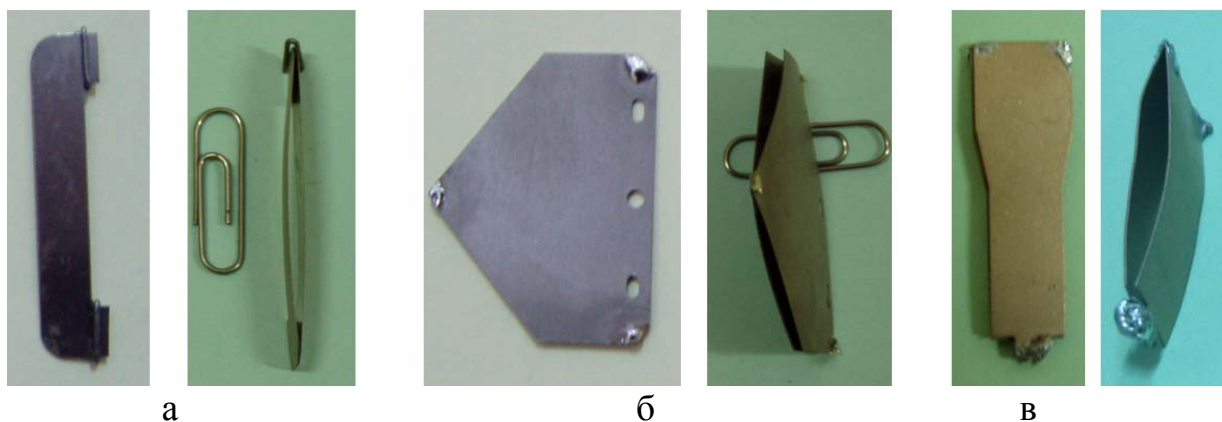


Рисунок 31 – Зовнішній вигляд спарених деталей до й після абразивної обробки затопленими струменями: а – титановий сплав ВТ-1; б – сталь 65Г; в – берилієва бронза БрБ2

Експериментально встановлено, що прогин пластини в результаті утворення напружень збільшується протягом 20 – 25 хвилин, після чого стабілізується (рис. 32,а), при цьому оброблена поверхня деталі стає опуклою, тобто виникають стискаючі напруження. Експериментально встановлено, що в процесі обробки в поверхневому шарі деталі виникає наклеп. Товщина наклепаного шару на деталях зі сплаву ВТ-1 і сталі 65Г дорівнює 5 мкм, а на деталі з берилієвої бронзи БрБ2 – 6 мкм. Середнє значення напруження в наклепаному шарі для деталі зі сплаву ВТ-1 дорівнює $\sigma_{cp} = 37,81 \text{ Н/мм}^2$, для деталі зі сталі 65Г – $\sigma_{cp} = 35,29 \text{ Н/мм}^2$, а для деталі із бронзи БрБ2 – $\sigma_{cp} = 32,77 \text{ Н/мм}^2$. Отже, при абразивній обробці затопленими струменями в поверхневому шарі оброблюваної деталі виникають сприятливі стискаючі напруження. Це вказує на перевагу силового фактора над тепловим фактором у процесі обробки й свідчить про високу якість оброблених поверхонь.

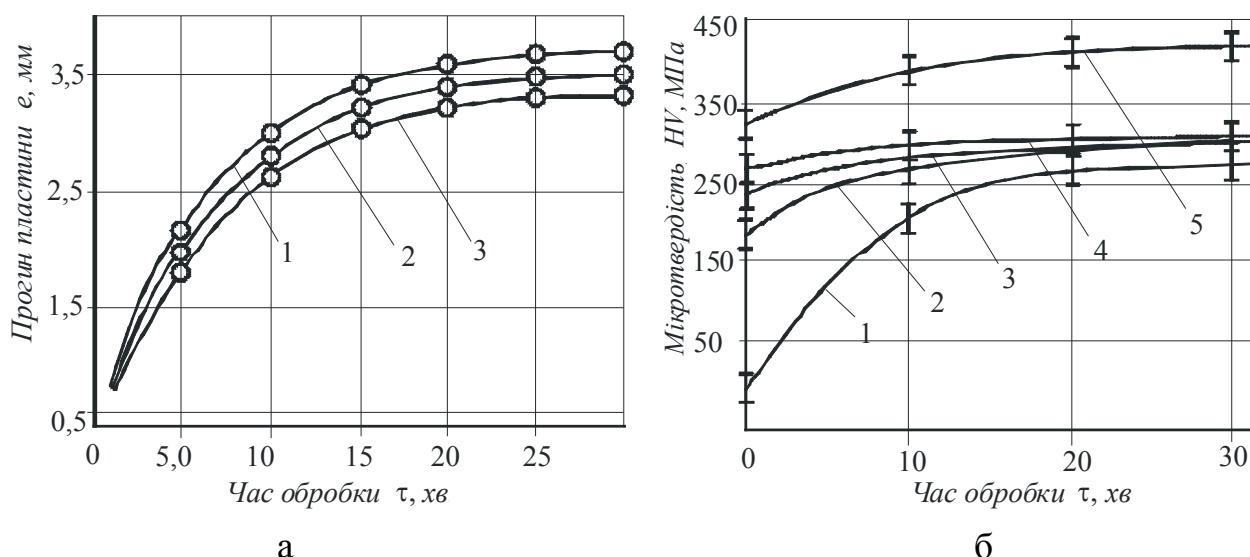


Рисунок 32 – Залежність прогину пластини (а) і мікротвердості поверхні HV (б) від часу обробки τ : а – 1 – титановий сплав ВТ-1 товщиною 0,18 мм; 2 – сталь 65Г товщиною 0,2 мм; 3 – берилієва бронза БрБ2 товщиною 0,25 мм; б – 1 – алюміній АД; 2 – латунь ЛС59.1; 3 – латунь Л63; 4 – сталь Ст3; 5 – сталь 65 Г

Додатковим підтвердженням часу формування поверхневого шару оброблених деталей є результати вимірів мікротвердості (по Віккерсу) поверхонь деталей з різних матеріалів до й після обробки на твердомірі ПМТ-3 за допомогою алмазної піраміди з витримкою навантаження 1,5 Н на протязі 15 с. На кожному зразку виконували по 10 вимірів. Поетапна зміна в часі мікротвердості деталей з алюмінію АД, латуні ЛС59.1, латуні Л63, сталі Ст3, сталі 65Г (рис. 32,б) завершується через 20 – 25 хвилин, і далі стабілізується на різних рівнях залежно від схильності матеріалів до наклепу. Із графіків видно, що найбільш сприйнятливими до наклепу в процесі абразивної обробки затопленими струменями з розглянутих матеріалів є алюміній АД і сталь 65Г.

Експериментально встановлено, що на відміну від характеру слідів абразивних зерен, що утворюються при обробці плоскої поверхні, при обробці кро-

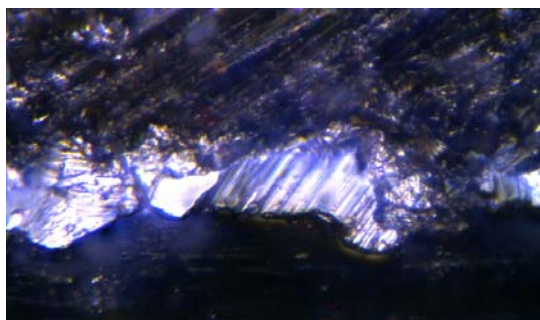


Рисунок 33 – Фотографія кромки листової латунної деталі зі слідами абразивних зерен. $\times 850$

мки деталі слід абразивного зерна має чітко виражену форму, фактично відсутні навали деформованого металу по обох сторін й поперед сліду (рис. 33).

Таким чином, кінетичної енергії абразивного зерна, що рухається, у цьому випадку достатньо для утворення повного мікрозрізу. Зроблений висновок про те, що при обробці кромки деталі енергоємність процесу менша, ніж при обробці плоскої поверхні, і тому інтенсивність знімання металу більше. Це підтверджує

теоретичні рішення, наведені в розділі 2 дисертаційної роботи. Експериментально встановлено також, що метод абразивної обробки затопленими струменями забезпечує одночасне видалення задирок, округлення гострих кромки, зміцнення оброблюваних поверхонь і надає деталям товарний вигляд за рахунок створення рівної матової поверхні.

У шостому розділі наведені результати експериментальних досліджень шорсткості поверхні й продуктивності абразивної обробки деталей затопленими струменями. На основі методу планування багатofакторного експерименту розроблені узагальнені математичні моделі процесу абразивної обробки деталей затопленими струменями й за критеріями найбільшої продуктивності та найменшої шорсткості поверхні визначені раціональні параметри обробки. Для цього спочатку експериментально визначені значення швидкості абразивного зерна V , що приєднується до струменя стисненого повітря, від віддалення зрізу сопла H (рис. 34).

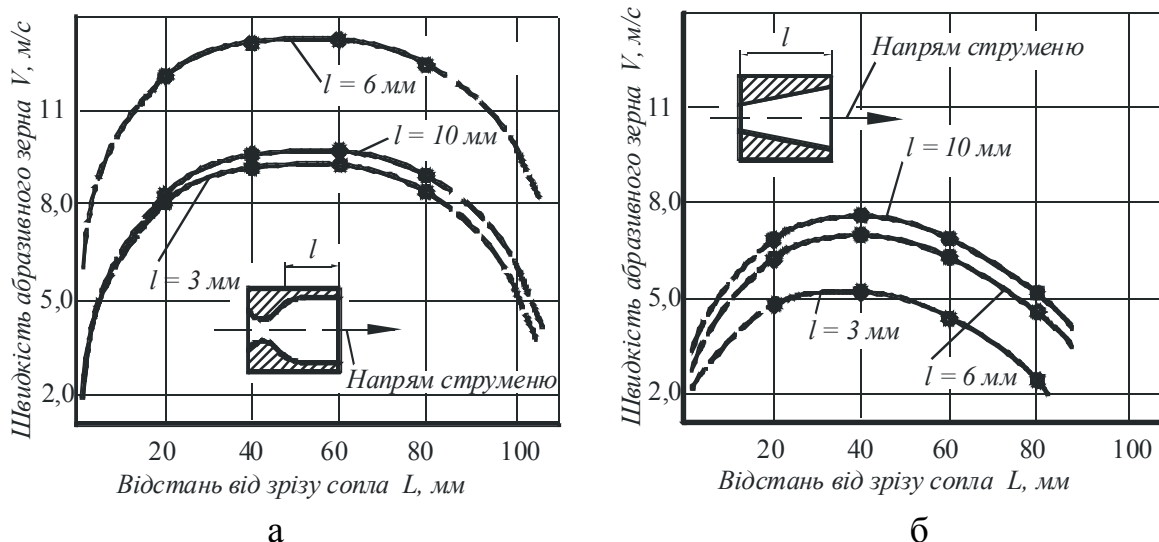


Рисунок 34 – Зміна швидкості абразивного зерна V від віддалення зрізу надзвукового сопла Лаваля (а) і конічного сопла, що розширюється (б). Умови обробки: абразивні зерна 63С (зернистість абразиву – 40П); діаметр найменшого перерізу 2 мм; тиск стисненого повітря перед соплом 0,5 МПа

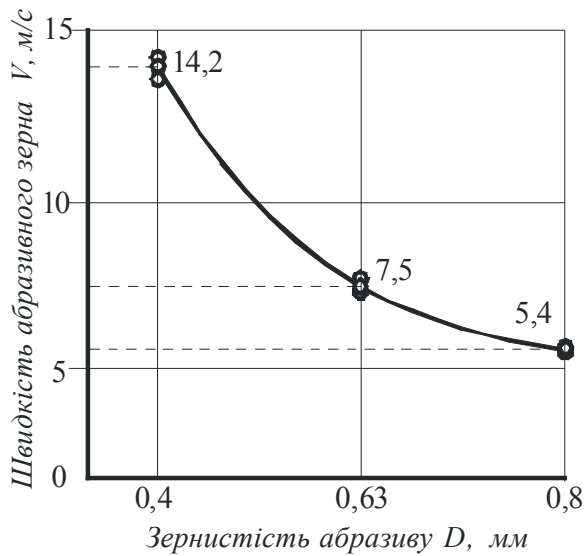


Рисунок 35 – Залежність швидкості абразивного зерна V від зернистості абразиву D

Установлено наявність екстремуму (максимуму) даної залежності для різних конструкцій сопел (надзвукове сопло Лавалю, конічні сопла, що розширюються і звужуються, та циліндричне сопло). При цьому найбільші значення швидкості абразивного зерна і відстані від зрізу сопла досягаються при використанні надзвукового сопла Лавалю (довжиною каналу 6 мм), яке забезпечує надзвукову швидкість витікання стисненого повітря й вказує на ефективність його застосування.

Експериментально встановлено (рис. 35), що зі збільшенням зернистості абразиву швидкість зерна безупинно зменшується (умови обробки: абразивне зерно –

63С (карбід кремнію зелений); діаметр критичного перерізу сопла Лавалю – 2 мм; тиск стисненого повітря перед соплом – 0,5 МПа; відстань від зрізу сопла – 40 мм). Це пов'язано з тим, що дрібніше зерно одержує більше прискорення, оскільки вплив струменя стисненого повітря на абразивні зерна незалежно від їхньої маси носить характер імпульсу сили. Отримані експериментальні результати узгоджуються з теоретичними рішеннями, наведеними в розділі 3 дисертаційної роботи.

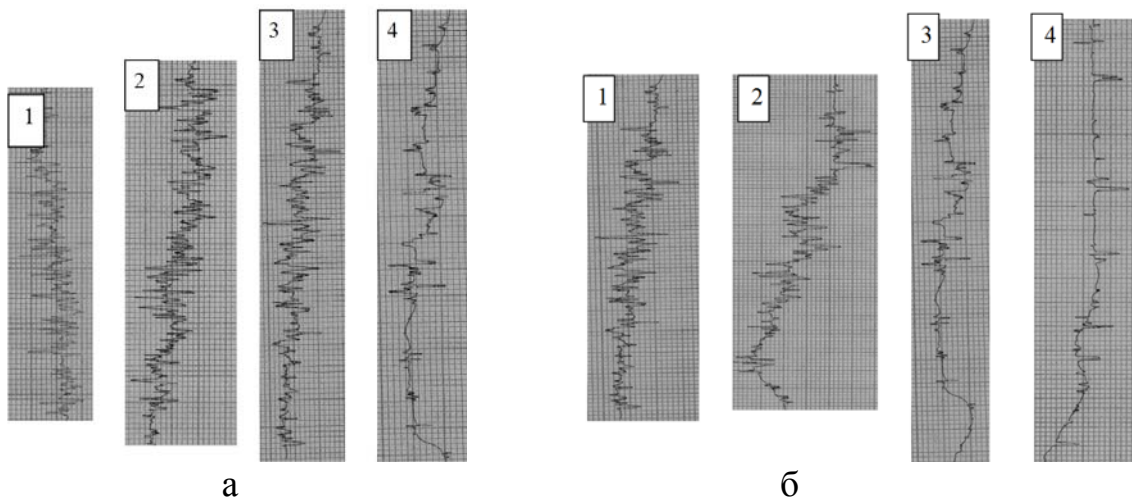


Рисунок 36 – Профілограми відбитків абразивних зерен, приєднаних до струменів, витікаючих із циліндричного сопла (а) і надзвукового сопла Лавалю (б): 1; 2; 3; 4 – відстань до зрізу сопла відповідно 10; 20; 30; 50 мм

Проведено експериментальні дослідження із установлення найбільш ефективної конфігурації сопла за критерієм забезпечення максимальної кількості зерен, які інжектуються у затоплений струмінь стисненого повітря, на основі

визначення кількості слідів зерен на оброблених полірованих латунних пластинах-екранах. Дослідження профілограм, знятих з поверхонь оброблених екранів (рис. 36), показало, що при використанні надзвукового сопла Лавалю має місце найбільш щільне розміщення слідів абразивних зерен (рис. 22), які також характеризуються й найбільшою глибиною. При цьому в порівнянні з використанням циліндричного сопла знімання металу за 30 хвилин збільшилося на 39 %.



Рисунок 37 – Зразки з латуні ЛС59.1 у формі диска діаметром 20 мм і товщиною 0,5; 1; 2; 4 і 8 мм до обробки (а) і після обробки (б)

Проведено комплекс експериментальних досліджень основних параметрів абразивної обробки деталей затопленими струменями на установці, спроектованій автором (рис. 23). Експериментально встановлено, що щільність покриття слідами абразивних зерен оброблюваної поверхні деталі (рис. 37) збільшується від середини до її кромки (рис. 38). Отже, найбільша інтенсивність знімання матеріалу при абразивній обробці затопленими струменями досягається на торцевих поверхнях оброблюваних дрібних деталей. Це узгоджується з аналогічними теоретичними результатами, наведеними в розділі 2 дисертаційної роботи, і свідчить про їхню вірогідність.

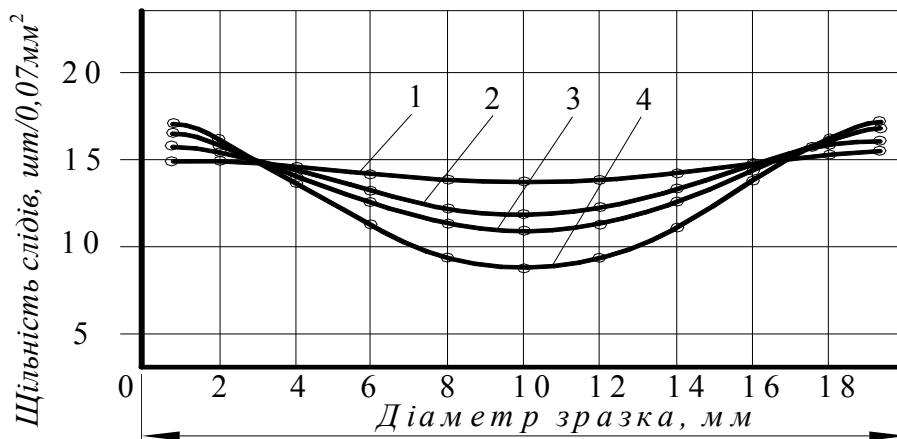


Рисунок 38 – Щільність слідів абразивних зерен (у полі зору об'єктива – $0,07 \text{ мм}^2$) у діаметральному напрямку зразків у формі диска: 1 – товщина диска 4,0 мм, 2 – 2,0 мм, 3 – 1,0 мм, 4 – 0,5 мм

На базі планування дробового факторного експерименту $2 \cdot 10^{-6}$ (1/8 репліки) побудовані математичні моделі визначення продуктивності обробки (в якості критерію оцінки обрано знімання металу M у мг за 30 хвилин обробки) і шорсткості поверхні (за критерієм R_{max} , у мкм):

$$M = 39,9 \cdot \frac{V_a^{0,313} D^{0,046} m_a^{0,002} \Sigma^{0,833} W_{\delta^2 a}^{0,16} d_{\bar{n}}^{0,088} n_{\bar{n}}^{0,4} D_{\delta i c i}^{0,074} \xi^{0,009}}{\delta^{0,02}}; \quad (38)$$

$$R_{\max} = 7,4 \cdot \frac{V_a^{0,27} D^{0,083} m_a^{0,028} \Sigma^{0,277} W_{\text{pid}}^{0,136} d_{\text{c}}^{0,09} n_{\text{c}}^{0,04} D_{\text{розм}}^{0,273} \xi^{0,143}}{\delta^{0,054}}, \quad (39)$$

де V_a – об'єм абразиву, що завантажується, л; D – зернистість абразиву, мм; m_d – одинична маса оброблюваних деталей, г; Σ – сумарна маса оброблюваних деталей, кг; W_{pid} – об'єм рідини, що заливається, л; d_c – діаметр сопел, мм; n_c – кількість сопел; $D_{\text{розм}}$ – діаметр розміщення сопел, м; ξ – кут осі сопла до горизонту, градус; δ – кут між віссю сопла й дотичною до окружності в точці її розміщення, градус.

Аналіз залежності (38) показує, що найбільший вплив на знімання металу M має сумарна маса деталей Σ і в меншій мірі – параметри n_c , V_a і W_{pid} . Виявлено також незначний вплив зернистості абразиву D на знімання металу M (рис. 39,а), тоді як у відомих методах струминно-абразивної обробки зернистість абразиву є визначальним параметром.

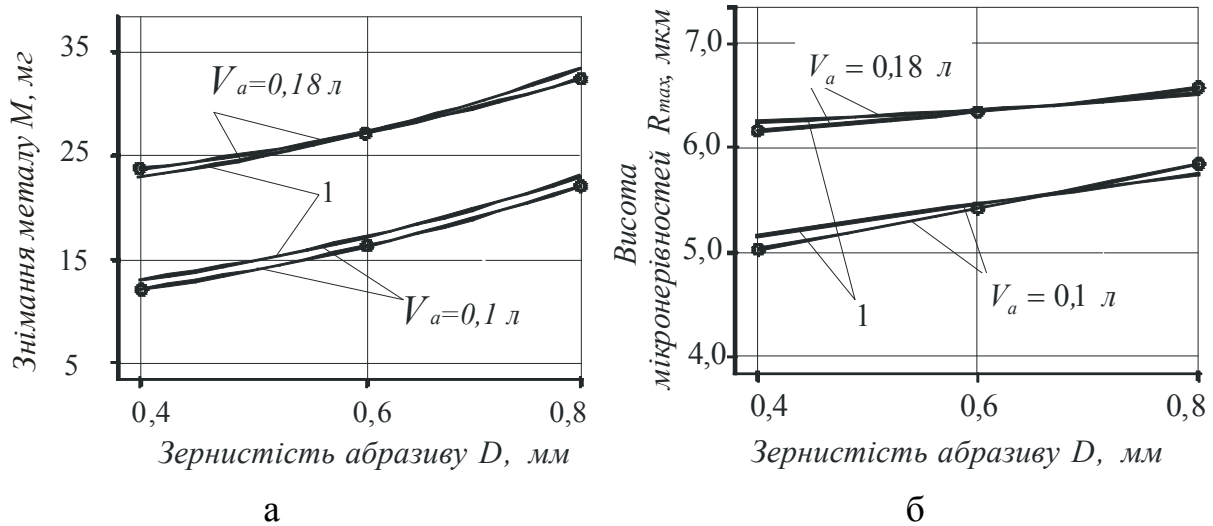


Рисунок 39 – Залежність знімання металу M (а) і висоти мікронерівностей R_{\max} (б) від зернистості абразиву D : 1 – розрахункові криві. Умови обробки: абразивні зерна 63С (зернистість абразиву 40П); діаметр найменшого перерізу 2 мм; тиск стисненого повітря перед соплом 0,5 МПа

Аналіз залежності (39) показує, що найбільший вплив на максимальну висоту мікронерівностей обробленої поверхні R_{\max} мають параметри Σ , V_a і $D_{\text{розм}}$. Висота мікронерівностей R_{\max} (рис. 39,б) перебуває в безпосередньому зв'язку із продуктивністю обробки, представленою зніманням металу M , і стабілізується для даних умов обробки при значенні $R_{\max} = 6,8$ мкм. Це узгоджується з теоретичними рішеннями, наведеними в розділі 2 дисертаційної роботи. Таким чином, розроблені узагальнюючі емпіричні математичні моделі параметрів процесу абразивної обробки деталей затопленими струменями (M і R_{\max}) у сукупності з отриманими результатами аналітичних досліджень дають достатньо повне уявлення про технологічні можливості процесу й дозволяють за критеріями найбільшої продуктивності та найменшої шорсткості поверхні визначити раціональні параметри обробки. Установлено, що реалізувати найбільшу продуктивність обробки для заданої шорсткості поверхні $R_{\max} = 6,8$ мкм (або $R_a = 0,8 \dots 1,25$ мкм) можна застосуванням наступних умов обробки: об'єм абразиву, що

завантажується – 0,18 л; зернистість абразиву – № 40; сумарна маса оброблюваних деталей – 0,4 кг; об'єм рідини, що заливається, – 3,0 л; діаметр сопел – 2 мм; кількість сопел – 8; діаметр розміщення сопел – 110 мм; кут осі сопла до горизонту – 25° ; кут між віссю сопла й дотичною до окружності в точці її розміщення – $0 \dots 5^{\circ}$. Отримані емпіричні залежності для визначення продуктивності обробки й шорсткості поверхні дають змогу виконувати вибір раціональних технологічних і конструктивних параметрів, науково і обґрунтовано підходити до проектування встаткування для оздоблювальної абразивної обробки деталей затопленими струменями.

У цьому розділі наведені результати розробки й впровадження ефективних технологій абразивної обробки деталей затопленими струменями. На основі проведених теоретичних і експериментальних досліджень розроблено ефективне устаткування, представлене гамою установок (захищених авторськими посвідченнями й патентами, рис. 40) для абразивної оздоблювальної обробки дрібних деталей затопленими струменями, що дозволяє ліквідувати трудомісткі ручні зачисні операції, підвищити якість, продуктивність і стабільність обробки за рахунок поліпшення товарного вигляду оброблених деталей при одночасній обробці великої кількості деталей із завантаженням у робочу камеру “навалом”.

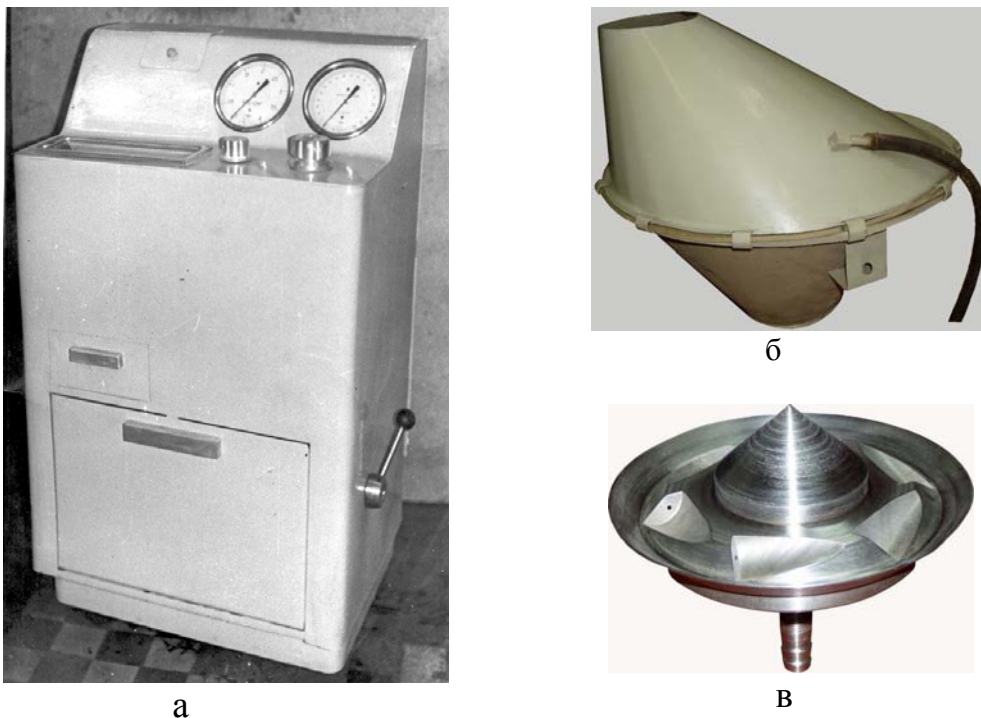


Рисунок 40 – Установа для абразивної обробки деталей затопленими струменями (а) та її складові: робоча камера (б), сопловий апарат (завихрювач) (в)

Розроблені автором установки забезпечують високоефективну спрямовану обробку торцевих поверхонь, плоских поверхонь і одночасно торцевих і плоских поверхонь деталей відповідно до отриманих в роботі теоретичних рішень, а також забезпечують поліпшення ергономічних показників обробки за

рахунок її автоматизації й механізації. Підвищення якості, продуктивності й стабільності обробки досягається, головним чином, за рахунок застосування надзвукових профільованих сопел Лавалю, розрахованих по запропонованим методикам.

Проведені експериментальні дослідження абразивної обробки деталей затопленими струменями на розробленій установці-напівавтоматі показали можливість збільшення продуктивності обробки (рис. 41) при забезпеченні необхідної якості оброблених поверхонь деталей у порівнянні з використовуваними базовими установками. Установлено, що в процесі обробки відбувається округлення кромки деталей, усуваються задирки, сліди корозії й різні неоднорідності на оброблюваних поверхнях (рис. 42), утворюється однорідна матова поверхня із шорсткістю в межах $R_a = 0,8 \dots 1,25$ мкм і наклепом (стискаючими напруженнями глибиною 5 – 6 мкм).

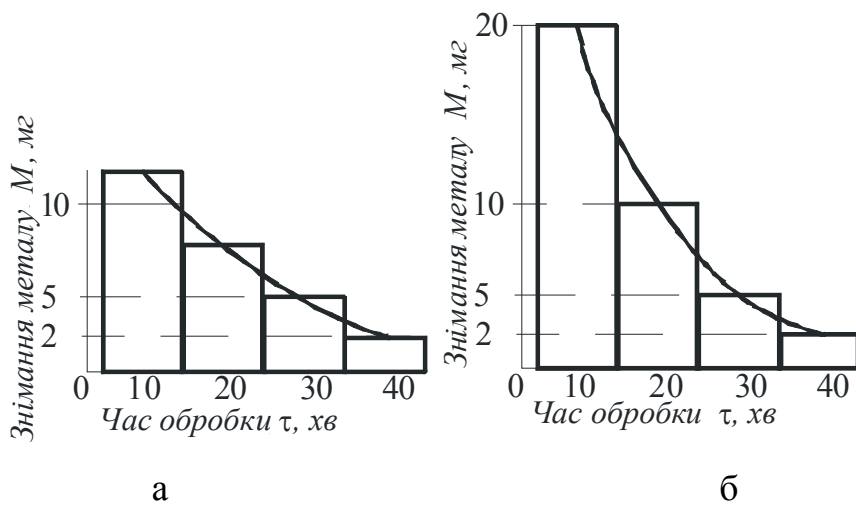


Рисунок 41 – Залежність знімання металу M від часу обробки τ при використанні базової (а) і розробленої (б) установок: шліфзерно 63С; зернистість абразиву 63П; тиск стисненого повітря 0,5 МПа; кут нахилу осей сопел до горизонту 10° ; сопловий апарат базової установки оснащений циліндричними соплами діаметром 2 мм, а розробленої установки – соплами Лавалю із критичним перерізом 2 мм

Проведені випробування розроблених установок показали, що завдяки новим технічним рішенням (захищеними авторськими посвідченнями на винаходи) вдалося на 62 % підвищити продуктивність обробки при забезпеченні високої якості оброблюваних поверхонь. Встановлено, що за рахунок створення додаткового джерела переміщення оброблюваних деталей, що забезпечує збільшення кількості одночасно оброблюваних деталей, продуктивність обробки виросла на 10 %. Установлено також, що завдяки поліпшенню якості абразивного матеріалу, за рахунок очищення від відходів, а також використання чистої води, досягнуто збільшення продуктивності обробки в середньому на 5 %. Значний приріст продуктивності обробки (на 39 %) отримано у результаті заміни сопел із циліндричним каналом на профільовані надзвукові сопла Лавалю. Виявлено, що застосування сопла Лавалю стало можливим лише завдяки використанню принципово нової схеми струминно-абразивної обробки – абразивної обробки деталей затопленими струменями, що виключає зношування каналів сопел потоком абразив-

них зерен, так як при використанні традиційних схем струминно-абразивної обробки “вузьким” місцем (обумовленим підвищеним зношуванням) у профільованому соплі є його критичний переріз.

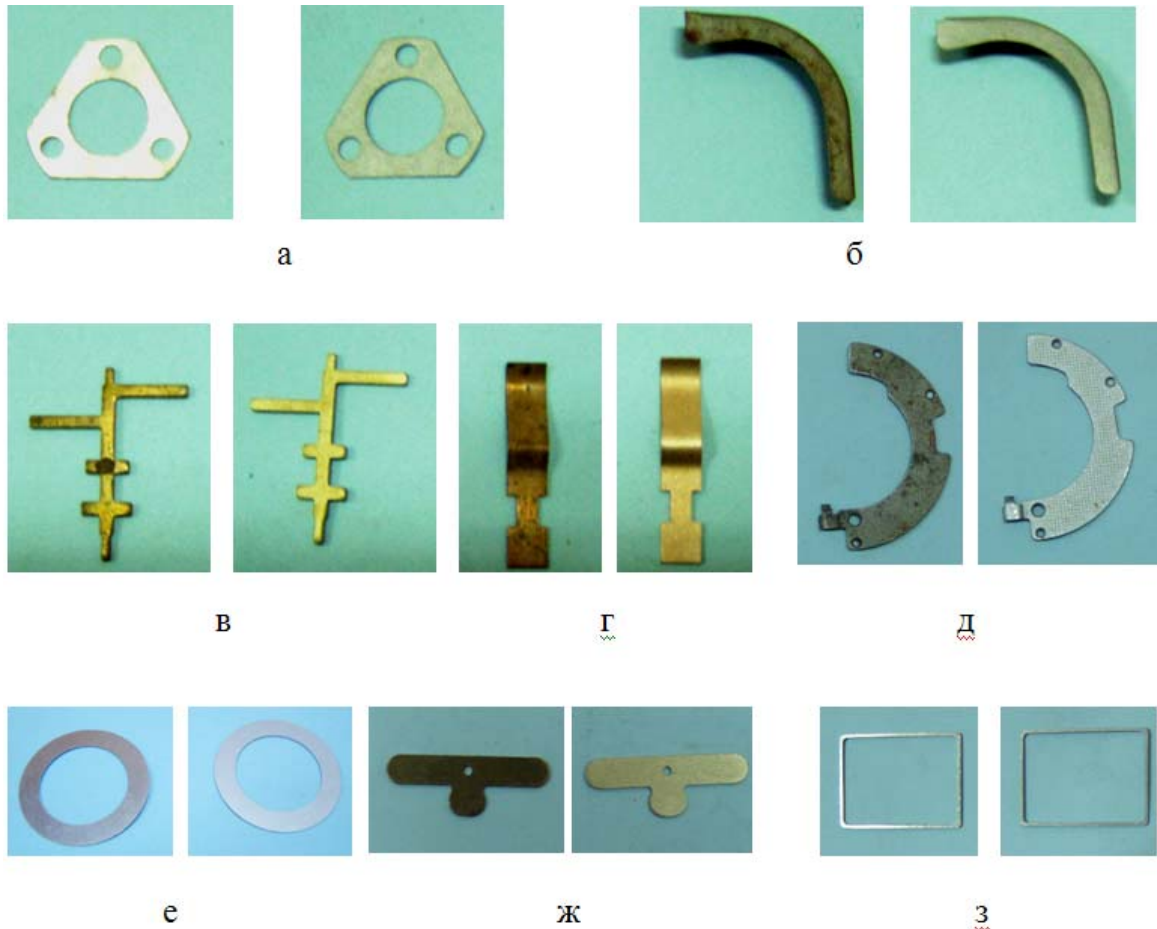


Рисунок 42 – Зовнішній вигляд деталей з різних матеріалів до й після обробки: а – алюміній; б, д – сталь Ст3; в – латунь ЛС59.1; г – берилієва бронза БрБ2; е – титановий сплав ВТ-1; ж – латунь Л63; з – дюралюміній Д16

Показано, що ефективною областю застосування абразивної обробки за-топленими струменями є обробка дрібних точних деталей малої жорсткості й складної конфігурації радіо- і електротехнічної промисловості, приладобудування, точної механіки, оптико-механічного виробництва, а також прецизійних деталей, використовуваних для нанотехнологій, загальномашинобудівного призначення й деталей ювелірних виробів і геральдики.

Промислові випробування розроблених установок показали, що за рахунок виключення зношування каналів сопел забезпечується їх надійна й безперебійна робота, практично не потрібно технічне обслуговування. Установлено, що за час виконання операції (приблизно 40 хвилин) основний (машинний) час становить 30 – 35 хвилин, тобто оператор зайнятий на обслуговуванні однієї установки 5 – 10 хвилин. Отже, в умовах виробничої ділянки оздоблювальної обробки оператор може одночасно обслуговувати три таких установки з послідовним запуском їх у роботу.

Розроблені технології й устаткування впроваджені в ЗАТ “Медпром” і ТОВ “Азовелектромеханіка” (м. Маріуполь), ДП Харківський машинобудівний завод “ФЕД”, ЗАТ “Азовський машинобудівний завод” (м. Бердянськ), ТОВ Технічний Центр “ВаріУс” (м. Дніпропетровськ) із загальним економічним ефектом 270535 гривень на рік. Установлено, що продуктивність обробки дрібних деталей на розроблених установках у порівнянні з їх традиційною ручною немеханізованою обробкою може бути збільшена до 66 разів. Все залежить від кількості оброблюваних деталей: з їхнім збільшенням продуктивність різко збільшується, що дає змогу виключити технологічні операції на підприємстві, пов'язані з ручною оздоблювальною (зачисною) обробкою даних деталей, і зменшити число робітників, виконуючих ці операції.

Результати теоретичних і експериментальних досліджень дисертаційної роботи використовуються в навчальному процесі при курсовому й дипломному проектуванні на кафедрі “Технологія машинобудування” а також у дисциплінах “Сучасні технології обробки” і “Основи робочої професії” на кафедрах “Технологія машинобудування” і “Металорізальні верстати й інструменти” ДВУЗ “Приазовський державний технічний університет”.

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі на основі одержаних нових науково обґрунтованих результатів вирішена актуальна для технології машинобудування науково-практична проблема ефективної оздоблювальної обробки дрібних точних деталей малої жорсткості й складної конфігурації шляхом розробки й застосування прогресивного методу абразивної обробки затопленими струменями й установок для його реалізації, а також визначення раціональних параметрів обробки, які забезпечують підвищення якості, продуктивності й стабільності обробки.

Основні висновки, наукові й практичні результати роботи:

1. На основі узагальнення сучасного стану оздоблювальної обробки дрібних точних деталей малої жорсткості й складної конфігурації встановлено, що вирішити проблему їхньої ефективної обробки можна шляхом застосування струминно-абразивної обробки. Однак, як показує практика, традиційні методи струминно-абразивної обробки характеризуються високою нестабільністю через інтенсивне зношування сопел і тому можливості їхнього вдосконалення в цьому напрямку майже вичерпані. Перспективним напрямком подальшого розвитку струминно-абразивної обробки є обробка затопленими струменями, коли абразивні зерна приєднуються до струменів стисненого повітря за межами сопел, що захищає їх від зношування й таким чином вирішує проблему стабільності обробки. У зв'язку із цим, у роботі розроблені наукові основи ефективної оздоблювальної абразивної обробки деталей затопленими струменями, які полягають в теоретичному й експериментальному визначенні технологічних можливостей підвищення якості, продуктивності, стабільності обробки та науково обґрунтованому виборі раціональних умов, включаючи технологічні й конструктивні параметри установок для здійснення абразивної обробки деталей затопленими струменями.

2. Розроблено теоретичний підхід до визначення технологічних закономірностей формування параметрів якості при абразивній обробці деталей затопленими струменями, який базується на положеннях теорії різання матеріалів і вперше встановлених умовах переходу від процесу пластичного деформування матеріалу до процесу різання абразивними зернами, що дозволило уточнити відомі теоретичні рішення, отримані стосовно струминно-абразивної обробки на основі класичних розрахунків деталей машин на тертя й зношування. З умови рівності кінетичної енергії абразивного зерна, що рухається, і роботи різання доведено, що основними напрямками зменшення шорсткості поверхні й підвищення продуктивності обробки є зменшення умовного напруження різання (енергоємності обробки) і збільшення довжини зрізу абразивним зерном.

3. Розроблено нову математичну модель визначення енергоємності обробки, що дозволяє обґрунтувати технологічні можливості підвищення якості й продуктивності абразивної обробки деталей затопленими струменями з урахуванням різних форм мікрорізів: з постійною товщиною та з товщиною зрізу, що збільшується й зменшується в часі. Доведено, що найменша енергоємність досягається при мікрорізанні зі зменшуваною в часі товщиною зрізу. Зроблено висновок про те, що найбільш ефективною областю застосування методу абразивної обробки затопленими струменями є обробка кромки заготовок, усунення задирок і зменшення мікронерівностей на оброблюваних поверхнях дрібних деталей.

4. Уперше запропоновано аналітичний зв'язок між енергоємністю при абразивній обробці й товщиною зрізу, що дозволило обґрунтувати умови переходу від процесу пластичного деформування матеріалу до процесу різання для різних форм мікрорізів. Виходячи із цього встановлено, що підвищити якість і продуктивність абразивної обробки затопленими струменями деталей, виготовлених з крихких матеріалів, можна при куті входу абразивного зерна в оброблюваний матеріал, рівному або близькому до 90° , а при обробці деталей, виготовлених із пластичних матеріалів, при кутах $10 - 30^{\circ}$. Це узгоджується з відомими експериментальними даними, отриманими при дослідженні традиційних методів струминно-абразивної обробки, і свідчить про вірогідність отриманих теоретичних рішень.

5. Розроблено нову математичну модель визначення шорсткості поверхні й продуктивності абразивної обробки деталей затопленими струменями з урахуванням динаміки руху абразивних зерен в оброблюваному матеріалі, що дозволило аналітично описати траєкторії руху абразивних зерен у процесі обробки й принципово, по-новому, обґрунтувати основні технологічні закономірності знімання матеріалу й формоутворення поверхонь деталей. На цій основі доведено визначальний вплив на шорсткість обробленої поверхні й продуктивність обробки швидкості руху абразивних зерен, яка на відміну від традиційної струминно-абразивної обробки істотно залежить від різних технологічних параметрів процесу.

6. Розроблено комплекс нових методик експериментальних досліджень абразивної обробки деталей затопленими струменями, що включає: визначення швидкості руху абразивних зерен, отримання фотографій оброблених повер-

хонь зі збільшенням до 1600 крат із практично необмеженою глибиною різкості, визначення продуктивності процесу абразивної обробки методом експрес-контролю, одержання перерізу лунки мікрорізу й визначення напруженого стану поверхні методом парної обробки деталей.

7. Проведено експериментальні дослідження швидкості руху абразивних зерен при використанні різних по конструктивному виконанню сопел. Установлено, що найбільша швидкість руху абразивних зерен і відповідно продуктивність обробки досягається при використанні сопла Лаваля, яке забезпечує надзвучкову швидкість витікання стисненого повітря. Показано, що найбільш щільне розташування слідів абразивних зерен, які характеризують шорсткість поверхні, забезпечується також при використанні надзвучкового сопла Лаваля.

8. На основі проведених експериментальних досліджень розроблено узагальнюючі емпіричні математичні моделі параметрів абразивної обробки деталей затопленими струменями, які в сукупності з отриманими аналітичними рішеннями дають достатньо повне уявлення про технологічні можливості процесу й дозволяють за критеріями найменшої шорсткості поверхні та найбільшої продуктивності визначити раціональні параметри обробки й виконати вибір кількості й розмірів конструктивних елементів установок при їх проектуванні.

9. Експериментально встановлено, що реалізувати найбільшу продуктивність обробки для заданої шорсткості поверхні $R_{max} = 6,8$ мкм (або $R_a = 0,8 \dots 1,25$ мкм) можна застосуванням наступних умов обробки: об'єм абразиву, що завантажується – 0,18 л; зернистість абразиву № 63; сумарна маса оброблюваних деталей – 0,4 кг; об'єм рідини, що заливається, – 3,0 л; діаметр сопел – 2 мм; кількість сопел – 8; діаметр розміщення сопел – 110 мм, кут осі сопла до горизонту – 25° ; кут між віссю сопла й дотичною до окружності в точці її розміщення – $0 \dots 5^{\circ}$.

10. На основі проведених експериментів встановлено, що найбільша інтенсивність знімання матеріалу при абразивній обробці затопленими струменями досягається на торцевих поверхнях оброблюваних дрібних деталей. Це підтверджує вірогідність отриманих теоретичних рішень і дозволяє в першу чергу обґрунтовано рекомендувати пропонований метод для обробки торцевих поверхонь дрібних деталей.

11. Експериментально встановлено, що в процесі абразивної обробки затопленими струменями в поверхневому шарі оброблюваної деталі виникають стискаючі напруження (має місце наклеп). При цьому величина напружень збільшується протягом 20 – 25 хвилин обробки, а потім стабілізується. Установлено також, що із часом обробки відбувається збільшення мікротвердості (по Вікерсу) досліджуваних деталей з алюмінію АД, латуні ЛС59.1, латуні Л63, сталі Ст3, сталі 65Г. Через 20 – 25 хвилин обробки мікротвердість стабілізується на різних рівнях залежно від схильності металів до наклепу. Найбільш сприйнятливими до наклепу в процесі абразивної обробки затопленими струменями є алюміній АД й сталь 65Г. Із цього зроблений висновок про можливість підвищення якості поверхневого шару деталей у процесі обробки.

12. Експериментально встановлено, що, незважаючи на сприятливі умови експлуатації абразивного матеріалу при обробці, його втрати вимагають періо-

дичного поповнення. Це пов'язано з тим, що при обробці, хоч і незначно (до 0,7 %), спостерігається дроблення абразивних зерен. Установлено, що при зміні тиску стисненого повітря до значення 0,57 МПа знімання металу пропорційно збільшується, а дроблення зерен незначно інтесифікується. Після перевищення цього значення тиску стисненого повітря вміст робочої камери піднімається над зоною роботи струменів, і процес обробки стає фактично нездійсненим. Отже, умовою стабільного протікання процесу обробки є встановлення тиску стисненого повітря не вище 0,57 МПа.

13. Виконано експериментальну оцінку стабільності основних параметрів процесу обробки. Установлена відсутність відхилень, зв'язаних зі зниженням знімання металу й збільшенням витрати стисненого повітря за час роботи установки (2,5 години), що в 5 разів перевищує час здійснення однієї операції. Відхилення, пов'язані зі зношуванням абразиву, за час операції (30 хвилин) становлять 0,5–0,7 %, а з віднесенням рідини – 2 %. Цим показано, що запропонований метод обробки, на відміну від відомих методів струминно-абразивної обробки, за рахунок виключення зношування сопел дозволяє стабілізувати в часі основні параметри обробки.

14. На основі теоретичних і експериментальних досліджень, а також нових технічних рішень визначено комплекс заходів, що забезпечують надійність і стабільність методу абразивної обробки деталей затопленими струменями. До їх числа входять: кути атаки оброблюваних поверхонь в залежності від механічних властивостей матеріалу, елементи деталей, на яких слід локалізувати процес обробки (кромки, площини, задирки, вершини мікронерівностей), збереження зернового складу суспензії та її рідкої складової, ефективна (з урахуванням передачі максимального запасу кінетичної енергії найбільшій кількості абразивних зерен) конструкція сопла для подачі стисненого повітря, його гранично допустима витрата, яка визначається діаметром, кількістю сопел і тиском стисненого повітря.

15. На основі проведених теоретичних і експериментальних досліджень розроблено ефективне устаткування, представлене гамою установок для здійснення оздоблювальної абразивної обробки дрібних деталей затопленими струменями. Їхнє застосування виключає трудомісткі ручні зачисні операції, підвищує якість, продуктивність і стабільність обробки за рахунок поліпшення товарного вигляду оброблених деталей і одночасної обробки великої кількості деталей, завантажених у робочу камеру “навалом”. Установлено, що в процесі обробки відбувається округлення кромки деталей, усуваються задирки, сліди корозії й різні неоднорідності на оброблюваних поверхнях, утворюється однорідна матова поверхня із шорсткістю в межах $R_a = 0,8 - 1,25$ мкм, зі зміцнюючим наклепом (стискаючими напруженнями на глибину 5 – 6 мкм). Показано, що в порівнянні із традиційною ручною обробкою дрібних деталей застосування розроблених установок і технологій абразивної обробки затопленими струменями зменшує в окремих випадках трудомісткість до 66 разів.

16. Розроблені ефективні технології оздоблювальної абразивної обробки дрібних деталей затопленими струменями й устаткування для їхнього здійснення впроваджені в ЗАТ “Медпром” і ТОВ “Азовелектромеханіка” (м. Маріуполь),

ДП Харківський машинобудівний завод “ФЕД”, ЗАТ “Азовський машинобудівний завод” (м. Бердянськ), ТОВ Технічний Центр “ВаріУс” (м. Дніпропетровськ) із загальним економічним ефектом 305135 гривень на рік. Результати теоретичних і експериментальних досліджень роботи використовуються в навчальному процесі на кафедрі “Технологія машинобудування” ДВУЗ “Приазовський державний технічний університет” (м. Маріуполь).

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Андилахай А. А. Абразивная обработка деталей затопленными струями / А. А. Андилахай. – Мариуполь: ПГТУ, 2006. – 190 с.
2. Андилахай А. А. Теоретические и экспериментальные исследования формообразования поверхностей деталей в процессе обработки свободными абразивными зёрнами / А. А. Андилахай // Вісник Приазов. держ. техн. ун-ту: Зб. наук. пр. – Маріуполь: ПДТУ, 2000. – Вип. 10. – С. 164–172.
3. Андилахай А. А. Особенности определения технологической эффективности упрочняющей абразивной обработки деталей затопленными струями / А. А. Андилахай // Захист металургійних машин від поломок: Зб. наук. пр. – Маріуполь: ПДТУ, 2002. – Вип. 6. – С. 238-242.
4. Андилахай А. А. Исследование струй сжатого воздуха, подаваемых в рабочую камеру, заполненную абразивной суспензией / А. А. Андилахай // Вісник Приазов. держ. техн. ун-ту: Зб. наук. пр. – Маріуполь: ПДТУ, 2003. – Вип. 13. – С. 159-162.
5. Андилахай А. А. Методика и описание экспериментально-аналитического исследования процесса абразивной обработки деталей затопленными струями / А. А. Андилахай // Захист металургійних машин від поломок: Зб. наук. пр. – Маріуполь: ПДТУ, 2003. – Вип. 7. – С. 205-213.
6. Андилахай А. А. Струйные методы, устройства для отделочной обработки деталей свободным абразивом / А. А. Андилахай // Вісник Приазов. держ. техн. ун-ту: Зб. наук. пр. – Маріуполь: ПДТУ, 2004. – Вип. 14. – С. 165–169.
7. Иванов И. Е. К вопросу повышения надежности технологических решений при изготовлении баллонов на автоматических линиях /И. Е. Иванов, А. А. Андилахай // Захист металургійних машин від поломок: Зб. наук. пр. – Маріуполь: ПДТУ, 2005. – Вип. 8. – С. 184-190.
8. Андилахай А. А. Теоретический анализ параметров струйно-абразивной обработки деталей / А. А. Андилахай // Вісник НТУ «ХПІ»: Зб. наук. пр. Тематичний випуск: Технології в машинобудуванні. – Харків: НТУ “ХПІ”, 2009. – № 1. – С. 15-22.
9. Андилахай А. А. Методы очистки металлических поверхностей от окислы и коррозии / А. А. Андилахай // Вісн. Харків. нац. техн. ун-ту сільськ. госп-ва ім. Петра Василенка: Зб. наук. пр. – Харків: ХНТУСГ, 2010. – Вип. 101. – С. 241-245.
10. Андилахай А. А. Теоретические и экспериментальные исследования динамики струйно-абразивной обработки / А. А. Андилахай, Ф. В. Новиков

// Вісник Приазов. держ. техн. ун-ту: Зб. наук. пр. Серія: Технічні науки. - Маріуполь: ДВНЗ “Приазов. держ. техн. ун-т”, 2010. – Вип. 20. – С. 206-212.

11. Андилахай А. А. Теоретический анализ параметров силовой напряженности струйно-абразивной обработки / А. А. Андилахай, Ф. В. Новиков // Наук. пр. Донецьк. нац. техн. ун-ту. Серія: машинобудування і машинознавство. – Донецьк: ДонНТУ, 2010. – Вип. 7 (166). – С. 46-52.

12. Андилахай А. А. Закономерности формирования заусенцев на обрабатываемых поверхностях и их устранение / А. А. Андилахай // Вісник НТУ «ХП»: Зб. наук. пр. Тематичний випуск: Технології в машинобудуванні. – Харків: НТУ “ХП”, 2010. – № 25. – С. 67-73.

13. Андилахай А. А. Теоретический анализ взаимодействия единичного абразивного зерна и обрабатываемой поверхности в процессе обработки затопленными струями / А. А. Андилахай // Захист металургійних машин від поломок: Зб. наук. пр. – Маріуполь: ПДТУ, 2010. – Вип. 12. – С. 50-55.

14. Андилахай А. А. Энергетика процесса струйно-абразивной обработки затопленными струями / А. А. Андилахай // Вісн. Харків. нац. техн. ун-ту сільськ. госп-ва ім. Петра Василенка: Зб. наук. пр. – Харків: ХНТУСГ, 2010. – Вип. 106. – С. 204-210.

15. Андилахай А. А. Технологические возможности абразивной обработки деталей затопленными струями / А. А. Андилахай // Вісник НТУ “ХП”: Зб. наук. пр. Тематичний випуск: Технології в машинобудуванні. – Харків: НТУ “ХП”, 2010. – № 49. – С. 140-143.

16. Андилахай А. А. Анализ струйно-абразивных методов обработки поверхностей / А. А. Андилахай // Вісник НТУ “ХП”: Зб. наук. пр. Тематичний випуск: Технології в машинобудуванні. – Харків: НТУ “ХП”, 2010. – № 53. – С. 4-10.

17. Андилахай А. А. Физические и технологические закономерности абразивной обработки деталей затопленными струями / А. А. Андилахай // Вісн. Харків. нац. техн. ун-ту сільськ. госп-ва ім. Петра Василенка: Зб. наук. пр. – Харків: ХНТУСГ, 2011. – Вип. 115. – С. 238-242.

18. Андилахай А. А. Динамика процесса струйно-абразивной обработки / А. А. Андилахай // Захист металургійних машин від поломок: Зб. наук. пр. – Маріуполь: ПДТУ, 2009. – Вип. 11. – С. 251-255.

19. Андилахай А. А. Методы и перспективы защиты каналов сопел струйно-абразивных установок от износа / А. А. Андилахай // Вісн. Харків. нац. техн. ун-ту сільськ. госп-ва ім. Петра Василенка: Зб. наук. пр. – Харків: ХНТУСГ, – 2011. – Вип. 118. – С. 37-44.

20. Андилахай А. А. Аналитические исследования энергоемкости абразивной обработки деталей затопленными струями / А. А. Андилахай, Ф. В. Новиков // Наук. пр. Донецьк. нац. техн. ун-ту. Серія: Машинобудування і машинознавство. – Донецьк: ДонНТУ, 2012. – Вип. 9 (205). – С. 49-54.

21. Андилахай А. А. Определение областей эффективного применения абразивной обработки затопленными струями / А. А. Андилахай // Захист металургійних машин від поломок: Зб. наук. пр. – Маріуполь: ПДТУ, 2012. – Вип. 14. – С. 217-223.

22. Андилахай А. А. Кинетическая энергия абразивного зерна, инжектированного в струю сжатого воздуха при истечении из сопла в суспензию / А. А. Андилахай // Вісник Приазов. держ. техн. ун-ту: Зб. наук. пр. Серія: Технічні науки. – Маріуполь: ПДТУ, 2012. – Вип. 24. – С. 224–230.

23. Андилахай А. А. Разработка математической модели динамики абразивной обработки деталей затопленными струями / А. А. Андилахай // Вісник Донбаської держ. машинобуд. академії: Зб. наук. пр. – Краматорськ, 2012. – Вип. 2. – С. 6–11.

24. Андилахай А. А. Скорость абразивных частиц в процессе струйно-абразивной обработки деталей затопленными струями / А. А. Андилахай // Вісник СевНТУ: Зб. наук. пр. – Севастополь: СевНТУ, 2012. – Вип. 129. – С. 7–12.

25. Анділахай О. О. Математична модель визначення енергоємності абразивної обробки та умов її зменшення / О. О. Анділахай, І. В. Гершиков // Вісник НТУ “ХПІ”: Зб. наук. пр. Тематичний випуск: Технології в машинобудуванні. – Харків: НТУ “ХПІ”, 2012. – № 54. – С. 3–13.

26. Андилахай А. А. Условия повышения производительности абразивной обработки / А. А. Андилахай // Вісник НТУ “ХПІ”: Зб. наук. пр. Тематичний випуск: Технології в машинобудуванні. – Харків: НТУ “ХПІ”, 2012. – № 53. – С. 42–47.

27. Андилахай А.А. Теоретические и экспериментальные исследования производительности абразивной обработки деталей затопленными струями / А.А. Андилахай // Вісник Приазов. держ. техн. ун-ту: Зб. наук. пр. Серія: Технічні науки. – Маріуполь: ДВНЗ “Приазов. держ. техн. ун-т”, 2012. – №25. – 2012. – С. 178-184.

28. Andilachay A. Determination of Energy Parameters for Liquid Blasting / A. Andilachay, N. Gharaibeh, M. Matarni, F. Novikov // American Journal of Scientific Research. – 2013. –Vol. 75, N 9. – P. 134–140.

29. Андилахай А. А. Выбор технологических параметров струйно-абразивной обработки / А. А. Андилахай, А. П. Сергиев, В. А. Барсуков // Станки и инструменты. – М., 1985. – №4. – С. 36.

30. Андилахай А. А. Разработка принципиальных схем установок для отделочной обработки с электромагнитным приводом рабочей камеры / А. А. Андилахай, И. А. Жабинский, Н. В. Василенко // Материалы V региональной научн.-техн. конф. – Мариуполь: ПГТУ, 1998. – Т. II “Машиностроение”. – С. 6.

31. Андилахай А. А. Отделочная обработка деталей приборов / А. А. Андилахай, Р. В. Граборов, Р. И. Шейченко // Материалы VII региональной научн.-техн. конф. – Мариуполь: ПГТУ, 2000. – Т. II. – С. 161-162.

32. Андилахай А. А. Оптимизация конструктивных и технологических параметров установки для отделочной зачистной обработки деталей / А. А. Андилахай, С. В. Савенко // Материалы VIII региональной научн.-техн. конф. – Мариуполь: ПГТУ, 2001. – Т. II. – С. 118-119.

33. Андилахай А. А. Об особенностях струйно-абразивной обработки / А. А. Андилахай, Р. В. Граборов, Р. И. Шейченко // Материалы IX региональной научн.-техн. конф. – Мариуполь: ПГТУ, 2002. – Т. 1. – С. 112.

34. Андилахай А. А. Оптимизация отделочной обработки деталей зернистым абразивом / А. А. Андилахай, Е. И. Антипенко, С. В. Савенко // Современные проблемы и перспективы развития станко-инструментального производства и совершенствование подготовки кадров: материалы Междунар. научн.-методич. конф. – Мариуполь: ПГТУ, 2003. – С. 68-70.

35. Андилахай А. А. Особенности технологии обработки деталей в установках с жесткой кинематической связью привода и рабочей камеры / А. А. Андилахай, И. А. Жабинский // материалы X региональной научн.-техн. конф. – Мариуполь: ПГТУ, 2003. – Т. 1. – С. 118.

36. Андилахай А. А. Разработка и испытание одновалкового кривошипного прессы встречного прессования / А.А. Андилахай // Университетская наука – 2007: материалы Междунар. научн.-техн. конф. – Мариуполь: ПГТУ, 2007. – С. 3–4.

37. Андилахай А. А. Математическая модель процесса струйно-абразивной обработки деталей / А. А. Андилахай // Физические и компьютерные технологии: труды 14-й Междунар. научн.-техн. конф. – Харьков: ХНПК “ФЭД”, 2008. – С. 183-189.

38. Андилахай А. А. Определение оптимальных параметров струйно-абразивной обработки деталей / А. А. Андилахай // Научные исследования, автоматика и динамика машин, инновационные и средозащитные технологии в техносфере: материалы Междунар. научн.-практ. конф. – Курск: Изд-во Курск. гос. с.-х. ак., 2008. – С. 132-137.

39. Андилахай А. А. Механика взаимодействия режущего зерна с материалом при струйно-абразивной обработке / А. А. Андилахай // Физические и компьютерные технологии: труды 15-й Междунар. научн.-техн. конф. – Харьков: ХНПК “ФЭД”, 2009. – С. 20-32.

40. Андилахай А. А. Струйно-абразивная обработка тонколистового проката перед гальваническим покрытием / А. А. Андилахай // Университетская наука-2009: материалы Междунар. научн.-техн. конф. – Мариуполь: ПГТУ, 2009. – С. 65.

41. Андилахай А. А. Обоснование технологических возможностей процесса струйно-абразивной обработки / А. А. Андилахай // Современные инструментальные системы, информационные технологии и инновации: материалы VII Междунар. научн.-техн. конф. – Курск: Курск. гос. техн. ун-т, 2010. – С. 258-264.

42. Андилахай А. А. Технологические возможности струйно-абразивной обработки / А. А. Андилахай // Физические и компьютерные технологии: труды 16-й Междунар. научн.-техн. конф. – Харьков: ХНПК “ФЭД”, 2010. – С. 89-95.

43. Андилахай А. А. Закономерности и особенности процесса абразивной обработки деталей затопленными струями / А. А. Андилахай // Современные инструментальные системы, информационные технологии и инновации: материалы VIII Междунар. научн.-техн. конф. – Курск: Юго-Зап. гос. ун-т, 2011. – Ч. 1. – С. 20-25.

44. Андилахай А. А. Струйные методы и конструкции установок для отделочной обработки деталей / А. А. Андилахай // Физические и компьютерные

технологии: труды 17-й Междунар. научн.-техн. конф. – Харьков: ХНПК “ФЭД”, 2011. – С. 24-30.

45. Андилахай А. А. Оценка энергетического баланса абразивной обработки деталей затопленными струями / А. А. Андилахай // Качество, стандартизация, контроль: теория и практика: материалы 11-я Междунар. научн.-практ. конф. – Ялта – Киев: АТМ Украины, 2011. – С. 9-12.

46. Андилахай А. А. Очистка тонколистового проката от окалины / А. А. Андилахай // Университетская наука-2011: материалы Междунар. научн.-технич. конф. – Мариуполь: ГВУЗ “ПГТУ”, 2011. – Т. II. – С. 116-118.

47. Анділахай О. О. Ефективна технологія струминно-абразивної поверхневої обробки дрібних деталей малої жорсткості / О. О. Анділахай, Ф.В. Новіков // Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я: матеріали ХХ Міжнар. наук.-практ. конф. – Харків: НТУ “ХПІ”, 2012. – Ч. 1. – С. 130.

48. Андилахай А. А. Условия уменьшения энергоемкости при абразивной обработке деталей затопленными струями / А. А. Андилахай, Ф. В. Новиков // Инженерия поверхности, реновация изделий: материалы 12-й Междунар. научн.-техн. конф. – Ялта – Киев : АТМ Украины, 2012. – С. 216–218.

49. Андилахай А. А. Устройство и методика определения скорости абразивных зерен, инжектируемых в струю сжатого воздуха / А. А. Андилахай // Университетская наука – 2012: материалы Междунар. научн.-техн. конф. – Мариуполь: ГВУЗ “ПГТУ”, 2012. – Т. II. – С. 122–127.

50. Андилахай А. А. Повышение качества струйно-абразивной обработки / А. А. Андилахай // Качество, стандартизация, контроль: теория и практика: материалы 12-й Междунар. научн.-практ. конф. – Ялта – Киев: АТМ Украины, 2012. – С. 51-53.

51. Андилахай А. А. Математические модели определения производительности и шероховатости поверхности при абразивной обработке мелкогабаритных деталей затопленными струями / А. А. Андилахай // Ресурсосбережение и энергоэффективность процессов и оборудования обработки давлением в машиностроении и металлургии: материалы IV научн.-технич. конф. – Харьков: НТУ “ХПИ”, 2012. – С. 59-67.

52. Андилахай А. А. Экспериментальные исследования параметров абразивной обработки затопленными струями мелких деталей / А. А. Андилахай // Физические и компьютерные технологии: труды 18-й Междунар. научн.-практ. конф. – Харьков: ГП ХМЗ “ФЭД”, 2012. – С. 45-50.

53. Андилахай А. А. Установка для отделочной обработки деталей / А. А. Андилахай, А. П. Сергиев, А. М. Стесель, А. А. Шилов // А. с. 1007940 СССР МКИ³ В 24 В 31/08. – № 3357456/25-08; Заявл. 25.11.81; Оpubл. 30.03.83, Бюл. № 12. – 4 с.

54. Андилахай А. А. Отделочная установка для абразивной обработки деталей / А. А. Андилахай, А. П. Сергиев, А. М. Стесель, А. А. Шилов // А. с. 1057255 СССР МКИ³ В 24 В 31/08. / – № 2845388/25-08; Заявл. 30.11.79; Оpubл. 30.11.83; Бюл. № 44. – 4 с.

55. Андилахай А. А. Устройство для поверхностной обработки деталей / А. А. Андилахай, А. П. Сергиев // А. с. 1248772 СССР МКИ⁴ В 24 В 31/00. / – № 3825140/25–08; Заявл. 17.12.84; Оpubл. 07.08.84; Бюл. № 29. – 4 с.

56. Андилахай А. А. Устройство для обработки деталей свободным абразивом / А. А. Андилахай, А. П. Сергиев // А. с. 1390001 СССР, МКИ⁴ В 24 В 31/00, 31/10, 31/104. № 4016857/31–08; Заявл. 05.02.86; Оpubл. 23.04.88; Бюл. № 15. – 4 с.

57. Андилахай А. А. Устройство для обработки головок винтов / А. А. Андилахай, В. С. Аникин, И. М. Безрук, В. И. Иванов // А. с. 1552505 А1 СССР МКИ³ В 24 В 9/00 № 4325420/31-08; Заявл. 06.11.87. ДСП– 4 с.

58. Андилахай А. А. Механизм прерывистого вращения / А. А. Андилахай, С. А. Савченко // А. с. 1585583 СССР МКИ³ F 16 Н 19/00. / – № 4251821/25-28; Заявл. 29.05.87; Оpubл. 15.08.90; Бюл. № 30. – 4 с.

59. Андилахай А. А. Способ обработки винтов / А. А. Андилахай, И. М. Безрук, В. Ф. Пуль // А. с. 1653276 СССР МКИ⁵ В 24 В 9/00.– № 4663996/08; Заявл. 20.03.89; Оpubл. 23.06.91; Бюл. № 23. – 4 с.

60. Андилахай А. А. Устройство для гидроабразивной обработки / А. А. Андилахай // А. с. 1664525 СССР МКИ⁵ В 24 В 31/00. – № 4400450/08; Заявл. 01.04.88; Оpubл. 23.07.91; Бюл. № 27. – 4 с.

61. Andilachay A. A. Dekončovací zařízení na brusne opracování součástí / A. A. Andilachay, A. P. Sergiev, A. M. Stesel, A. A. Šilov // А. с. 239324 Ceskoslovenska Socialisticka Republika (CSR), МКИ⁴ В 24 В 31/104. / – № PV 6216-81/25-08; Заявл. 18.08.81; Оpubл. 15.11.86. – 4 с.

62. Андилахай А. А. Устройство за фина абразивна обработка детали / А. А. Андилахай, А. П. Сергиев, А. М. Стесель, А. А. Шилов // А. с. 38676 Болгария, МКИ⁴ В 24 В 31/04. / – № 53313; Заявл. 17.08.81; Оpubл. 14.02.86; Бюл. № 2. – 4 с.

63. Андилахай А. А. Установка для отделочной обработки деталей / А. А. Андилахай, А. П. Сергиев, Ю. А. Ларин // А. с. 656815 СССР, МКИ³ В 24 В 31/08. / № 2351976/08; Заявл. 26.04.76; Оpubл. 15.04.79; Бюл. № 14. – 4 с.

64. Andilachay A. A. Zurichtungsanlage für die abschleifende Bearbeitung von Teilen / Andilachay A. A., A. P. Sergiev, A. M. Stesel, A. A. Šilov // Патент 235544 DDR, МКИ⁵ В 24 В 31/104. / (SU); – № WP В 24 В/232 654 5; Заявл. 18.08.81; Оpubл. 14.05.86. – 4 с.

65. Анділахай О. О. Пристрій для виготовлення конічної різьбової частини горловини балона / О. О. Анділахай, І. Є. Іванов // Патент 97630 Україна, МПК В 23 G 3/00, В 23 В 49/00 /, № а 2008 08516; Заявл. 26.06.08; Оpubл. 12.03.12; Бюл. № 5. – 4 с.

66. Анділахай О. О. Спосіб обробки деталей і пристрій для його здійснення / О. О. Анділахай, В. А. Барсуков, С. В. Савенко // Патент 39372 Україна, МПК⁷ В 24 В 31/06; № а 2000063516; Заявл. 16.06.2001; Оpubл. 12.03.12; Бюл. № 5. – 4 с.

67. Анділахай О. О. Спосіб обробки деталей і пристрій для його здійснення / О. О. Анділахай, Р. В. Граборов, С. В. Савенко // Патент 58135 Україна,

МПК⁷ В 24 В 31/00; № а2002108004; Заявл. 08.10.2002; Опубл. 15.07.03; Бюл. № 7. – 4 с.

68. Анділахай О. О. Пристрій для поверхневої обробки деталей / О. О. Анділахай, С. В. Кіпчарський, В. П. Кіпчарський // Патент 96362 Україна, МПК В24В 31/108, В 24 В 31/033, В 24 В 31/02; № а20104444; Заявл. 16.04.2010; Опубл. 25.10.11; Бюл. № 20. – 4 с.

АНОТАЦІЯ

Анділахай О.О. Наукові основи ефективної оздоблювальної абразивної обробки деталей затопленими струменями. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.02.08 – технологія машинобудування. – Одеський національний політехнічний університет, Одеса, 2013.

Дисертація присвячена вирішенню актуальної проблеми ефективної оздоблювальної обробки дрібних точних деталей малої жорсткості й складної конфігурації шляхом розробки й застосування прогресивного методу абразивної обробки затопленими струменями й установок для його реалізації, які забезпечують істотне підвищення якості, продуктивності й стабільності обробки. Теоретично доведено, що найбільш ефективною областю застосування даного методу є обробка кромek деталей, усунення задирок і зменшення мікронерівностей на оброблюваних поверхнях дрібних деталей. Розроблено нову математичну модель визначення шорсткості поверхні й продуктивності абразивної обробки деталей затопленими струменями з урахуванням динаміки руху абразивних зерен в оброблюваному матеріалі й енергоємності обробки, що принципово, по-новому, розкриває основні технологічні закономірності знімання припуску й формоутворення поверхонь деталей. Доведено ефективність застосування надзвучкового профільованого сопла Лавалю. Розроблено й впроваджено у виробництво ефективне устаткування для здійснення оздоблювальної абразивної обробки дрібних деталей затопленими струменями, що виключає трудомісткі ручні зачисні операції, підвищує якість і продуктивність обробки за рахунок поліпшення товарного вигляду оброблених деталей і одночасної обробки великої кількості деталей, завантажених у робочу камеру “навалом”.

Ключові слова: абразивна обробка, абразивне зерно, сопло Лавалю, математична модель, якість обробки, шорсткість поверхні.

АННОТАЦИЯ

Андилахай А.А. Научные основы эффективной отделочной абразивной обработки деталей затопленными струями. – Рукопись.

Диссертация на соискание научной степени доктора технических наук по специальности 05.02.08 – технология машиностроения. – Одесский национальный политехнический университет, Одесса, 2013.

Диссертация посвящена решению актуальной проблемы эффективной отделочной обработки мелких точных деталей малой жесткости и сложной конфигурации путем разработки и применения прогрессивного метода абразивной обработки затопленными струями и установок для его реализации, обеспечи-

вающих существенное повышение качества, производительности и стабильности обработки. Впервые произведена оценка технологических закономерностей формирования параметров качества при струйно-абразивной обработке с позиции теории резания материалов с учетом условий перехода от процесса пластического деформирования материала к процессу резания абразивными зернами, что позволило уточнить известные теоретические решения, полученные на основе использования классических расчетов деталей машин на трение и износ. Впервые теоретически на основе критерия наименьшей энергоемкости обработки обоснованы технологические возможности повышения качества и производительности абразивной обработки деталей затопленными струями и сформулированы основные направления ее эффективного применения, состоящие в обработке кромок заготовок, устранении заусенцев и уменьшении микронеровностей на обрабатываемых поверхностях. Разработана новая математическая модель определения шероховатости поверхности и производительности абразивной обработки деталей затопленными струями с учетом динамики движения абразивных зерен в обрабатываемом материале, что позволило принципиально по-новому раскрыть основные технологические закономерности съема припуска и формообразования поверхностей деталей. Впервые теоретически обоснована возможность повышения качества и производительности абразивной обработки затопленными струями деталей, изготовленных из пластичных и хрупких материалов, путем обеспечения углов входа абразивных зерен в обрабатываемый материал, соответственно равных $10\text{--}30^\circ$ и 90° . Это согласуется с известными экспериментальными данными, полученными при исследовании традиционных методов струйно-абразивной обработки.

Экспериментально установлено, что наибольшая интенсивность съема материала при абразивной обработке затопленными струями достигается на торцовых поверхностях обрабатываемых мелких деталей, а в поверхностном слое обрабатываемой детали образуются положительные (сжимающие) напряжения (происходит наклеп). Впервые теоретически и экспериментально доказана эффективность применения сверхзвукового профилированного сопла Лаваля, обеспечивающего повышение качества и производительности обработки за счет достижения двойного эффекта обработки: увеличения скорости потока и количества абразивных зерен, инжектируемых в затопленную струю сжатого воздуха.

Разработаны обобщающие эмпирические математические модели параметров абразивной обработки деталей затопленными струями, которые в совокупности с полученными результатами аналитических исследований дают достаточно полное представление о технологических возможностях процесса и позволяют по критериям наименьшей шероховатости поверхности и наибольшей производительности определить рациональные параметры обработки. На основе проведенных теоретических и экспериментальных исследований разработано эффективное оборудование, представленное гаммой установок для осуществления отделочной абразивной обработки мелкогабаритных деталей затопленными струями. Их применение позволяет исключить трудоемкие ручные зачистные операции, повысить качество и производительность обработки за счет улучшения товарного вида обработанных деталей и одновременной обработки большого ко-

личества деталей, загруженных в рабочую камеру “навалом”. Установлено, что в процессе обработки происходит скругление кромок деталей, устраняются заусенцы, следы коррозии и разные неоднородности на обрабатываемых поверхностях, образуется однородная матовая поверхность с шероховатостью в пределах $R_a = 0,8 \dots 1,25$ мкм, с упрочняющим наклепом (сжимающими напряжениями глубиной 5 – 6 мкм). Определены оптимальные конструктивные и технологические параметры установок, позволяющие обоснованно назначать количество и размеры конструктивных элементов, а также устанавливать оптимальные режимы обработки, обеспечивающие максимальную производительность при заданной шероховатости поверхности. Разработанные эффективные технологии абразивной обработки мелкоразмерных деталей затопленными струями и оборудование для их осуществления внедрены в производство.

Ключевые слова: абразивная обработка, абразивное зерно, сопло Лавалья, математическая модель, качество обработки, шероховатость поверхности.

ABSTRACT

Andilahay A. A. The scientific fundamentals for effective finishing abrasive machining with submerged jets. – Manuscript.

The thesis for the degree of doctor of technical science, specialty 05.02.08 – Engineering Technology. – Odessa National Polytechnic University, Odessa, 2013.

The thesis deals with the urgent problem of efficient finishing treatment of small precision parts of small stiffness and complex configuration through the development and application of advanced methods of abrasion flooded streams and systems for its implementation, providing a significant increase in quality, performance and handling stability. Theoretically, it is proved that the effective area of application of this method is to treat the edges of parts, deburring and decrease of asperities on the treated surfaces.

A new mathematical model for determining the roughness of the surface and the performance of the abrasive jet machining flooded with the driving dynamics of abrasive grains in the material being processed, enabling an entirely new technology to reveal the basic laws of stock removal and shaping surfaces of the parts. The efficiency of the use of a supersonic shaped Laval nozzle, providing improved quality and processing performance by increasing the flow rate and the number of abrasive grains injected into the submerged jet of compressed air. Developed and implemented in production was efficient equipment for finishing of the abrasive machining of small parts submerged jets, which allows to eliminate the time-consuming manual stripping operations, improve quality, performance and handling stability by improving the presentation of machined parts for the simultaneous processing of a large number of parts with loading into the working chamber in “bulk”.

Keywords: abrasion, abrasive grain, a Laval nozzle, a mathematical model, the quality of treatment, the roughness of the surface.

Анділахай Олександр Олександрович

**НАУКОВІ ОСНОВИ ЕФЕКТИВНОЇ
ОЗДОБЛЮВАЛЬНОЇ АБРАЗИВНОЇ ОБРОБКИ
ДЕТАЛЕЙ ЗАТОПЛЕНИМИ СТРУМЕНЯМИ**

Автореферат

дисертації на здобуття наукового ступеня
доктора технічних наук

Підписано до друку 09.10.2013 р. Формат 60x90/16.
Ум. друк. арк. 2,25. Тираж 100 прим. Зам. №70

Надруковано в поліграфічному центрі
ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет»
Міністерство освіти і науки України
вул. Університетська, 7, м. Маріуполь, 87500
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи
ДК № 3729 від 15.03.2010 р.