

*Новіков Ф. В.
Анділахай О. О.*

ОСНОВИ СТРУМИННО-АБРАЗИВНОЇ ОБРОБКИ ДРІБНИХ ДЕТАЛЕЙ

Монографія

Харків. Вид. ХНЕУ, ім. С. Кузнеця, 2014

УДК 621.924.9

ББК 34.637

Н 73

Рецензенти: докт. техн. наук, професор кафедри "Технологія машинобудування та металорізальні верстати" Харківського національного технічного університету "ХПІ" *Сизий Ю. А.*; докт. техн. наук, професор кафедри "Теоретична механіка та деталі машин" Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка, академік транспортної академії України *Коломієць В. В.*; канд. техн. наук, провідний інженер Державного підприємства Харківський машинобудівний завод "ФЕД" *Рябенков І. О.*

Рекомендовано до видання рішенням вченої ради Харківського національного економічного університету імені Семена Кузнеця.

Протокол №7 від 24.02.2014 р.

Авторський колектив: докт. техн. наук, професор Новіков Ф. В. - вступ, розділи 1 - 3; докт. техн. наук, доцент Анділахай О. О. - розділи 4 - 7, висновки.

Новіков Ф. В.

Н73 Основи струминно-абразивної обробки дрібних деталей : монографія / Ф. В. Новіков, О. О. Анділахай. - Х. : Вид. ХНЕУ ім. С. Кузнеця, 2014. - 348 с. (Укр. мов.)

Наведено результати досліджень процесу струминно-абразивної обробки дрібних деталей. Визначено технологічні можливості процесу з точки зору забезпечення якості та продуктивності обробки. Обґрунтовано основні напрями його ефективного застосування, які полягають в обробці кромки деталей, усуненні задирок і зменшенні мікронерівностей на оброблюваних поверхнях. Розроблено практичні рекомендації щодо конструювання та застосування високопродуктивних установок для реалізації процесу струминно-абразивної обробки дрібних деталей.

Рекомендовано для студентів інженерних та економічних спеціальностей вищих навчальних закладів, а також для фахівців і керівників підприємств, які підвищують свою кваліфікацію.

ISBN 978-966-676-539-3

УДК 621.924.9

ББК 34.637

© Новіков Ф. В.
Анділахай О. О.
2014

Вступ

На сучасному етапі машинобудування має достатньо великий арсенал технологій оздоблювальної обробки деталей машин. Однак операції із зачищення дрібних точних деталей (масою до 3 г) малої жорсткості й складної конфігурації залишилися не механізованими, досить часто здійснюються вручну й потребують нових технологічних рішень. Це обумовлено, в першу чергу, низькою ефективністю застосування в даних операціях прогресивних методів оздоблювальної струминно-абразивної обробки, тому що, з одного боку, через значні сили, що прикладаються до деталей, відбувається їхня деформація, а з іншого боку, ці методи не технологічні, оскільки абразивним потоком руйнуються сопла, що потребує частої їх заміни й призводить до нестабільності процесу обробки. Тому в даній роботі запропоновано принципово новий метод абразивної обробки, здійснюваний за допомогою струменів стисненого повітря, затоплених абразивною суспензією, оскільки при цьому забезпечується збереження (довговічність) сопел, через які подають стиснене повітря, і стабільність процесу обробки. Сутність 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 забезпечувалося збереження 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 на сьогодні 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 вирішення проблеми підвищення якості, продуктивності й стабільності обробки потребує 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 і зношування. Однак це не відображає закономірностей формування па-

раметрів якості обробки й потребує застосування нових підходів, заснованих, насамперед, на положеннях теорії різання матеріалів, які визначають фізичну сутність процесу знімання матеріалу й дозволяють обґрунтувати умови істотного підвищення якості та 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 та 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. Вирішення даної проблеми є актуальним як для науки, так і для розвитку вітчизняного машинобудування.

У роботі здійснено оцінювання технологічних закономірностей формування параметрів якості у випадках струминно-абразивної обробки з позиції теорії різання матеріалів з урахуванням умов переходу від процесу пластичного деформування матеріалу до процесу різання абразивними зернами. Теоретично на основі критерію найменшої енергоємності обробки обґрунтовано умови підвищення якості та продуктивності абразивної обробки деталей затопленими струменями, які полягають в обробці кромek заготовок, усуненні задирок і зменшенні мікронерівностей на оброблюваних поверхнях. Розроблено математичну модель визначення шорсткості поверхні й продуктивності абразивної обробки деталей затопленими струменями з урахуванням динаміки руху абразивних зерен в оброблюваному матеріалі. Теоретично обґрунтовано можливість підвищення якості та продуктивності абразивної обробки затопленими струменями деталей, виготовлених із пластичних і крихких матеріалів, шляхом забезпечення кутів входу абразивних зерен в оброблюваний матеріал, що дорівнюють відповідно $10 - 30^\circ$ і 90° . Доведено ефективність застосування надзвукового профільованого сопла Лавалю, що забезпечує підвищення якості та продуктивності обробки. Розроблено науково обґрунтовані принципи проектування високопродуктивних установок для здійснення абразивної обробки деталей затопленими струменями.

Результати досліджень використовуються в навчальному процесі на кафедрі техніки та технологій Харківського національного економічного університету під час вивчення дисциплін "Системи технологій у машинобудуванні", "Основи технологічних систем" та ін.

Розділ 1. Найбільш істотні проблеми оздоблювальної обробки дрібних деталей і шляхи їх вирішення

1.1. Аналіз технологічних можливостей методів оздоблювальної обробки деталей

Технологія оздоблювальної обробки деталей зернистим абразивом характеризується широкими можливостями в порівнянні з відомими методами абразивної обробки. Особливо привабливою є можливість обробки деталей малої жорсткості. До деталей малої жорсткості відносять майже всі деталі приладобудування й оптико-механічного виробництва, а також ряд тонкостінних, легкодеформованих деталей з інших галузей виробництва, обробка яких жорстким інструментом призводить до втрати необхідної точності геометричної форми. Разом із тим збільшення випуску товарів народного споживання, одержуваних пресуванням або штампуванням і віднесених до деталей складної конфігурації, значною мірою гальмується відсутністю високопродуктивних методів одержання необхідної якості поверхонь, які піддаються надалі гальванічному й лакофарбовому покриттям. Округлення гострих кромek і видалення задирок, які утворюються на деталях після операцій обробки різанням, наприклад, після обробки на токарних автоматах, є не менш складним і актуальним завданням для забезпечення високої продуктивності обробки.

На рис. 1.1 показана номенклатура деталей, які потребують видалення задирок, округлення гострих кромek, створення чистої поверхні за умови збереження початкової геометричної форми й розмірів. За даними ВНДІАШ [89], більше 80 % трудомісткості фінішних операцій обробки лопаток і дисків парових та газових турбін виконується вручну. Нормативи трудомісткості на округлення кромek на робочих дисках турбін становлять залежно від розміру деталей від 4 до 20 годин на один диск. Тому проблемі механізації операцій видалення задирок і округлення кромek приділяється серйозна увага у світовій практиці: створені європейський і японський комітети, у які входить ряд машинобудівних фірм. За даними цих комітетів, витрати на видалення задирок становлять від 5 до 30 % виробничих витрат.



Рис. 1.1. Номенклатура деталей, які підлягають обробно-зачисній обробці

Обстеження близько 400 машинобудівних фірм США (дані журналу *Production*) показало, що витрати на видалення задирок і округлення кромek становлять від 10 до 40 %. Наведена на рис. 1.2 схема демонструє різноманіття методів оздоблювальної обробки деталей.

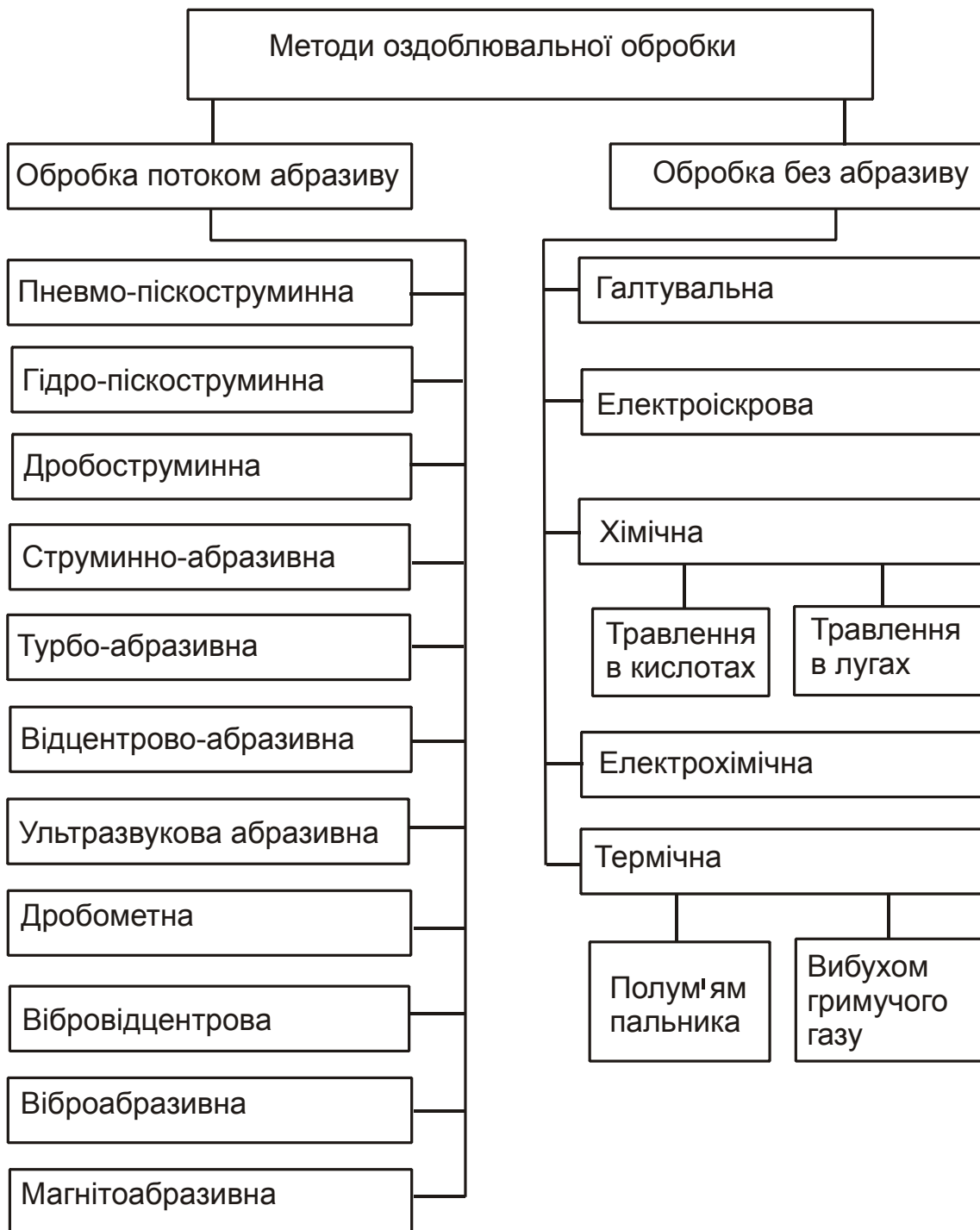


Рис. 1.2. **Методи оздоблювальної обробки деталей** [7]

Певні труднощі становить механізація обробки дрібних деталей малої жорсткості в умовах великосерійного багатомоделного ви-

робництва. Так, дотепер у приладобудуванні, оптико-механічній, радіо- й електротехнічній промисловості застосовується піскоструминна обробка й зачищення плоских деталей із застосуванням шліфувальної стрічки. Ці операції малопродуктивні, трудомісткі, виснажливі, викликають травматизм у працівників і внаслідок свого кустарного характеру не забезпечують стабільної якості обробки.

Більш продуктивними є механізовані способи, такі, як зачищення абразивними кругами, прокатування між валками. Ці способи застосовуються головним чином для обробки плоских деталей із найбільшим габаритним розміром 20 – 100 мм і забезпечують очищення від окалини й надання поверхням товарного вигляду тільки на площинах.

Серед широко розповсюджених методів зачисної обробки металевих деталей значне місце посідають хімічний, електрохімічний, термічний, а також комбіновані різновиди цих способів обробки. Фізична сутність електрохімічного методу полягає в анодному розчиненні металу оброблюваної деталі в електроліті. Застосування електроліту, який є агресивним середовищем, обумовлює аналогічні недоліки електрохімічного методу й стримує його поширення у виробництві. Травлення в агресивних середовищах – усунення з поверхні деталей окисної плівки, окалини, слідів корозії – виконується за допомогою агресивних розчинів на базі сірчаної, азотної й соляної кислот, лужних розчинів. Для одержання рівномірного очищення по всій поверхні в агресивні розчини додають різні інгібітори корозії, які гальмують процес окислювання вже очищених ділянок металу, не знижуючи швидкості усунення корозії. Інгібітори корозії вибирають безпосередньо для певних агресивних розчинів.

Хімічне очищення характеризується значною продуктивністю, простотою встаткування й здійснення процесу, можливістю обробки поверхонь деталей складної конфігурації. Недоліками є необхідність рясного промивання деталей від залишків агресивних розчинів, для чого потрібна велика кількість промивної води; необхідність нейтралізації або регенерації відпрацьованих розчинів. Окалина на поверхні високовуглецевої сталі являє собою три шари, у тому числі два шари окислів і одного шару закису: верхнього – Fe_2O_3 , середнього – Fe_3O_4 , і нижнього шару – Fe . В окалині, яка перебуває на поверхні легованих сталей, разом з тим, утримуються ще й окисли легувальних елементів (до 3 %). Окалина у своїх шарах містить до 50 % окислів Fe_2O_3 , а також Fe_3O_4 і до 80 % Fe .

Для різних марок сталей залежно від хімічного складу використовують різні кислоти. Для травлення низьколегованої й вуглецевої сталей використовують, як правило, розчин сірчаної кислоти. Травлення листа високого сорту, а також листів і гарячекатаних смуг з нержавіючої сталі виконують водяними розчинами сірчаної, соляної або азотної кислот у різних комбінаціях і в різних концентраціях. Водяний розчин кислоти контролюється наступним чином. Отриманий розчин перемішують, потім із глибини ємності відбирають пробу кислототривкою склянкою, наприклад, свинцевою. У відібраній пробі вимірюють щільність за контрольованої температури. Виходячи з цього, визначають щільність розчину. З отриманої проби відбирають 10 мл розчину й додають по краплях концентрований лужний розчин до появи зеленого кольору. За витратою лужного розчину і його питомою вагою визначають вміст кислоти.

Агресивна рідина повинна перевірятися кожні 3 години, а результати перевірок заноситися в журнал. Якість поверхні заготовок перевіряється візуально. Добре оброблена поверхня повинна мати чисту поверхню сталевого кольору. Окалина повинна бути витравлена повністю. У разі виявлення дефектів аналізуються причини їхнього виникнення і виконується необхідне коректування режиму травлення.

Очищення поверхонь травленням у сумішах концентрованих кислот забезпечує задовільну обробку поверхонь у важкодоступних місцях [89]. При цьому відкривається можливість практично повної автоматизації або механізації процесу. Однак ряд недоліків, таких як: низька інтенсивність процесу травлення (за відсутності інгібіторів корозії), який локалізується, насамперед, на відносно чистих фрагментах поверхонь і приводить до травлення поверхонь деталі, що не мають окалини, окісної плівки, дрібних дефектів; агресивність і токсичність травильних розчинів, які потребують спеціальних умов експлуатації, обмежує його широке застосування. Нерідко травлення поєднується зі знежиренням, особливо якщо використовується розчин сірчаної кислоти за температури 60 °С.

За останні 10 – 15 років одержав визнання метод безперервного усунення окалини з поверхні металу, наприклад, листового прокату й смуг за допомогою дробометних і дробоструминних апаратів за різними схемами. Однак застосування методу стримується високим рівнем шуму, який перевищує допустимий санітарними нормами рівень 80 дБ. Видалення товстого шару окалини з металеві поверхні тонколистового й ве-

ликосортного прокату вуглецевих і конструкційних сталей виконується очищенням за допомогою молотків із пневмоприводом з наступною обробкою дротовими щітками. Зазначена послідовність не забезпечує якісного усунення окалини – це стосується в основному нижнього шару, крім того не створює умов для виявлення поверхневих дефектів прокату. Цю схему слід використовувати за умови достатньо чистої вихідної поверхні або в тих випадках, коли вимоги, висунуті до якості, невисокі, тобто допускаються невеликі дефекти на поверхні.

Останнім часом на металургійних підприємствах видалення окалини з поверхні прокату здійснюється газополум'яним методом. Його суть полягає в нагріванні поверхні смуги газовими пальниками з вигином смуги в межах пружної деформації, завдяки чому окалина обсипається з розтягнутих шарів криволінійної поверхні. При цьому шари переміщуються, виконуючи сканувальний рух. Усунення дефектів з поверхні прокату можна здійснювати й такими способами, як вогневе й електродно-дугове очищення, очищення на обдирних верстатах, а також стругання на поздовжньо- й поперечностругальних верстатах, фрезерування та ін.

Ручне газополум'яне зачищення застосовується наступним чином. Листовий метал перед газополум'яним зачищенням розміщують на стелажках. Окалина й інші домішки усуваються з поверхні листів металевими щітками й бойками пневматичних молотків. Перш ніж розпочати зачищення поверхонь, контролюють розміри й маркування металу. Зовнішні дефекти виявляють візуально й обводять крейдою. Після видалення (виправлення) виявлених дефектів розпочинають газополум'яне зачищення. Запалений газополум'яний пальник розміщується під кутом близьким 90° до оброблюваної поверхні. Після нагрівання металу до температури почервоніння пальник повертають на кут, що приблизно дорівнює 30° , і для інтенсифікації процесу подають кисень. Оскільки в процесі газополум'яного зачищення утворюються продукти горіння металу, їх видаляють шкребками. Дефекти зачищають уздовж напрямку прокату, починаючи з кромки. При цьому процес газополум'яного зачищення здійснюється безупинно. Отримані в процесі обробки канавки перекиваються, що викликає утворення гострих гребенів. Після газополум'яного зачищення поверхня листового прокату піддається повторному візуальному контролю на наявність напливів, нерівностей, на задовільний розвал борозен. Це дозволяє виключити дефекти, які можуть виникнути в процесі прока-

тування в наступному переділі. Обробка випалюванням гострих кромок у високотемпературному полум'ї пальника забезпечує оплавлення задирок і гострих кромок.

Очищення абразивними кругами – широко розповсюджений метод обробки товстолистого прокату, литих заготовок, зварних виробів. Даний метод має ряд переваг порівняно з обробкою металу травленням, одним із яких є виключення дефектів, пов'язаних із наявністю в агресивному середовищі втрат якісного металу. У процесі виробництва слябів, а також сортового прокату (крім того, прокату нержавіючої або легованої сталі) використовується метод обробки абразивними кругами, що є різновидом обробки металу ручним механізованим інструментом з використанням абразивного круга. Суть методу в тому, що на поверхні металу, покритого окалиною, виконують підрізування шарів окалини змійкою або іншим візерунком абразивним кругом із кроком 100 мм. Однак даний метод порівняно з іншими методами має декілька істотних недоліків. Головними з них є невисока продуктивність, пов'язана з тим, що значними виявляються втрати високоякісного металу і мала величина площі металу з усунутою окалиною. Очищення ж тонколистового прокату, а також виробів малої жорсткості з використанням даного методу неможливе, тому що через обмежене тепловідведення виникають припікання, а через малу товщину й жорсткість прокату – наскрізні прорізи.

Очищення також здійснюють із використанням механізованого інструмента, наприклад, металевих щіток, що обертаються, пристосувань для обробки абразивними стрічками, кругів для обробки абразивними шліфувальними стрічками, кругів з пелюстками зі шліфувальної стрічки, молотків із пневматичним або електричним приводом тощо, які полегшують роботу шліфувальних пристосувань. Зачищення круглими металевими щітками ефективно в процесі підготовки поверхонь до зварних швів, але неефективно у випадку видалення окалини. При цьому оброблювана поверхня не очищається повною мірою від корозії й може виявитися гладенькою, але забрудненою змащеннями та ін. Істотним недоліком є обмежена дія на важкодоступні ділянки поверхні, через що вони повинні піддаватися попередній обробці вручну. У процесі очищення механізованим ручним інструментом слід не допускати грубої шорсткості поверхні, а також гострих кромок, які повністю не перекриваються лакофарбовими й тим паче гальванічними покриттями необхідної товщини.

З іншого боку, у процесі використання металевих щіток необхідно не допускати обробки залишків окалини до полірованого стану, тому що це може погіршувати схоплювання покриття з поверхнею. Пневматичні молотки слід застосовувати для зварювальних швів з метою видалення флюсу після зварювання. Використання ручного й механічного інструменту вимагає попереднього видалення товстих шарів окалини й слідів корозії, при цьому необхідно усунути помічені плями олії, змащення й бруд.

Незважаючи на певну ефективність застосування механізованого інструменту порівняно з очищенням ручним інструментом, все-таки найбільш прогресивною є струминно-абразивна обробка, тому що обробка ручним і механізованим інструментом приводить до більших значень шорсткості й відхилення від правильної геометричної форми оброблюваних поверхонь. Тому для одержання такої ж якості обробки як під час використання струминно-абразивного методу, потрібне застосування декількох механізованих інструментів, що, безумовно, призводить до зниження економічних показників використовуваної технології.

Феромагнітне порошкове очищення широко представлене в патенто-ліцензійних [70], а також у літературних [4; 5] джерелах. У процесі магнітно-абразивної порошкової обробки деталь розміщують між двома полюсами електромагніту, а в зазор, що утворився, подають абразивний порошок, який має магнітні властивості. Як правило, матеріал оброблюваної деталі не повинен мати магнітних властивостей. Феромагнітні абразивні частки, притягаючись до полюсів електромагніту й один до одного, орієнтуються уздовж магнітних ліній найбільшим виміром, завдяки чому їх найбільш гострі вершини повернені у бік оброблюваної поверхні. У цьому випадку створюються передумови для ефективною обробки, однак сили, які утримують зерна в бажаній позиції (за рахунок створення магнітного поля), достатньо малі, тому даний метод застосовується під час полірування циліндричних поверхонь. Видалення окалини з дроту, смуги або листового прокату потребує значно більших зусиль, ніж це може створити магнітне поле. У зв'язку із цим сила притискання абразивного порошку до оброблюваної поверхні забезпечується механічним притисканням, а магнітні сили забезпечують щільний стан абразивного порошку. Недоліком даного методу видалення окалини є орієнтація абразивних зерен відносно оброблюваної поверхні тупими вершинами.

Технологія струминно-абразивної обробки поверхонь відома кілька десятків років. Перша інформація про струминно-абразивну обробку з'явилася вже в 1960 – 1970-ті роки, але певний час її важко було довести до використання у виробничих умовах. Поширення цей метод набув в останньому десятилітті. Струминно-абразивна обробка використовується в тих випадках, коли необхідно з невеликими витратами, якісно й ефективно виконати обробку поверхні з метою очищення від окалини, лакофарбових покриттів, слідів корозії та ін. Публікації останніх років свідчать про неухильне зростання інтересу розробників нових технологій і устаткування до створення методів оздоблювальної обробки поверхонь деталей потоком вільного абразиву. Особливе місце серед них посідає струминна обробка зернистими матеріалами (абразивними частками). У зв'язку із цим метою даної роботи є розробка й оптимізація нового процесу струминно-абразивної зачисної обробки деталей складної конфігурації й малої жорсткості, вивчення й установлення основних закономірностей процесу та механізму формоутворення поверхонь деталей, розробка устаткування для здійснення процесу й оптимізація його конструктивних параметрів, а також впровадження розробленого устаткування у виробництво.

Обробка деталей потоком абразивних часток може досягатися такими шляхами як:

обробка абразивною суспензією [22; 35; 37; 38; 47; 50; 52; 58; 59];

пневмо-піскоструминна обробка [39 – 45; 137 – 139];

пневмо-гідро-піскоструминна обробка [83; 90].

Для обробки абразивною суспензією застосовують рідинно-абразивні струминні установки, які можна класифікувати за величиною робочого тиску, за способом подачі абразивного матеріалу, а також за видом носія абразивних часток. За першою ознакою розрізняють установки двох типів, які використовують високий тиск – 1 ... 10 МПа й низький тиск 0,5 ... 0,6 МПа. Установки високого тиску застосовуються для попередньої обробки відносно великих деталей, вони характеризуються більшими габаритними розмірами (рис. 1.3). Установка має два баки абразивної суспензії, завдяки чому забезпечується практично безперервна обробка деталей. Ці баки розташовані на столі під сопловим апаратом. Після вмикання установки стиснене повітря подається в сопловий апарат і до розподільника 4. Через розподільник 4 стиснене повітря подається в

один із баків (за схемою на рис. 1.3 у правий бак). Одночасно клапан 5 включають для забирання суспензії із правого бака, клапан 2 закривають

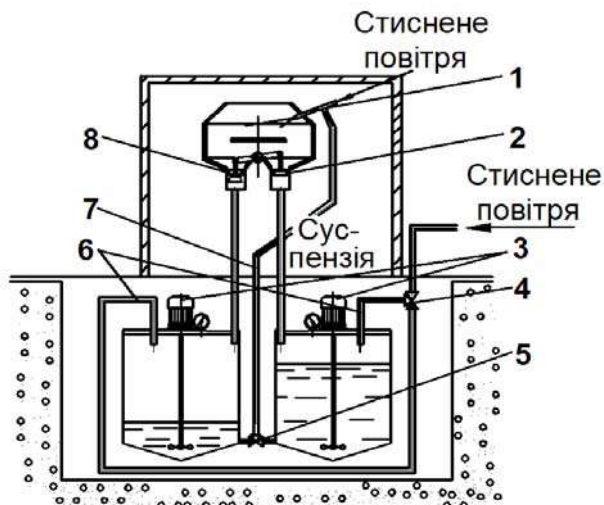


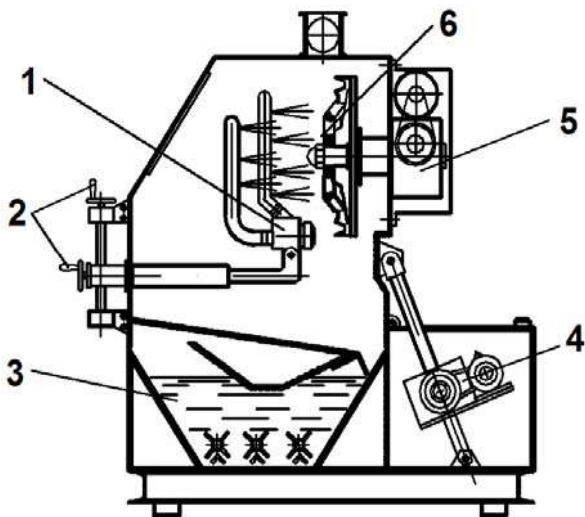
Рис. 1.3. Установка для струминно-абразивної обробки деталей з виштовхувальними баками, що діють по черзі

Умовні позначення: 1 – сопловий апарат; 2 – клапани; 3 – електродвигуни для перемішування суспензії; 4 – розподільник стисненого повітря; 5 – клапан почергового забирання суспензії; 6 – повітропровід; 7 – трубопровід для подачі суспензії; 8 – зливальні клапани.

для створення надлишкового тиску в правому баку, а клапан 8 відкривають для зливання суспензії самотпливом у лівий бак. Завдяки цьому суспензія подається до соплового апарата й прискорюється потоком стисненого повітря. На думку авторів, установка забезпечує високу продуктивність обробки й економічність процесу. Однак не можна не визнати неминучості втрат машинного часу на заміну сопел, які піддаються інтенсивному зношуванню від абразивної суспензії, що прокачується через сопла, а також витрат на виготовлення сопел та їх часту заміну.

Установки низького тиску використовуються для обробки деталей середніх і відносно малих розмірів. Як правило, установки містять сопловий апарат і стіл для розміщення оброблюваних деталей [114] (рис. 1.4). Живлення здійснюється стисненим повітрям промислової пневмережі. На базі цієї конструкції автором роботи [114] створені установки, до числа яких увійшли модифікації із самоочищенням суспензії (рис. 1.4), з механізованим завантаженням і зніманням оброблюваних деталей, а також для обробки пресформ. Залежно від способу подання абразиву струминні установки, які працюють під тиском до 0,6 МПа, можуть бути розподілені на дві групи: установки, у яких суспензія подається під тиском з ємності через сопла на оброблювані деталі [56; 64], а також установки, у яких подача абразиву з бака до сопла здійснюється за рахунок ежекції [36; 43; 48; 51].

Відомі два різновиди енергоносіїв, застосовуваних у процесі струминно-абразивної обробки – це газоподібні (як правило, використовується



**Рис. 1.4. Установа
для струминно-абразивної
обробки деталей**

Умовні позначення: 1 – сопловий апарат; 2 – пристрій переміщення й фіксації струминного апарата; 3 – бак з абразивною суспензією; 4 – механізм відведення оброблюваної деталі із зони обробки; 5 – механізм обертання оброблюваної деталі; 6 – пристосування для встановлення оброблюваної деталі.

нього середовища й необхідності евакуації відпрацьованого піску або дробу. Однак метод не знайшов широкого застосування у зв'язку з тим, що для одержання "сухого льоду" необхідно підтримувати температуру 18°C і тиск 2 – 3 МПа.

Широке застосування в промисловості (як в Україні, так і за кордоном) знаходять установки для рідинно-абразивної обробки, що працюють на стисненому повітрі. Вони виготовляються у вигляді шаф, часто оснащуються допоміжними пристроями для завантаження й вивантаження оброблюваних деталей, транспортерами, пристосуваннями для миття й сушіння. На основі багаторічної експлуатації рідинно-абразивних установок деякі автори [44; 46] прийшли до висновку про доцільність обробки дрібних деталей складної форми струминними апаратами з ручним керуванням [137; 138]. Подібні установки випускаються фірмами *Abrasive Developments* і *Filghments* [139]. Струминна обробка деталей, розміще-

ся стиснене повітря) й рідкі (як правило, використовується вода). У процесі обробки деталей за допомогою стисненого повітря на пікоструминних апаратах забезпечується достатня якість поверхні, однак рясне пило-відділення стало причиною заборони застосування цього способу без спеціальних заходів захисту.

Фірмою *Lockheed-California* [102] була випробувана обробка металевих виробів порошком із твердої вуглекислоти – "сухого льоду", яка характеризується достатньою твердістю. При цьому досягалося не тільки очищення поверхонь металевих виробів, але й створення на поверхні алюмінію необхідної шорсткості, що забезпечує надалі міцне зчеплення з нанесеним шаром захисного покриття. Основною перевагою методу є виключення забруднення навколиш-

них на поворотному столі, забезпечується рухливим сопловим апаратом, керованим оператором вручну. Рідинно-абразивні установки, як правило, мають бак для збору й підготовки абразивної суспензії, яка транспортується трубопроводами до соплового апарата. У роботах [32; 34; 41; 44; 45; 47] запропоновані конструкції соплових апаратів, що забезпечують рівномірну подачу абразивної суспензії на деталі.

У загальному вигляді струминна обробка має ряд переваг, до яких можна віднести наступні:

- низький рівень шуму (10 – 20 дБ);

- універсальність (можливість обробки різних деталей складної конфігурації, а також деталей з різних матеріалів без переналагодження);

- легкість плавного регулювання інтенсивності процесу;

- низькі експлуатаційні витрати;

- можливість поєднання видалення задирок з видаленням окалини, окісної плівки, старих покриттів і забруднення;

- можливість багаторазового використання абразиву;

- можливість простого поділу деталей і абразивного матеріалу;

- можливість обробки деталей у важкодоступних місцях.

Завдяки своїм унікальним технологічним можливостям струминно-абразивна обробка одержує все більше застосування в машинобудуванні, металургії, приладобудуванні й інших галузях промисловості. Технологічні можливості традиційних схем струминно-абразивної обробки:

- видалення задирок;

- округлення гострих кромки і радіусів;

- видалення окалини й гострих радіусів;

- підготовка до люмінесцентного контролю;

- зменшення шорсткості поверхні;

- підготовка поверхні під гальванічні й лакофарбові покриття;

- видалення нагару;

- видалення гальванічних і лакофарбових покриттів;

- видалення дефектного поверхневого шару;

- виведення окремих поверхневих дефектів;

- створення масляних кишень для утримання змащення на поверхні,

- нанесення антифрикційних і антикорозійних покриттів;

- одержання матової поверхні, що приховує відхилення від правильної геометричної форми.

Відомо, що струминно-абразивна обробка використовується винятково як чорнова обробка. Лише в роботах Проволоцького О. Є. [114] наведено результати дослідження струминно-абразивної обробки для створення мікрорельєфу, який збільшує маслоємність поверхні до двох разів за однакової висоти мікронерівностей.

Необхідно зауважити, що можливість видалення часток металу окремими абразивними зернами дозволяє використовувати як гідроабразивну, так і струминно-абразивну обробку для формоутворення регулярного або частково-регулярного мікрорельєфу. У цьому плані струминно-абразивна обробка ефективніша від гідроабразивної обробки з наступних причин (див. рис. 1.4). Гідроабразивна обробка потребує для свого здійснення наявності гідросистеми, обов'язковими елементами якої повинні бути насос, а також бак, трубопровід і запірна арматура. Гідросистема не повинна мати важкопрохідних ділянок, а швидкість середовища має бути достатньою для того, щоб абразивні частки не осідали в непротічних обсягах. Найважливішою проблемою гідроабразивної обробки є інтенсивне абразивне зношування каналів сопел. Зношування можна зменшити, якщо використовувати спеціальні матеріали, стійкі до абразивного зношування. Однак за невеликої вихідної стійкості (60 ... 180 хвилин) її збільшення в 2 – 3 рази не вирішує проблеми кардинально.

1.2. Основні закономірності струминно-абразивної обробки

З огляду на широке практичне використання струминно-абразивної обробки у науково-технічній літературі їй приділено значну увагу, у результаті чого розкрито фізичну сутність і виявлено потенційні можливості обробки (рис. 1.5 [122]). Це дозволило науково обґрунтовано підходити до вибору оптимальних умов обробки. Значний внесок у розробку й подальше вдосконалення струминно-абразивної обробки зробив професор Проволоцький О. Є. [107 – 114]. Зокрема, ним встановлено, що висока швидкість абразивних часток у процесі струминно-абразивної обробки не є безумовно корисною властивістю струменя. Причому зниження швидкості абразивних часток, яке досягається, як правило, за рахунок зменшення тиску стисненого повітря практично неможливе без побічних ефектів, тому що висока швидкість витікання потоку разом з обробкою необхідна для ежекції абразивного порошку з бункера до сопла.

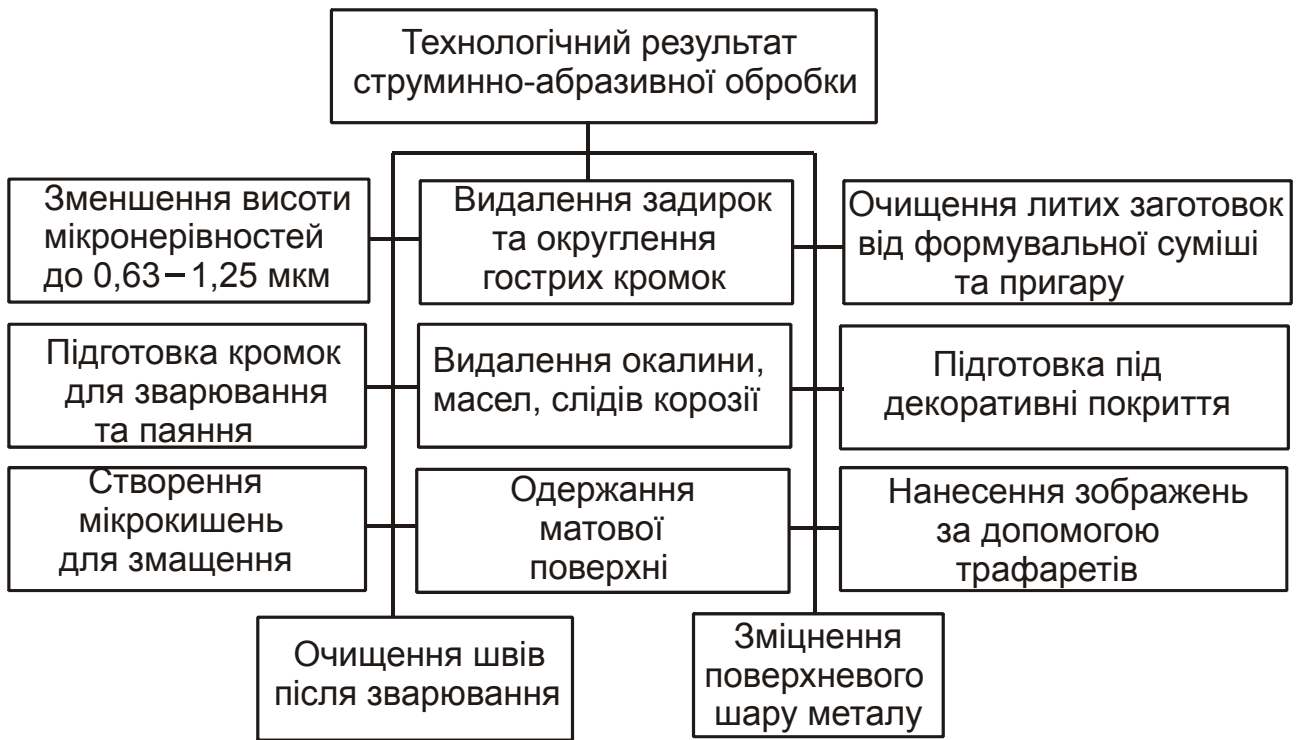


Рис. 1.5. Технологічний результат процесів оздоблювально-зачисної струминно-абразивної обробки

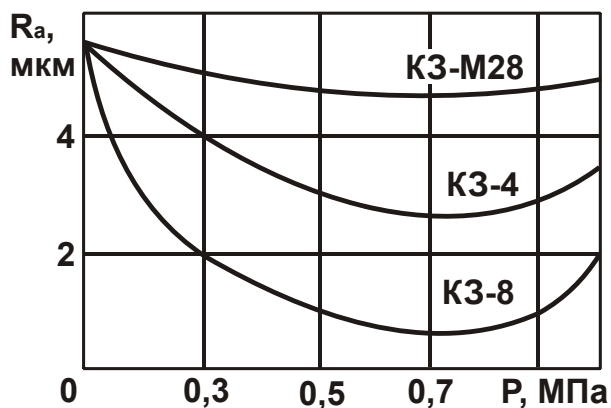


Рис.1.6. Залежність шорсткості поверхні R_a від тиску перед соплом P і зернистості абразиву

Умови обробки: час обробки 60 с; відстань від зрізу сопла до оброблювальної поверхні 40 мм; кут атаки струменя до оброблюваної поверхні $\alpha = 40^\circ$.

Установлено, що висока швидкість абразивних зерен у ряді випадків небажана, оскільки відносно великий запас кінетичної енергії абразивних зерен спричиняє одержання відносно великої глибини слідів на оброблюваній поверхні, тобто погіршує її шорсткість [108; 109] порівняно з вихідною шорсткістю оброблюваної поверхні. Так, з рис. 1.6 видно, що за вихідної шорсткості поверхні $R_a = 5,5$ мкм зі збільшенням тиску повітря до значень 0,7 – 0,8 МПа шорсткість зменшується до $R_a = 0,6$ мкм, а потім збільшується. Отже, збільшення

швидкості абразивних зерен приводить до збільшення висоти мікронерівностей. Цим підтверджується те, що формування мікрорельєфу повер-

хні відбувається спочатку в результаті знімання найбільш виступних нерівностей, у тому числі задирок і гострих кромок, а потім настає другий етап, який полягає в рівномірному інтенсивному зніманні матеріалу на всій оброблюваній поверхні.

Із цього ж рисунка видно, що зернистість абразиву необхідно вибирати залежно від вихідної шорсткості поверхні. У прямій залежності від цих параметрів перебуває і якість поверхонь. Тому наведені в роботі [109] дані про збільшення шорсткості поверхні в разі збільшення зернистості абразиву й тиску повітря є помилковими саме через неправильність вибору цих параметрів. Так, на рис. 1.6 показане зменшення шорсткості поверхні залежно від тиску повітря.

Необхідно зауважити, що висока швидкість абразивних зерен приводить до інтенсивного зношування каналів сопел, через які проходить абразивний матеріал. У свою чергу, це приводить до підвищеної витрати абразивного порошку, стисненого повітря й фільтрів для очищення повітря.

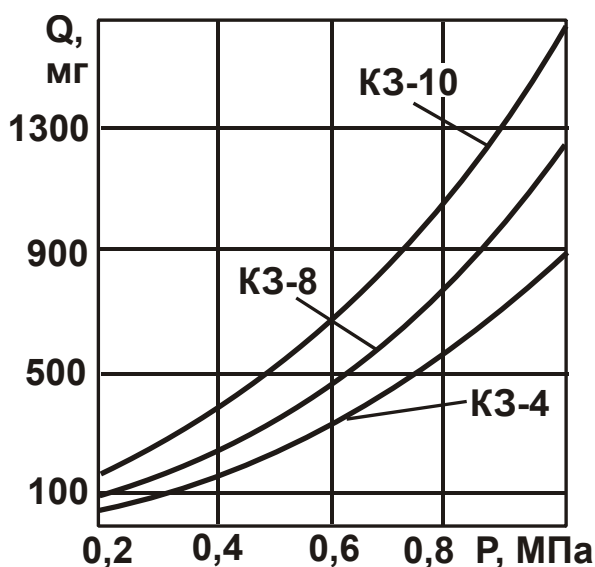


Рис. 1.7. Залежність знімання матеріалу Q

від тиску P перед соплом

Умови обробки: час обробки 60 с; відстань від зрізу сопла до оброблюваної поверхні 40 мм; кут атаки струменя до оброблюваної поверхні $\alpha = 40^\circ$; абразивний матеріал: КЗ-4, КЗ-8, КЗ-10 – карбід кремнію зелений зернистістю відповідно 40, 80, 100 мкм.

Досліджуючи процес очищення деталей від пригару, професор Проволоцький О. Є. у роботі [110] установив, що за високої швидкості руху абразивні зерна пронизують плівку пригару й, зустрічаючись із металевою основою, дробляться на більш дрібні гранули. Масовим дробленням абразивних зерен пояснюється різке зниження інтенсивності знімання матеріалу в процесі обробки. Експериментально встановлено, що продуктивність обробки значно залежить від тиску стисненого повітря (рис. 1.7).

На рис. 1.8 [114] показана залежність інтенсивності руйнування пригару від швидкості потоку абразиву. Як впливає з рис. 1.9 [114], продуктивність об-

робки зростає з підвищенням концентрації абразиву до насичення суспензії. У процесі подальшого збільшення концентрації продуктивність обробки стабілізується, а потім процес витікання струменя припиняється через блокування соплового каналу абразивним матеріалом.

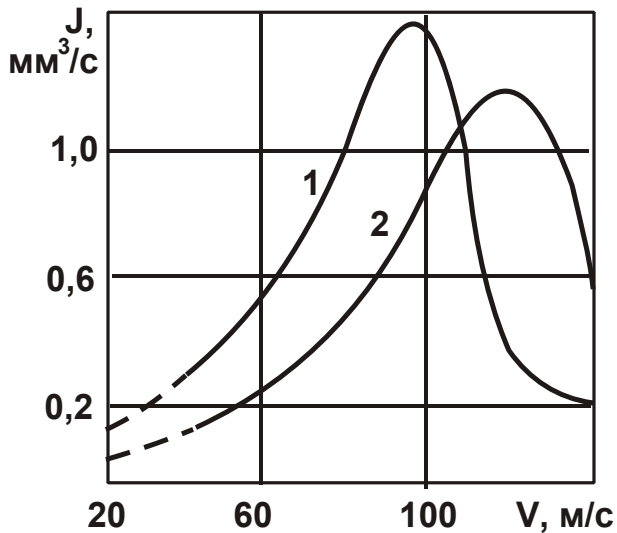


Рис. 1.8. Залежність інтенсивності руйнування пригару J від швидкості потоку абразиву V

Умовні позначення: 1 – обробка абразивом 54С; 2 – обробка абразивом 24А.

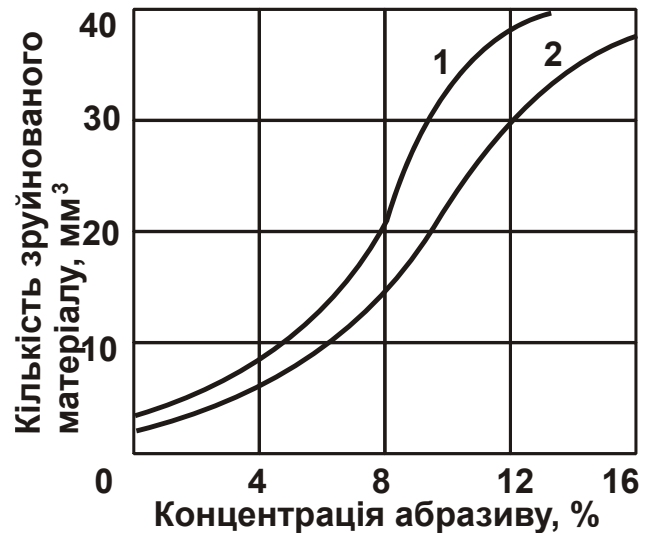


Рис. 1.9. Залежність кількості зруйнованого матеріалу від концентрації абразиву в одиниці об'єму суспензії

Умовні позначення: 1 – обробка абразивом 54С; 2 – обробка абразивом 24А.

На рис. 1.10 наведені графіки залежності кількості знятого матеріалу від кута нахилу струменя, побудовані за експериментальними даними. У процесі проведення експериментів змінювалися кут і зернистість абразиву. Із графіків видно, що зона ефективних кутів нахилу струменя під час обробки перебуває в межах $25 - 50^\circ$ (рис. 1.10, зона $\uparrow \downarrow$) незалежно від зернистості абразиву.

У роботі [53] встановлено, що знімання матеріалу максимальне при куті атаки 45° . Відхилення максимуму знімання при куті 45° (рис. 1.10) пояснюється руйнуванням поверхні переважно в результаті процесу мікрорізання (сила різання більша при куті атаки до 45°). На думку професора Проволоцького О. Є. [114], при кутах атаки, менших ніж 25° , коли абразивні зерна недостатньо впроваджуються в оброблювану поверхню, справджується відношення глибини впровадження зерна h до радіуса r

округлення його різальної кромки ($h / r \leq 0,5$) і продуктивність процесу обробки зменшується.

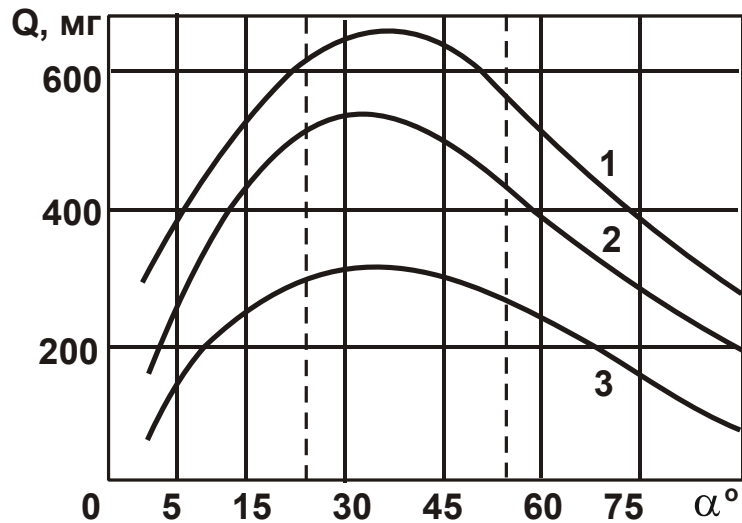


Рис. 1.10. Залежність продуктивності обробки Q від кута α між віссю струменя й площиною та від зернистості абразиву

Умовні позначення: 1 – абразив 80 мкм; 2 – абразив 60 мкм; 3 – абразив 40 мкм.

Шорсткість поверхні залежно від кута атаки в межах від 0 до 90° змінюється за екстремальною залежністю (див. рис. 1.10). Найменші її значення досягаються при зміні кута атаки в межах $25 - 50^\circ$. Однак така закономірність, на думку автора [114], справджується під час обробки пластичних матеріалів. У разі обробки крихких матеріалів, наприклад, скла, встановлено, що найбільш інтенсивне руйнування мікрорельєфу

поверхні спостерігається при кутах атаки струменя в межах $60 - 90^\circ$ (рис. 1.11). Це свідчить про те, що під час обробки металів та їхніх сплавів, а також інших матеріалів, які характеризуються помітними пластичними властивостями, слід використовувати косе зіткнення гідроабразивного струменя з поверхнею, а в процесі обробки крихких матеріалів – пряме зіткнення.

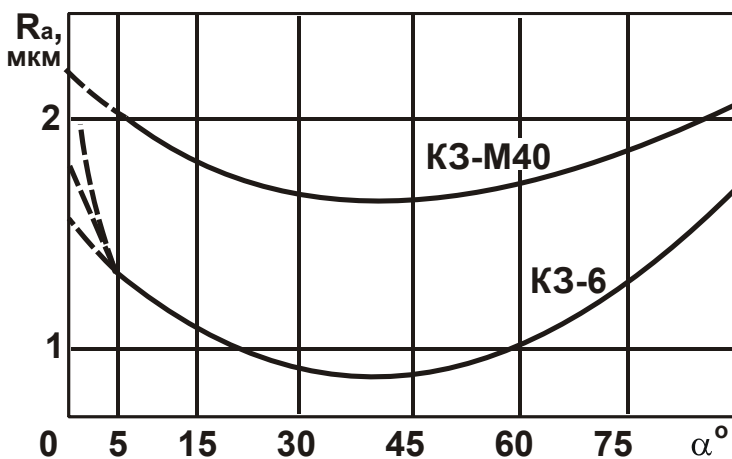


Рис. 1.11. Залежність шорсткості поверхні R_a від кута α атаки абразивного струменя

Характер розташування кривих на рис. 1.12 (для вихідного значення шорсткості поверхні $R_a = 2,3$ мкм) підтверджує думку про те, що пластичні метали руйнуються переважно за рахунок мікрорізання й повторного пластичного відтискування, а крихкі матеріали – за рахунок інтенсивного розвитку крихких тріщин. Оскільки інтенсивність руйнування матеріалу гідроабразивним потоком залежить від його пластичних властивостей, то слід очікувати, що в міру зниження цих властивостей буде зростати частка пружного відновлення й зменшуватися шорсткість обробленої поверхні. Експерименти щодо обробки матеріалів із різними пластичними властивостями підтверджують сказане (див. рис. 1.12) і дають підставу думати, що під час гідроабразивної обробки кольорових металів і сплавів, а також обробки незагартованих сталей для досягнення малої шорсткості поверхні ($R_a = 0,5 - 0,1$ мкм) необхідно призначати 4 – 5 технологічних переходів, зменшуючи зернистість абразиву для кожного наступного переходу в 1,5 – 2 рази. Загартовані сталі й тверді сплави можна обробляти за 2 – 3 переходи, причому зернистість абразиву для чергового переходу може бути зменшена в 2 – 3 рази. Як видно з рис. 1.13, під час обробки абразивом із зернистістю понад 60 мкм спостерігається іс-

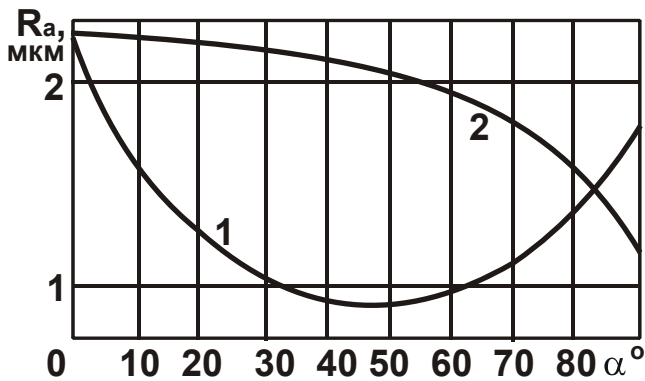


Рис. 1.12. Залежність шорсткості поверхні від кута α атаки струменя в процесі обробки пластичних (1 – сталь 45) і крихких (2 – сталь 10) матеріалів [114]

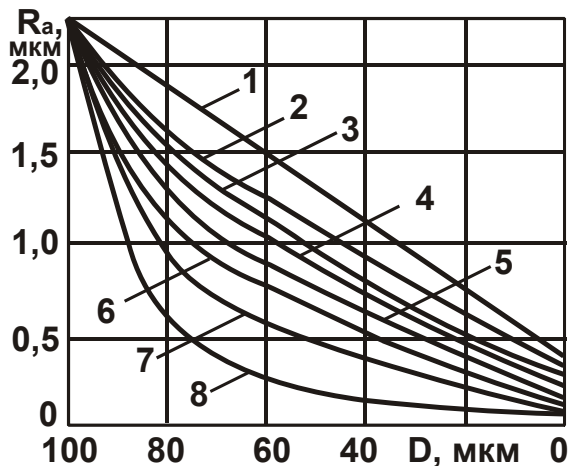


Рис. 1.13. Залежність шорсткості поверхні R_a залежно від зернистості абразиву D й пружно-пластичних властивостей матеріалу [114]

Умовні позначення: 1 – свинець; 2 – алюміній; 3 – мідь; 4 – латунь; 5 – сталь ШХ15 (сира); 6 – сталь Х18Н9Т; 7 – сталь ШХ15 (загартована); 8 – твердий сплав ВК8.

тичні метали руйнуються переважно за рахунок мікрорізання й повторного пластичного відтискування, а крихкі матеріали – за рахунок інтенсивного розвитку крихких тріщин. Оскільки інтенсивність руйнування матеріалу гідроабразивним потоком залежить від його пластичних властивостей, то слід очікувати, що в міру зниження цих властивостей буде зростати частка пружного відновлення й зменшуватися шорсткість обробленої поверхні. Експерименти щодо обробки матеріалів із різними пластичними властивостями підтверджують сказане (див. рис. 1.12) і дають підставу думати, що під час гідроабразивної обробки кольорових металів і сплавів, а також обробки незагартованих сталей для досягнення малої шорсткості поверхні ($R_a = 0,5 - 0,1$ мкм) необхідно призначати 4 – 5 технологічних переходів, зменшуючи зернистість абразиву для кожного наступного переходу в 1,5 – 2 рази. Загартовані сталі й тверді сплави можна обробляти за 2 – 3 переходи, причому зернистість абразиву для чергового переходу може бути зменшена в 2 – 3 рази. Як видно з рис. 1.13, під час обробки абразивом із зернистістю понад 60 мкм спостерігається іс-

тотний вплив пластичних властивостей матеріалу на шорсткість поверхні. Зі зменшенням зернистості абразиву до 10 мкм і нижче цей вплив проявляється слабкіше. Очевидно, зниження енергії імпульсу до значень 0,0005 – 0,0001 Дж є тим енергетичним бар'єром, за якого якому потік абразивних зерен не в змозі активно руйнувати поверхню твердого тіла. Замість знімання матеріалу шляхом мікрорізання й крихкого руйнування відбувається лише слабе пластичне відтискування. Із сказаного випливає, що кут атаки істотно впливає на продуктивність обробки й шорсткість поверхні.

На продуктивність процесу й шорсткість обробленої поверхні впливає також довжина струменя (в інтервалі довжини струменя від 100 до 20 мм). Гідроабразивний струмінь із великою щільністю інтенсивно гальмується після виходу із сопла, тому твердження, що найкращі результати [29 – 32] отримані при довжині струменя 70 – 80 мм, недостатньо обґрунтовані. Так, аналіз графіків, наведених на рис. 1.14а, показує, що продуктивність обробки зі збільшенням довжини струменя зменшується, причому залежність $Q = f(L)$ відрізняється від лінійного закону.

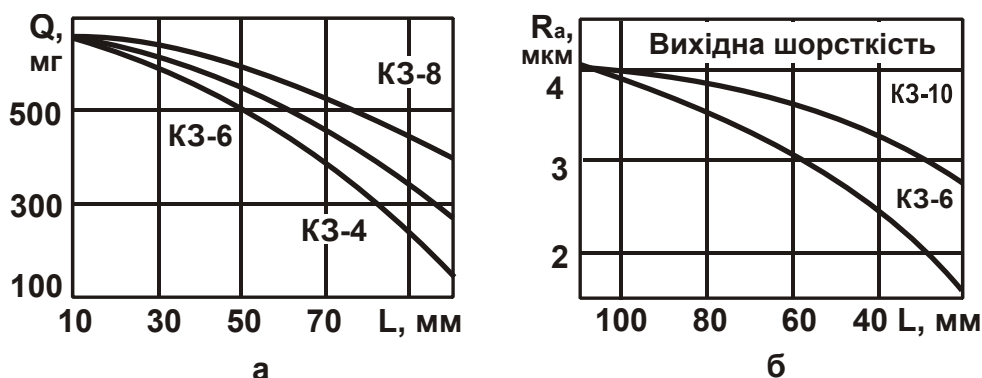


Рис. 1.14. Залежність продуктивності обробки Q (а) і шорсткості поверхні R_a (б) від довжини струменя L

Умови обробки: час обробки 60 с; тиск перед соплом $P = 0,8$ МПа; кут атаки струменя до оброблювальної поверхні $\alpha = 40^\circ$.

Задана шорсткість досягається тим швидше, чим менша довжина гідроабразивного струменя (рис. 1.14б). Із цього випливає, що в кожному конкретному випадку необхідно виконувати експериментальну перевірку. Наприклад, встановлено, що за струминного очищенні окалини оптимальним кутом атаки α струменя є кут, близький до 90° . Тверда й крихка окалина при малих кутах атаки майже не руйнується (рис. 1.15).

При цьому не можна не враховувати швидкості переміщення заготовки відносно струминного апарата.

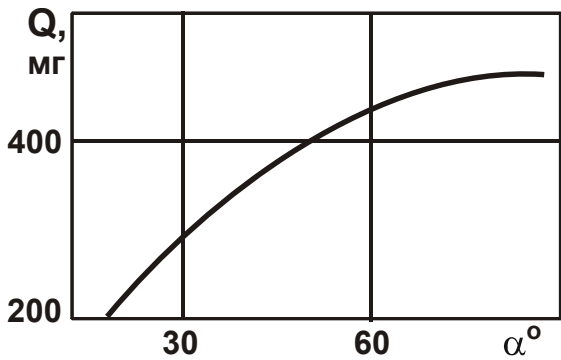


Рис. 1.15. Вплив кута α атаки струменя на інтенсивність руйнування окалини Q

Із наведеної на рис. 1.16 залежності між необхідним тиском повітря й швидкістю подачі листової заготовки випливає, що якісне очищення листів від окалини зі швидкістю 0,8 м/хв здійснюється за тиску повітря 0,5 МПа. Для забезпечення високої продуктивності очищення зі швидкістю 18 м/хв необхідно збільшувати тиск повітря до 1,0 МПа. Однак підвищення тиску повітря не є єдиною можливим методом підвищення продуктивності очищення.

Так, за стабільного тиску повітря 0,8 МПа, змінюючи кількість проходів (чисельність рядів сопел), одержують різну продуктивність очищення. Отже, найбільш ефективно обробку виконувати за тиском повітря 0,8 МПа [114] але можна переходити на менш інтенсивні режими.

Необхідно зазначити, що на практиці дещо рідше використовуються схеми струминної обробки деталей із зануренням їх у суспензію [114]. У цьому випадку, по суті, обробка здійснюється затопленими струменями

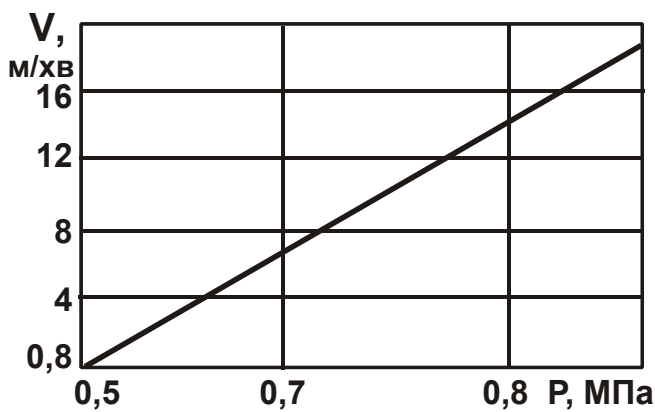


Рис. 1.16. Взаємозв'язок між тиском перед соплом P і швидкістю переміщення смуги V при очищенні від окалини

(рис. 1.17), що знижує ефективність їхнього впливу на оброблювану поверхню. Однак під час тонкого доведення деталей малої жорсткості така схема знаходить широке використання.

Відповідно до схеми, наведеної на рис. 1.17, технологічна ємність 1 відкритого або закритого типу на 70 – 80 % об'єму заповнюється гідроабразивною суспензією 2 з можливістю забезпечення зваженого стану зерен. У ємності

1 за допомогою спеціального настановного пристосування змонтовано поданий у вигляді ежекційного сопла струминний апарат 4, відносно якого на маніпуляторі 5 закріплена заготовка 6.

Обробка поверхні заготовки здійснюється за допомогою струменя стисненого повітря, затопленого в абразивній суспензії, що витікає зі

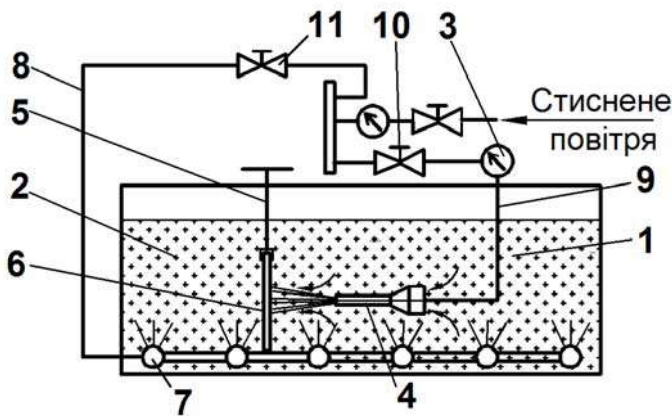


Рис. 1.17. **Схема струминної обробки деталей, затоплених в абразивну суспензію [130]**

струминного апарата. Струмені стисненого повітря ежектують абразивні зерна із суспензії й передають їм певний запас кінетичної енергії, достатній для виконання роботи (деформації оброблюваного матеріалу). Абразив у суспензії приводиться у зважений стан за допомогою барботажної системи 7, що живиться, як і струминний апарат, від одного джерела стисненого повітря,

яке подається гнучкими трубопроводами 8, 9 із дроселями 10, 11 до ежекційного сопла 4. Тиск повітря регулюють манометром 3.

Становлять інтерес результати експериментальних досліджень про швидкість руху абразивних зерен у різних середовищах, у тому числі й у воді [131]. Вони є особливо цінними для даної роботи, тому що дають можливість порівняти результати вимірювань швидкості в розроблюваному методі абразивної обробки затопленими струменями (рис. 1.18).

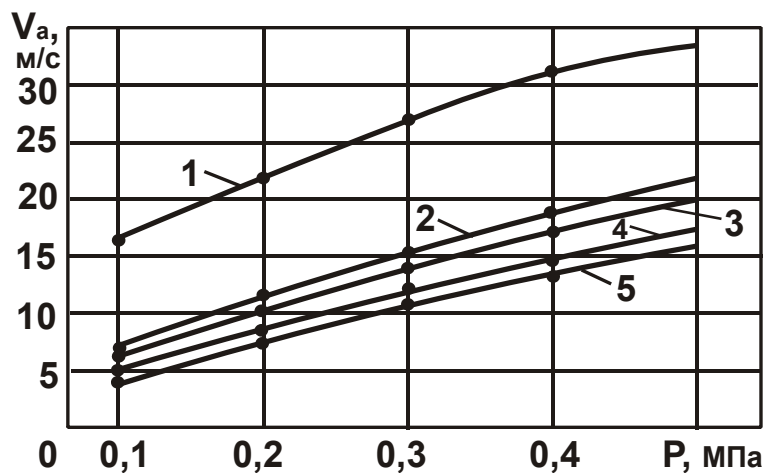


Рис. 1.18. **Залежність швидкості абразивних часток V_a від тиску стисненого повітря P у процесі витікання струменя в різні середовища**

Умовні позначення: 1 – на повітрі; 2 – у воді; 3, 4, 5 – у суспензіях з об'ємним співвідношенням абразиву і води 1:10, 1:5, 1:3 [132].

Із графіка, наведеного на рис. 1.18, видно, що швидкість руху абразивних зерен у повітрі в діапазоні, що цікавить дослідників, тобто в діапазоні тиску 0,4 – 0,5 МПа, на 30 % менша від швидкості руху в повітрі. Однак, як показали попередні експерименти, такої швидкості руху (10 – 15 м/с) цілком достатньо для виконання роботи різання, зминання, зсуву, стирання тощо у процесі обробки затопленими струменями. Втрату швидкості руху всього лише на 30 % автор роботи [130] пояснює тим, що струмінь стисненого повітря, затоплений у воді, тільки в перший момент її подачі сприймає опір води, після чого утворюється слутний потік, який незначною мірою протидіє витіканню струменя. Ще менший опір швидкості руху абразивних зерен у струмені виконує концентрація абразиву, що також є сприятливим чинником для застосування даного методу обробки у виробництві.

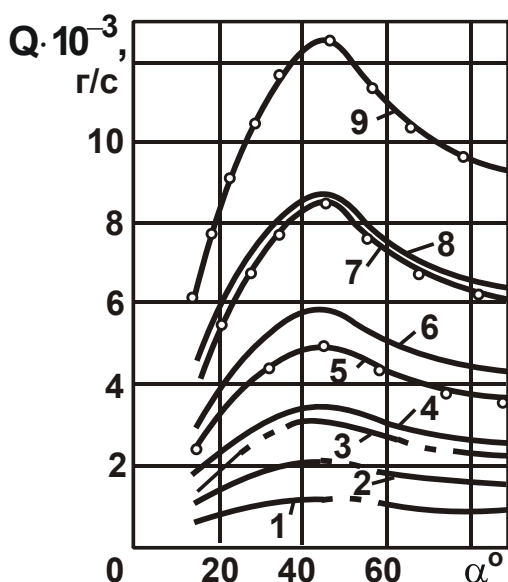


Рис. 1.19. Залежність масового знімання металу Q від кута атаки α [59]

Умови обробки: 1, 4, 5 – при $P_0 = 0,2$ МПа; 2, 6, 7 – при $P_0 = 0,3$ МПа; 3, 8, 9 – при $P_0 = 0,4$ МПа; --- 24А М20; — - 24А М63; —○— - 24А 10.

екстремумом. Зі збільшенням кута α від 15 до 40° ... 45°, тиску стисненого повітря від 0,3 до 0,5 МПа й зернистості абразиву від М20 до М10 (від 0,02 мм до 0,1 мм) продуктивність зростає, і при $\alpha = 43^\circ \dots 45^\circ$ досягає екстремуму, після чого спостерігається зменшення продуктивності, а при

У роботі [58] продуктивність обробки запропоновано оцінювати зніманням металу з оброблюваних контрольних зразків. Це обґрунтовується універсальністю й відносною простотою визначення даного параметра. Найважливішою його характеристикою є пропорційне зростання в часі. На рис. 1.19 [59] наведено залежність масового знімання металу Q від кута атаки α , тобто кута між віссю сопла, яке подає абразивний матеріал, та її проекцією на оброблювану поверхню, тиску стисненого повітря P_0 й зернистості абразивного порошку, який подається через сопло діаметром 2 мм. Як видно, знімання металу має характерну кривизну з більш-менш явно вираженим

куті $\alpha = 70^\circ \dots 90^\circ$ продуктивність змінюється незначно. Такого роду залежність зберігається в процесі обробки деталей незалежно від зернистості абразиву.

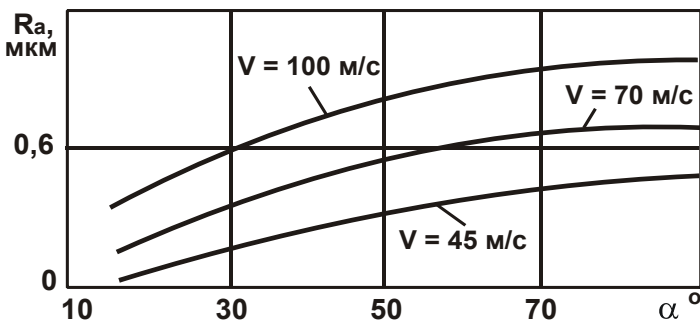


Рис. 1.20. Залежність шорсткості поверхні R_a від кута атаки α для різних значень швидкості руху абразивних зерен V [59]

У загальному випадку підвищення продуктивності обробки веде до збільшення висоти мікронерівностей. Тому дослідникам доводиться розв'язувати оптимізаційну задачу одержання максимальної продуктивності при заданій шорсткості. На рис. 1.20 [59] показано, що збільшення швидкості руху абразивних

часток веде до погіршення якості поверхні за показником "шорсткість". У зв'язку із цим схеми обробки, які характеризуються невисокою швидкістю руху зерен, але мають інші важливі переваги, можуть бути більш ефективними.

Аналіз рис. 1.21 і 1.22 [58] не дає повного однозначного уявлення про одержувану шорсткість, тому що за однакових умов, наприклад, швидкості – 50 м/с і радіуса зерен – 51,5 мкм, відповідно до графіка (рис. 1.22) шорсткість поверхні становить 0,7 мкм, а відповідно до графіка

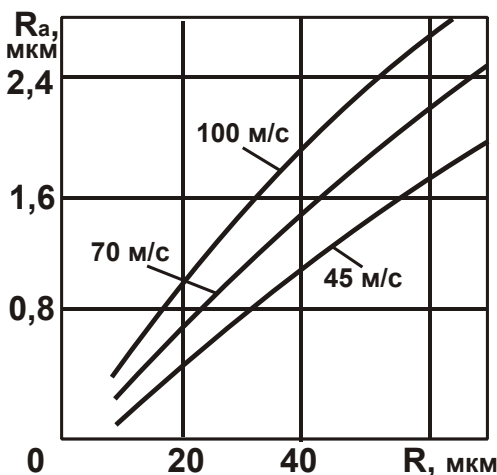


Рис. 1.21. Залежність шорсткості поверхні R_a від радіуса зерен R та швидкості їх руху [58]

на рис. 1.21, за цих же умов – 1,4 мкм. У роботі [59] формування мікрорельєфу поверхневого шару в процесі струминно-абразивної обробки автори досліджували у два етапи. Спочатку визначали шорсткість поверхні залежно від зернистості абразиву, при цьому вихідна шорсткість поверхні $R_a = 0,1 \dots 0,2$ мкм. На другому етапі досліджувалася залежність стану поверхні після струминно-абразивної обробки від вихідної шорсткості. При цьому обробка здійснювалася зі зменшенням вихідної шорсткості поверхні з $R_a = 0,1 \dots 0,3$ мкм до $R_a = 0,7 \dots 1$ мкм.

На думку автора роботи [58], процес утворення мікрорельєфу поверхні за струминно-абразивної обробки залежить від кількості зерен, які бомбардують одиницю площі поверхні. У разі збільшення площі оброблюваної поверхні буде збільшуватися час, необхідний для одержання необхідної шорсткості. На рис. 1.23 [58] наведені результати досліджень, отримані в процесі струминно-абразивної обробки порошком 63С63П (карбід кремнію зелений, розміром 630 мкм).

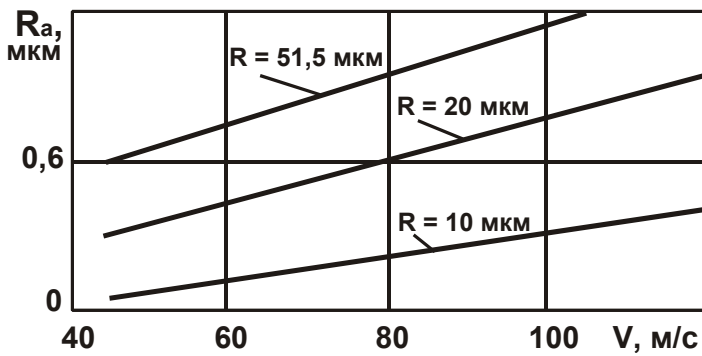


Рис. 1.22. Залежність шорсткості поверхні R_a від швидкості руху зерен V при їхньому радіусі 10; 20; 51,5 мкм і куті атаки $\alpha = 45^\circ$

бомбардують одиницю площі поверхні. У разі збільшення площі оброблюваної поверхні буде збільшуватися час, необхідний для одержання необхідної шорсткості. На рис. 1.23 [58] наведені результати досліджень, отримані в процесі струминно-абразивної обробки порошком 63С63П (карбід кремнію зелений, розміром 630 мкм).

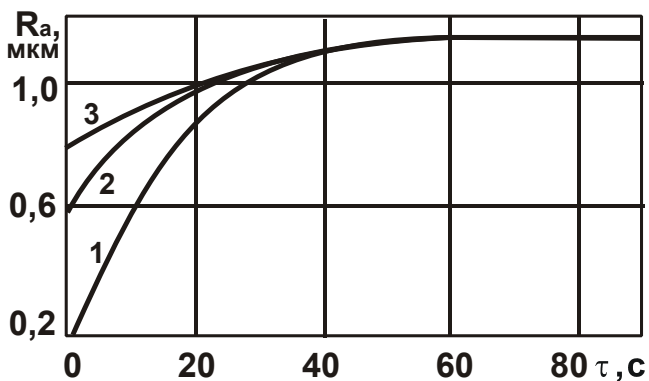


Рис. 1.23. Залежність шорсткості поверхні R_a від часу обробки τ
Умовні позначення: 1 – $R_{amax} = 0,2$ мкм; 2 – $R_{amax} = 0,6$ мкм; 3 – $R_{amax} = 0,8$ мкм; кут атаки $\alpha = 45^\circ$; $P_o = 0,4$ МПа; зернистість 63.

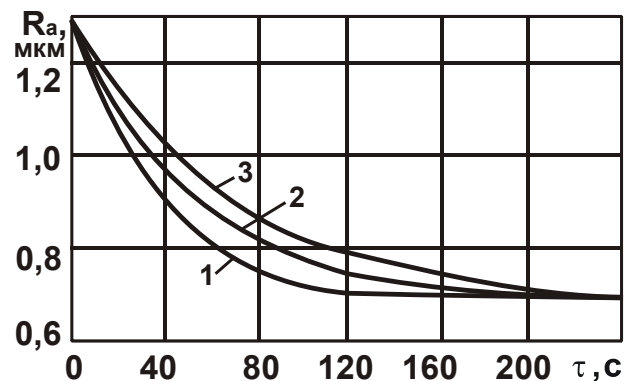


Рис. 1.24. Залежність шорсткості поверхні R_a від часу обробки τ
Умовні позначення: 1 – абразив 24А М40; $P_o = 0,4$ МПа; $\alpha = 45^\circ$; 2 – абразив 24А М50; $P_o = 0,25$ МПа; $\alpha = 45^\circ$; 3 – абразив 24А М63; $P_o = 0,2$ МПа; $\alpha = 32^\circ$.

Як видно, незалежно від вихідної шорсткості поверхні, висота мікронерівностей збільшується й стабілізується на рівні $R_a = 1,25$ мкм. З часом обробки мікропорошком М40 – М63 (40 – 63 мкм) шорсткість обробки R_a зменшується з 1,25 мкм до 0,7 мкм (рис. 1.24) [59]. Однак одержання однакової шорсткості в процесі обробки зі збільшенням тиску стисненого повітря, а отже й швидкості руху абразивних зерен, не узгоджується з попередніми результатами експериментів (див. рис. 1.20 – рис. 1.22), де

зі збільшенням швидкості руху зерен збільшується висота мікронерівностей. Графіки, наведені на рис. 1.25 [59], також не узгодяться з результатами, отриманими в попередніх експериментах: за вихідної шорсткості

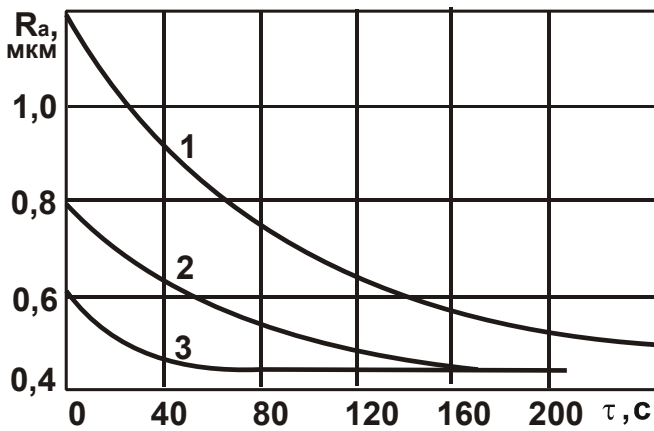


Рис. 1.25. Залежність шорсткості поверхні R_a від часу обробки τ при різній вихідній шорсткості поверхні $R_{a,вих}$

Умовні позначення: 1 – $R_{a,вих} = 1,2$ мкм; 24А М40; $P_o = 0,4$ МПа; кут атаки $\alpha = 45^\circ$; 2 – $R_{a,вих} = 0,8$ мкм; 24А М50; $P_o = 0,25$ МПа; кут атаки $\alpha = 45^\circ$; 3 – $R_{a,вих} = 0,6$ мкм; 24А М63; $P_o = 0,2$ МПа; кут атаки $\alpha = 32^\circ$.

$R_a = 1,25$ мкм і тиску стисненого повітря $P_o = 0,4$ МПа час стабілізації шорсткості поверхні становить 240 с, а на рис. 1.24, відповідно до наведеного графіка, стабілізація настає через 160 с. Це потребує уточнення отриманих результатів експериментальних досліджень.

На рис. 1.26 [66] показано, що зі збільшенням відстані між зрізом сопла й оброблюваною поверхнею параметр шорсткості R_z збільшується. На думку автора [66], це пов'язано зі зміною інтенсивності обробки внаслідок збільшення площі контакту й можливості розгону зерен

до більшого значення. Однак із наведених графіків випливає, що обраний діапазон зміни відстаней не перевищує значення віддалення зрізу сопла від оброблюваної поверхні, за якого відбувається зниження ефективності обробки.

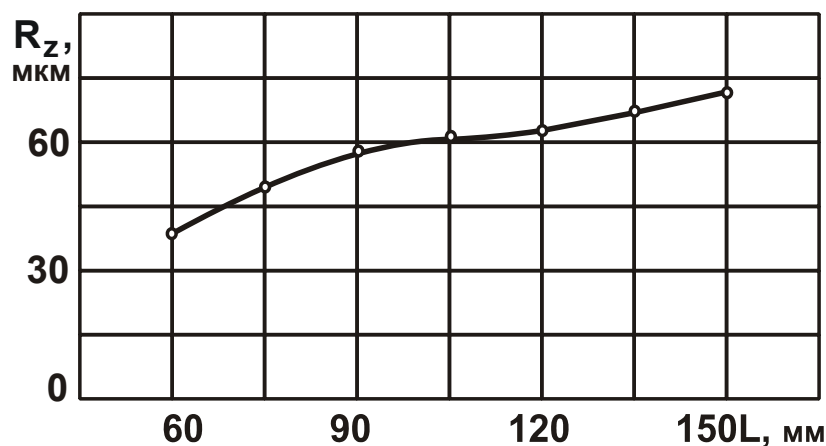


Рис. 1.26. Залежність шорсткості поверхні R_z від відстані L від сопла до поверхні

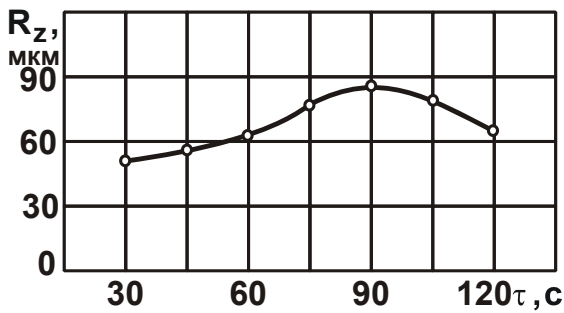


Рис. 1.27. Залежність шорсткості поверхні R_z від часу обробки τ [66]

У свою чергу, час струминно-абразивної обробки неоднозначно впливає на одержувану шорсткість обробленої поверхні R_z . Так, відповідно до експериментально встановлених залежностей (рис. 1.27 і 1.28), зі збільшенням часу обробки значення R_z спочатку збільшується, а потім зменшується. Автор пояснює це тим, що в процесі обробки відбувається змінання мікронерівностей, у результаті чого утворюється нова поверхня з меншою шорсткістю й пластично деформованим шаром.

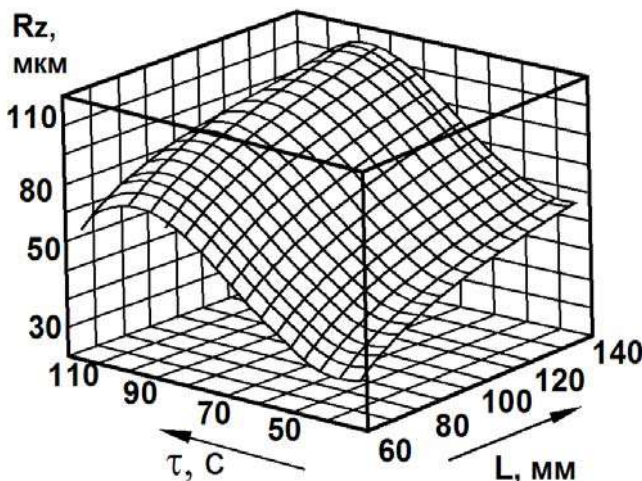


Рис. 1.28. Залежність шорсткості поверхні R_z від L і τ

Умовні позначення: L – відстань від зрізу сопла до оброблюваної поверхні, мм; τ – час обробки, с [66].

фрикційного матеріалу в кількостях, застосовуваних у даному способі, не здатні утворити суцільний шар покриття. Крім того, цей шар не здатний утриматися на поверхні обробки без застосування допоміжного технологічного середовища внаслідок динамічної дії газового струменя.

Оригінальне дослідження проведене Цигановським А. Б. [129]. Ним запропоновано спосіб визначення часток знятого металу безпосередньо струменем, який задає кінетичну енергію зернам, і абразивним супутнім потоком, що утворюється за межами ежекційної насадки. Принципова схема установки для визначення частки знятого металу, здійсненого

У свою чергу, час струминно-абразивної обробки неоднозначно впливає на одержувану шорсткість обробленої поверхні R_z . Так, відповідно до експериментально встановлених залежностей (рис. 1.27 і 1.28), зі збільшенням часу обробки значення R_z спочатку збільшується, а потім зменшується. Автор пояснює це тим, що в процесі обробки відбувається змінання мікронерівностей, у результаті чого утворюється нова поверхня з меншою шорсткістю й пластично деформованим шаром.

У роботі [22] наведена експериментально встановлена залежність глибини слідів абразивних зерен від розмірів абразивних зерен (рис. 1.29). Однак вона не логічна: за однакової швидкості удару 150 ... 160 м/с зерна з більшою масою повинні формувати сліди більшої глибини, а з рис. 1.29 випливає, що глибина слідів зі збільшенням розмірів абразивних зерен зменшується. Це дозволяє зробити висновок, що даний спосіб обробки не працездатний. Це пов'язано з тим, що частки анти-

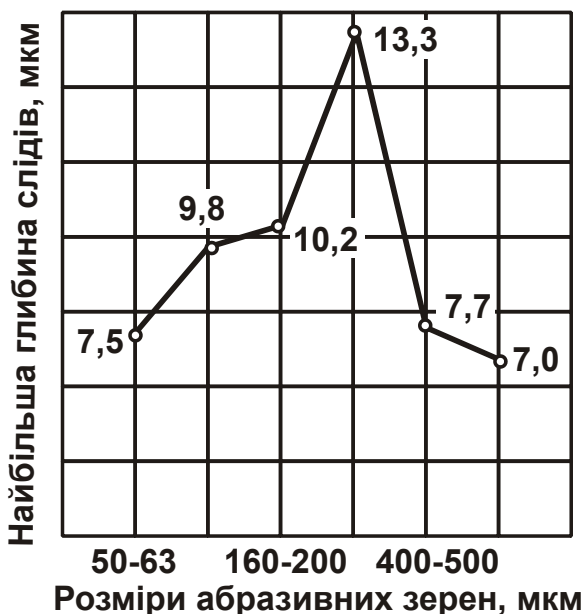


Рис. 1.29. Залежність глибини слідів абразивних зерен від їхнього розміру [22]

спутним потоком абразивної суспензії, наведена на рис. 1.30, де 1 – вентиль подання стисненого повітря; 2 – повітряний колектор; 3 – манометр; 4 – резервуар з водою; 5 – сопло; 6 – ежекційна насадка; 7 – барботер; 8 – екран; 9 – резервуар з абразивною суспензією. Автором роботи [129] показано, що спутний потік впливає на кінцевий результат обробки. Для визначення безпосередньої частки цих двох складових автор отримані результати зіставляє з результатами, які відображають загальне знімання металу в процесі обробки затопленими струменями.

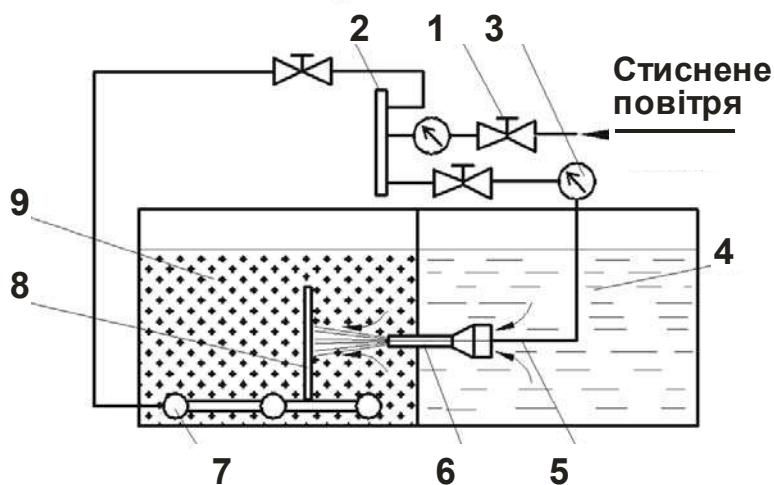


Рис. 1.30. Схема установки

Дослідження процесу струминно-абразивної обробки з використанням сопла з ежекційною насадкою здійснювалося з метою визначення частки знятого металу, здійсненого супутнім потоком абразивної суспензії, в загальному об'ємі знятого металу. Експериментально визначалася роль ежекційної насадки в одержанні кінцевого результату й у випадку значущої частки в сумарному зніманні металу обґрунтовувалася необхідність більш глибокого дослідження конструкції ежекційної насадки:

діаметра (рис. 1.31) [129], довжини, кута конуса, розташування відносно зрізу сопла, відношення діаметрів насадки та зовнішньої частини сопла.

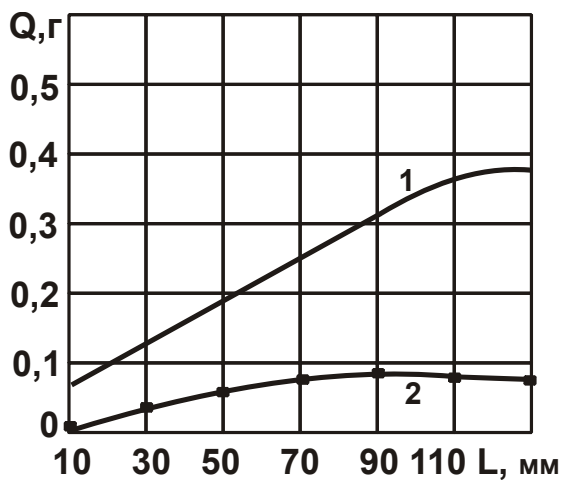


Рис. 1.31. Залежність знімання металу Q супутнім потоком від довжини струменя L

Умовні позначення: діаметр інжекційної насадки 10 мм (1) і 15 мм (2).

Розглянута схема є прогресивною порівняно з традиційними методами струминно-абразивної обробки, тому що дозволяє багаторазово використовувати абразивний матеріал, який знаходиться в камері, де здійснюється обробка, а також завдяки невеликим розмірам зерен порівняно з оброблюваними деталями спрощується відділення оброблюваних деталей від абразивного порошку. Проте головний недолік методу струминно-абразивної обробки – зношування ежекційної насадки – зберігається.

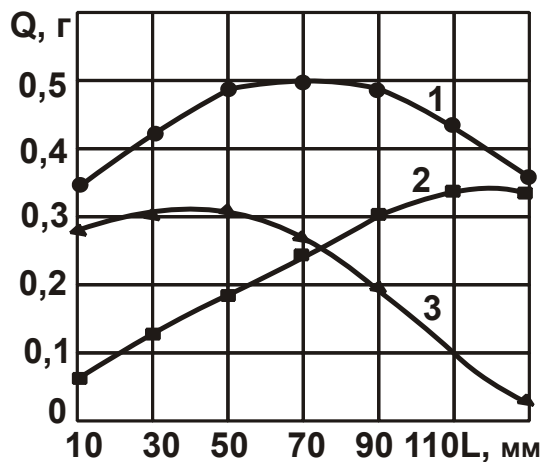


Рис. 1.32. Залежність знімання металу Q від довжини струменя

Умовні позначення: знімання металу: загальне (1); супутнім потоком (2); інжектіваним абразивом (3); діаметр інжекційної насадки – 10 мм [129].

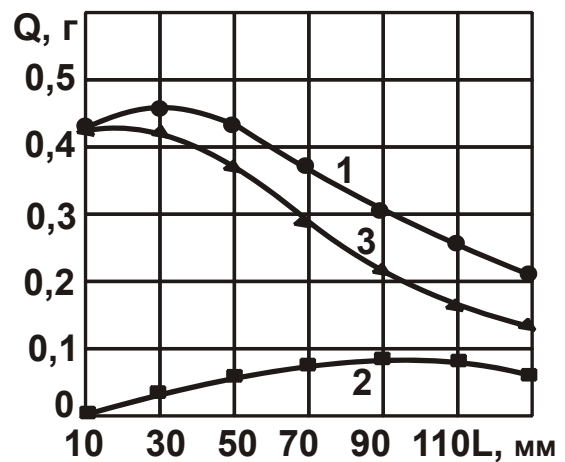


Рис. 1.33. Залежність знімання металу Q від відстані між зрізом сопла й деталлю L

Умовні позначення: знімання металу: загальне (1); супутнім потоком (2); інжектіваним абразивом (3); діаметр інжекційної насадки – 15 мм [129].

З рис. 1.32 і 1.33 випливає, що сумарне знімання металу становить суму металу, знятого інжектіваними абразивними зернами і супутнім по-

током. Найбільший рівень знімання металу інжектіваними зернами досягається на виході із сопла. При цьому супутній потік забезпечує мінімальне знімання металу, тому що ця ділянка струменя містить ядро струменя, яке обмежує інжекцію абразиву в струмінь із навколишнього робочого середовища. Із цього зроблено висновок про те, що сопло з інжекційною насадкою діаметром 10 мм більш ефективно. Слід зазначити, що рівень знімання металу за умови використання сопла з діаметром насадки 15 мм більший, оскільки приєднується більша кількість абразиву за рахунок більш високого коефіцієнта інжекції.

Однак суспензія, інжектівана соплом з діаметром інжектора 10 мм, набуває швидкості, значно більшої у зрізі, завдяки чому інжектуються більша кількість абразивного матеріалу з потоку на найбільш ефективній ділянці струменя.

Аналізуючи графіки, наведені на рис. 1.32, автор роботи [129] стверджує, що сумарне металознімання на відстані від зрізу сопла 130 мм забезпечується спутним потоком. Автор пояснює це тим, що на даній ділянці струменя відбувається його повне розсіювання, а обробка здійснюється тільки за рахунок спутного потоку. При цьому у випадку використання інжекційної насадки із внутрішнім діаметром 15 мм (див. рис. 1.33) кількість інжектіваних зерен більша, ніж у випадку з насадкою внутрішнім діаметром, що дорівнює 10 мм. Однак при цьому швидкість руху зерен менша.

Таким чином, кількість абразивних зерен, інжектіваних зі спутного потоку, менше. У результаті розсіювання струменя відбувається за більшої його довжини. Із цього зроблений висновок про те, що в сумарний результат супутній потік вносить значний вклад.

1.3. Аналіз струминних методів і конструкцій установок для оздоблювальної обробки деталей невеликих розмірів, низької жорсткості й складної просторової форми

В поточний час існує цілий арсенал струминно-абразивних установок, призначених для виконання найрізноманітніших операцій – від обробки стін будинків з метою видалення старих покриттів до оздоблювальної обробки деталей приладів з метою надання їм товарного вигляду. Як правило, установки для струминно-абразивної обробки містять

місткі ємності для заправлення їх абразивним порошком, тому що обробка може безупинно тривати доти, поки не закінчиться абразивний матеріал; сопловий апарат у вигляді пістолета; фільтри, що відокремлюють воду й олію, які утримуються в стисненому повітрі, і м'які трубопроводи, що забезпечують можливість маніпуляцій пневматичним пістолетом відносно оброблюваного об'єкта.

Для струминно-абразивної обробки використовуються також піско-струминні камери [11]. У камерах з достатньою щільністю вбудовані рукавички й оглядові вікна для керування сопловим апаратом пістолета й для контролю за ходом виконання технологічного процесу. На рис. 1.34 показаний загальний вигляд гами струминно-абразивних установок моделей АСО 150 і АСО 200.



Рис. 1.34. Струминно-абразивні установки моделей АСО 150 (а) і АСО 200 (б)

Струминно-абразивні установки моделей АСО 150 і АСО 200 з об'ємом абразивного матеріалу, що завантажується, відповідно 150 і 200 кг, призначені для очищення як внутрішніх, так і зовнішніх поверхонь від лакофарбових покриттів, окалини й продуктів корозії, різного роду забруднень, знежирення, а також для підготовки поверхонь під лакофарбові покриття під час ремонтних робіт. Вони оснащені керованим соплом, а також змінними соплами діаметрами 8 і 10 мм. Застосовується шліфувальний матеріал зернистістю від 40 (400 мкм) до 80 (800 мкм). Особливістю експлуатації цих та інших установок подібного типу є необхідна

умова використання сухого абразивного матеріалу, тому що ежекція абразивного матеріалу в струмінь стисненого повітря здійснюється завдяки ефекту сопла Вентурі, тобто підсмоктування абразивного матеріалу за рахунок розрідження в районі звуження каналу соплового апарата.

Істотним недоліком всіх струминно-абразивних установок є зношування каналів сопел, через які прокачується абразивний матеріал, тому що зі збільшенням діаметра каналу сопла на невелику величину його площа, а отже, й витрата абразивного матеріалу, збільшується за квад-



Рис. 1.35. Зовнішній вигляд установки моделі АСО 40Е

ратичною залежністю. Збільшення витрати стисненого повітря й абразивного матеріалу спричиняє зниження тиску в мережі й ефективності обробки. Більш мобільною для експлуатації є установка моделі АСО 40Е (рис. 1.35).

Конструкція цієї установки проста й тому надійна. У нижній частині ємності розміщена змішувальна камера для абразивного матеріалу й стисненого повітря. Для

приведення її в робочий стан достатньо в ємність засипати абразивний порошок, а до трійника в нижній частині ємності підключити стиснене повітря. Принцип роботи установки заснований на ежекції абразивного порошку в процесі проходження повітрям ділянки перед повітряним соплом. У разі подачі стисненого повітря за допомогою кульового крана через повітряне сопло з максимальною швидкістю потік створює в порожнині перед соплом розрідження, завдяки якому абразивний порошок з бункера трубопроводом подається в спеціальну порожнину, де змішується з потоком повітря й через пневматичне сопло у вигляді повітряно-абразивної суміші подається на деталь. Витрата абразивного порошку регулюється заслінкою. Інтенсивність обробки регулюється зсувом повітряного сопла в сопловому апараті.

На рис. 1.36 показаний вигляд піскоструминної установки моделі DBS 100 фірми CONTRACOR об'ємом 100 літрів, виробленої в Німеччині. Фірмою CONTRACOR виробляється гама установок BlastPack-25, -50, -100, -200. Піскоструминна установка моделі DBS 100 відрізняється наяв-

ністю високоефективного масловодовідділителя моделі САФ-3, що забезпечує високоякісне відділення масляного туману й вологи від стисненого повітря, яке подається із пневмомережі. Завдяки цьому забезпечується збереження сухої, знежиреної поверхні, якщо вона була такою в стані поставки на операцію. Ця властивість достатньо важлива для наступного фарбування або нанесення гальванічних покриттів. Слід зауважити, що практично завжди разом зі стисненим повітрям від компресора в магістраль подаються масляний туман і волога, які осідають на оброблюваній поверхні, у результаті чого виникає необхідність введення перед фарбуванням додаткової операції – знежирення. Тому струминно-абразивні установи, що випускаються серійно, не можуть забезпечити обробку дрібних деталей, тому що призначені в основному для зовнішніх робіт з великогабаритними виробами. У цьому аспекті більш прийнятними є струминно-абразивні (піскоструминні) камери, зовнішній вигляд однієї з яких наведений на рис. 1.37 і в іншому виконанні – на рис. 1.38 [8; 11; 12; 14].



Рис. 1.36. Піскоструминна установка

печується збереження сухої, знежиреної поверхні, якщо вона була такою в стані поставки на операцію. Ця властивість достатньо важлива для наступного фарбування або нанесення гальванічних покриттів. Слід зауважити, що практично завжди разом зі стисненим повітрям від компресора в магістраль подаються масляний туман і волога, які осідають на оброблюваній поверхні, у результаті чого виникає необхідність введення перед фарбуванням додаткової операції – знежирення. Тому струминно-абразивні устано-

вки, що випускаються серійно, не можуть забезпечити обробку дрібних деталей, тому що призначені в основному для зовнішніх робіт з великогабаритними виробами. У цьому аспекті більш прийнятними є струминно-абразивні (піскоструминні) камери, зовнішній вигляд однієї з яких наведений на рис. 1.37 і в іншому виконанні – на рис. 1.38 [8; 11; 12; 14].



Рис. 1.37. Зовнішній вигляд піскоструминної камери з робочим об'ємом 350 л з можливістю обробки вручну



Рис. 1.38. Зовнішній вигляд піскоструминної камери КАО-300 робочим об'ємом 0,3 м³

Умови обробки: витрата стисненого повітря від 0,2 до 1,2 м³/хв.

Піскоструминна установка призначена для струминно-абразивного очищення будь-яких поверхонь із керуванням вручну. Головною перевагою представленої установки є економічна витрата стисненого повітря, що не перевищує $1,3 \text{ м}^3/\text{хв}$. Камери цього типу забезпечують більш м'яке очищення поверхні порівняно з установками високого тиску, наприклад, моделі КАО-300-Н. Таким чином, розглянуте устаткування для обробки сухим абразивом неприйнятне для обробки дрібних деталей. У зв'язку із цим слід розглянути гідроабразивне устаткування, яке забезпечує обробку абразивною суспензією. Принципові схеми відомих струминних установок для обробки виробів абразивною суспензією, що перемішується лопатами, наведено на рис. 1.39.

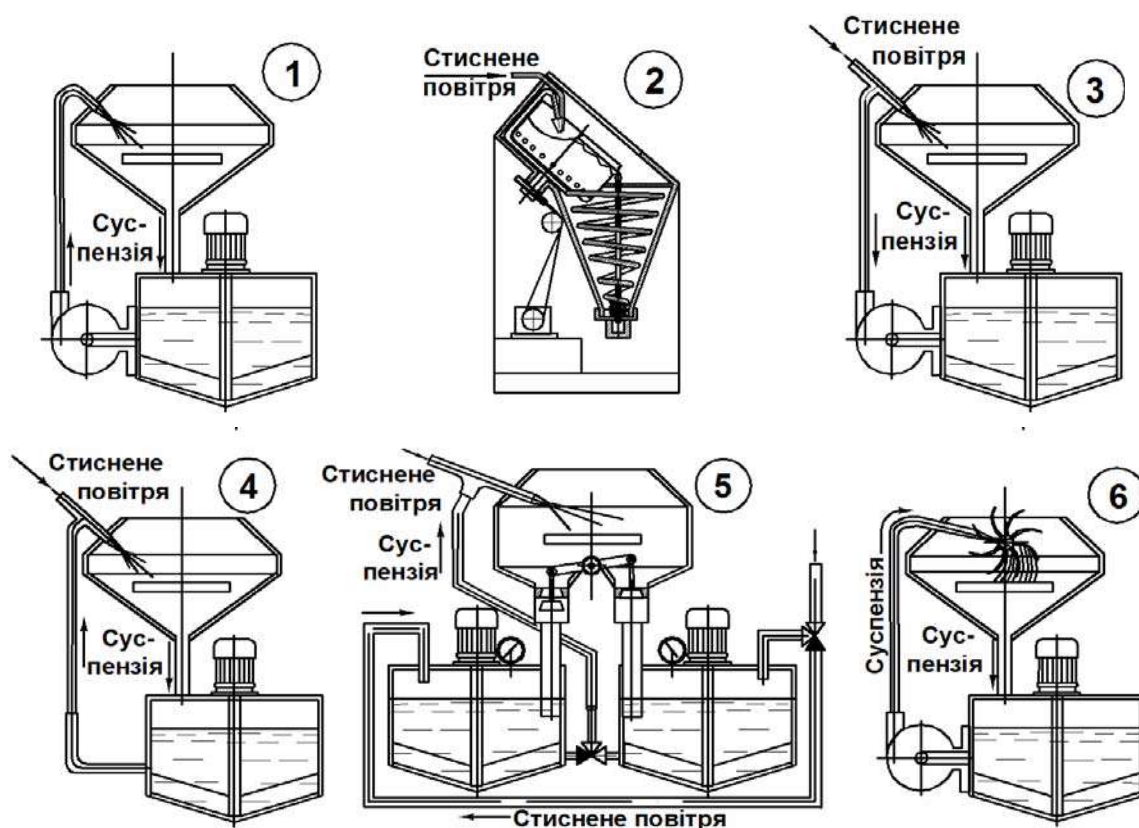


Рис. 1.39. Струминні установки для обробки абразивною суспензією

Умовні позначення: 1 – суспензія перемішується лопатами й подається помпою під тиском; 2 – абразивна суспензія піднімається по гвинтовій конічній трубі в результаті вібрацій спіралі, які виникають у процесі обертання робочої камери, до хвилястої поверхні якої підгорнута спіраль; 3 – суспензія перемішується лопатами й подається до соплового апарата насосом, а потім інжектуються потоком стисненого повітря; 4 – суспензія перемішується лопатами й інжектуються потоком стисненого повітря; 5 – суспензія перемішується лопатами й поперемінно витісняється стисненим повітрям із двох баків без ежекції; 6 – суспензія перемішується лопатами і подається до соплового апарата помпою, а потім прискорюється обертвовою крильчаткою.

Установки, які працюють за перерахованими схемами, мають різне цільове призначення. На установках, що працюють за схемами 1 – 3, досягається найбільш інтенсивна обробка, тому що суспензія подається до сопла примусово, а потім розганяється стисненим повітрям тиском до 0,6 МПа й швидкості 50 – 180 м/с. Інші установки використовуються в тих випадках, коли не потрібне інтенсивне знімання металу. Принципові схеми існуючих струминних установок для обробки деталей абразивною суспензією, що перемішується барботуванням, наведені на рис. 1.40.

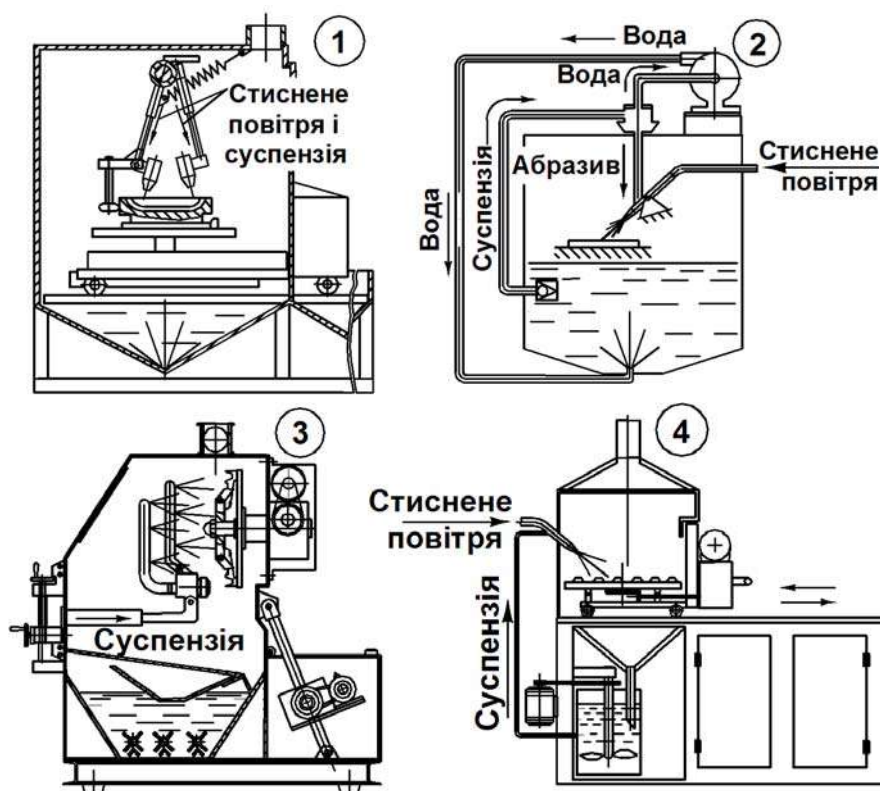


Рис. 1.40. Принципові схеми струминних установок для обробки абразивною суспензією, що перемішується барботуванням

До подачі з сопла абразивна суспензія проходить ряд етапів за наступними схемами (див. рис. 1.40): 1 – перемішується барботуванням, подається до соплового апарата помпою й інжектуються стисненим повітрям; 2 – суспензія розділяється на воду й абразив, який подається самопливом до соплового пристрою, розганяється там стисненим повітрям, а вода відкачується відцентровим насосом і повертається в бак з абразивною суспензією; 3 – перемішується стисненим повітрям й інжектуються потоком стисненого повітря до соплового апарата, розташованого перед столом, який обертається навколо горизонтальної осі з закріпленими об-

роблюваними деталями, з можливістю повороту стола й відведення деталей із зони обробки; 4 – перемішується лопатами й інжектуюється потоком стисненого повітря до соплового апарата, розташованого перед столом, який обертається навколо вертикальної осі із закріпленими оброблюваними деталями, з можливістю переміщення із зони обробки.

Відомі установки [7], у яких абразив перемішується суспензією, повертається частково усередину бака і подається в сопловий апарат, а потім прискорюється обертовими валками або за тією ж схемою – перемішується суспензією, повертається частково всередину бака, подається в сопловий апарат, а потім – у зазор між обертовим валком і щитком.

На рис. 1.41 наведено структурну схему класифікації струминно-абразивних пристроїв [8].



Рис. 1.41. Класифікація струминно-абразивних пристроїв

Для даних пристроїв характерні: низький рівень шуму (5 – 15 дБ); універсальність (можливість обробки різних деталей складної конфігурації, а також деталей з різних матеріалів без переналадження); легкість плавного регулювання інтенсивності процесу; низькі експлуатаційні витрати; можливість одночасного видалення задирок з видаленням змащення й забруднення; можливість багаторазового використання абразиву; можливість обробки деталей у важкодоступних місцях. Водночас, усі

струминно-абразивні установки характеризуються досить істотним недоліком: внаслідок подачі абразивної суспензії через сопла, які є найбільш відповідальними елементами, має місце їх інтенсивне абразивне руйнування. Так, у процесі обробки суспензією із кварцового піску під тиском 0,5 МПа зношування сопла діаметром 4 мм із інструментальної сталі склало 1 мм за три години обробки. За даними, наведеними в роботі [98], стійкість сопел із інструментальної сталі не перевищує 8 – 10 годин. За даними, наведеними в роботі [106], стійкість сопел із мартенситного чавуну склало 4 – 6 годин.

Аналогічні результати отримані закордонними дослідниками [139]. Так, у процесі обробки порошком карбиду кремнію зеленого (63С) стійкість сопел, виготовлених із твердого сплаву на основі карбиду вольфраму, становить 5 – 10 годин, з кераміки – 3 – 5 годин, чавуну – 2 – 3 години. Сопла, виготовлені зі стійких до абразивного зношування матеріалів (гуми, капрону, поліуретану), зношувалися ще більш інтенсивно [2; 3; 49].

Експериментальне відпрацювання конструктивних параметрів (за рахунок профілювання поздовжнього перетину сопел) дозволило підвищити їхню стійкість більш ніж у 2 рази. Однак сопла стають більш габаритними, придатними для використання у великогабаритних пристроях, наприклад, у турбореактивних соплах. Крім того, в разі низької вихідної стійкості це збільшення становить усього 10 – 15 годин. Отже, зниження або навіть виключення зношування каналів сопел струминно-абразивних установок є надзвичайно актуальним завданням, яке вимагає ефективних рішень.

1.4. Методи й перспективи захисту каналів сопел струминно-абразивних установок від зношування

Як уже зазначалося, струминно-абразивна обробка поверхонь деталей потоком абразивних зерен знаходить ширше застосування в промисловому виробництві, особливо в машинобудуванні й металургії. Обробка поверхонь струминно-абразивним методом забезпечує одержання матової поверхні з одночасним очищенням металу від окалини, формувальної суміші, піску, окисної плівки, іржі, залишків фарби, виключає відхилення від правильної геометричної форми, видаляє задирки, дрібні поверхневі дефекти й у цілому надає деталям товарного вигляду.

Разом із тим зернистий абразивний порошок, який прокачується через мірний канал сопла, у першу чергу призводить до його інтенсивного зношування. У результаті цього діаметр сопла збільшується, що підвищує витрати стисненого повітря й абразивного матеріалу, який, як правило, заправляється у вихідну ємність в обмеженій кількості. Безперервне збільшення діаметра соплового отвору є причиною безперервної зміни режиму обробки поверхні й нестабільності процесу. При цьому заміна зношеного сопла новим соплом приводить до стрибкоподібної зміни режиму обробки й зміни площі, охопленої потоком абразивних зерен, що знижує якість і продуктивність обробки.

Характер впливу абразивного струменя на плоску поверхню з періодичною заміною зношених сопел новими соплами показано на рис. 1.42. З наведеної схеми випливає, що в разі використання сопел з традиційних матеріалів (які піддаються швидкому зношуванню) рівномірно обробити поверхню практично неможливо. Значні складності виникають у зв'язку з необхідністю частої заміни сопел струминного апарата.

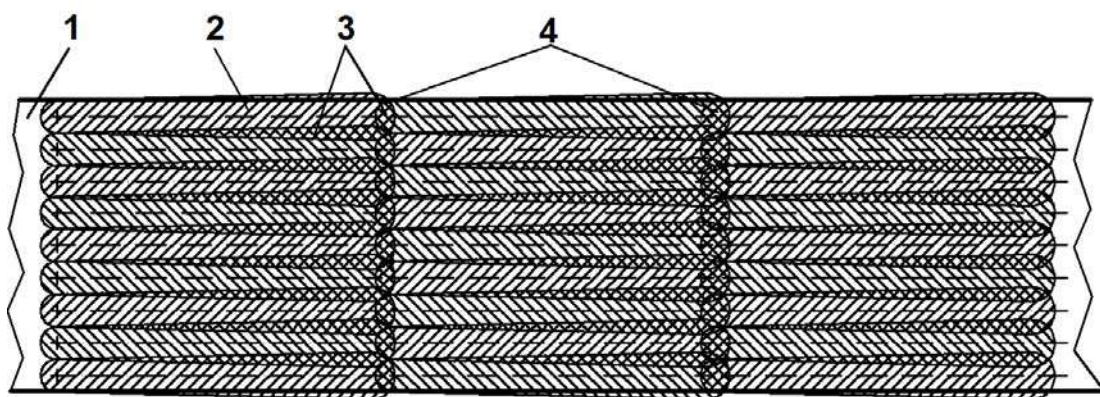
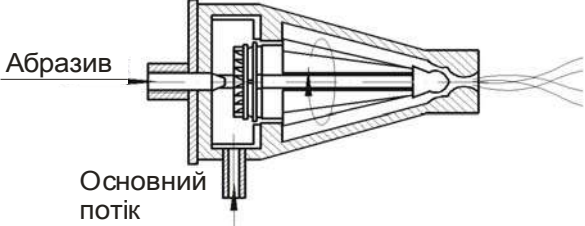
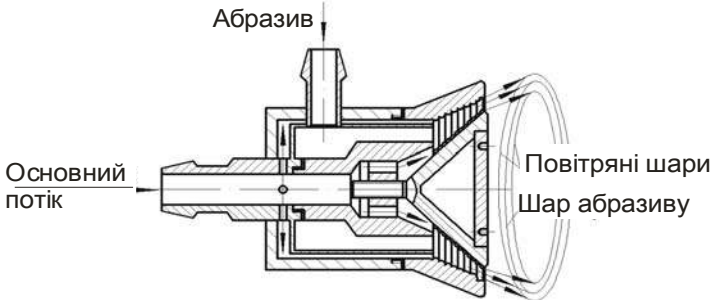
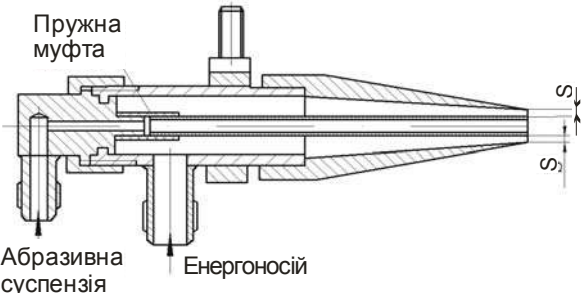
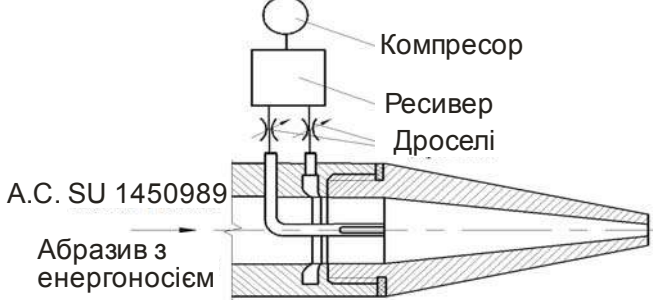
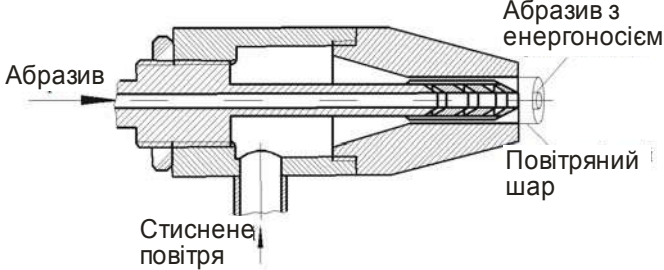


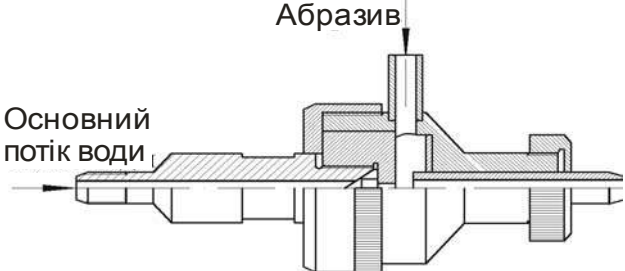
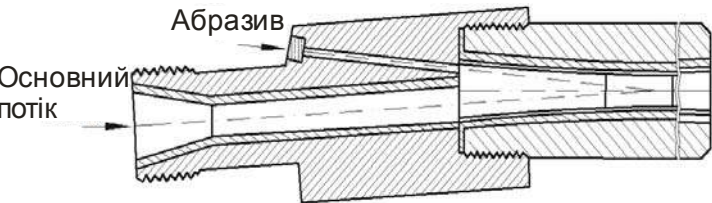
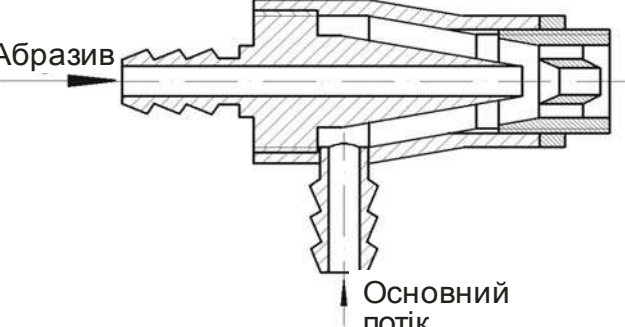
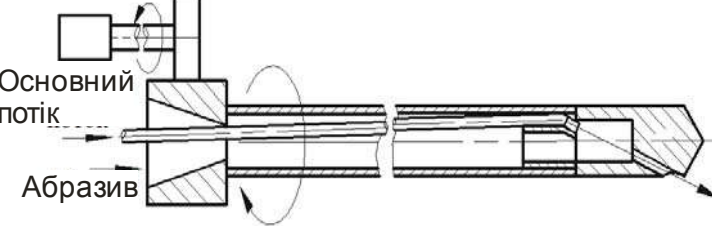
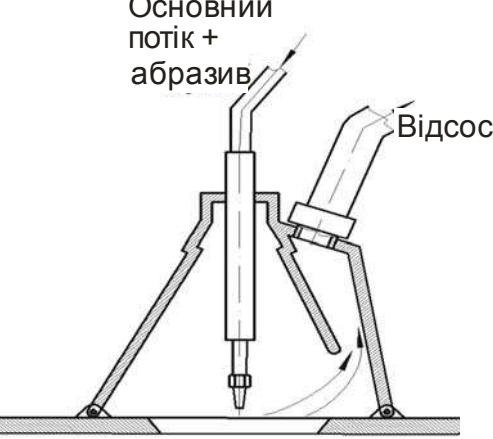
Рис. 1.42. Схема поверхні листового прокату, обробленої струминно-абразивним методом (прокачування абразиву через сопла)

Умовні позначення: 1 – смуга прокату; 2 – слід від струменя одного із сопел, що розширюється; 3 – накладення сусідніх слідів; 4 – зупинка, заміна зношених сопел новими соплами.

Для вирішення проблеми зниження зношування каналів сопел деякі дослідники створювали захисний шар із рідини, що стікає, або стисненого повітря, яке подавалося окремо від абразивного порошку [27; 33; 34; 40; 45]. У табл. 1.1 наведено приклади виконання таких технічних рішень, захищених авторськими посвідченнями й патентами [12].

Соплові пристрої із захистом від абразивного зношування потоками суспензії

№ п/п	Схема соплового пристрою	Опис
1	2	3
1		Сопловий пристрій з обертовим центральним завихрювачем [27]
2		Сопловий пристрій із захисним шаром, отриманим за рахунок незалежної подачі стисненого повітря [34]
3		Сопловий пристрій із пружно встановленим самоцентрувальним патрубком [40]
4		Сопловий пристрій з додатковою подачею полімерного матеріалу [33]
5		Сопловий пристрій з повітряним прошарком уздовж стінок, отриманим за рахунок використання декількох втулок [45]

1	2	3
6		<p>Сопловий пристрій з перетинанням у камері змішування струменя води струменем абразиву (Патент DE 38 44 344 A1, Німеччина)</p>
7		<p>Сопловий пристрій з гострим кутом між осями каналів для стисненого повітря або води й абразивного матеріалу [103]</p>
8		<p>Сопловий пристрій з додатковою гільзою з кутами фасок 7 – 10° [44]</p>
9		<p>Сопловий пристрій з обертовим корпусом (Патент US 4.936.059, США)</p>
10		<p>Сопловий пристрій піскоструминного апарата з відведенням відпрацьованого стисненого повітря (Патент GB 38 2207625 A, Англія)</p>

У пристрої [27] (схема 1 в табл. 1.1) захист поверхні каналу сопла від абразивного зношування досягається завдяки потоку стисненого повітря, який одержує гвинтовий рух від осьової турбіни, що приводиться в обертовий рух цим же потоком.

Пристрій за А. с. SU 1450990 A1, СРСР [33] (схема 2 в табл. 1.1) забезпечує захист поверхонь каналу сопла й центрального розсікувача, завдяки роздільній подачі стисненого повітря й абразивного матеріалу.

Сопловий пристрій з пружновстановленим самоцентрувальним патрубком (А. с. SU 1570889 A1, СРСР [40], схема 3 в табл. 1.1) характеризується менш інтенсивним зношуванням каналу, через який інжектуються абразивний матеріал. Однак при цьому швидкість руху абразивних зерен значно знижується через більш пізній розгін стисненим повітрям.

Сопловий пристрій з додатковою подачею полімерного матеріалу (А. с. SU 1450989 A1, СРСР [33], схема 4 в табл. 1.1) забезпечує надійний захист стінок сопла твердими полімерними частками, які подаються по периферії потоку. Водночас повторне використання абразивного й полімерного матеріалів складнюється необхідністю поділу цих матеріалів.

На схемі 5 у табл. 1.1 (А. с. SU 1634464 A1, СРСР [45]) показано сопловий пристрій з повітряним прошарком уздовж стінок, отриманим за рахунок виконання кільцевих каналів. На думку авторів, особливістю цього рішення є те, що кільцеві канали розташовані під гострим кутом до осі втулки в напрямку руху абразиву, щонайменше в 3 ряди.

На схемі 6 у табл. 1.1 (Патент DE 38 44 344 A1, Німеччина) показано сопловий пристрій, в якому у камері змішування струмінь води перетинається струменем абразиву. Завдяки наявності камери змішування, в разі обробки за цією схемою досягається рівномірне перемішування абразивного матеріалу й рідини. Водночас більш висока щільність потоку води, порівняно з повітряним потоком, забезпечує максимальну швидкість руху абразивних зерен, що дорівнює швидкості несучого потоку. Недоліком даної схеми є інтенсивне гідроабразивне зношування сопла, а також нагромадження в зоні обробки поряд з абразивним матеріалом ще й рідини, у зв'язку із чим процес обробки необхідно часто переривати.

Сопловий пристрій з гострим кутом між осями каналів для стисненого повітря або води й абразивного матеріалу показано на схемі 7 у табл. 1.1 (Патент US 4.815.241, США [103]). Основною перевагою цієї схеми є інжекція абразивного матеріалу струменем стисненого повітря

або води, оскільки напрямок руху основного потоку й абразивного матеріалу практично збігаються. Однак наведена схема не забезпечує хоча б мінімального захисту сопел від інтенсивного зношування.

Сопловий пристрій з додатковою гільзою з кутами фасок $7^\circ - 10^\circ$ показаний на схемі 8 у табл. 1.1 (А. с. SU 1632757 A1, СРСР [44]). Завдяки подачі стисненого повітря в радіальному напрямку потік рухається по гвинтовій лінії, охороняючи поверхню соплового каналу від абразивного порошку, який подається по центральному каналу. На виході із сопла спрямованість потоку забезпечується короткою гільзою зі згаданими кутами фасок. Недоліком даного пристрою є підвищене зношування короткої гільзи.

На схемі 9 у табл. 1.1 показано сопловий пристрій з обертовим корпусом, який оснащений індивідуальним приводом, завдяки чому стає можливою обробка складнопрофільних поверхонь, що характеризуються наявністю важкодоступних місць. Однак у пристрої не передбачено заходів, спрямованих на захист сопла від абразивного зношування.

Сопловий пристрій піскоструминного апарата з відведенням відпрацьованого стисненого повітря із зони обробки, показаний на схемі 10 у табл. 1.1 (патент GB 38 2207625 A, Англія), дозволяє створити комфортні умови для оператора. Однак у закритому просторі швидко накопичується абразивний матеріал, що обмежує доступ абразивного струменя до оброблюваної поверхні. З усього різноманіття технічних рішень, спрямованих на захист каналів сопел, можна відзначити схеми, які забезпечують поділ повітряно-абразивного потоку на дві складові (табл. 1.2). У пристрої, показаному на схемі 1 у табл. 1.2, передбачене відділення частини повітряного потоку від повітряно-абразивної суміші для захисту соплового каналу від абразивного зношування (А. с. SU 1579749 A1, СРСР [41]). Пристрій має певні переваги, оскільки дає можливість готування повітряно-абразивної суміші в спеціальному пристрої, й тому сопловий пристрій не перевантажується цією функцією.

Аналогічно вирішується завдання захисту вихідного каналу соплового пристрою захисним повітряним шаром (Патент DD 271076 A1, Німеччина [101]).

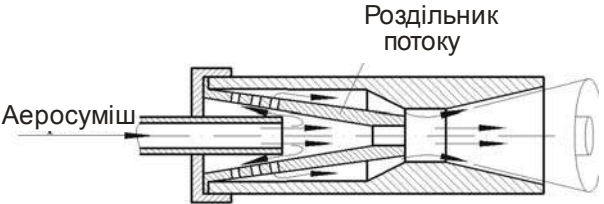
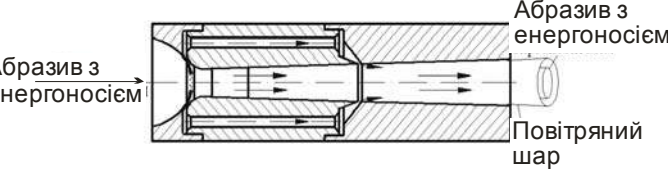
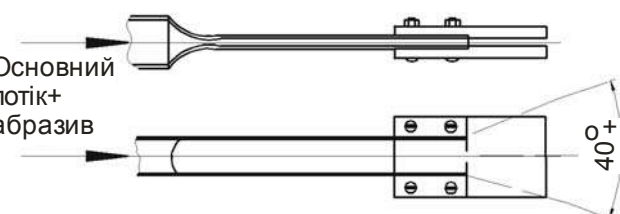
Для 1-ї і 2-ї схем, наведених в табл. 1.2, характерною є ділянка каналу, яка знаходиться перед захищеною ділянкою, що піддається підвищеному інтенсивному зношуванню, оскільки через канал прокачується

більш концентрований, тобто збагачений абразивом повітряно-абразивний потік.

Автори щілиноподібного соплового пристрою із плоским струменем (US Патент 4.843.770, США [104], схема 3 в табл. 1.2) запропонували варіант вирішення проблеми зменшення зношування сопла шляхом використання легковідновлюваних елементів вихідного перетину, який може бути утворений двома плоскими пластинами.

Таблиця 1.2

Соплові пристрої з поділом абразивної суспензії на складові

№ п/п	Схема соплового пристрою	Опис
1	 <p>Роздільник потоку Аеросуміш</p>	Сопловий пристрій з відділенням частини повітряного потоку від повітряно-абразивної суміші [41]
2	 <p>Абразив з енергоносієм Абразив з енергоносієм Повітряний шар</p>	Сопловий пристрій із захисним повітряним шаром [101]
3	 <p>Основний потік+ абразив 40+</p>	Щілиноподібний сопловий пристрій із плоским струменем [104]

Соплові пристрої (їх автори не встановлені), наведені в табл. 1.3, застосовуються на ділянках очищення заготовок від формувальної землі, піску, окалини, продуктів корозії. Однак вони громіздкі, характеризуються значною витратою стисненого повітря й суспензії. У табл. 1.1 – 1.3 показані різновиди сопел для струминно-абразивної обробки, які виявлені в процесі патенто-ліцензійного пошуку. Вони мають наступні недоліки:

зношування вихідного перетину сопла вдається зменшити тільки за рахунок збільшення зношування в попередніх перетинах пристрою;

захисні конструктивні елементи призводять до збільшення розмірів сопел і витрати стисненого повітря, яке необхідно фільтрувати;

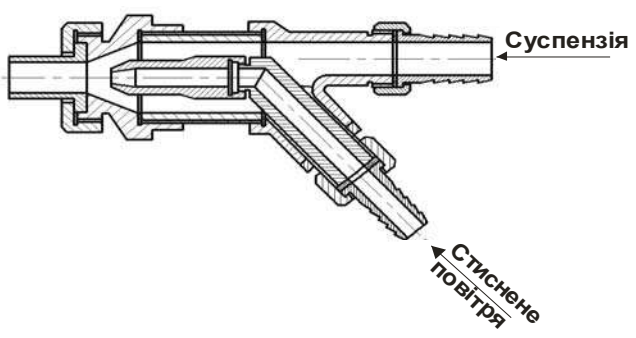

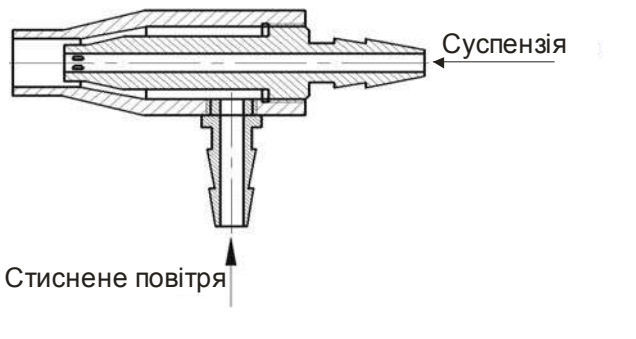
обмеження часу обробки, яке визначається кількістю заправленого й кількістю відпрацьованого абразивного матеріалу, після чого потрібна зупинка й перезарядження струминно-абразивного апарата;

необхідність поділу відпрацьованого абразивного матеріалу й рідини, а також тривалого сушіння для відновлення сипкості;

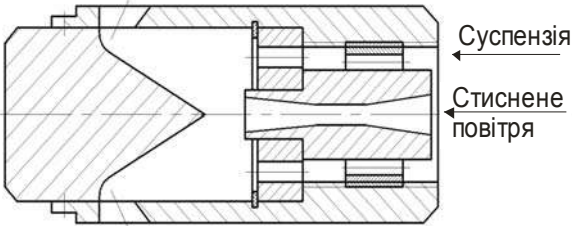
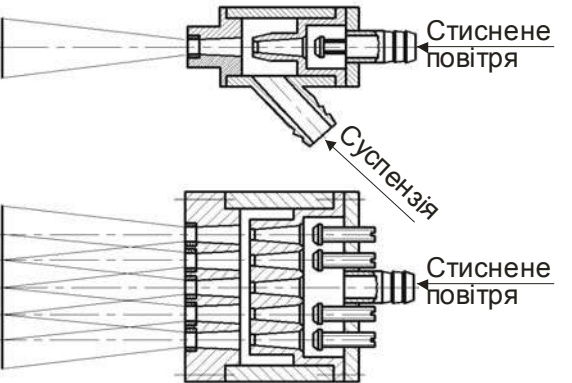
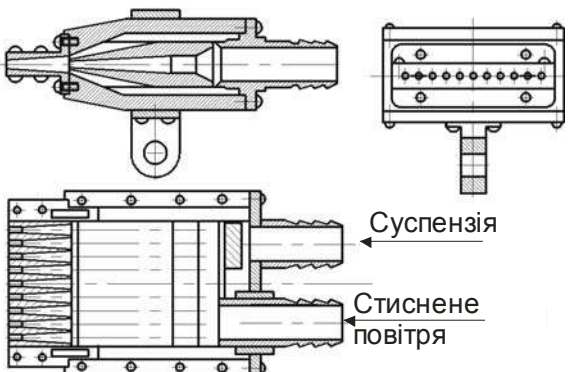
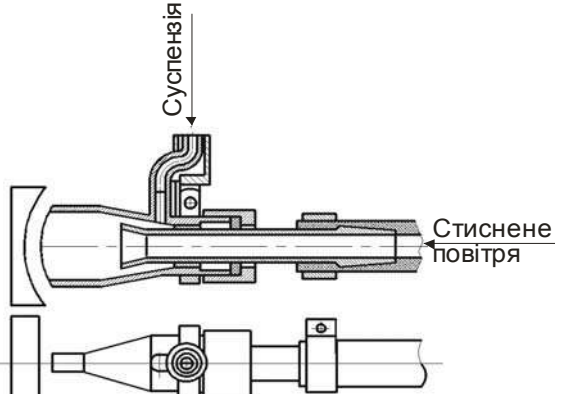
нестабільний процес обробки, пов'язаний із безперервним збільшенням діаметра отвору сопла.

Таблиця 1.3

Соплові пристрої, застосовувані у виробничих умовах

№ п/п	Схема соплового пристрою	Опис
1		<p>Сопловий пристрій зі змінною гільзою з матеріалу, стійкого до абразивного зношування</p>
2		<p>Сопловий пристрій із відділенням потоку суспензії від внутрішньої поверхні повітряним шаром</p>
3		<p>Сопловий пристрій з ділянкою змішування повітряного потоку і суспензії</p>

Закінчення табл. 1.3

<p>4</p>		<p>Сопловий пристрій для струминно-абразивного очищення внутрішньої поверхні труб</p>
<p>5</p>		<p>Сопловий пристрій з ряду сопел з утворенням плоского струменя</p>
<p>6</p>		<p>Сопловий пристрій з утворенням плоского струменя в процесі попереднього змішування стисненого повітря й суспензії</p>
<p>7</p>		<p>Сопловий пристрій з утворенням плоского струменя для обробки пресформ</p>

Аналіз наведених даних показує, що вдосконалювання методу струминно-абразивної обробки шляхом оптимізації конструкції струминного апарата практично вичерпало себе. Кардинальне підвищення експлуатаційних характеристик можливе тільки в разі зміни принципової схеми струминно-абразивної обробки. У зв'язку із цим окреслено наступний перспективний напрям – обробку поверхонь струменями стисненого повітря, затопленими в абразивній суспензії. Обробка за такою схемою виключає абразивне зношування каналів сопел, тому що абразивний порошок, який є складовою частиною водно-абразивної суспензії, приєднується до струменя стисненого повітря, що витікає із сопла, за його межами. Даний метод у науково-технічній літературі одержав назву методу абразивної обробки деталей затопленими струменями [114].

1.5. Наукові передумови розробки теоретичних основ абразивної обробки деталей затопленими струменями

Аналіз розглянутих робіт показує, що на сьогодні оздоблювальна обробка деталей масою до 3 грамів здійснюється різними методами. Одним з перспективних методів є струминна обробка деталей вільним абразивом [114]. Особливо ефективним видається використання струминно-абразивної обробки для деталей приладів, кіно-фотоапаратури, медичних інструментів, меблевої фурнітури та ін., тому що поряд з видаленням задирок і округленням гострих кромek можна одержувати рівномірну матову поверхню, яка надає деталям товарного вигляду. Разом з тим даний метод має істотний недолік, пов'язаний з інтенсивним зношуванням сопел, через які прокачується абразивна суспензія. У результаті цього діаметр сопла збільшується, що призводить до збільшення витрати стисненого повітря й абразивного матеріалу, а безперервне збільшення діаметра соплового отвору є причиною безперервної зміни режиму обробки поверхні й нестабільності процесу. При цьому заміна зношеного сопла новим соплом приводить до стрибкоподібної зміни режиму обробки й зміни площі, охоплюваної потоком абразивних часток, що знижує якість і продуктивність обробки.

У роботах [2; 3; 49] обґрунтовано можливі напрями зменшення інтенсивності зношування сопел струминного апарата: 1) виготовлення сопел з таких матеріалів, як кераміка, твердий сплав, гума, капрон, полі-

уретан, які меншою мірою піддаються абразивному зношуванню; 2) створення захисного шару сопла, утвореного рідиною, що стікає, або стисненим повітрям, яке подається окремо від абразивного порошку [27; 33; 34; 40]. Однак досягти відчутного результату при цьому не вдалося, тобто оптимізація елементів конструкції струминного апарата практично вичерпала себе. Тому проблема зменшення зношування сопел струминного апарата, як і раніше, залишається актуальною і потребує ефективного вирішення.

Як показано в роботах [7; 13; 18], кардинальним вирішенням 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 і виключає основний недолік струминно-абразивних установок – абразивне зношування каналів сопел або ежекційних насадок [114], тому що абразивні зерна приєднуються до струменів стисненого повітря за їхніми межами. Ефект обробки досягається за рахунок забезпечення рівномірного перемішування оброблюваних деталей і всебічної дії абразивних зерен на їхні поверхні. Ефективність процесу може бути втрачена через порушення пропорцій (балансу) між цими двома факторами, оскільки в процесі перемішування деталей і абразивних зерен з високою швидкістю виключається досягнення істотної різниці швидкостей між абразивними зернами й оброблюваними деталями. З іншого боку, інтенсивна локальна дія абразивних зерен на оброблювані поверхні без належного перемішування деталей приведе до похибок геометричної форми окремих деталей і нерівномірної обробки всієї партії. Щоб ефективно управляти даним процесом обробки, необхідно знати його фізичні закономірності й технологічні можливості. Як зазначалося, питанням дослідження струминно-абразивної обробки в науково-технічній літературі приділена достатньо велика увага. Серед відомих робіт слід особливо виділити роботи професора Проволоцького О. Є. [114], який зробив великий внесок у розвиток теорії та практики струминно-абразивної обробки. У його роботах [107; 111] наведено важливі результати досліджень, пов'язані з керуванням параметрами процесу за інтенсивністю шуму, який виникає в процесі обробки, що відкриває нові можливості широкого застосування на практиці цього прогресивного методу обробки.

Заслуговує на увагу докторська дисертація Ісупова М. Г. [74], присвячена розробці й дослідженню технології струминно-абразивної фінішної обробки. У ній в узагальненому вигляді наведено сучасний стан проблеми струминно-абразивної обробки, розрахункові залежності для визначення основних параметрів обробки. Однак вони отримані на основі теорії розрахунку деталей машин на тертя й зношування, розробленої професорами Крагельським І. В. [84], Демкіним Н. Б. [62; 63] і Рижовим Е. В. [80].

У даному ж випадку досліджується процес мікрорізання матеріалу абразивними зернами, який, очевидно, повинен підпорядковуватися основним закономірностям теорії різання матеріалів [54; 61; 65; 67; 86; 119; 124]. Тому розрахунки повинні виконуватися на основі закономірностей стружкоутворення в процесі різання з урахуванням переходу від пружно-пластичного деформування матеріалу до процесу різання. Насправді про умови стружкоутворення під час струминно-абразивної обробки в роботі [74] фактично немає згадувань, що потребує проведення подальших досліджень струминно-абразивної обробки з позиції теорії різання матеріалів.

Необхідно зауважити, що в зазначених наукових працях наводяться результати досліджень струминно-абразивної обробки як крихких, так і пластичних матеріалів (кольорових металів). У зв'язку із цим може виникнути питання про те, що

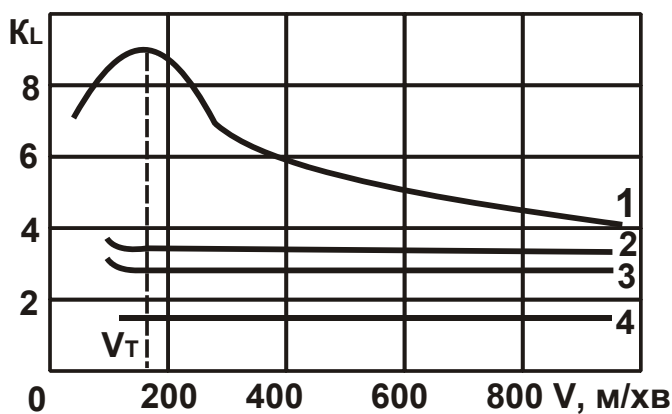


Рис. 1.43. Вплив швидкості різання V на усадку стружки K_L

Умовні позначення: 1 – твердий сплав; 2 – алмаз АСБ; 3 – алмаз АСПК; 4 – природний алмаз.

Умови обробки: оброблюваний матеріал – латунь Л62.

виникнути питання про те, що струминно-абразивна обробка кольорових металів не підпорядковується закономірностям процесу різання і її необхідно розглядати з позиції обробки металів тиском. Однак, як показано в численних роботах з різання матеріалів [68; 69; 105; 121], обробка кольорових металів підпорядковується закономірностям різання, оскільки відбувається з утворенням стружки. Як приклад на рис. 1.43 і 1.44 [115] наведено експеримен-

тальні значення усадки стружки, отримані в процесі алмазного й тонкого поздовжнього точіння кольорових металів (латуні Л62 і міді М1) алмазними й твердосплавними різцями. За визначення усадка стружки дорівнює відношенню товщини стружки до товщини зрізу.

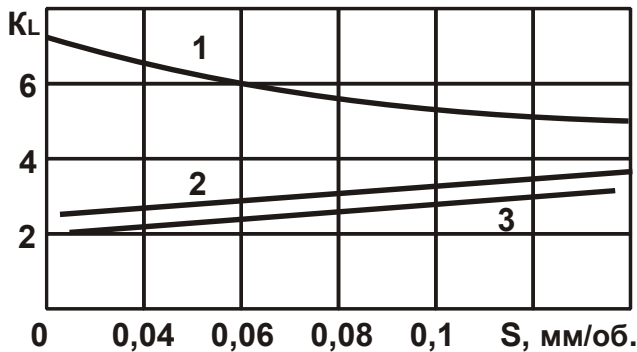


Рис. 1.44. Вплив подачі S на усадку стружки K_L

Умовні позначення: 1 – твердий сплав; 2 – алмаз АСПК; 3 – природний алмаз.
Умови обробки: оброблюваний матеріал – мідь М1.

У процесі точіння латуні Л62 різцем із твердого сплаву усадка стружки значно більша, ніж під час точіння різцями зі штучних алмазів АСБ, АСПК і особливо із природного алмаза. Це пов'язано з меншим коефіцієнтом тертя латуні Л62 з алмазами порівняно з коефіцієнтом тертя латуні Л62 з твердим сплавом. При цьому усадка стружки в процесі точіння алмазними різцями не залежить від швидкості

різання, тоді як під час точіння різцем із твердого сплаву вона зменшується в широкому діапазоні зміни швидкості різання.

У процесі точіння міді М1 різцем із твердого сплаву (див. рис. 1.44) [115] усадка стружки набуває великих значень (понад 8), що пов'язано з інтенсивним тертям різця зі стружкою. Коефіцієнт тертя алмаза АСПК і природного алмаза з міддю значно менший, ніж у твердого сплаву, тому усадка стружки під час точіння міді алмазним різцем значно менша, ніж у процесі точіння різцем із твердого сплаву, особливо у випадку невеликих подач.

Професором Сагардою А. О. в роботі [120] встановлено, що в процесі мікрорізання алмазним конусом з кутом при вершині $2\alpha = 90 \dots 150^\circ$ таких пластичних металів, як мідь і латунь, утворюється стружка, а формування силових параметрів підпорядковується таким же закономірностям стружкоутворення, як і під час мікрорізання сталей (табл. 1.4 і 1.5).

З наведених табл. 1.4 і 1.5 випливає, що параметри силової напруженості процесу мікрорізання міді й латуні менші, ніж в армко-заліза, сталі й твердого сплаву. Таким чином показано, що для більш повного уявлення про фізичну сутність і технологічні можливості струминно-абразивної обробки важливо провести її теоретичний аналіз із позиції

теорії різання й, зокрема, з позиції теорії абразивної обробки. Це дозволить по-новому підійти до розрахунку параметрів струминно-абразивної обробки й визначити умови підвищення її ефективності за критеріями якості, продуктивності й стабільності обробки.

Таблиця 1.4

Розрахункові й експериментальні значення умовного напруження мікрорізання σ

Матеріал	Твердість HV, Н/мм ²	2 α , град.	σ , Н/мм ²		Похибка, %
			Розрахункові дані	Дослідні дані	
Мідь	600	90	3 650	3 170	-15
		120	4 950	5 390	+8
		150	8 100	8 600	+6
Армко-залізо	1 180	90	7 300	6 500	-14
		120	9 720	11 000	+14
		150	12 100	11 500	-7
Сталь У8	5 600	90	1 950	18 000	-8
		120	2 540	23 500	-8
		150	4 400	4 010	-9

Таблиця 1.5

Значення роботи в процесі мікрорізання алмазним конусом з кутом при вершині 2 α = 120° на маятниковому приладі

Матеріал	Твердість, Н/мм ²	Глибина 30 мкм			Глибина 60 мкм		
		Об'єм знятого металу, мм ³	Сумарна робота, Дж/мм ²	Питома робота, Н/мм ³	Об'єм знятого металу, мм ³	Сумарна робота, Дж/мм ²	Питома робота, Н/мм ³
Латунь	1 340	0,5	0,808	12	0,5	0,628	10,6
Сталь 40Х	1 560	0,2	1,124	43	0,5	1,544	47
Твердий сплав ВК6М	15 000	0,4	1,59	53	1,8	6,743	50

В основу розрахунків може бути покладено теоретичний підхід до визначення параметрів силової напруженості процесу різання – умовного кута зрушення матеріалу β , сили різання P і її тангенціальної P_z і радіальної P_y складових, відношення $K_{\text{різ}} = P_z / P_y$ й умовного напруження різання (енергоємності обробки) σ (рис. 1.45) [81; 125]:

$$\beta = 45^\circ - \frac{(\psi - \gamma)}{2}; \quad (1.1)$$

$$P = \frac{a \cdot b \cdot \tau_{\text{зсув}}}{\sin^2 \beta} = \frac{2 \cdot a \cdot b \cdot \tau_{\text{зсув}}}{[1 - \sin(\psi - \gamma)]}; \quad (1.2)$$

$$P_z = P \cdot \cos(\psi - \gamma) = \frac{2 \cdot a \cdot b \cdot \tau_{\text{зсув}}}{\text{tg} \beta} = \frac{2 \cdot a \cdot b \cdot \tau_{\text{зсув}}}{\text{tg} \left(45^\circ - \frac{(\psi - \gamma)}{2} \right)}; \quad (1.3)$$

$$P_y = P \cdot \sin(\psi - \gamma) = \frac{2 \cdot a \cdot b \cdot \tau_{\text{зсув}} \cdot \sin(\psi - \gamma)}{[1 - \sin(\psi - \gamma)]}; \quad (1.4)$$

$$K_{\text{різ}} = \frac{P_z}{P_y} = \frac{1}{\text{tg}(\psi - \gamma)} = \text{tg} 2\beta; \quad (1.5)$$

$$\sigma = \frac{2 \cdot \tau_{\text{зсув}}}{\text{tg} \beta} = \frac{2 \cdot \tau_{\text{зсув}}}{\text{tg} \left(45^\circ - \frac{(\psi - \gamma)}{2} \right)} = \frac{2 \cdot \tau_{\text{зсув}}}{K_{\text{різ}}} \cdot \left(1 + \sqrt{1 + K_{\text{різ}}^2} \right), \quad (1.6)$$

де a, b – товщина й ширина зрізу, м;

$\tau_{\text{зсув}}$ – межа міцності на зсув оброблюваного матеріалу, Н/м²;

γ – передній кут інструмента;

ψ – умовний кут тертя матеріалу з передньою поверхнею інструмента ($\text{tg} \psi = f$ – коефіцієнт тертя оброблюваного й інструментального матеріалів).

Як впливає із залежності (1.1), зі збільшенням додатного значення переднього кута інструмента γ умовний кут зсуву матеріалу β збільшується, що призводить до зменшення сили різання. Коефіцієнт різання $K_{\text{різ}}$ цілком однозначно визначається умовним кутом зсуву матеріалу β :

чим він більший, тим більший $K_{різ}$ й вище ефективність процесу різання. Водночас коефіцієнт різання $K_{різ}$ неоднозначно впливає на умовне напруження різання σ . При значеннях $K_{різ} < 1$ (в умовах абразивної обробки) підкореневий вираз можна вважати приблизно рівним одиниці, тоді залежність (1.6) спроститься й набуде вигляду:

$$\sigma = \frac{4 \cdot \tau_{зсув}}{K_{різ}} = \frac{2 \cdot \sigma_{ст}}{K_{різ}}, \quad (1.7)$$

де $\sigma_{ст} \approx 2\tau_{зсув}$ – межа міцності на стискання оброблюваного матеріалу, Н/м².

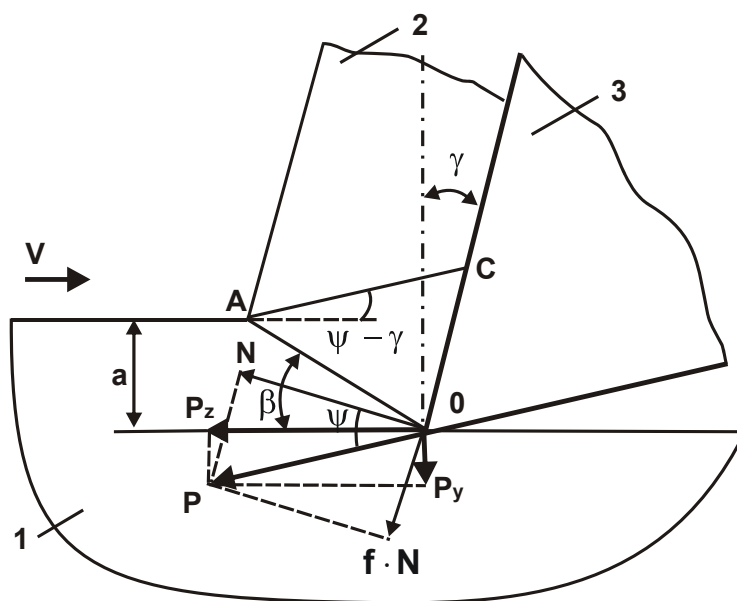


Рис. 1.45. Розрахункова схема параметрів стружкоутворення в процесі різання матеріалу

Умовні позначення: 1 – оброблюваний матеріал; 2 – стружка; 3 – інструмент.

У цьому випадку $K_{різ}$ впливає на умовне напруження різання σ : чим більший $K_{різ}$, тим менше σ й вища ефективність процесу різання. У випадку $K_{різ} > 1$ умовне напруження різання σ зі збільшенням $K_{різ}$ також буде зменшуватися, однак з меншою інтенсивністю, ніж у випадку $K_{різ} < 1$. При $K_{різ} \gg 1$ вираз, що входить у дужки залежності (1.7), приблизно дорівнюватиме $K_{різ}$. Тоді залежність (1.7) спроститься:

$$\sigma = 2\tau_{зсув} \approx \sigma_{ст}. \quad (1.8)$$

Отже, в цьому випадку умовне напруження різання σ набуває значення, близького до значення межі міцності на стискання оброблюваного матеріалу $\sigma_{ст}$, і тоді процес стружкоутворення в процесі різання буде підпорядковуватися закономірностям деформування прямолінійного зразка під час його стискання. У випадку від'ємного значення переднього кута інструмента $\gamma < 0$ у залежності (1.1) – (1.6) необхідно підставити замість кута ψ кут $(\psi + \gamma)$:

$$\beta = 45^\circ - \frac{(\psi + \gamma)}{2}; \quad (1.9)$$

$$P = \frac{2 \cdot a \cdot v \cdot \tau_{зсув}}{[1 - \sin(\psi + \gamma)]}; \quad (1.10)$$

$$P_z = \frac{2 \cdot a \cdot v \cdot \tau_{зсув}}{\operatorname{tg}\left(45^\circ - \frac{(\psi + \gamma)}{2}\right)}; \quad (1.11)$$

$$P_y = \frac{2 \cdot a \cdot v \cdot \tau_{зсув} \cdot \sin(\psi + \gamma)}{[1 - \sin(\psi + \gamma)]}; \quad (1.12)$$

$$K_{різ} = \frac{P_z}{P_y} = \frac{1}{\operatorname{tg}(\psi + \gamma)}; \quad (1.13)$$

$$\sigma = \frac{2 \cdot \tau_{зсув}}{\operatorname{tg}\left(45^\circ - \frac{(\psi + \gamma)}{2}\right)}. \quad (1.14)$$

Як видно, зі збільшенням від'ємного значення переднього кута γ умовний кут зсуву матеріалу β , складові сили різання P_z й P_y , рівнодійна сили різання P й умовне напруження різання σ збільшуються, тобто процес різання відбувається з вищою силовою напруженістю, ніж при $\gamma > 0$. Коефіцієнт різання $K_{різ} = P_z/P_y$ у цьому випадку може бути як більшим, так і меншим від одиниці. Так, відомо, що в процесі абразивної обробки, яка характеризується від'ємними передніми кутами різальних

кромки, коефіцієнт різання $K_{\text{різ}} = P_z/P_y$ менший від одиниці, а в разі лезової обробки, здійснюваної інструментами з додатними передніми кутами, – більший від одиниці.

Наведені залежності справджуються в процесі різання з постійною товщиною зрізу. Під час струминно-абразивної обробки має місце процес мікрорізання зі змінною товщиною зрізу. Тому важливо отримати аналогічні аналітичні залежності для визначення основних параметрів напруженості процесу різання з урахуванням змінної товщини зрізу. Це дозволить розкрити фізичну сутність і технологічні можливості розглянутого методу абразивної обробки деталей затопленими струменями.

Підводячи підсумки проведеного аналізу, слід зазначити, що в науково-технічній літературі наводяться в основному практичні рекомендації щодо ефективного використання струминно-абразивної обробки без достатньо глибокого розкриття її фізичної сутності та потенційних можливостей. При цьому роботи, присвячені дослідженню струминно-абразивної обробки, розрізнені. З багатьох питань відсутні необхідні дані, узагальнення й рекомендації, не розкриті технологічні особливості обробки. У зв'язку із цим розвиток і застосування струминно-абразивної обробки істотно стримується. Відсутня також загальноприйнята теорія, яка відображає взаємодію незакріпленого абразивного зерна й оброблюваної деталі, що рухаються в повітряному струмені з рідиною. Водночас необхідність свідомого керування технологічним процесом і одержання стабільних результатів обробки, а також аналітичного опису закономірностей знімання матеріалу і формоутворення поверхонь (визначення параметрів якості обробки) потребують розробки теоретичних основ струминно-абразивної обробки й, у першу чергу, методу абразивної обробки деталей затопленими струменями як найбільш ефективного методу оздоблювальної обробки дрібних деталей, малої жорсткості й складної просторової форми.

На відміну від традиційних методів струминно-абразивної обробки, даний метод передбачає 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, як зазначалося, важливо теоретично встановити вплив кута врізання абразивних зерен в оброблюваний матеріал на енергоємність процесу й силу різання. Це дозволить оцінити технологічні

можливості запропонованого методу в плані обробки площин і кромek плоских деталей невеликих розмірів і малої жорсткості, усунення задирок, зменшення значних мікронерівностей поверхонь деталей, утворених на попередніх технологічних операціях, тобто визначити основні ефекти, яких можна досягти даним методом обробки. В основу теоретичного аналізу параметрів силової напруженості процесу обробки можуть бути покладені важливі результати, отримані в роботах [124; 135].

Надзвичайно важливо оцінити роль динаміки взаємодії абразивних зерен з оброблюваним матеріалом у процесі мікрорізання та формоутворення поверхонь, тому що ці питання в теорії струминно-абразивної обробки фактично не розкриті [114]. Відсутні математичні рівняння, що описують траєкторію руху абразивного зерна в оброблюваному матеріалі, отримані з урахуванням динамічного фактора. Тим часом процес взаємодії абразивного зерна з оброблюваним матеріалом обумовлений саме динамічним фактором, у результаті чого зерно в процесі руху втрачає кінетичну енергію аж до нуля і, як правило, зупиняється в оброблюваному матеріалі. У підсумку на поверхні утворюється лунка з витиснутим спереду й з боків металом, тобто відсутній повний зріз металу. Це пов'язано з недостатньою кінетичною енергією абразивного зерна через його низьку початкову швидкість. Усі ці фактори необхідно враховувати в процесі розробки математичної моделі струминно-абразивної обробки, що дозволить більш повно розкрити фізичну сутність процесу й науково обґрунтовано підійти до вибору оптимальних умов обробки.

Важливо оцінити можливості збільшення початкової швидкості руху абразивних зерен, яка в процесі використання даного методу обробки нижча, ніж за традиційної струминно-абразивної обробки. Для цього необхідно математично описати закономірності руху абразивного зерна в повітряно-рідинному потоці з огляду на те, що в початковий момент зерно нерухоме й під впливом потоку стисненого повітря набуває робочої швидкості. Необхідно також провести експериментальні дослідження характеру й кількості мікрорізів окремими зернами на оброблюваній поверхні і порівняти результати теоретичних та експериментальних досліджень. Це дозволить виявити провідні фактори в процесі обробки й можливості керування ними з метою підвищення продуктивності та якості обробки, розробки високоефективних технологій абразивної обробки деталей затопленими струменями. Основними науковими передумовами ро-

боти слід вважати результати досліджень, отримані Проволоцьким О. Є., Ісуповим М. Г., Саверініним М. М., Кашеєвим В. М., Сорокіним Г. М., Павловим Б. В., Цигановським А. Б., Якимовим О. В., а також результати, отримані під керівництвом Сергієва А. П., Шаїнського М. Е. та ін.

Висновки до розділу 1

1. Прогрес металообробного й штампувального виробництва істотно стримується відсутністю високопродуктивних методів зачисної обробки, особливо у випадках обробки деталей невеликих розмірів, малої жорсткості й складної просторової форми на підприємствах, пов'язаних із виробництвом прецизійних машин і механізмів, точної механіки, медичного устаткування, радіотехніки, а також пов'язаних з нанотехнологіями, де, як і раніше, переважають неавтоматизовані й достатньо трудомісткі ручні операції. Складність обробки зазначених деталей на зачисних операціях пов'язана з малою жорсткістю й невеликими розмірами деталей для якісної обробки у віброабразивних машинах або галтувальних барабанах і водночас відносно великою масою для обробки відомими способами, наприклад, ультразвуковим. Результати випробувань установок різних типів показали, що турбулентно-абразивна обробка переважно ефективна в процесі обробки жорстких деталей простої конструкції, віброабразивна обробка з великими амплітудами коливань краща для деталей складної конфігурації з пазами й отворами, у тому числі для деталей малої жорсткості. Створення віброабразивних машин з великими амплітудами коливань (10 – 20 мм) навіть за малих об'ємів робочої камери (до 1 л) пов'язане зі значними конструктивними труднощами, а також з питаннями вібро- і шумоізоляції. Таким чином, незважаючи на те, що машинобудування має арсенал технологічних прийомів і можливостей, спрямованих на вирішення завдань, пов'язаних із досягненням високої якості й продуктивності оздоблювальної обробки, зачищення деталей малої жорсткості масою до 3 грамів дотепер залишається немеханізованим, часто здійснюється вручну й потребує нових технологічних рішень.

2. Показано, що перспективним напрямом вирішення завдання підвищення ефективності зачищення деталей малої жорсткості масою до 3 грамів може бути застосування струминно-абразивної обробки, здійснюваної зернистим абразивом з подачею абразивної суспензії через

сопла під високим тиском. Цей метод дозволяє виконувати ряд трудомістких технологічних операцій, до яких належать: видалення задирок, округлення гострих кромek, очищення поверхонь деталей від окисної плівки, підготовка деталей під гальванічні покриття та ін. Основним недоліком цього методу обробки є інтенсивне зношування сопел, через які прокачується абразивна суспензія. У зв'язку із цим перспективним є метод обробки, здійснюваної за допомогою струменів стисненого повітря, затоплених абразивною суспензією, тому що за такої схеми забезпечується збереження (довговічність) сопел, які подають стиснене повітря. Сутність даного методу обробки полягає в тому, що в робочу камеру, в яку вільно поміщені оброблювані деталі й абразивна суспензія, подають стиснене повітря у вигляді струменів, розташованих так, щоб досягалися обробка й перемішування деталей, а також забезпечувалося збереження внутрішніх поверхонь робочої камери. Забезпечення рівномірного перемішування оброблюваних деталей і всебічна дія абразивних зерен на їхні поверхні є найважливішою умовою досягнення високих позитивних результатів обробки.

3. Установлено, що відомі теоретичні підходи до визначення параметрів струминно-абразивної обробки базуються в основному на положеннях теорії розрахунку деталей машин на тертя й зношування. У деяких випадках зводяться до визначення глибини відбитка сферичної абразивної частки на металевій поверхні й не враховують закономірностей процесу стружкоутворення, тоді як видалення оброблюваного матеріалу відбувається в результаті здійснення процесу різання й пластичного деформування. Це не дозволяє повною мірою розкрити фізичні закономірності й визначити технологічні можливості струминно-абразивної обробки. Із цієї причини дотепер не розроблено загальноприйнятої теорії, яка відображає взаємодію незакріпленого абразивного зерна й оброблюваних деталей. Разом із тим необхідність цілеспрямованого керування процесом і одержання стабільних результатів обробки, а також пошук шляхів аналітичного вирішення завдань теорії мікрорізання вільним абразивним зерном потребують розкриття сутності явищ, що супроводжують процес. Це передбачає розробку наукових основ струминно-абразивної обробки й, у першу чергу, методу абразивної обробки затопленими струменями як найбільш ефективного методу обробки деталей невеликих розмірів, малої жорсткості й складної просторової форми.

Розділ 2. Теоретичне обґрунтування технологічних можливостей підвищення якості та продуктивності абразивної обробки деталей затопленими струменями

2.1. Загальний підхід до визначення умов підвищення якості та продуктивності абразивної обробки деталей затопленими струменями

Струминно-абразивна обробка набула застосування в процесі очищення заготовок від окалини, чистовому доведенні деталей, у тому числі й складної форми [7]. Вона забезпечує зменшення шорсткості поверхні, одержання поверхні без спрямованих слідів механічної обробки, створення наклепу для підвищення твердості, одержання поверхонь із високою капілярністю, підвищення зносостійкості та зчеплення з покриттями й фарбами, збільшення стійкості інструмента, усунення слідів механічної обробки, видалення іржі й очищення поверхонь від забруднення та ін. Разом із тим перебіг процесу струминно-абразивної обробки в часі нестабільний через інтенсивне зношування сопел і необхідність їхньої частотої заміни. Як показано в розділі 1, застосування прогресивного методу оздоблювальної абразивної обробки деталей затопленими струменями дозволяє вирішити проблему підвищення стабільності обробки. Однак для створення конкурентоспроможної машинобудівної продукції поряд з підвищенням стабільності важливо забезпечити високі показники якості й продуктивності обробки. Це потребує проведення комплексу теоретичних і експериментальних досліджень з виявлення й обґрунтування перспективних напрямів підвищення якості та продуктивності обробки.

Метод оздоблювальної абразивної обробки затопленими струменями заснований на реалізації ефекту ударно-імпульсної дії на поверхню оброблюваної деталі потоку вільного абразиву, у результаті чого відбувається утворення найтонших мікрорізів й знімання оброблюваного матеріалу, формування шорсткості поверхні й параметрів якості поверхневого шару деталі. При цьому абразивні зерна можуть під різними кутами входити й виходити з контакту з оброблюваним матеріалом, що визначає різні умови утворення мікрорізів і відповідно мікронерівностей на оброб-

люваній поверхні. Геометричні параметри мікронерівності цілком залежать від кінетичної енергії абразивного зерна, що рухається, $W = m \cdot V_0^2 / 2$ (де m – маса абразивного зерна, кг; V_0 – початкова швидкість руху абразивного зерна, м/с). У випадку недостатнього значення кінетичної енергії абразивне зерно може повністю втратити швидкість руху й зупинитися в оброблюваному матеріалі, не зробивши повного зрізу. Очевидно, чим більша кінетична енергія W зерна, тим більші висота R_{\max} й довжина l мікронерівності, що утворюється (рис. 2.1). На параметри R_{\max} й l суттєво впливає кут входу абразивного зерна в оброблюваний матеріал α .

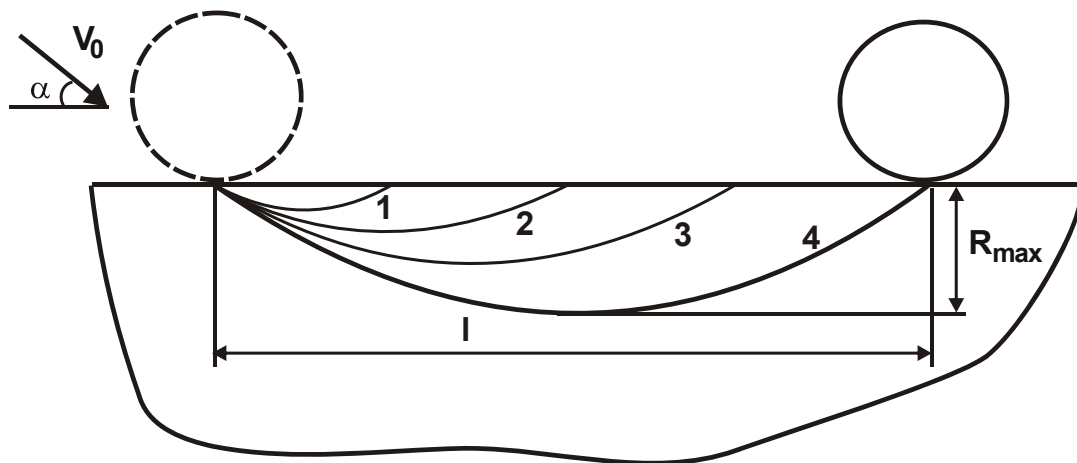


Рис. 2.1. Траєкторії руху абразивного зерна в оброблюваному матеріалі залежно від його кінетичної енергії:
 $W_1 < W_2 < W_3 < W_4$

Для визначення параметрів R_{\max} і l можна скористатися умовою рівності кінетичної енергії W зерна, що рухається, і роботи різання $A = P_z \cdot l$, де $P_z = \sigma \cdot a \cdot v$ – тангенціальна складова сили різання, Н; σ – умовне напруження різання, Н/м² (енергоємність обробки, Дж/м³); a , v , l – відповідно товщина, ширина й довжина зрізу, м. Тоді одержимо:

$$\frac{m \cdot V_0^2}{2} = \sigma \cdot a \cdot v \cdot l. \quad (2.1)$$

За фізичною сутністю параметр σ виражає енергоємність обробки – кількість енергії, затрачуваної на знімання одиниці об'єму матеріалу, і

вимірюється в Дж/м³. З іншого боку, параметр σ виражає умовне напруження різання, яке вимірюється в Н/м². Очевидно, від розмірності Дж/м³ можна перейти до розмірності Н/м². Тому енергоємність обробки й умовна напруга різання за фізичною сутністю одна й та сама величина.

У першому наближенні добуток параметрів $a \cdot v \cdot l$ у залежності (2.1) можна розглядати як об'єм матеріалу, що знімається одним зерном $\mathcal{Q}_{\text{зріз}} = a \cdot v \cdot l$, який визначає продуктивність обробки. Збільшити $\mathcal{Q}_{\text{зріз}}$ за умови заданої кінетичної енергії абразивного зерна, що рухається, $W = m \cdot V_0^2 / 2$ можна винятково за рахунок зменшення енергоємності σ обробки відповідно до перетвореної залежності (2.1):

$$\mathcal{Q}_{\text{зріз}} = \frac{m \cdot V_0^2}{2 \cdot \sigma}. \quad (2.2)$$

З іншого боку, досягти заданого значення $\mathcal{Q}_{\text{зріз}} = a \cdot v \cdot l$ можна різними поєднаннями параметрів a і l . Розглядаючи $a \approx R_{\text{max}}$, очевидно, ефективно збільшувати l . Це дозволить зменшити висоту мікронерівності R_{max} й відповідно шорсткість обробленої поверхні:

$$R_{\text{max}} = \frac{\mathcal{Q}_{\text{зріз}}}{v \cdot l}. \quad (2.3)$$

Таким чином, у загальному вигляді показано, що основними умовами зменшення шорсткості поверхні й підвищення продуктивності обробки є зменшення енергоємності обробки σ і збільшення довжини зрізу l . При цьому зменшення енергоємності обробки σ слід розглядати як необхідну умову, а збільшення довжини зрізу l – як достатню умову підвищення ефективності абразивної обробки деталей затопленими струменями. Безсумнівно, параметри σ й l залежать від великої кількості різних факторів обробки й, у першу чергу, від кута входу α абразивного зерна в оброблюваний матеріал (див. рис. 2.1). Тому важливо встановити функціональні зв'язки параметрів σ і l залежно від кута входу α з позицій теорії різання матеріалів і динаміки взаємодії абразивного зерна з оброблюваним матеріалом (рис. 2.2). У зв'язку із цим даний розділ роботи присвячений теоретичному визначенню енергоємності обробки σ й

умов її зменшення з метою обґрунтування технологічних можливостей підвищення якості та продуктивності абразивної обробки деталей затопленими струменями.

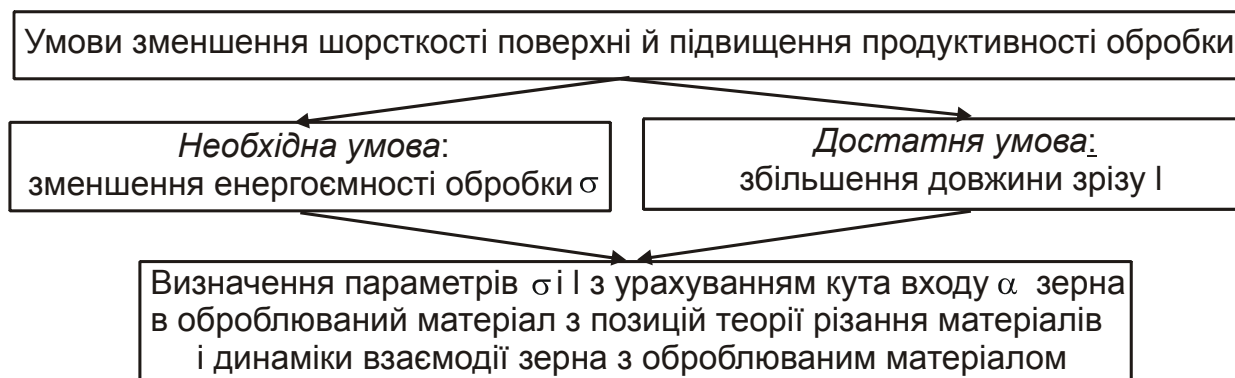


Рис. 2.2. Структурна схема умов зменшення шорсткості поверхні й підвищення продуктивності обробки

У розділі 3 будуть теоретично визначені умови збільшення довжини зрізу l з урахуванням закономірностей зміни енергоємності обробки σ і на цій основі виконані розрахунки шорсткості поверхні й продуктивності обробки та сформульовані основні напрями підвищення ефективності абразивної обробки деталей затопленими струменями.

2.2. Теоретичне визначення й аналіз умов зменшення енергоємності обробки як основного фактора підвищення якості та продуктивності абразивної обробки деталей затопленими струменями

Як було зазначено, щоб визначити оптимальні умови обробки, важливо знати закономірності процесу взаємодії абразивних зерен з оброблюваним матеріалом і, в першу чергу, закономірності формування енергоємності обробки. Тому в даному підрозділі наведено теоретичний аналіз закономірностей стружкоутворення в процесі різання окремим абразивним зерном і визначено енергетичні параметри обробки за умови утворення сегментної форми зрізу (рис. 2.3). На цій основі [96] встановлено основні умови зменшення енергоємності обробки й відповідно умови підвищення якості та продуктивності обробки.

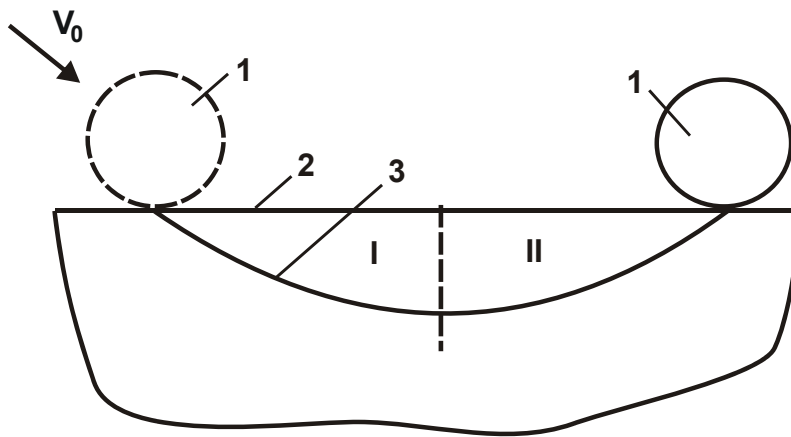


Рис. 2.3. Загальний вигляд форми зрізу окремим зерном

У процесі абразивної обробки деталей затопленими струменями

Умовні позначення: 1 – різальне зерно; 2 – оброблюваний матеріал; 3 – траєкторія руху зерна (сегментна форма зрізу).

Для визначення цих умов слід скористатися теоретичним підходом, запропонованим у роботах [96; 124 – 127] стосовно до процесу різання зі змінною товщиною зрізу (рис. 2.4). Це дозволить встановити закономірності стружкоутворення та знімання металу в моменти входу й виходу абразивного зерна з контакту з оброблюваним матеріалом (ділянки I і II на рис. 2.3).

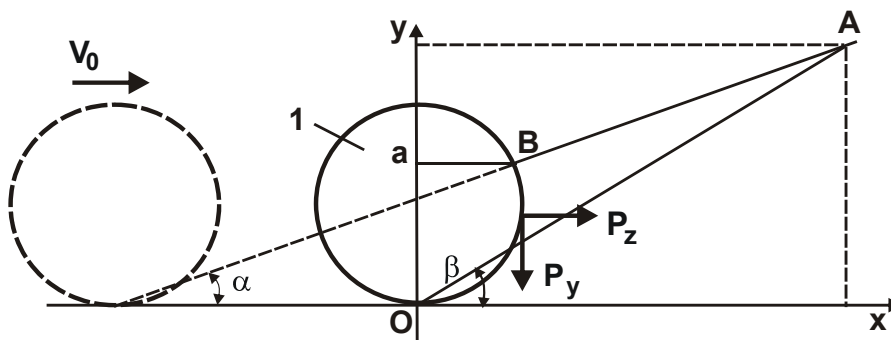


Рис. 2.4. Розрахункова схема процесу стружкоутворення в процесі різання окремим абразивним зерном 1

Спочатку слід розглянути умови стружкоутворення в момент входу зерна в оброблюваний матеріал (випадок різання з товщиною зрізу, що збільшується), а потім у момент виходу зерна з контакту з матеріалом (випадок різання зі зменшуваною товщиною зрізу). Для спрощення розрахунків форми зрізу на ділянках I і II (див. рис. 2.3) необхідно апроксимувати прямими лініями.

2.2.1. Визначення енергоємності обробки в процесі різання зі збільшеною товщиною зрізу

Припустимо, що з боку абразивного зерна, що рухається зі швидкістю V_0 , на оброблюваний матеріал діють тангенціальна P_z й радіальна P_y складові сили різання, які викликають періодичне руйнування (зсув) матеріалу уздовж умовної площини зсуву, розташованої під кутом β до напрямку руху зерна (див. рис. 2.4). Для визначення положення умовної площини зсуву оброблюваного матеріалу слід встановити дотичне напруження τ , що виникає в площині, розташованій під кутом β [93]:

$$\tau = \frac{P_z \cdot \cos \beta - P_y \cdot \sin \beta}{b \cdot L}, \quad (2.4)$$

де b – ширина зрізу, м;

$L = OA$ – довжина площини зсуву матеріалу, м.

Довжину L можна знайти на основі розв'язання двох тригонометричних рівнянь, які випливають із рис. 2.4:

$$\begin{cases} y = a + \operatorname{tg} \alpha \cdot x, \\ y = \operatorname{tg} \beta \cdot x, \end{cases} \quad (2.5)$$

де x , y – координати точки перетину умовної площини зсуву OA з оброблюваною поверхнею BA ;

a – товщина зрізу, м;

α – кут входу абразивного зерна в оброблюваний матеріал.

Розв'язуючи систему рівнянь (2.5), маємо:

$$x = \frac{a}{(\operatorname{tg} \beta - \operatorname{tg} \alpha)}; \quad L = \frac{x}{\cos \beta} = \frac{a}{\cos \beta \cdot (\operatorname{tg} \beta - \operatorname{tg} \alpha)}.$$

Підставляючи отримані вирази в залежність (2.4), одержимо:

$$\tau = \frac{P_y \cdot \cos \beta \cdot (\operatorname{tg} \beta - \operatorname{tg} \alpha)}{b \cdot a} \cdot (K_{\text{ш}} \cdot \cos \beta - \sin \beta), \quad (2.6)$$

де $K_{\text{ш}} = P_z / P_y$ – коефіцієнт шліфування, який визначається за залежністю: $K_{\text{ш}} = \text{ctg}(\psi + \gamma)$, наведеною в роботі [125];

ψ – умовний кут тертя зерна з оброблюваним матеріалом;

γ – від'ємний передній кут різального абразивного зерна.

Спочатку кут γ слід розглядати як постійний. Виходячи з того, що $\psi + \gamma = \psi_1$ і $K_{\text{ш}} = \text{ctg} \psi_1$, залежність (2.6) після відповідних тригонометричних перетворень матиме наступний вигляд:

$$\begin{aligned} \tau &= \frac{P_y \cdot \cos \beta \cdot (\text{tg} \beta - \text{tg} \alpha)}{b \cdot a} \cdot (K_{\text{ш}} \cdot \cos \beta - \sin \beta) = \\ &= \frac{P_y}{b \cdot a} \cdot \frac{(\sin \beta \cdot \cos \alpha - \sin \alpha \cdot \cos \beta)}{\sin \psi_1 \cdot \cos \alpha} \cdot (\cos \psi_1 \cdot \cos \beta - \sin \beta \cdot \sin \psi_1) = \\ &= \frac{P_y}{2 \cdot b \cdot a \cdot \sin \psi_1 \cdot \cos \alpha} \cdot [\sin(2\beta - \alpha + \psi_1) - \sin(\alpha + \psi_1)]. \end{aligned} \quad (2.7)$$

Як впливає із залежності (2.7), дотичне напруження τ зі збільшенням кута β змінюється за законом синусоїди $\sin(2\beta - \alpha + \psi_1)$ (рис. 2.5). За умови $\sin(2\beta - \alpha + \psi_1) = 1$ дотичне напруження τ набуде максимального значення τ_{max} . Кут β , що відповідає максимальному дотичному напруженню $\tau = \tau_{\text{max}}$, буде визначати положення умовної площини зсуву оброблюваного матеріалу:

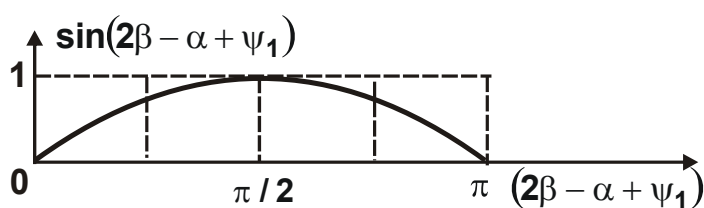


Рис. 2.5. Графік функції $\sin(2\beta - \alpha + \psi_1)$

$$\beta = \frac{\pi}{4} + \frac{\alpha - \psi_1}{2}. \quad (2.8)$$

Як видно, умовний кут зсуву оброблюваного матеріалу β тим більший, чим більший кут входу абразивного зерна в оброблюваний матеріал α і менший кут $\psi_1 = \psi + \gamma$, тобто чим менший умовний кут тертя оброблюваного матеріалу з абразивним зерном ψ (або коефіцієнт тертя f) і від'ємний передній кут різального абразивного зерна γ .

Підставляючи залежність (2.8) в (2.7), можна визначити максимальне дотичне напруження $\tau_{\max} = \frac{P_y}{b \cdot a \cdot \sin \psi_1 \cdot \cos \alpha} \cdot \sin^2 \left(\frac{\pi}{4} - \frac{\alpha}{2} - \frac{\psi_1}{2} \right)$.

Зсув оброблюваного матеріалу в умовній площині ОА відбудеться за умови досягнення максимальним дотичним напруженням τ_{\max} межі міцності на зсув оброблюваного матеріалу $\tau_{\text{зсув}}$. Тоді, вважаючи, що $\tau_{\max} = \tau_{\text{зсув}}$, з отриманої залежності можна визначити радіальну складову сили різання P_y :

$$P_y = 2 \cdot a \cdot b \cdot \tau_{\text{зсув}} \cdot \sin \psi_1 \cdot \cos \alpha \cdot \frac{1}{[1 - \sin(\alpha + \psi_1)]} \quad (2.9)$$

Відповідно, тангенціальна складова сили різання P_z буде визначена наступним чином:

$$P_z = P_y \cdot K_{\text{ш}} = P_y \cdot \text{ctg} \psi_1 = 2 \cdot a \cdot b \cdot \tau_{\text{зсув}} \cdot \cos \psi_1 \cdot \cos \alpha \cdot \frac{1}{[1 - \sin(\alpha + \psi_1)]} \quad (2.10)$$

Якщо подати тангенціальну складову сили різання у вигляді $P_z = a \cdot b \cdot \sigma$, то умовна напруга різання σ або енергоємність обробки матиме вигляд:

$$\sigma = \cos \psi_1 \cdot \cos \alpha \cdot \frac{2 \cdot \tau_{\text{зсув}}}{[1 - \sin(\alpha + \psi_1)]} \quad (2.11)$$

За умови $\alpha = 0$ залежність (2.11) набуде вигляду:

$$\begin{aligned} \sigma &= \frac{2 \tau_{\text{зсув}} \cdot \sin(90^\circ - \psi_1)}{[1 - \cos(90^\circ - \psi_1)]} = \frac{2 \tau_{\text{зсув}} \cdot \sin\left(45^\circ - \frac{\psi_1}{2}\right) \cdot \cos\left(45^\circ - \frac{\psi_1}{2}\right)}{\sin^2\left(45^\circ - \frac{\psi_1}{2}\right)} = \\ &= \frac{2 \tau_{\text{зсув}}}{\text{tg}\left(45^\circ - \frac{\psi_1}{2}\right)} \end{aligned} \quad (2.12)$$

Залежність (2.12) ідентична залежності, отриманій у роботі [125] для спрощеної схеми різання ($\alpha = 0$), що свідчить про вірогідність виконаних розрахунків. З урахуванням залежності (2.8) для умови $\alpha = 0$ залежність (2.12) набуде вигляду:

$$\sigma = \frac{2\tau_{зсув}}{\operatorname{tg}\beta}. \quad (2.13)$$

Розглядаючи тригонометричне відношення $\operatorname{tg}2\beta = \frac{2\operatorname{tg}\beta}{1 - \operatorname{tg}^2\beta}$ й нехтуючи в ньому величиною $\operatorname{tg}^2\beta$, яка значно менша від одиниці, залежність (2.13) після перетворень матиме вигляд:

$$\sigma = \frac{4\tau_{зсув}}{\operatorname{tg}2\beta}. \quad (2.14)$$

Із залежності (2.8) випливає: $\operatorname{tg}2\beta = \operatorname{tg}(90^\circ - \psi_1) = \operatorname{ctg}\psi_1 = K_{\psi}$. Тоді:

$$\sigma = \frac{4\tau_{зсув}}{K_{\psi}}. \quad (2.15)$$

У результаті отримано відому залежність, наведену в роботі [127]. Отже, отримане рішення (2.11) є узагальненим рішенням, з якого випливає наведене відоме рішення (2.15).

Із залежностей (2.9), (2.10) і (2.11) випливає неоднозначний характер зміни радіальної P_y й тангенціальної P_z складових сили різання, а також умовного напруження різання σ зі збільшенням кутів ψ_1 і α . З одного боку, за рахунок чисельника відбувається зменшення параметрів P_y , P_z і σ зі збільшенням кутів ψ_1 і α , а з іншого боку, за рахунок знаменника – збільшення параметрів P_y , P_z і σ . Пунктирною лінією на рис. 2.6 показано графік функції $\sin(\alpha + \psi_1)$, а суцільною лінією – графік функції $1 - \sin(\alpha + \psi_1)$. Із залежностей (2.9), (2.10) і (2.11) видно, що існують екстремальні залежності параметрів P_y , P_z і σ від кутів ψ_1 і α .

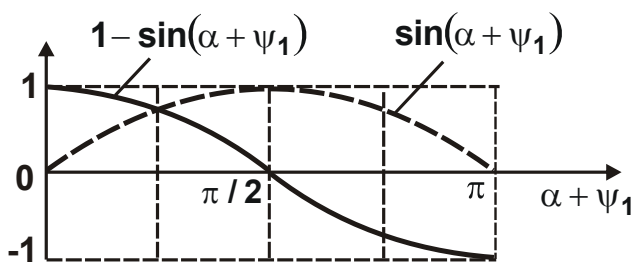


Рис. 2.6. Графіки функцій $\sin(\alpha + \psi_1)$ і $1 - \sin(\alpha + \psi_1)$

Для визначення екстремуму функції P_z підпорядкуймо залежність (2.10) необхідній умові екстремуму: $(P_z)'_{\alpha} = 0$. Після перетворень буде одержано:

$$\alpha = 90^\circ - \psi_1. \quad (2.16)$$

У табл. 2.1 наведено розраховані за залежністю (2.16) значення кута α для різних значень кута ψ_1 .

Таблиця 2.1

Розрахункові значення кута α

ψ_1 , град.	0	30	45	60	70	90
α , град.	90	60	45	30	20	0

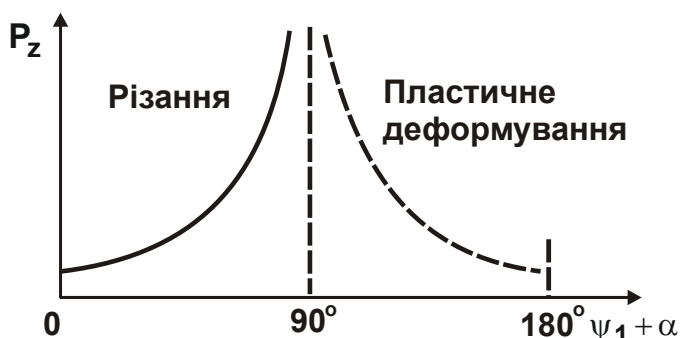


Рис. 2.7. Загальний вигляд залежності P_z від кута $\psi_1 + \alpha$

Підставляючи залежність (2.16) у (2.10), можна побачити, що в точці екстремуму функція P_z наближається до нескінченності (рис. 2.7). Це пов'язано з тим, що умовний кут зсуву оброблюваного матеріалу β , який визначається залежністю (2.8), дорівнює куту α . У результаті, виходячи з рис. 2.3, умовна

площина зсуву OA не перетинається з оброблюваною поверхнею BA й процес стружкоутворення відсутній, має місце лише процес пластичного деформування оброблюваного матеріалу (без утворення стружки).

Даний висновок впливає з наступного. Якщо позначити кут $\psi_1 + \alpha = z$, то $\alpha = z - \psi_1$. Підставляючи дане відношення в залежність

(2.8), одержимо $\beta = \frac{\pi}{4} + \frac{z}{2} - \psi_1$. За умови, що $z = 90^\circ$ (див. рис. 2.5), кут

$\beta = 90^\circ - \psi_1$. Такого ж значення набуває й кут $\alpha = z - \psi_1 = 90^\circ - \psi_1$. Отже, у точці екстремуму функції P_z умовний кут зсуву оброблюваного матеріалу дорівнює $\beta = \alpha$.

При куті $z > 90^\circ$, наприклад, при $z = 110^\circ$ кут $\beta = 100^\circ - \psi_1$, а кут $\alpha = z - \psi_1 = 110^\circ - \psi_1$, тобто кут $\beta < \alpha$. У цьому випадку, очевидно, процес стружкоутворення (різання) буде відсутнім, а, як зазначалося вище, буде мати місце лише процес пластичного деформування оброблюваного матеріалу (без утворення стружки).

В узагальненому вигляді характер зміни кутів β і α від кута z показаний у табл. 2.2, а також графічно на рис. 2.8. Як видно, в разі зміни кута z в межах $0 < z < 90^\circ$ кут $\beta < \alpha$. При $z = 90^\circ$ відповідно $\beta = \alpha$, а при $z > 90^\circ$ справджується умова $\beta < \alpha$ [21].

Таблиця 2.2

Розрахункові значення кутів β і α

z , град.	0	30	45	60	90	110	160
β , град.	$45^\circ - \psi_1$	$60^\circ - \psi_1$	$67,5^\circ - \psi_1$	$75^\circ - \psi_1$	$90^\circ - \psi_1$	$100^\circ - \psi_1$	$125^\circ - \psi_1$
α , град.	$-\psi_1$	$30^\circ - \psi_1$	$45^\circ - \psi_1$	$60^\circ - \psi_1$	$90^\circ - \psi_1$	$110^\circ - \psi_1$	$160^\circ - \psi_1$

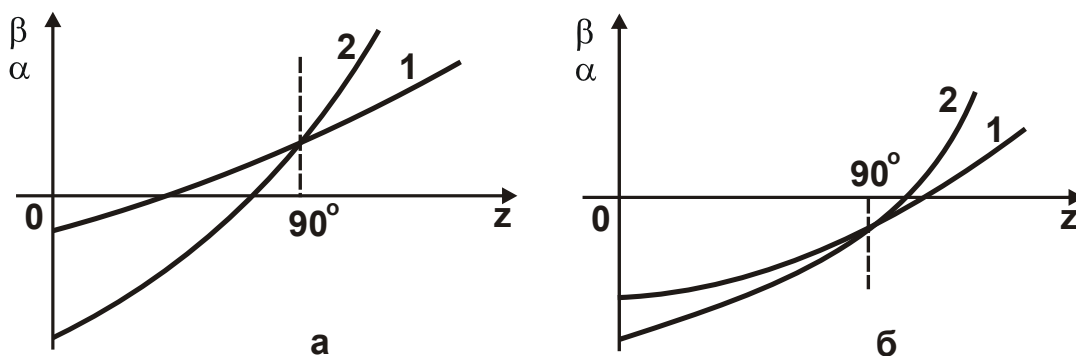


Рис. 2.8. Характер зміни кутів β (1) і α (2) залежно від кута z

З табл. 2.2 також випливає, що в разі відносно великого значення кута $\psi_1 = \psi + \gamma$ (при $\psi_1 \rightarrow 90^\circ$) умовний кут зсуву оброблюваного матеріалу β є від'ємним фактично у всьому діапазоні зміни кута ψ_1 й процес різання відсутній. Він можливий лише за великого значення кута $z \rightarrow 90^\circ$, коли кути β й α мають додатні значення (див. рис. 2.8а). Якщо

ж кути β й α за умови $z = 90^\circ$ мають від'ємні значення (див. рис. 2.8б), то процес різання нездійснений. Таким чином доведено, що в разі зміни кута $z = \psi_1 + \alpha$ в межах $0 < \psi_1 + \alpha < 90^\circ$ можливий процес різання, а в разі зміни кута $z = \psi_1 + \alpha$ в межах $90^\circ < \psi_1 + \alpha < 180^\circ$ – процес пластичного деформування оброблюваного матеріалу. Із цього випливає, що зменшити тангенціальну складову сили різання P_z можна за умови:

$$\psi_1 + \alpha < 90^\circ. \quad (2.17)$$

У табл. 2.3 і на рис. 2.9 наведено розраховані за перетвореною залежністю (2.17) значення кута $\gamma = 90^\circ - \alpha - \psi$.

Таблиця 2.3

Розрахункові значення кута γ (у градусах)

ψ°	α°					
	0	30	45	60	70	80
10	80	50	35	20	10	0
20	70	40	25	10	0	–
30	60	30	15	0	–	–
45	45	15	0	–	–	–

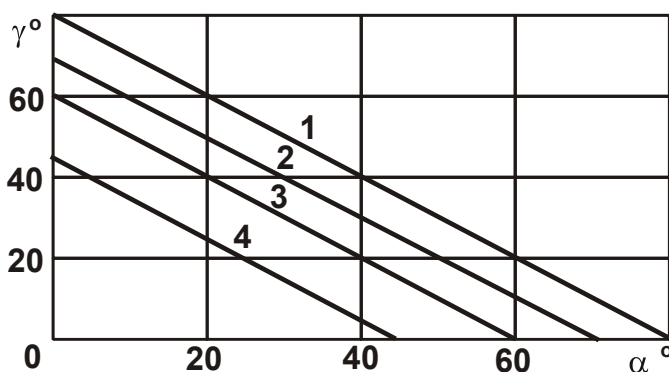


Рис. 2.9. Залежність кута γ від кута α
Умовні позначення: 1 – при $\psi = 10^\circ$; 2 – при $\psi = 20^\circ$; 3 – при $\psi = 30^\circ$; 4 – при $\psi = 45^\circ$.

З рис. 2.9 видно, що для реалізації кута α в діапазоні $0 \dots 80^\circ$ необхідно зменшувати кути ψ й γ , тобто кут $\psi_1 = \psi + \gamma$. Як уже зазначалося, кут $\psi_1 = \psi + \gamma$ за рахунок відносно великого від'ємного значення переднього кута різального абразивного зерна $\gamma = 45 \dots 60^\circ$ може набувати значень, близьких до 90° .

Тому реалізувати умову (2.17) можна лише за досить низьких значень

кута $\alpha \rightarrow 0$. Отже, процес стружкоутворення можливий фактично в процесі різання з постійною товщиною зрізу ($\alpha = 0$). У протилежному випадку буде здійснюватися процес пластичного деформування матеріалу з більш високою силовою напруженістю.

Виконати умову (2.17) можна також за рахунок різання зі зменшуваною товщиною зрізу ($\alpha < 0$). У цьому випадку кут $z = \psi_1 - \alpha$ можна зменшити фактично до нуля (за умови $\alpha = \psi_1$) і реалізувати найменше значення тангенціальної P_z складової сили різання, показаної на рис. 2.7. Це надзвичайно важливе рішення, тому що воно, по суті, визначає технологічні можливості струминно-абразивної обробки й зокрема розглянутого методу абразивної обробки деталей затопленими струменями. Дане рішення вказує на можливість ефективного застосування прогресивного способу струминно-абразивної гідро-ротаційної обробки (зачищення) дрібних деталей масою до 3 г, які мають складну просторову форму [7].

Оскільки різальне зерно за формою наближається до форми сфери, то, як уже зазначалося, за умови $\alpha < 0$ кут $z = \psi_1 - \alpha < 90^\circ$ і фактично завжди буде здійснюватися процес стружкоутворення за одночасної взаємодії абразивного зерна з оброблюваним матеріалом. Це забезпечує менші енергетичні витрати на обробку, ніж під час пластичного деформування металу без відділення стружки.

Необхідно зауважити, що дана умова справджується в процесі використання різального елемента у формі сфери, коли має місце значний негативний передній кут різання. За додатного значення переднього кута інструмента (під час різання лезовим інструментом) умовний кут ψ_1 буде набувати відносно невеликих значень і додатний кут α може змінюватися в більш широких межах, наприклад, $0 < \alpha < 45^\circ$ і більше. Це впливає з наступного. Так, при $z = \psi_1 + \alpha = 60^\circ$ умовний кут зсуву оброблюваного матеріалу $\beta = 75^\circ - \psi_1$, а кут $\alpha = 60^\circ - \psi_1$. Отже, кут $\beta > \alpha$ і можливий процес стружкоутворення. Цим показано, що різання лезовим інструментом з додатним переднім кутом порівняно з мікрорізанням абразивним зерном має у своєму розпорядженні значно більші технологічні можливості в плані здійснення процесу стружкоутворення й зниження силової напруженості процесу. З огляду на важливість отриманого рішення, слід провести детальний аналіз залежності (2.11), подаючи її у вигляді:

$$\sigma = \cos \psi_1 \cdot \cos \alpha \cdot \frac{\tau_{зсув}}{\sin^2 \left[45^\circ - \frac{(\alpha + \psi_1)}{2} \right]} \quad (2.18)$$

Характер зміни функції $\sin^2 \left[45^\circ - \frac{(\alpha + \psi_1)}{2} \right]$, що входить у знаменник залежності (2.18), графічно (суцільною лінією) показаний на рис. 2.10а. Тут же для порівняння (пунктирною лінією) наведено графік функції $\sin \left[45^\circ - \frac{(\alpha + \psi_1)}{2} \right]$. Як видно, дані функції принципово відрізняються.

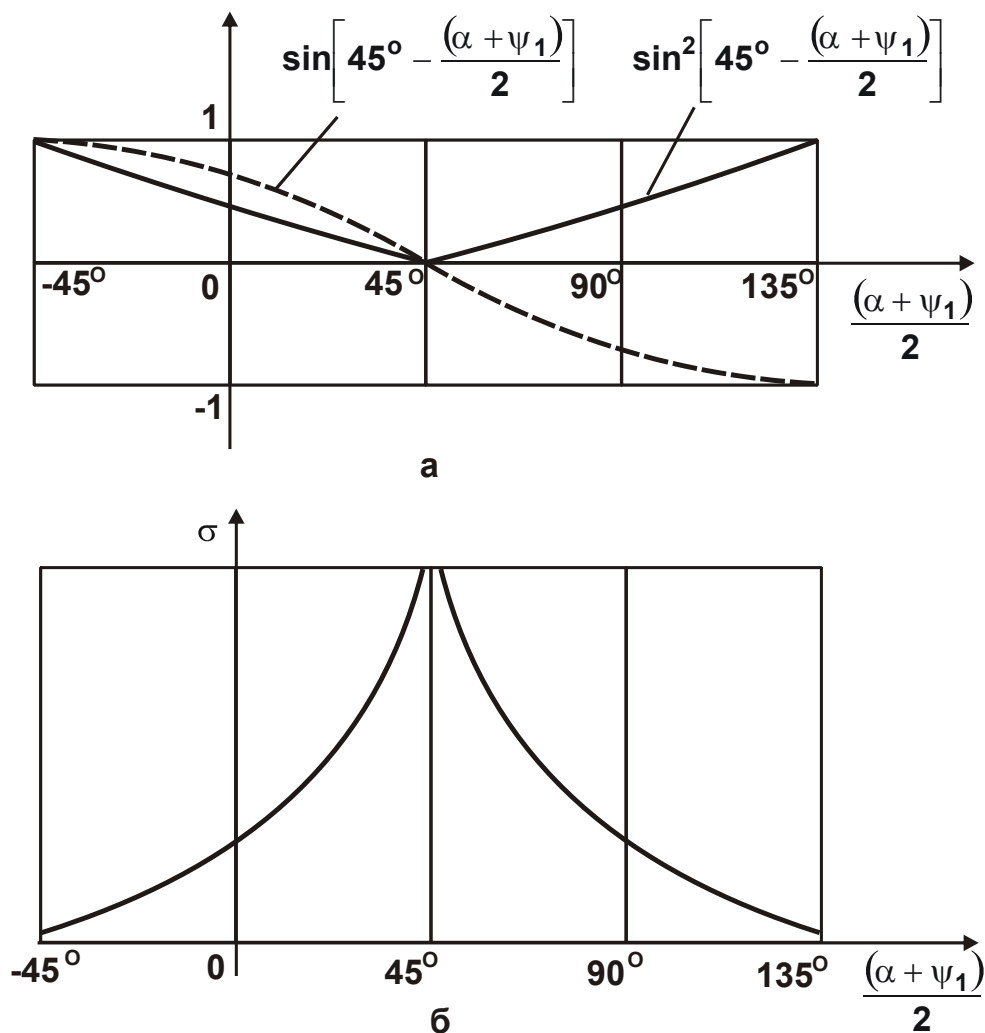


Рис. 2.10. Графіки функцій $\sin \left[45^\circ - \frac{(\alpha + \psi_1)}{2} \right]$ і $\sin^2 \left[45^\circ - \frac{(\alpha + \psi_1)}{2} \right]$ (а) і умовного напруження різання σ (б)

Характер зміни умовного напруження різання σ графічно показаний на рис. 2.10б. Якщо значення кута $\frac{(\alpha + \psi_1)}{2} = 45^\circ$, умовне напруження різання σ – нескінченно велика величина. Зменшити σ можна за умови зменшення кута $\frac{(\alpha + \psi_1)}{2}$ в діапазоні $0 < \frac{(\alpha + \psi_1)}{2} < 45^\circ$ або його збільшення в діапазоні $45^\circ < \frac{(\alpha + \psi_1)}{2} < 135^\circ$. У першому випадку, тобто за умови $0 < (\alpha + \psi_1) < 90^\circ$, кут входу зерна в оброблюваний матеріал повинен бути меншим від значення $\alpha < 90^\circ - \psi_1$. З огляду на те, що кут $\psi_1 = \psi + \gamma$ набуває значень, близьких до 90° , кут входу зерна в оброблюваний матеріал α повинен бути невеликим, близьким до нуля [91].

У другому випадку, тобто за умови $90^\circ < (\alpha + \psi_1) < 270^\circ$, як уже зазначалося, процес стружкоутворення нездійснений, можливий лише процес пластичного деформування матеріалу без утворення стружки.

У табл. 2.4 та на рис. 2.11 і 2.12 наведено розрахункові значення відношення $\sigma / 2\tau_{зсув}$, отримані на основі перетвореної залежності (2.11):

$$\frac{\sigma}{2\tau_{зсув}} = \cos \psi_1 \cdot \cos \alpha \cdot \frac{1}{[1 - \sin(\alpha + \psi_1)]}. \quad (2.19)$$

Таблиця 2.4

Розрахункові значення відношення $\sigma / 2\tau_{зсув}$

ψ_1°	α°					
	0	10	20	30	45	60
30	1,732	2,387	3,477	5,6	18	∞
45	2,357	3,844	7,144	17,95	∞	
60	3,73	8,21	30,91	∞		
70	5,43	22,45	∞			
90	∞					

Як видно, зі збільшенням кутів α і ψ_1 відношення $\sigma / 2\tau_{зсув}$ необмежено збільшується. Отже, досягти найменшого значення σ можна за умови $\alpha = 0$, тобто в процесі різання з постійною товщиною зрізу.

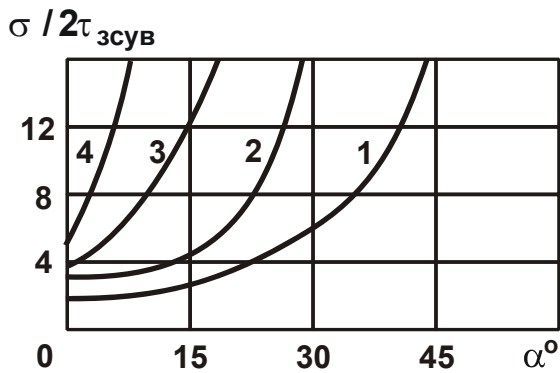


Рис. 2.11. Залежність відношення $\sigma / 2\tau_{зсув}$ від кута α

Умовні позначення:

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

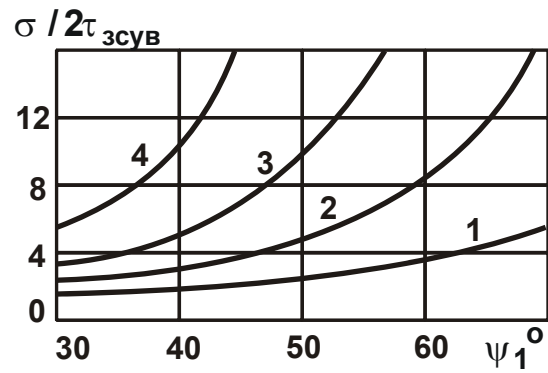


Рис. 2.12. Залежність відношення $\sigma / 2\tau_{зсув}$ від кута ψ_1

Умовні позначення:

1; 2; 3; 4 – при $\alpha = 0^\circ; 10^\circ; 20^\circ; 30^\circ$.

Таким чином встановлено, що реалізуючи умову $\alpha \rightarrow 0$, можна досягти найменшого значення умовного напруження різання σ , тобто ефективно обробку здійснювати з постійною товщиною зрізу. Найбільш просто реалізувати дану умову можна за лезової обробки. У процесі абразивної обробки, включаючи процеси обробки зв'язаним абразивом (шліфування, хонінгування та ін.) і вільним абразивом (притирання, струминно-абразивну обробку та ін.), товщина зрізу завжди змінна. Тому умовне напруження різання σ (енергоємність обробки) буде завжди більшою, ніж під час лезової обробки.

2.2.2. Порівняння енергоємності обробки в процесі різання зі збільшеною товщиною зрізу й постійною товщиною зрізу

Слід провести більш детальний порівняльний аналіз енергоємності обробки під час різання зі збільшеною товщиною зрізу й постійною товщиною зрізу. Для цього можна перетворити залежність (2.11), виражаючи її через умовний кут зсуву оброблюваного матеріалу β , який визначається залежністю (2.8). Для цього дану залежність подамо у наступному вигляді:

$$\psi_1 = 90^\circ - 2\beta + \alpha . \quad (2.20)$$

Підставимо залежність (2.20) у (2.11):

$$\sigma = \cos(90^\circ - 2\beta + \alpha) \cdot \cos \alpha \cdot \left[\frac{2 \cdot \tau_{зсув}}{1 - \sin[90^\circ - 2 \cdot (\beta - \alpha)]} \right] =$$

$$= \frac{2 \cdot \tau_{зсув} \cdot \sin(2\beta - \alpha) \cdot \cos \alpha}{1 - \cos[2 \cdot (\beta - \alpha)]} = \frac{\tau_{зсув} \cdot \sin(2\beta - \alpha) \cdot \cos \alpha}{\sin^2(\beta - \alpha)}. \quad (2.21)$$

Як було показано, за умови $\beta < \alpha$ процес різання (стружкоутворення) відсутній, можливий лише процес пластичного деформування оброблюваного матеріалу.

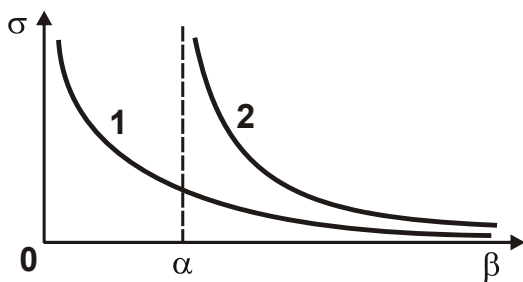


Рис. 2.13. Залежність σ від кута β

Умовні позначення: 1 – при $\alpha = 0$;
2 – при $\alpha > 0$.

Процес різання (стружкоутворення) може відбуватися за умови $\beta > \alpha$. Тому, виходячи із залежності (2.21), зі збільшенням умовного кута зсуву оброблюваного матеріалу β , починаючи зі значення $\beta = \alpha$, енергоємність обробки σ буде зменшуватися (рис. 2.13) у зв'язку зі збільшенням функції $\sin^2(\beta - \alpha)$.

Функція $\sin(2\beta - \alpha)$, яка входить до чисельника залежності (2.21), зі збільшенням кута β збільшується, починаючи зі значення $2\beta > \alpha$ або $\beta > \alpha/2$. За менших значень β , тобто при $\beta < \alpha/2$, функція $\sin(2\beta - \alpha)$ від'ємна, так само, як і функція $\sin(\beta - \alpha)$, яка входить до знаменника залежності (2.21). Тому процес різання (стружкоутворення) відсутній.

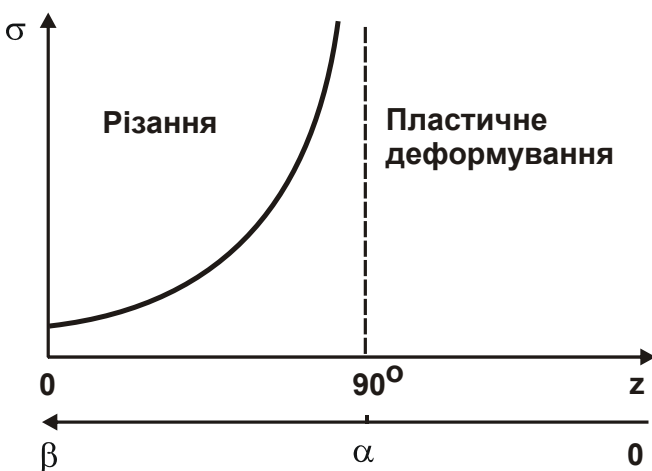


Рис. 2.14. Залежність σ від кутів z й β

Порівнюючи графіки тангенціальної складової сили різання P_z й енергоємності обробки σ , які наведені на рис. 2.7 і рис. 2.13, можна побачити, що процес різання (стружкоутворення) можливий у діапазонах $\beta > \alpha$ і $z < 90^\circ$. У зв'язку із цим, на рис. 2.14 наведено узагальнений графік зміни енергоємності обробки σ залежно від двох

змінних величин: z і β . Отримані залежності (2.11) і (2.21) містять по три різні тригонометричні функції, що ускладнює аналіз енергоємності обробки σ . Тому важливо спростити дані залежності, виражаючи енергоємність обробки σ через одну або дві тригонометричні функції. Для цього можна перетворити залежність (2.11), подаючи тригонометричну функцію $\cos \psi_1$ в наступному вигляді:

$$\cos \psi_1 = \cos[(\alpha + \psi_1) - \alpha] = \cos(\alpha + \psi_1) \cdot \cos \alpha + \sin(\alpha + \psi_1) \cdot \sin \alpha. \quad (2.22)$$

Підставимо вираз (2.22) у залежність (2.11) і перетворимо її:

$$\begin{aligned} \sigma &= 2\tau_{\text{зсув}} \cdot \cos \alpha \cdot \frac{[\cos(\alpha + \psi_1) \cdot \cos \alpha + \sin(\alpha + \psi_1) \cdot \sin \alpha]}{[1 - \sin(\alpha + \psi_1)]} = \\ &= 2\tau_{\text{зсув}} \cdot \cos \alpha \cdot \frac{[\sin[90^\circ - (\alpha + \psi_1)] \cdot \cos \alpha + \cos[90^\circ - (\alpha + \psi_1)] \cdot \sin \alpha]}{[1 - \cos[90^\circ - (\alpha + \psi_1)]]} = \\ &= 2\tau_{\text{зсув}} \cdot \cos \alpha \cdot \left\{ \frac{\cos \alpha}{\text{tg}\left[45^\circ - \frac{(\alpha + \psi_1)}{2}\right]} + \frac{[\cos^2\left[45^\circ - \frac{(\alpha + \psi_1)}{2}\right] - \sin^2\left[45^\circ - \frac{(\alpha + \psi_1)}{2}\right]] \cdot \sin \alpha}{2 \cdot \sin^2\left[45^\circ - \frac{(\alpha + \psi_1)}{2}\right]} \right\} = \\ &= 2\tau_{\text{зсув}} \cdot \cos \alpha \cdot \left\{ \cos \alpha \cdot \text{tg}\left[45^\circ + \frac{(\alpha + \psi_1)}{2}\right] + \frac{\sin \alpha}{2} \cdot \left[\text{tg}^2\left[45^\circ + \frac{(\alpha + \psi_1)}{2}\right] - 1\right] \right\}. \quad (2.23) \end{aligned}$$

Для кількісного оцінювання отриманої залежності (2.23) у табл. 2.5 наведено розрахункові значення функції $\text{tg}\left[45^\circ + \frac{(\alpha + \psi_1)}{2}\right]$, а в табл. 2.6 – розрахункові значення відношення $\sigma / 2\tau_{\text{зсув}}$, отримані на основі залежності (2.23). Як видно, якщо значення $(\alpha + \psi_1) < 90^\circ$, перший доданок залежності (2.23) несуттєво відрізняється від розрахованого значення відношення $\sigma / 2\tau_{\text{зсув}}$. Отже, у цьому випадку другий доданок залежності (2.23) буде менший від першого доданка і ним у першому наближенні можна знехтувати.

Таблиця 2.5

Розрахункові значення функції $\operatorname{tg}\left[45^\circ + \frac{(\alpha + \psi_1)}{2}\right]$

ψ_1°	α°						
	0	10	20	30	45	70	90
0	1	1,191	1,428	1,732	2,415	5,671	∞
10	1,191	1,428	1,732	2,145	3,15	11,43	
20	1,428	1,732	2,145	2,747	4,5	∞	
30	1,732	2,145	2,747	3,732	7,5		
45	2,415	3,15	4,5	7,5	∞		
70	5,671	11,43	∞				
90	∞						

Таблиця 2.6

Розрахункові значення відношення $\sigma/2\tau_{зсув}$

ψ_1°	α°						
	0	10	20	30	45	70	90
0	1	1,19	1,427	1,73	2,41	5,67	∞
10	1,191	1,47	1,85	2,6	3,8	22,21	
20	1,428	1,935	2,472	3,476	7	∞	
30	1,732	2,49	3,477	5,6	17,56		
45	2,415	3,81	7,1	17,58	∞		
70	5,671	22,5	∞				
90	∞						

Тоді залежність (2.23) набуває вигляду:

$$\sigma = \frac{2 \cdot \tau_{зсув} \cdot \cos^2 \alpha}{\operatorname{tg}\left[45^\circ - \frac{(\alpha + \psi_1)}{2}\right]} \quad (2.24)$$

За умови $\alpha = 0$ (тобто під час різання з постійною товщиною зрізу) залежність (2.24) ідентична залежності (2.12), що свідчить про можливість нехтування в залежності (2.23) другим доданком.

Залежність (2.24) можна виразити через умовний кут зсуву оброблюваного матеріалу β , який виражається залежністю (2.7). Для цього дану залежність можна подати як:

$$\beta = 45^\circ - \frac{(\alpha + \psi_1)}{2} + \alpha. \quad (2.25)$$

Підставимо залежність (2.25) в (2.24):

$$\sigma = \frac{2 \cdot \tau_{зсув} \cdot \cos^2 \alpha}{\operatorname{tg}(\beta - \alpha)}. \quad (2.26)$$

За умови $\alpha = 0$ залежність (2.26) матиме вигляд:

$$\sigma = \frac{2 \cdot \tau_{зсув}}{\operatorname{tg} \beta}. \quad (2.27)$$

У роботі [125] показано, що коефіцієнт шліфування $K_{ш} = \operatorname{tg} 2\beta$. Використовуючи відношення:

$$\operatorname{tg} 2\beta = \frac{2 \cdot \operatorname{tg} \beta}{1 - \operatorname{tg}^2 \beta}, \quad (2.28)$$

Можна виразити у формулі (2.28) функцію $\operatorname{tg} \beta$ через $K_{ш}$. Для цього слід розв'язати рівняння (2.28) відносно невідомої функції $\operatorname{tg} \beta$ з урахуванням відношення $K_{ш} = \operatorname{tg} 2\beta$:

$$\operatorname{tg}^2 \beta + \frac{2}{K_{ш}} \cdot \operatorname{tg} \beta - 1 = 0. \quad (2.29)$$

У результаті отримано квадратне рівняння. Його розв'язання:

$$\operatorname{tg} \beta = -\frac{1}{K_{ш}} \pm \sqrt{\frac{1}{K_{ш}^2} + 1}. \quad (2.30)$$

Оскільки функція $\operatorname{tg}\beta$ повинна бути додатною, то в залежності (2.30) необхідно прийняти знак "+". Тоді буде отримано:

$$\operatorname{tg}\beta = -\frac{1}{K_{\text{ш}}} + \sqrt{\frac{1}{K_{\text{ш}}^2} + 1}. \quad (2.31)$$

Помножимо й поділимо (2.31) на величину $\frac{1}{K_{\text{ш}}} + \sqrt{\frac{1}{K_{\text{ш}}^2} + 1}$:

$$\operatorname{tg}\beta = \frac{1}{\left(\frac{1}{K_{\text{ш}}} + \sqrt{\frac{1}{K_{\text{ш}}^2} + 1}\right)} = \frac{K_{\text{ш}}}{\left(1 + \sqrt{1 + K_{\text{ш}}^2}\right)}. \quad (2.32)$$

Як відомо, у випадку абразивної обробки $K_{\text{ш}} < 1$, тому з достатньою для практики точністю залежність (2.32) можна спростити, нехтуючи другим доданком у підкореновому виразі:

$$\operatorname{tg}\beta = \frac{K_{\text{ш}}}{2}. \quad (2.33)$$

Підставляючи отриману залежність (2.33) в (2.28), маємо:

$$\sigma = \frac{4 \cdot \tau_{\text{зсув}}}{K_{\text{ш}}}. \quad (2.34)$$

Результатом стала відомої залежність [127], отримана другим шляхом. Отже, всі розрахунки виконані правильно. Слід провести аналіз залежності (2.27), яка справджується для різання як зі збільшуваною товщиною зрізу, так і з постійною ($\alpha = 0$) товщиною зрізу. На рис. 2.13 показано характер зміни енергоємності обробки σ від кута зсуву оброблюваного матеріалу β для двох випадків: $\alpha = 0$ і $\alpha > 0$.

Як видно, у випадку $\alpha = 0$ енергоємність обробки σ за умови $\beta = 0$ набуває нескінченно великого значення. Це свідчить про те, що процес різання (стружкоутворення) відсутній, має місце лише процес пластично-

го деформування матеріалу. У цьому випадку, очевидно, енергоємність обробки буде набувати кінцевого значення. Однак її розрахунок слід виконувати методами теорії пластичності матеріалів.

У випадку різання зі збільшеною товщиною зрізу ($\alpha > 0$) процес стружкоутворення починається за умови $\beta = \alpha$. За умови $\beta < \alpha$ має місце лише процес пластичного деформування оброблюваного матеріалу. Тому за умови $\beta = \alpha$ енергоємність обробки $\sigma \rightarrow \infty$. Отже, процес стружкоутворення починається не в початковий момент обробки, як у випадку $\alpha = 0$, а через певний час, коли умовний кут зсуву оброблюваного матеріалу β досягне значення кута α (див. рис. 2.13). Із цього випливає, що у випадку різання з постійною товщиною зрізу ($\alpha = 0$) процес менш енергоємний порівняно з різанням зі збільшеною товщиною зрізу в часі ($\alpha > 0$). При цьому в останньому випадку складніше здійснити процес різання, оскільки необхідно реалізувати умову $\beta > \alpha$, яка виконується не в початковий момент обробки (як у випадку $\alpha = 0$), а в разі досягнення певної товщини зрізу. Відповідно до залежності (2.8), збільшити кут β і зменшити енергоємність обробки σ (див. рис. 2.13) можна за рахунок зменшення від'ємного переднього кута γ різального зерна.

2.2.3. Визначення енергоємності обробки з урахуванням змінності переднього кута різального зерна

У процесі різання окремим абразивним зерном зі змінною товщиною зрізу у зв'язку із криволінійністю передньої (різальної) поверхні зерна кут γ буде змінним (рис. 2.15).

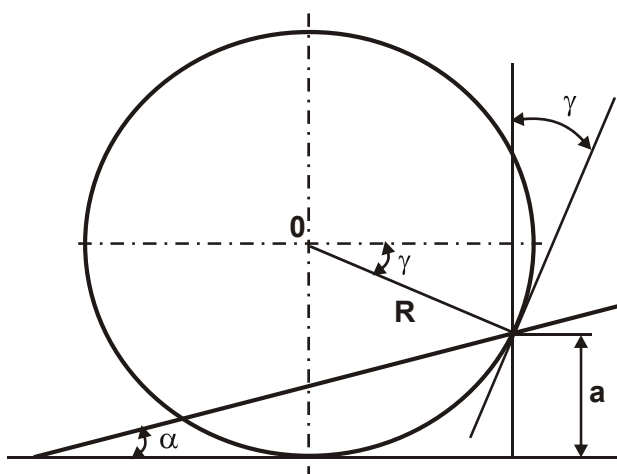


Рис. 2.15. Розрахункова схема мікрорізання зерном

Тому слід встановити зв'язок між змінною товщиною зрізу й переднім кутом γ , розглядаючи в розрахунковій схемі передній кут γ , утворений дотичною до кола радіусом R (у верхній точці контакту матеріалу з зерном) і вертикальною віссю. Виходячи зі схеми, наведеної на рис. 2.15, можна скласти рівняння [95]:

$$R = R \cdot \sin \gamma + a, \quad (2.35)$$

звідси

$$\sin \gamma = \left(1 - \frac{a}{R}\right). \quad (2.36)$$

Із залежності (2.36) випливає, що зі збільшенням відношення a/R передній кут γ зменшується (табл. 2.7 і рис. 2.16), а це приводить до збільшення умовного кута зсуву оброблюваного матеріалу β відповідно до залежності (2.8) і зменшення енергоємності обробки σ відповідно до залежності (2.27).

Таблиця 2.7

Розрахункові значення кута γ

a/R	0	0,1	0,2	0,3	0,5	1
γ , град.	90	65	54	45	30	0

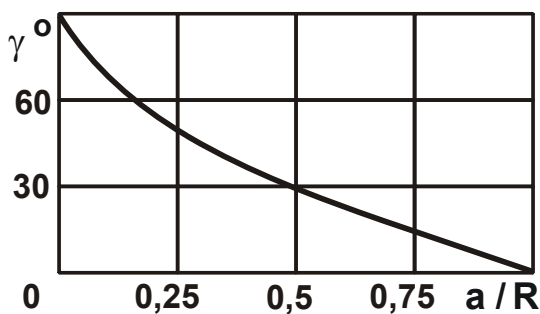


Рис. 2.16. Залежність γ від a/R

За умови $\beta = \alpha$ розпочинається процес стружкоутворення. Кут γ при цьому визначається із залежності (2.8), в якій $\beta = \alpha$. Тоді:

$$\gamma = 90^\circ - \alpha - \psi. \quad (2.37)$$

Підставимо залежність (2.37) в (2.36):

$$\frac{a}{R} = 1 - \cos(\alpha + \psi). \quad (2.38)$$

У результаті отримано аналітичну залежність для визначення відношення a/R й відповідно товщини зрізу a_1 , в разі досягнення якої розпочинається процес стружкоутворення (рис. 2.17). Як впливає із залежності (2.38), товщина зрізу тим менша, чим менший умовний кут тертя ψ і кут α . Тому з погляду підвищення ефективності процесу різання до-

цільно зменшувати коефіцієнт тертя різального зерна з оброблюваним матеріалом і кут α входу зерна в оброблюваний матеріал. У цьому випадку процес пластичного деформування матеріалу переходить у процес стружкоутворення (різання) з меншою товщиною зрізу й меншою довжиною l шляху різання абразивним зерном. Це впливає із залежності, отриманої на основі розрахункової схеми (див. рис. 2.15) з урахуванням залежності (2.38):

$$l = \frac{a}{\operatorname{tg} \alpha} = \frac{R \cdot [1 - \cos(\alpha + \psi)]}{\operatorname{tg} \alpha}. \quad (2.39)$$

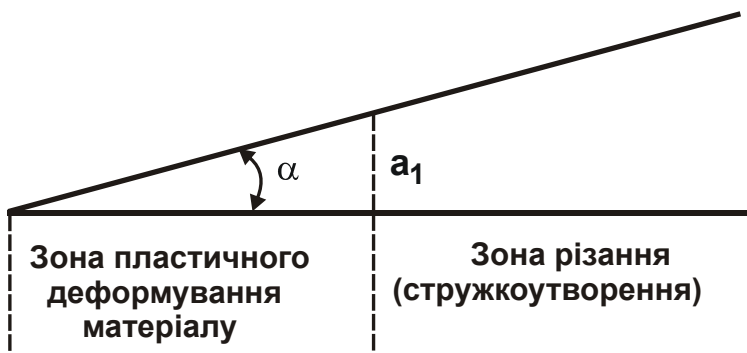


Рис. 2.17. Схематичне розташування зони пластичного деформування матеріалу й зони різання

Як видно, зі збільшенням кута α знаменник залежності (2.39) збільшується більш інтенсивно, ніж чисельник. Тому величина l буде зменшуватися зі збільшенням кута α . Зі збільшенням умовного кута тертя зерна з оброблюваним матеріалом ψ , навпаки, величина l буде збільшуватися.

Отримані теоретичні рішення узгоджуються з відомими експериментальними даними [88; 117; 120], отриманими в процесі шліфування, коли в початковий момент формування зрізу окремим зерном круга процес стружкоутворення (різання) відсутній, а має місце інтенсивне тертя абразивного зерна з оброблюваним матеріалом, що переходить у пластичне деформування матеріалу. Так, встановлено [60], що в процесі глибокого шліфування, коли утворюються довгі стружки, а кут α входу абразивного зерна в оброблюваний матеріал невеликий, процес стружкоутворення ускладнений. Спостерігається інтенсивне тертя абразивних зерен з оброблюваним матеріалом, що приводить до збільшення енергоємності обробки. У випадку багатопрхідного шліфування, навпаки, довжина зрізу менша, а кут α більший. У результаті спостерігається інтенсивне стружкоутворення і процес шліфування відбувається з меншою енергоємністю обробки.

За умови $\alpha = 0$ умовний кут зсуву оброблюваного матеріалу $\beta = \alpha$, за якого розпочинається процес стружкоутворення, дорівнює $\beta = 0$. У зв'язку із цим, виходячи із (2.37), можна визначити граничне значення переднього кута γ різального зерна (за якого процес пластичного деформування матеріалу переходить у процес стружкоутворення) для умови $\alpha = 0$:

$$\gamma = 90^\circ - \psi. \quad (2.40)$$

Підставимо залежність (2.40) у (2.36):

$$\frac{a}{R} = 1 - \cos \psi. \quad (2.41)$$

Як видно, у процесі різання з постійною товщиною зрізу, гранична товщина зрізу, за якої процес пластичного деформування оброблюваного матеріалу переходить у процес різання, визначається умовним кутом тертя ψ (коефіцієнтом тертя $f = \operatorname{tg} \psi$) і радіусом різального зерна R . Чим менше значення ψ , тим менша товщина зрізу, за якої починається процес стружкоутворення (різання).

Використовуючи залежність (2.36), можна визначити енергоємність обробки σ відповідно до залежності (2.24) для умови $\alpha = 0$, тобто в процесі різання з постійною товщиною зрізу a . Для цього необхідно виразити функцію $\operatorname{tg}\left(45^\circ - \frac{\psi_1}{2}\right)$ в залежності (2.24) через функцію $\sin \gamma$, що входить у залежність (2.36), спочатку для випадку $\psi = 0$. Залежність (2.36) буде мати такий вигляд:

$$1 - \cos(90^\circ - \gamma) = \frac{a}{R}. \quad (2.42)$$

Тоді з урахуванням відомого тригонометричного відношення:

$$2 \cdot \sin^2\left(45^\circ - \frac{\gamma}{2}\right) = \frac{a}{R}; \quad (2.43)$$

$$\operatorname{tg}\left(45^{\circ} - \frac{\gamma}{2}\right) = \frac{\sin\left(45^{\circ} - \frac{\gamma}{2}\right)}{\cos\left(45^{\circ} - \frac{\gamma}{2}\right)} = \frac{\sqrt{\frac{a}{2R}}}{\sqrt{1 - \frac{a}{2R}}}. \quad (2.44)$$

Оскільки $\frac{a}{2R} \ll 1$, то другим доданком у знаменнику залежності (2.44) можна знехтувати, у результаті залежність (2.44) матиме вигляд:

$$\operatorname{tg}\left(45^{\circ} - \frac{\gamma}{2}\right) = \sqrt{\frac{a}{2R}}. \quad (2.45)$$

Підставимо (2.45) у залежність (2.24) з урахуванням $\alpha = 0$:

$$\sigma = \frac{2 \cdot \tau_{зсув}}{\sqrt{\frac{a}{2R}}}. \quad (2.46)$$

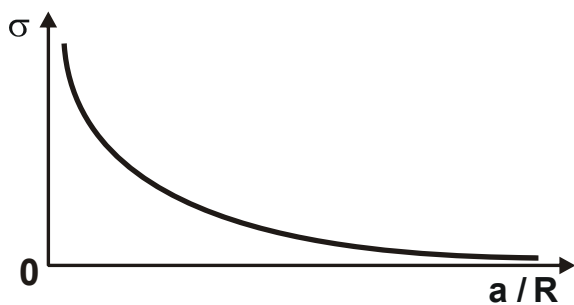


Рис. 2.18. Залежність енергоємності обробки σ від відношення a/R

Таким чином, отримано аналітична залежність для визначення енергоємності обробки σ у процесі мікрорізанні одиничним зерном у формі сфери з постійною товщиною зрізу. Як видно, зі збільшенням відношення a/R енергоємність обробки σ безупинно зменшується (рис. 2.18).

Це узгоджується з відомими експериментальними даними [87; 134], отриманими в процесі дослідження закономірностей процесу мікрорізання одиничним зерном (рис. 2.19 і 2.20).

Із наведеного випливає вірогідність отриманого теоретичного рішення (2.46), що встановлює взаємозв'язок між енергоємністю обробки σ й товщиною зрізу в процесі мікрорізання одиничним зерном. З урахуванням тертя різального зерна з оброблюваним матеріалом (тобто для випадку $\psi > 0$) залежність (2.24) зміниться. Для цього з урахуванням залежності (2.45) слід перетворити функцію:

$$\operatorname{tg}\left(45^{\circ}-\frac{\gamma}{2}-\frac{\psi}{2}\right)=\frac{\operatorname{tg}\left(45^{\circ}-\frac{\gamma}{2}\right)-\operatorname{tg}\frac{\psi}{2}}{1+\operatorname{tg}\left(45^{\circ}-\frac{\gamma}{2}\right)\cdot\operatorname{tg}\frac{\psi}{2}}=\frac{\sqrt{\frac{a}{2R}}-\operatorname{tg}\frac{\psi}{2}}{1+\sqrt{\frac{a}{2R}}\cdot\operatorname{tg}\frac{\psi}{2}}. \quad (2.47)$$

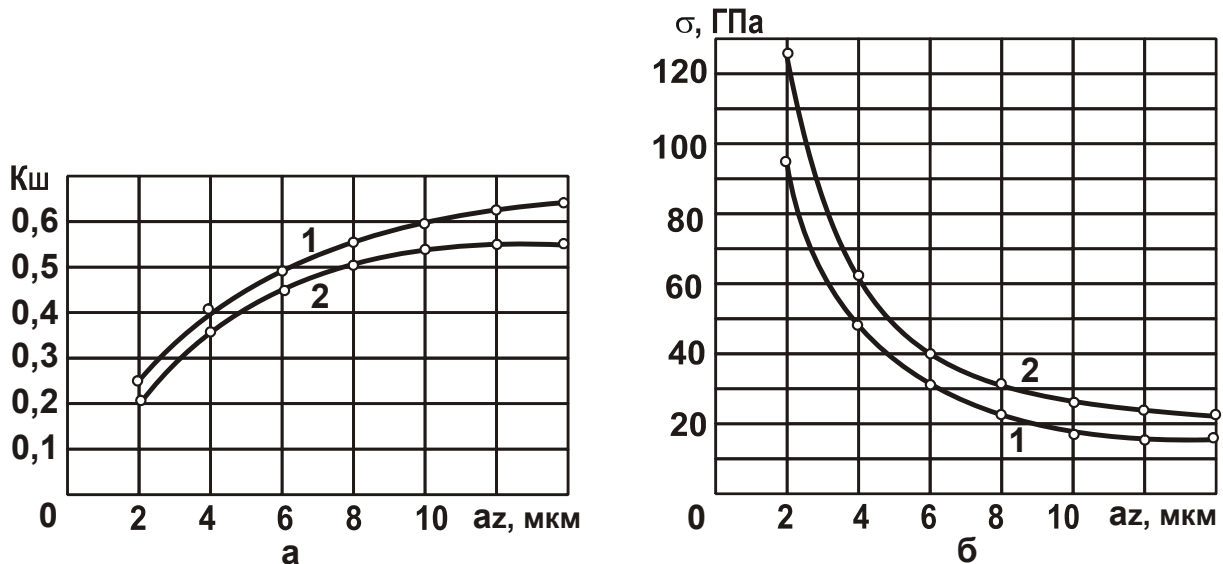


Рис. 2.19. Вплив товщини зрізу a_z на коефіцієнт

шліфування $K_{ш}$ (а) і умовне напруження різання σ (б)

Умови мікрорізання: алмазне зерно АС50, швидкість різання $V = 20$ м/с, оброблюваний матеріал: 1 – твердий сплав Т15К6; 2 – твердий сплав ТН-20 [87].

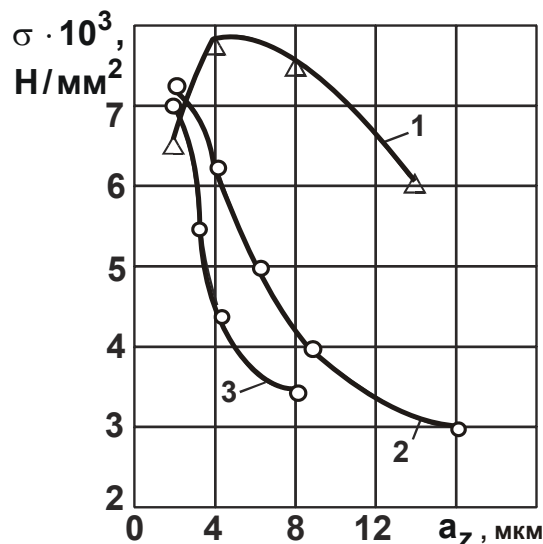


Рис. 2.20. Залежність умовного напруження різання σ від товщини зрізу a_z

Умовні позначення: 1 – $V = 0,02$ м/с; 2 – $V = 40$ м/с (матеріал – Ст. 3; $R = 60$ мкм); 3 – $V = 36$ м/с (сталь У8А відпалена; $R = 70$ мкм) [134].

Очевидно, у знаменнику залежності (2.47) другим доданком можна знехтувати, тому що воно значно менше від одиниці. У результаті отримано:

$$\operatorname{tg}\left(45^{\circ} - \frac{\gamma}{2} - \frac{\psi}{2}\right) = \sqrt{\frac{a}{2R}} - \operatorname{tg}\frac{\psi}{2}. \quad (2.48)$$

Тоді залежність (2.24) за умови $\alpha = 0$ матиме вигляд [95]:

$$\sigma = \frac{2 \cdot \tau_{\text{зсув}}}{\sqrt{\frac{a}{2R} - \operatorname{tg}\frac{\psi}{2}}}. \quad (2.49)$$

Як видно, залежності (2.46) і (2.49) відрізняються знаменником. Відповідно до залежності (2.49), за умови $\sqrt{\frac{a}{2R}} = \operatorname{tg}\frac{\psi}{2}$ енергоємність обробки σ набуває нескінченного значення. Гранична товщина зрізу a_1 , за якої $\sigma \rightarrow \infty$ і процес пластичного деформування матеріалу переходить у процес стружкоутворення (мікрорізання), визначається залежністю:

$$a_1 = 2R \cdot \operatorname{tg}^2\frac{\psi}{2}. \quad (2.50)$$

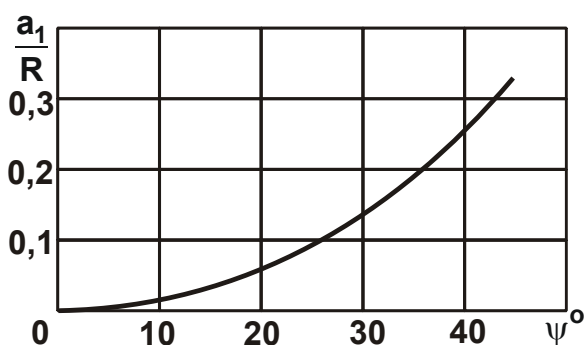


Рис. 2.21. Залежність відношення a_1/R від кута ψ

На рис. 2.21 і в табл. 2.8 наведено розраховані за перетвореною залежністю (2.50)

$$\frac{a_1}{R} = 2 \cdot \operatorname{tg}^2\frac{\psi}{2} \quad (2.51)$$

значення відношення a_1/R . Як видно, зі збільшенням умовного кута тертя ψ відношення a_1/R збільшується, набуваючи при $\psi = 20 \dots 30^{\circ}$ значень 0,062 ... 0,143, відповідних експериментально встановленим значенням [134], за яких пластичне деформування матеріалу переходить у різання.

Розрахункові значення відношення a_1/R

ψ , град.	0	10	20	30	45
a_1/R	0	0,015	0,062	0,143	0,33

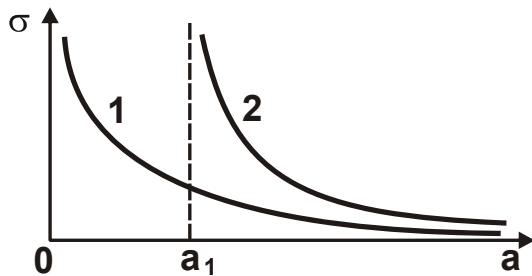


Рис. 2.22. Залежність σ від товщини зрізу a для різних значень умовного кута тертя абразивного зерна з оброблюваним матеріалом

Умовні позначення: 1 – при $\psi = 0$;
2 – при $\psi > 0$.

Графічно характер зміни енергоємності обробки σ від товщини зрізу відповідно до залежності (2.49) і умов $\psi = 0$ і $\psi > 0$ показано на рис. 2.22. У випадку $\psi > 0$ енергоємність обробки σ завжди більша, ніж у випадку $\psi = 0$ (тобто без урахування тертя різального зерна з оброблюваним матеріалом). При цьому, уже зазначалося, процес мікрорізання починається за умови $a_1 > 0$, тоді як у випадку $\psi = 0$ – за умови $a_1 = 0$.

Отже, чим вища інтенсивність тертя ріжучого зерна з оброблюваним матеріалом, тим більша енергоємність обробки σ й тим довший у часі процес пластичного деформування матеріалу (без утворення стружки), який потім переходить у процес різання (стружкоутворення) [95].

Необхідно розглянути випадок $\alpha > 0$, тобто випадок різання з товщиною зрізу, що збільшується. У загальному вигляді енергоємність обробки σ описується залежністю (2.24). Функцію $\operatorname{tg}\left(45^\circ - \frac{(\alpha + \gamma + \psi)}{2}\right)$ в даній залежності можна виразити через відношення a/R відповідно до залежності (2.36). Для цього слід скористатися попереднім теоретичним рішенням, описуваним залежністю (2.48), розглядаючи в ній замість кута ψ суму кутів $(\alpha + \psi)$. Тоді залежність (2.48) набуває вигляду:

$$\operatorname{tg}\left(45^\circ - \frac{\gamma}{2} - \frac{\psi}{2}\right) = \sqrt{\frac{a}{2R}} - \operatorname{tg}\frac{(\alpha + \psi)}{2}. \quad (2.52)$$

Підставляючи отриману залежність (2.52) в (2.24), маємо:

$$\sigma = \frac{2 \cdot \tau_{\text{зсув}} \cdot \cos^2 \alpha}{\sqrt{\frac{a}{2R}} - \operatorname{tg} \frac{(\alpha + \psi)}{2}}. \quad (2.53)$$

За умови:

$$\sqrt{\frac{a}{2R}} - \operatorname{tg} \frac{(\alpha + \psi)}{2} = 0 \quad (2.54)$$

енергоємність обробки σ набуває нескінченно великого значення ($\sigma \rightarrow \infty$), тому процес стружкоутворення відсутній, відбувається лише пластичне деформування оброблюваного матеріалу.

Граничне значення відношення a_1/R , за якого процес пластичного деформування оброблюваного матеріалу переходить у процес різання, визначається на основі перетвореної залежності (2.54):

$$\frac{a_1}{R} = 2 \cdot \operatorname{tg}^2 \frac{(\alpha + \psi)}{2}. \quad (2.55)$$

Залежність (2.55) відрізняється від аналогічної залежності (2.51) лише наявністю кута α . Очевидно, чим більший даний кут, тим більше відношення a_1/R (див. рис. 2.21). Отже, збільшення кута α передбачає збільшення відношення a_1/R (граничної товщини зрізу a_1), що свідчить про погіршення умов стружкоутворення, оскільки збільшується довжина шляху зерна в оброблюваному матеріалі до моменту початку стружкоутворення. Інакше кажучи, зі збільшенням кута α до моменту початку стружкоутворення буде мати місце досить тривалий процес пластичного деформування матеріалу. Тому зі збільшенням кута α (кута атаки в процесі струминно-абразивної обробки), цілком можливо, що процес стружкоутворення може й не статися, тобто весь час буде відбуватися процес пластичного деформування матеріалу.

Дана закономірність, як показано вище, обумовлена зменшенням переднього (від'ємного) кута різального зерна γ в міру збільшення товщини зрізу. У разі досягнення певного значення кута γ починає викону-

ватися умова (2.20) і процес пластичного деформування матеріалу переходить у процес різання (стружкоутворення). Отже, під час різання абразивним зерном на відміну від різання різцем (з фіксованим від'ємним переднім кутом γ) процес стружкоутворення здійснений у всьому можливому діапазоні зміни кута $\alpha = 0 \dots 90^\circ$. Однак для цього необхідно попередньо досягти граничної товщини зрізу a_1 , за якої відбувається перехід від пластичного деформування матеріалу до процесу різання.

Таким чином, теоретично встановлена умова здійснення стружкоутворення в процесі мікрорізання одиничним абразивним зерном з товщиною зрізу, що змінюється в часі. Ця умова принципово відрізняється від аналогічної умови (2.20), отриманої під час різання інструментом із заданим (постійним) переднім кутом γ . Так, згідно з розв'язком (2.20), кут α , за якого можливий процес стружкоутворення, набуває невеликих значень, оскільки кут $\psi_1 = \gamma + \psi \rightarrow 90^\circ$. Відповідно до отриманого рішення (2.55), кут α може набувати значно більших значень, які змінюються в діапазоні $0 \dots 90^\circ$ (залежно від кута ψ). Це означає, що процес струминно-абразивної обробки за фізичною сутністю є процесом різання, здійснюваним з утворенням стружки. Тому його необхідно розглядати з позиції теорії різання матеріалів, тоді як у роботі [74] він розглядається з позиції теорії розрахунків деталей машин на тертя й зношування, що не дозволяє повною мірою розкрити його фізичної сутності. Безсумнівно, у даному процесі має місце й пластичне деформування матеріалу. Однак воно пов'язане головним чином з моментом досягнення товщиною зрізу граничного значення, за якого починається стружкоутворення.

Виходячи із залежності (2.55), процес пластичного деформування матеріалу настає тим швидше, чим менший кут α . Як уже зазначалося, за відносно невеликих кутів α процес стружкоутворення може навіть не настати – увесь час буде відбуватися процес пластичного деформування матеріалу. Тому в процесі обробки пластичних матеріалів внаслідок специфіки їхнього пластичного деформування виконати умову (2.55) можна значно простіше, ніж під час обробки крихких матеріалів. Особливо це стосується різання пластичних матеріалів з невеликими кутами α . У цьому випадку довжина дуги контакту передньої поверхні зерна з оброблюваним матеріалом збільшується й фактичний кут α стає ніби більшим від його номінального значення, що полегшує процес стружко-

утворення. Зі збільшенням номінального кута α фактичний кут α істотно збільшується й умова (2.55) стає нездійсненною, що виключає процес стружкоутворення й ускладнює знімання матеріалу. Для оцінювання вірогідності зробленого висновку слід розглянути процес різання з товщиною зрізу, що збільшується в часі.

Тангенціальну складову сили різання P_z можна подати у вигляді:

$$P_z = \sigma \cdot S = HV \cdot S_0, \quad (2.56)$$

де $S = a \cdot v$ – площа поперечного перерізу зрізу, m^2 ;

$S_0 = a_0 \cdot v$ – фактична площа контакту різального зерна з оброблюваним матеріалом, m^2 ;

a_0 – фактична довжина контакту різального зерна з оброблюваним матеріалом, m ;

HV – твердість оброблюваного матеріалу (за Віккерсом), H/m^2 .

Енергоємність обробки σ в цьому випадку визначається залежністю (2.53). Із залежності (2.56) визначимо величину a_0 :

$$a_0 = a \cdot \frac{\sigma}{HV}. \quad (2.57)$$

Підставляючи залежність (2.53) в (2.57), маємо

$$a_0 = \frac{2 \cdot \tau_{зсув}}{HV} \cdot \frac{a \cdot \cos^2 \alpha}{\left[\sqrt{\frac{a}{2 \cdot R} - \operatorname{tg} \frac{(\alpha + \psi)}{2}} \right]}. \quad (2.58)$$

Якщо прийняти в першому наближенні, що $\tau_{зсув} \approx 0,5 \cdot \sigma_{час}$, де $\sigma_{час}$ – тимчасовий опір оброблюваного матеріалу, H/m^2 , тоді залежність (2.58) матиме вигляд:

$$a_0 = \frac{\sigma_{час}}{HV} \cdot \frac{a \cdot \cos^2 \alpha}{\left[\sqrt{\frac{a}{2 \cdot R} - \operatorname{tg} \frac{(\alpha + \psi)}{2}} \right]}. \quad (2.59)$$

Із залежності (2.59) випливає, що зі збільшенням параметрів a і α фактична довжина контакту різального зерна з оброблюваним матеріалом a_0 збільшується. В отриманій залежності (2.59) всі величини відомі, що дозволяє визначити значення a_0 . У табл. 2.9 [80] наведено значення відношення $\sigma_{\text{час}}/HV$ для різних оброблюваних матеріалів.

Таблиця 2.9

Значення твердості HV, тимчасового опору $\sigma_{\text{час}}$ і їхні відношення $\sigma_{\text{час}}/HV$ (і $HV/\sigma_{\text{час}}$) для різних оброблюваних матеріалів [80]

Матеріал	$HV \cdot 10, \text{Н/мм}^2$	$\sigma_{\text{час}} \cdot 10, \text{Н/мм}^2$	$\sigma_{\text{час}}/HV$	$HV/\sigma_{\text{час}}$
Нікель	120	65	0,53	1,9
Армко-залізо	120	67	0,53	1,9
Мідь	60	30	0,5	2
Сира сталь У8	190	80	0,43	2,3
Сталь Р12Ф5М	950	290	0,31	3,2
Загартowana сталь У8	690	170	0,25	4
Загартowana сталь ШХ15	740	140	0,19	5,3
Швидкорізальна сталь Р9	830	190	0,23	4,37
Сірий чавун СЧ 18-36	180	23	0,14	7
Цинк	40	4	0,1	10
Твердий сплав ВК8	1500	130	0,09	11,5
Сталь 40Х (за різної температури відпускання після загартування)	200	63	0,33	2,96
	280	90	0,29	3,46
	350	92	0,3	3,33
	415	93	0,22	4,46
	510	104	0,2	4,94

Як видно, відношення $\sigma_{\text{час}}/HV$ для пластичних матеріалів (міді, сталі) більше, ніж для крихких матеріалів (твердого сплаву, сірого чавуну). Отже, відповідно до залежності (2.59), будуть більшими й значення a_0 , що сприяє поліпшенню умов стружкоутворення в процесі різання. Власне цим і пояснюється ефективність обробки пластичних матеріалів за відносно невеликих значень кута α . У процесі обробки крихких матеріалів, у зв'язку з невеликою величиною $a_0 \approx a$, процес різання (стружко-

утворення) за невеликих кутів α може бути нездійсненним. Він можливий у разі збільшених значень кута α , тобто збільшених товщин зрізу.

Із сказаного випливає, що в процесі обробки пластичних матеріалів найбільш інтенсивне знімання матеріалу буде мати місце за відносно невеликих кутів α (кутів атаки під час струминно-абразивної обробки), а в процесі обробки крихких матеріалів, навпаки, за відносно великих кутів α , близьких до 90° . Отже, отримане теоретичне рішення дозволило обґрунтувати умову практичної реалізації струминно-абразивної обробки, що узгоджується з відомими експериментальними даними [114]. Доведено, що під час різання абразивним зерном за рахунок зміни (зменшення) кута γ в процесі обробки завжди здійснений процес стружкоутворення. Це забезпечує високопродуктивне знімання матеріалу й розширює межі здійснення процесу різання у випадку струминно-абразивної обробки.

Необхідно зауважити, що залежність (2.53) аналогічна до залежності (2.49). Водночас у ній товщина зрізу є змінною величиною, яка зміню-

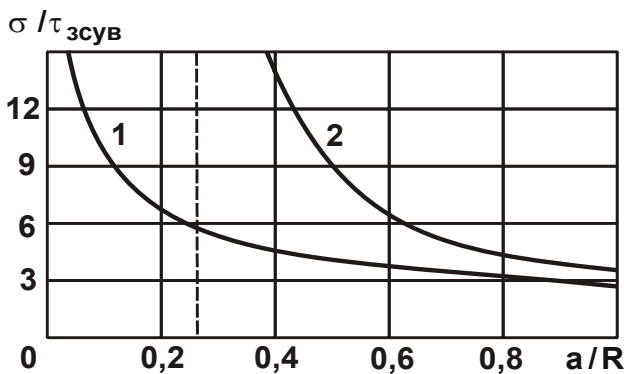


Рис. 2.23. Залежність $\sigma/\tau_{зсув}$ від відношення a/R

Умовні позначення:

1 – при $\alpha = 0$; 2 – при $\alpha = 40^\circ$.

$\alpha = 40^\circ$; $\psi = 0^\circ$ (табл. 2.10)) процес мікрорізання відсутній, має місце лише процес пластичного деформування матеріалу, що характеризується великою енергоємністю обробки.

Як випливає з рис. 2.23 і табл. 2.10, чим більший кут $\alpha > 0$, тим більше відношення $\sigma/\tau_{зсув}$, розраховане за залежністю (2.53). Отже, енергоємність обробки σ у процесі різання зі збільшеною товщиною зрізу вища, ніж у процесі різання з постійною товщиною, як це випливає із залежності (2.46). Це пов'язано з тим, що в початковий момент оброб-

ється в межах від нуля до певного значення. У залежності (2.46) товщина зрізу є постійною величиною, тому що $\alpha = 0$. З урахуванням сказаного у випадку $\alpha > 0$ зі збільшенням відношення a/R від нуля до певного значення, енергоємність обробки σ відповідно до залежності (2.53) буде безупинно зменшуватися від нескінченності до кінцевого значення (рис. 2.23). При значеннях $a/R < 0,265$ (для

ки у випадку $\alpha > 0$ умовний кут зсуву матеріалу $\beta \leq \alpha$. Тому довжина умовної площини зсуву матеріалу набуває досить великого значення, що потребує значного зусилля для руйнування матеріалу уздовж умовної площини зсуву, розташованої під кутом β до напрямку руху зерна. Інакше кажучи, збільшення σ у процесі різання зі збільшуваною товщиною зрізу ($\alpha > 0$) порівняно з різанням з постійною товщиною зрізу ($\alpha = 0$) пов'язане з гіршими умовами стружкоутворення, тому що в цьому випадку умовою переходу від пластичного деформування матеріалу до процесу стружкоутворення й різання є рівність кутів $\beta = \alpha$. Очевидно, реалізувати дану умову значно складніше, ніж під час різання з постійною товщиною зрізу ($\alpha = 0$), де перехід від пластичного деформування матеріалу до процесу стружкоутворення відбувається за умови $\beta = 0$.

Таблиця 2.10

Розрахункові значення відношення $\sigma/\tau_{зсув}$ для $\psi = 0^\circ$

a/R	0	0,2	0,265	0,4	0,6	0,8	1,0
$\sigma/\tau_{зсув}$ при $\alpha = 0^\circ$	∞	6,33	5,5	4,47	3,65	3,16	2,83
$\sigma/\tau_{зсув}$ при $\alpha = 40^\circ$	—	—	∞	14,1	6,37	4,38	3,41

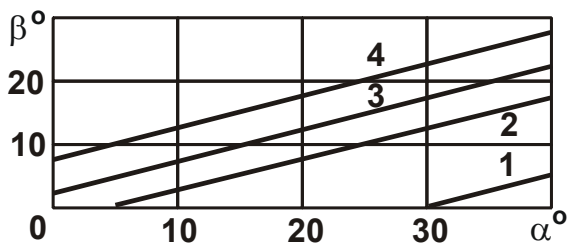


Рис. 2.24. Залежність кута β від кута α

Умовні позначення:

1; 2; 3; 4 – при відношенні $a/R = 0; 0,1; 0,2; 0,3$.

На рис. 2.24 і в табл. 2.11 наведено розраховані за залежністю (2.8) значення кута зсуву оброблюваного матеріалу β з урахуванням залежності (2.36) і $\psi = 30^\circ$. Як видно, умова $\beta \geq \alpha$ виконується для збільшених значень a/R . У цьому випадку для $a/R = 0,2$ (при $\alpha = 0$) і $a/R = 0,3$ (при $\alpha = 0$ і $\alpha = 10^\circ$). Для $\alpha > 10^\circ$ умовний кут зсуву оброблюваного матеріалу $\beta < \alpha$ і процес стружкоутворення (різання) не відбувається. Отже, чим більше відношення a/R , тим більший кут α входу абразивного зерна в оброблюваний матеріал, за якого процес пластичного деформування матеріалу переходить у процес стружкоутворення (різання).

Розрахункові значення кута β (у градусах)

a/R	α°				
	0	10	20	30	40
0	-15	-10	-5	0	5
0,1	-2,5	2,5	7,5	12,5	17,5
0,2	3	8	13	18	23
0,3	7,5	12,5	17,5	22,5	27,5

У процесі різання з постійною товщиною зрізу для забезпечення переходу процесу пластичного деформування матеріалу в процес стружкоутворення достатньо того, щоб умовний кут зсуву оброблюваного матеріалу β дорівнював нулю. Очевидно, ця умова полегшує стружкоутворення, у результаті перехід від процесу пластичного деформування матеріалу до процесу різання починається за меншої товщини зрізу.

Отримані залежності узгоджуються з відомими експериментальними даними [87; 134] і відкривають нові можливості для аналізу технологічних закономірностей знімання матеріалу за абразивної обробки, включаючи розглянутий процес струминно-абразивної обробки, а також процес шліфування, який, як правило, здійснюється зі змінною товщиною зрізу ($\alpha > 0$) і потребує глибокого вивчення закономірностей стружкоутворення й умов виключення пластичного деформування матеріалу.

2.2.4. Уточнений розрахунок енергоємності обробки в процесі різання зі збільшеною товщиною зрізу

З огляду на важливість установлення відносно простої залежності, що пов'язує енергоємність обробки σ й товщину зрізу, необхідно одержати уточнене рішення на основі залежностей (2.11) і (2.36). Спочатку слід розглянути випадки $\alpha = 0$ і $\psi = 0$. Тоді залежність (2.11) виразиться:

$$\sigma = \frac{2 \cdot \tau_{зсув} \cdot \cos \gamma}{(1 - \sin \gamma)} = \frac{2 \cdot \tau_{зсув} \cdot \sqrt{1 - \sin^2 \gamma}}{(1 - \sin \gamma)} = \frac{2 \cdot \tau_{зсув} \cdot \sqrt{\frac{2a}{R} - \left(\frac{a}{R}\right)^2}}{\left(\frac{a}{R}\right)}. \quad (2.60)$$

Нехтуючи другим доданком у підкореновому виразі у зв'язку з тим, що він значно менший від першого доданка, одержимо:

$$\sigma = \frac{2 \cdot \tau_{зсув}}{\sqrt{\frac{a}{2R}}}. \quad (2.61)$$

Як видно, залежність (2.61) ідентична залежності (2.46). У цьому випадку уточнене рішення (2.61) і наближене рішення (2.46) збігаються.

Слід розглянути випадки $\alpha = 0$ і $\psi > 0$. Тоді залежність (2.11) матиме вигляд:

$$\sigma = \frac{2 \cdot \tau_{зсув} \cdot \cos(\gamma + \psi)}{1 - \sin(\gamma + \psi)} = \frac{2 \cdot \tau_{зсув} \cdot \sin[90^\circ - (\gamma + \psi)]}{1 - \cos[90^\circ - (\gamma + \psi)]} = \frac{2 \cdot \tau_{зсув}}{\operatorname{tg}\left[45^\circ - \frac{(\gamma + \psi)}{2}\right]}. \quad (2.62)$$

У результаті отримано залежність (2.24) за умови $\alpha = 0$. Отже, і в цьому випадку уточнене й наближене рішення збігаються, а енергоємність обробки σ описується залежністю (2.49). Із цього випливає, що стосовно до процесу різання з постійною товщиною зрізу отримана точна залежність (2.49), яка пов'язує енергоємність обробки σ й товщину зрізу.

Розглянемо загальний випадок, коли $\alpha > 0$ й $\psi > 0$, тобто описуваний залежністю (2.11). Очевидно, у цьому випадку складно перетворити її за допомогою залежності (2.36) і виразити енергоємність обробки σ через товщину зрізу. Тому в загальному випадку розрахунок енергоємності обробки σ слід виконувати на основі залежності (2.11) з урахуванням залежності (2.36). Для спрощення розрахунків залежність (2.11) за допомогою тригонометричного перетворення можна подати у вигляді:

$$\sigma = \frac{\tau_{зсув} \cdot \cos \psi_1 \cdot \cos \alpha}{\sin^2\left[45^\circ - \frac{(\alpha + \psi_1)}{2}\right]}. \quad (2.63)$$

Як видно, залежність (2.63) структурно мало чим відрізняється від аналогічної спрощеної залежності (2.24), тому що при значеннях кута

$$\left[45^\circ - \frac{(\alpha + \psi_1)}{2}\right] < 30^\circ \quad \text{функції} \quad \sin\left[45^\circ - \frac{(\alpha + \psi_1)}{2}\right] \quad \text{й} \quad \text{tg}\left[45^\circ - \frac{(\alpha + \psi_1)}{2}\right]$$

приблизно рівні. Отже, всі висновки, зроблені в процесі аналізу залежності (2.24), справджуються й для залежності (2.11).

Розглянемо випадок $\psi_1 = 0$. Він можливий у випадку різання лезовим інструментом із додатним значенням переднього кута γ . У цьому випадку кут ψ_1 описується залежністю $\psi_1 = \psi - \gamma$. Тому за умови $\psi = \gamma$ кут $\psi_1 = 0$. Тоді залежність (2.11) спрощується до вигляду:

$$\sigma = \frac{2 \cdot \tau_{\text{зсув}} \cdot \cos \alpha}{1 - \sin \alpha} = \frac{2 \cdot \tau_{\text{зсув}} \cdot \sin[90^\circ - \alpha]}{1 - \cos[90^\circ - \alpha]} = \frac{2 \cdot \tau_{\text{зсув}}}{\text{tg}\left[45^\circ - \frac{\alpha}{2}\right]}. \quad (2.64)$$

Із залежності (2.64) випливає, що зі збільшенням кута α входження різального зерна в оброблюваний матеріал енергоємність обробки σ збільшується, а при $\alpha = 90^\circ$ прагне до нескінченності (див. рис. 2.23).

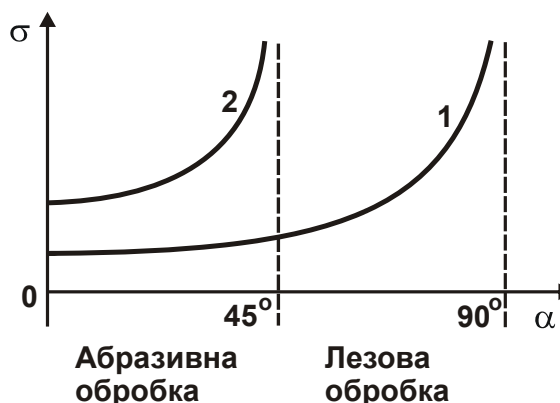


Рис. 2.25. Залежність енергоємності обробки σ від кута α

Умовні позначення: 1 – при $\psi_1 = 0$;
2 – при $\psi_1 = 45^\circ$.

кут α набуває значення $\alpha = 0$, й таким чином реалізується процес різання з постійною товщиною зрізу. При куті $\psi_1 > 90^\circ$ процес різання нездійснений, тому що функція $\cos \psi_1$ в залежності (2.11) набуває від'ємних значень. У цьому випадку можливий лише процес пластичного деформування матеріалу.

На рис. 2.25 наведено узагальнене рішення, яке визначає характер зміни енергоємності обробки σ залежно від кута α для різних значень $\psi_1 = \psi + \gamma$. Як уже зазначалося, у діапазоні $0 < \psi_1 < 45^\circ$ реалізується процес різання лезовим інструментом з додатним переднім кутом γ . У діапазоні $45^\circ < \psi_1 < 90^\circ$ реалізується абразивна обробка – різання зі збільшеною товщиною зрізу ($\alpha > 0$). При $\psi_1 = 90^\circ$ можливе лише різання з постійною товщиною зрізу ($\alpha = 0$). При $\psi_1 > 90^\circ$, як було показано вище, реалізується процес пластичного деформування матеріалу [21].

Таким чином встановлено, що у зв'язку з більшим кутом ψ_1 , який набуває під час абразивної обробки значень близько 90° і більше, достатньо складно здійснити процес різання (стружкоутворення). В основному може бути реалізований процес пластичного деформування матеріалу (без стружкоутворення). Гарантовано забезпечити процес стружкоутворення під час абразивної обробки можна в умовах різання з постійною товщиною зрізу ($\alpha = 0$). Це може бути досягнуто в процесі шліфування (наприклад, плоского шліфування торцем круга), доведенні вільним абразивом, притирання абразивним або алмазним порошком. У випадку струминно-абразивної обробки виконати умову $\alpha = 0$ можна стосовно до обробки кромки плоскої заготовки, усунення задирок на ній, зменшення мікронерівностей на оброблюваній поверхні тощо (рис. 2.26).

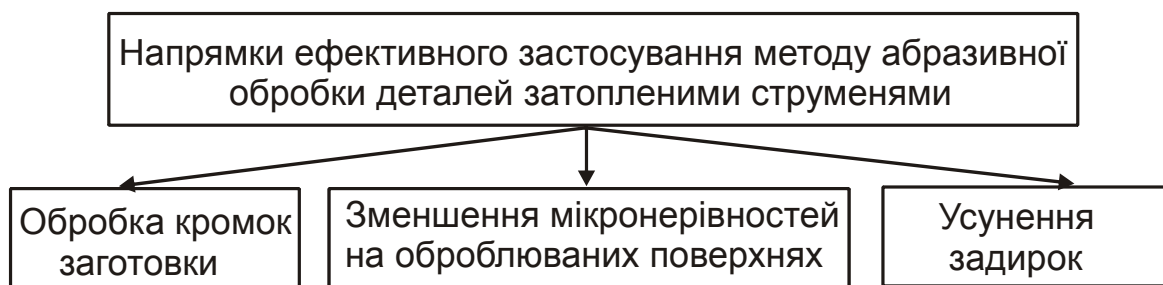


Рис. 2.26. Структурна схема основних напрямів ефективного застосування методу абразивної обробки деталей затопленими струменями

Із цього випливає, що розглянутий метод абразивної обробки деталей затопленими струменями може бути найбільш ефективним саме для цих умов обробки. Ефективність його застосування для плоских повер-

хонь дрібних деталей буде проявлятися меншою мірою, тому що складно здійснити процес різання. Видалення оброблюваного матеріалу можливе лише шляхом пластичного деформування, що може мати місце в процесі обробки пластичних матеріалів (кольорових металів).

Як було показано, із залежності (2.11) випливає ще одне важливе рішення, яке забезпечує зменшення енергоємності обробки σ . Це реалізація процесу різання зі зменшеною товщиною зрізу ($\alpha < 0$). У цьому випадку функція $\sin(\alpha + \psi_1)$, яка входить у знаменник залежності (2.11), може бути зменшена до нуля, що передбачає зменшення енергоємності обробки σ .

Графічно дане рішення наведені на рис. 2.27. За умови $\psi_1 = 0$ кут α може змінюватися в межах $-90^\circ < \alpha < 90^\circ$. Тоді з кутом $\alpha = -90^\circ$, відповідно до залежності (2.60), енергоємність обробки $\sigma \rightarrow 0$, а з кутом $\alpha = 90^\circ$ енергоємність обробки $\sigma \rightarrow \infty$.

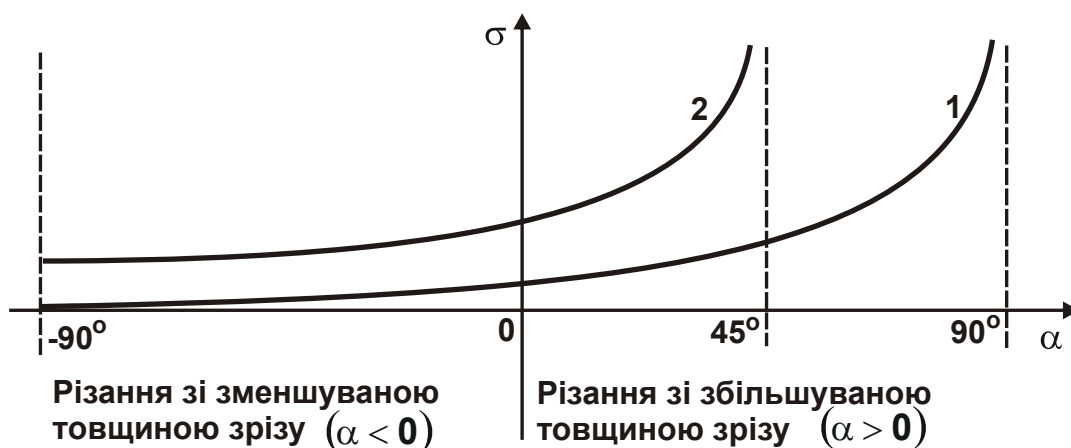


Рис. 2.27. Узагальнена залежність енергоємності обробки σ від кута α

Умовні позначення: 1 – при $\psi_1 = 0$; 2 – при $\psi_1 = 45^\circ$.

За умови $\psi_1 = 45^\circ$ кут α може змінюватися в межах $-90^\circ < \alpha < 45^\circ$. При цьому енергоємність обробки σ завжди більша, ніж у випадку $\psi_1 = 0$.

Залежність (2.11) у процесі різання зі зменшеною товщиною зрізу ($\alpha < 0$) має вигляд:

$$\sigma = \cos \psi_1 \cdot \cos \alpha \cdot \frac{2 \cdot \tau_{зсув}}{[1 - \sin(\psi_1 - \alpha)]} \quad (2.65)$$

Процесі порівняння залежностей (2.11) і (2.65) видно, що у випадку $\alpha > 0$ енергоємність обробки σ завжди більша, ніж у випадку $\alpha < 0$. З огляду на важливість отриманого рішення, проведемо більш повний аналіз випадку $\alpha < 0$. У табл. 2.12 і на рис. 2.28 наведені розраховані за залежністю (2.11) значення відношення $\sigma / 2\tau_{зсув}$ до кута α в разі його зміни в діапазоні $-90^\circ \dots 60^\circ$ для різних значень кута ψ_1 .

Таблиця 2.12

Розрахункові значення відношення $\sigma / 2\tau_{зсув}$

ψ_1°	α°							
	-90	-60	-30	0	20	30	45	60
30	0	0,288	0,75	1,732	3,477	5,6	18	∞
45	0	0,28	0,82	2,357	7,144	17,95	∞	
60	0	0,25	0,866	3,73	30,91	∞		
70	0	0,21	0,83	5,43	∞			
90	0	0	0	∞				

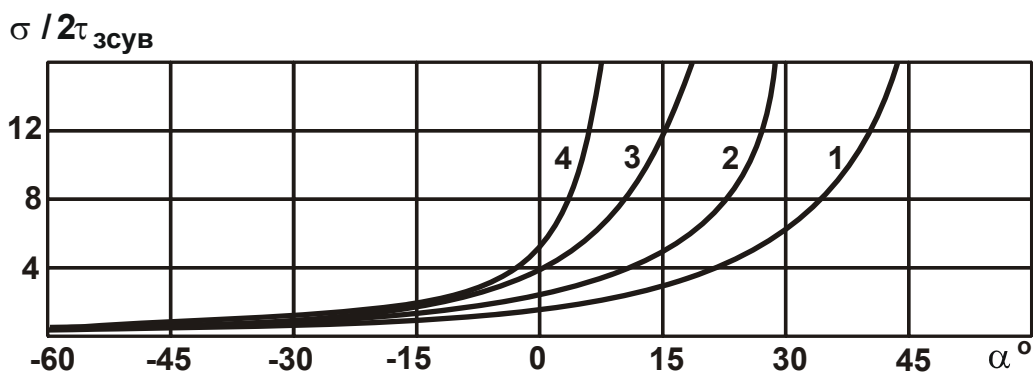


Рис. 2.28. Залежність відношення $\sigma / 2\tau_{зсув}$ до кута α

Умовні позначення: 1 – при $\psi_1 = 30^\circ$; 2 – при $\psi_1 = 45^\circ$; 3 – при $\psi_1 = 60^\circ$; 4 – при $\psi_1 = 70^\circ$.

Як видно, зі зменшенням кута α (у тому числі в області його від'ємних значень) відношення $\sigma / 2\tau_{зсув}$ безупинно зменшується, набуваючи нульових значень при $\alpha = -90^\circ$. З наведених графіків випливає, що перехід в область від'ємних значень кута α відкриває широкі можливості для зменшення відношення $\sigma / 2\tau_{зсув}$ й відповідно енергоємності обробки σ .

2.2.5. Визначення енергоємності обробки в процесі різання зі зменшуваною товщиною зрізу

З огляду на ефективність процесу різання зі зменшуваною товщиною зрізу слід провести його більш детальний аналіз на прикладі різання абразивним зерном під час його виходу з контакту з оброблюваним матеріалом. Для цього необхідно визначити параметри силової напруженості процесу різання зі зменшуваною товщиною зрізу [91].

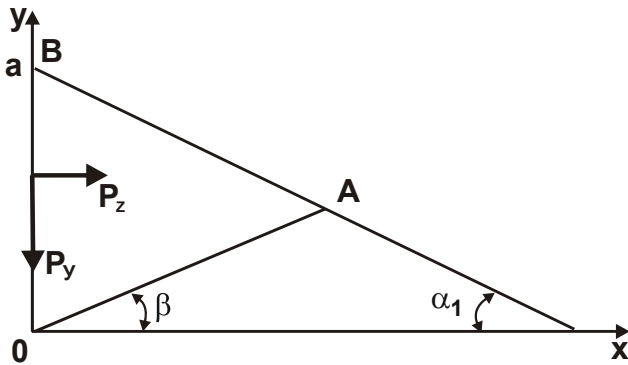


Рис. 2.29. Розрахункова схема процесу стружкоутворення при різанні зерном зі зменшуваною товщиною зрізу

Припустимо, що в початковий момент часу товщина зрізу дорівнює a (рис. 2.29) і в міру переміщення зерна уздовж осі ox зменшується за законом $a - \operatorname{tg}\alpha_1 \cdot x$, де α_1 – кут виходу абразивного зерна з контакту з оброблюваним матеріалом.

Очевидно, під дією системи сил P_z і P_y відбудеться зсув оброблюваного матеріалу уздовж умовної площини зсуву $OA = L$, розташованої під кутом зсуву β до напрямку руху зерна.

Дотичне напруження τ , що виникає в даній площині, визначається за наведеною залежністю (2.4), а довжина площини зсуву $OA = L$ – на основі розв'язання системи тригонометричних рівнянь, які впливають із рис. 2.29:

$$\begin{cases} y = a - \operatorname{tg}\alpha_1 \cdot x, \\ y = \operatorname{tg}\beta \cdot x, \end{cases} \quad (2.66)$$

де x й y – координати точки перетину умовної площини зсуву OA з оброблюваною поверхнею BA .

Звідси

$$x = \frac{a}{(\operatorname{tg}\beta + \operatorname{tg}\alpha_1)}; \quad (2.67)$$

$$L = \frac{x}{\cos \beta} = \frac{a}{\cos \beta \cdot (\operatorname{tg} \beta + \operatorname{tg} \alpha_1)}. \quad (2.68)$$

Підставляючи залежність (2.68) у залежність (2.4) з урахуванням $K_{\text{ш}} = \operatorname{ctg}(\psi + \gamma) = \operatorname{ctg} \psi_1$ і відповідних тригонометричних перетворень, одержимо:

$$\begin{aligned} \tau &= \frac{P_y \cdot \cos \beta \cdot (\operatorname{tg} \beta + \operatorname{tg} \alpha_1)}{b \cdot a} \cdot (K_{\text{ш}} \cdot \cos \beta - \sin \beta) = \\ &= \frac{P_y}{b \cdot a} \cdot \frac{(\sin \beta \cdot \cos \alpha_1 + \sin \alpha_1 \cdot \cos \beta)}{\sin \psi_1 \cdot \cos \alpha_1} \cdot (\cos \psi_1 \cdot \cos \beta - \sin \beta \cdot \sin \psi_1) = \\ &= \frac{P_y}{2 \cdot b \cdot a \cdot \sin \psi_1 \cdot \cos \alpha_1} \cdot [\sin(2\beta + \alpha_1 + \psi_1) - \sin(\alpha_1 - \psi_1)]. \quad (2.69) \end{aligned}$$

Максимальне дотичне напруження τ_{\max} , яке визначає положення умовної площини зсуву оброблюваного матеріалу, буде досягатися за умови $\sin(2\beta + \alpha_1 + \psi_1) = 1$. Тоді:

$$\beta = \frac{\pi}{4} - \frac{(\alpha_1 + \psi_1)}{2}. \quad (2.70)$$

Порівнюючи залежність (2.70) з аналогічною залежністю (2.8), видно, що в другому випадку умовний кут зсуву оброблюваного матеріалу β менший. Підставляючи залежність (2.70) у залежність (2.69), визначимо максимальне дотичне напруження τ_{\max} :

$$\tau_{\max} = \frac{P_y}{2 \cdot b \cdot a \cdot \sin \psi_1 \cdot \cos \alpha_1} \cdot [1 + \sin(\alpha_1 - \psi_1)]. \quad (2.71)$$

Припустивши, що $\tau_{\max} = \tau_{\text{зсув}}$, на основі залежності (2.71) отримуємо розрахункову залежність для визначення радіальної складової сили різання P_y :

$$P_y = 2 \cdot a \cdot b \cdot \tau_{зсув} \cdot \sin \psi_1 \cdot \cos \alpha_1 \cdot \frac{1}{[1 + \sin(\alpha_1 - \psi_1)]} \quad (2.72)$$

Відповідно параметри P_z й σ визначаються:

$$P_z = P_y \cdot K_{ш} = P_y \cdot \operatorname{ctg} \psi_1 = 2 \cdot a \cdot b \cdot \tau_{зсув} \cdot \cos \psi_1 \cdot \cos \alpha_1 \cdot \frac{1}{[1 + \sin(\alpha_1 - \psi_1)]}; \quad (2.73)$$

$$\sigma = \frac{P_z}{a \cdot b} = \cos \psi_1 \cdot \cos \alpha_1 \cdot \frac{2 \cdot \tau_{зсув}}{[1 + \sin(\alpha_1 - \psi_1)]} \quad (2.74)$$

Як видно, залежності (2.11) і (2.74) відрізняються лише знаменником, враховуючи кут $\alpha = \alpha_1$.

У випадку $\psi_1 > \alpha_1$ залежність (2.74) матиме вигляд, аналогічний до залежності (2.11):

$$\sigma = \frac{P_z}{a \cdot b} = \cos \psi_1 \cdot \cos \alpha_1 \cdot \frac{2 \cdot \tau_{зсув}}{[1 - \sin(\psi_1 - \alpha_1)]} \quad (2.75)$$

За умови $(\psi_1 - \alpha_1) \rightarrow 90^\circ$ умовне напруження різання $\sigma \rightarrow \infty$ (рис. 2.30). Отже, для зменшення σ обробку необхідно виконувати з кутом $\alpha_1 \rightarrow \psi_1$,

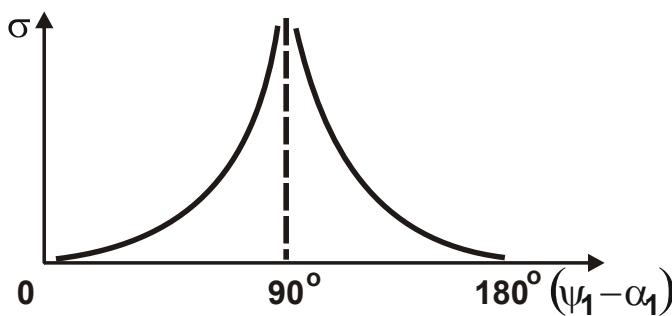


Рис. 2.30. Загальний вигляд залежності σ від кута $(\psi_1 - \alpha_1)$

тобто чим більший кут ψ_1 , тим більший повинен бути кут α_1 . Зважаючи на те, що кут ψ_1 у процесі мікрорізання абразивним зерном (як було показано) може набувати значень, близьких до 90° , отже й кут α_1 повинен набувати таких самих великих значень. Зменшення кута

ψ_1 за рахунок здійснення процесу різання більш гострими гранями абразивного (або алмазного) зерна дозволить зменшити й кут α_1 без збільшення умовного напруження різання σ (енергоємності обробки).

Таким чином показано, що кут $(\psi_1 - \alpha_1)$ буде завжди меншим від 90° і тому параметри P_z , P_y і σ , які визначаються залежностями (2.72), (2.73) і (2.74), завжди будуть набувати кінцевих значень, тоді як, відповідно до залежностей (2.9), (2.10) і (2.11), ці параметри можуть необмежено збільшуватися. Це свідчить про нижчу силову напруженість процесу різання в момент виходу зерна з контакту з оброблюваним матеріалом порівняно з моментом його входу в оброблюваний матеріал. Для більш детального аналізу σ слід подати залежність (2.74) у такому вигляді:

$$\sigma = \cos \psi_1 \cdot \cos \alpha_1 \cdot \frac{\tau_{зсув}}{\cos^2 \left[45^\circ - \frac{(\alpha_1 - \psi_1)}{2} \right]}. \quad (2.76)$$

На рис. 2.31 суцільною лінією показаний графік тригонометричної функції $\cos^2 \left[45^\circ - \frac{(\alpha_1 - \psi_1)}{2} \right]$, що входить у знаменник залежності (2.76), а пунктирною лінією – графік функції $\cos \left[45^\circ - \frac{(\alpha_1 - \psi_1)}{2} \right]$. Оскільки функція \cos – парна функція, то наведені графіки відрізняються несуттєво.

Енергоємність обробки σ , яка описується формулою (2.76), змінюється за екстремальною залежністю, проходячи точку мінімуму зі значенням кута $\frac{(\alpha_1 - \psi_1)}{2} = 45^\circ$ (рис. 2.31б). Даний графік принципово відрізняється від аналогічного графіка, показаного на рис. 2.10б. Отже, в момент виходу абразивного зерна з контакту з оброблюваним матеріалом енергоємність обробки σ менша, ніж у момент входження зерна в оброблюваний матеріал. При цьому кут α_1 може змінюватися в широких межах: $0 < \alpha_1 < 90^\circ$. Тому підвищити ефективність абразивної обробки, зокрема струминно-абразивної обробки, можна шляхом зниження енергоємності обробки σ у момент входження абразивного зерна в оброблюваний матеріал відповідно до рішень, що впливають із залежності (2.15). Однак, очевидно, досягти істотного зменшення величини σ в процесі обробки конкретного матеріалу досить складно. Власне цим можна пояснити той факт, що абразивне зерно, контактуючи з оброблюваним матеріалом, як правило, не здійснює повного зрізу – воно зупиняється в

оброблюваному матеріалі. У результаті під час обробки реалізується лише перший з розглянутих двох випадків – різання зі збільшеною товщиною зрізу.

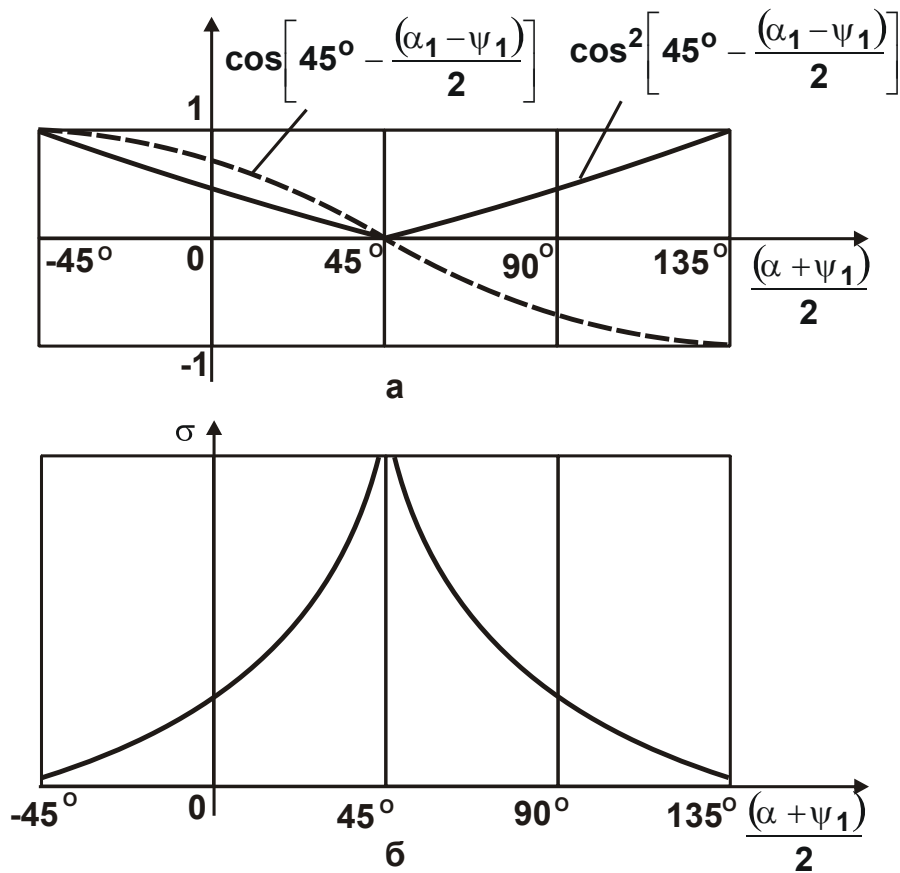


Рис. 2.31. Графіки функцій $\cos\left[45^\circ - \frac{(\alpha_1 - \psi_1)}{2}\right]$ і $\cos^2\left[45^\circ - \frac{(\alpha_1 - \psi_1)}{2}\right]$ (а) і енергоємності обробки σ (б)

Щоб реалізувати другий випадок (різання зі зменшеною товщиною зрізу), який характеризується меншою енергоємністю й більш ефективний, необхідно виключити з "циклу обробки" етап різання зі збільшеною товщиною зрізу. Це досягається, наприклад, у випадку обробки кромки заготовки (рис. 2.32). У цьому випадку відбувається лише різання зі зменшеною товщиною зрізу. Отже, найбільш ефективною областю застосування абразивної обробки деталей затопленими струменями, як зазначалося в пп. 2.2.4, необхідно розглядати обробку кромки заготовок, усунення задирок і зменшення мікронерівностей на оброблених поверхнях. Отримане рішення узгоджується із практикою застосування даного методу обробки, оскільки основною умовою його ефективного вико-

ристання є реалізація процесу різання зі зменшеною товщиною зрізу, що типово для обробки кромки заготовок, усунення задирок і зменшення мікронерівностей на оброблюваних поверхнях.

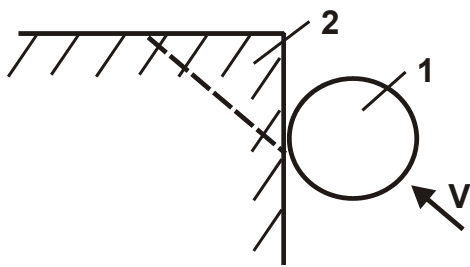


Рис. 2.32. **Схема взаємодії абразивного зерна (1) із кромкою заготовки (2)**

Проведемо аналіз енергоємності обробки в процесі різання абразивним зерном зі зменшеною в часі товщиною зрізу з урахуванням змінності переднього кута зерна γ . Для цього слід скористатися залежністю (2.53), отриманою стосовно до процесу різання абразивним зерном з товщиною зрізу, що збільшується в часі. У цьому випадку в залежності (2.53)

необхідно кут α розглядати як від'ємний:

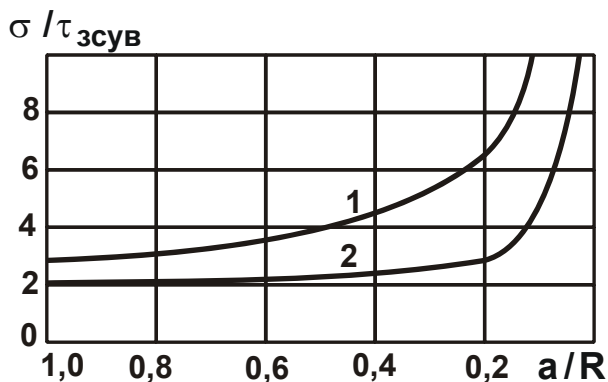


Рис. 2.33. **Залежність $\sigma / \tau_{зсув}$ від відношення a/R**

Умовні позначення: 1 – при $\alpha = 0$;
2 – при $\alpha = -40^\circ$.

$$\sigma = \frac{2 \cdot \tau_{зсув} \cdot \cos^2 \alpha}{\sqrt{\frac{a}{2R} - \operatorname{tg} \frac{(\psi - \alpha)}{2}}}. \quad (2.77)$$

Як видно, у міру зменшення товщини зрізу a енергоємність обробки σ буде безупинно збільшуватися (рис. 2.33, табл. 2.13) до досягнення знаменником нульового значення енергоємність обробки $\sigma \rightarrow \infty$. Це відбудеться в разі виконання умови:

$$\sqrt{\frac{a}{2R} - \operatorname{tg} \frac{(\psi - \alpha)}{2}} = 0, \quad (2.78)$$

коли процес стружкоутворення відсутній, а відбувається лише пластичне деформування матеріалу. Граничне значення відношення a_1/R , за якого процес різання (стружкоутворення) переходить у процес пластичного деформування оброблюваного матеріалу (без утворення стружки), визначається на основі перетвореної залежності (2.78):

$$\frac{a_1}{R} = 2 \cdot \operatorname{tg}^2 \frac{(\psi - \alpha)}{2}. \quad (2.79)$$

Таблиця 2.13

Розрахункові значення відношення $\sigma/\tau_{зсув}$ для $\psi = 0^\circ$

a/R	1,0	0,8	0,6	0,4	0,2	0
$\sigma/\tau_{зсув}$ для $\alpha = 0^\circ$	2,83	3,16	3,65	4,47	6,33	∞
$\sigma/\tau_{зсув}$ для $\alpha = -40^\circ$	2,0	2,1	2,2	2,4	2,9	∞

Як впливає із залежності (2.79), процес різання (стружкоутворення) здійснений у широкому діапазоні зміни кута $\alpha = 0 \dots 90^\circ$. Порівнюючи залежності (2.55) і (2.79), можна побачити, що у випадку різання зі зменшуваною товщиною зрізу відношення a_1/R менше, ніж під час різання зі збільшуваною товщиною зрізу. Отже, у цьому випадку набагато простіше здійснити процес різання (стружкоутворення) і виконати знімання матеріалу.

З порівняння залежностей (2.53) і (2.77) також видно, що під час різання зі зменшуваною товщиною зрізу енергоємність обробки σ завжди менше, ніж під час різання зі збільшуваною товщиною зрізу (див. рис. 2.23). Це обумовлено тим, що тригонометрична функція $\operatorname{tg} \frac{(\psi - \alpha)}{2} < \operatorname{tg} \frac{(\psi + \alpha)}{2}$. Отже, знаменник залежності (2.77) більший і відповідно енергоємність обробки σ менша. Таким чином, отримана залежність (2.77), так само, як і залежність (2.53), по-новому розкриває закономірності процесу різання зі змінною товщиною зрізу.

2.3. Особливості обробки кромки заготовок

З огляду на можливість ефективного застосування методу абразивної обробки затопленими струменями для обробки кромки заготовок, слід розглянути умови стружкоутворення в момент виходу різального зерна на кромку плоскої заготовки. Це дозволить порівняти запропонований метод із традиційними методами обробки з погляду підвищення якості оброблюваних поверхонь. Необхідно зауважити, що істотним фак-

тором зниження якості обробки деталей на фінішних операціях є утворення задирок і мікровідколів на оброблюваних поверхнях. Для їхнього усунення застосовуються різні методи. Однак вони досить трудомісткі й ускладнюють технологічні процеси обробки. У зв'язку із цим важливо, поперше, установити механізм утворення задирок і визначити оптимальні умови обробки, за яких задирки або не будуть утворюватися, або будуть утворюватися з меншими розмірами, що дозволить знизити трудомісткість наступних операцій щодо їх усунення. По-друге, слід обґрунтувати найбільш ефективні методи обробки щодо зняття задирок і відповідно підвищення якості оброблюваних поверхонь. Виходячи зі сказаного, необхідно визначити умови утворення задирок і мікровідколів на оброблюваних поверхнях деталей і встановити шляхи їхнього усунення.

Для вирішення поставленого завдання слід розглянути закономірності стружкоутворення в процесі різання матеріалу з постійною товщиною зрізу (рис. 2.34) на основі теоретичного підходу, запропонованого в пп. 2.2.1. Під дією сили різання P , очевидно, можливий зсув оброблюваного матеріалу уздовж двох умовних площин OA й OB , які перетинають зовнішні поверхні оброблюваної деталі й розташовані відповідно під кутами β_1 й β_2 до напрямку руху (зі швидкістю V_0) інструмента уздовж лінії OC . Для оцінювання найбільш імовірного положення умовної площини зсуву оброблюваного матеріалу необхідно визначити дотичні напруження, що виникають у двох розглянутих умовних площинах OA й OB , і порівняти їх.

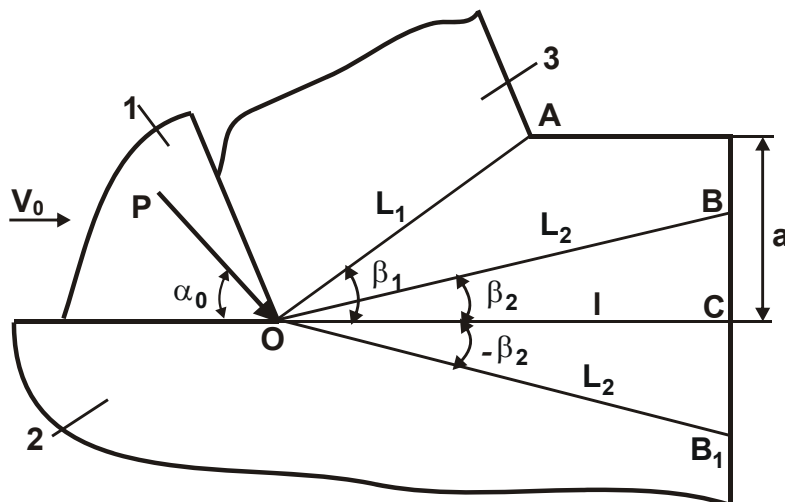


Рис. 2.34. Розрахункова схема параметрів процесу стружкоутворення під час різання

Умовні позначення: 1 – різальний інструмент; 2 – оброблюваний матеріал; 3 – стружка, що утворюється.

Випадок 1. Необхідно визначити дотичне напруження τ_1 , що виникає в площині ОА:

$$\tau_1 = \frac{P \cdot \cos(\alpha_0 + \beta_1)}{L_1 \cdot b}, \quad (2.80)$$

де α_0 – кут дії сили різання Р;

$L_1 = a / \sin \beta_1$ – довжина площини зсуву ОА, м.

Тоді:

$$\tau_1 = \frac{P}{a \cdot b} \cdot \cos(\alpha_0 + \beta_1) \cdot \sin \beta_1. \quad (2.81)$$

Як видно, кут β_1 неоднозначно впливає на дотичне напруження τ_1 , тобто існує екстремум функції τ_1 від кута β_1 . Для його визначення слід продіференціювати залежність (2.81) за кутом β_1 і похідну порівняти з нулем:

$$(\tau_1)'_{\beta_1} = \frac{P}{a \cdot b} \cdot \cos(\alpha_0 + 2\beta_1) = 0. \quad (2.82)$$

Звідси:

$$\beta_1 = 45^\circ - \frac{\alpha_0}{2}. \quad (2.83)$$

Потрібно визначити другу похідну функції τ_1 від кута β_1 :

$$(\tau_1)''_{\beta_1} = -\frac{2 \cdot P}{a \cdot b} \cdot \sin(\alpha_0 + 2\beta_1). \quad (2.84)$$

У точці екстремуму друга похідна функції τ_1 від кута β_1 :

$$(\tau_1)''_{\beta_1} = -\frac{2 \cdot P}{a \cdot b} \quad (2.85)$$

від'ємна. Отже, має місце максимум функції τ_1 від кута β_1 . Тому зсув оброблюваного матеріалу відбудеться під кутом β_1 , який визначається залежністю (2.83). Підставляючи залежність (2.83) у залежність (2.80), можна встановити максимальне дотичне напруження $\tau_{1_{\max}}$:

$$\tau_{1_{\max}} = \frac{P}{a \cdot b} \cdot \sin^2\left(45^\circ - \frac{\alpha_0}{2}\right). \quad (2.86)$$

Максимальне дотичне напруження $\tau_{1_{\max}}$ змінюється за законом зміни кута β_1 . У разі досягнення $\tau_{1_{\max}}$ межі міцності на зсув оброблюваного матеріалу $\tau_{\text{зсув}}$ в площині OA відбудеться зсув матеріалу. Дотримуючись цієї умови в залежності (2.86), можна визначити силу різання P , за якої починається стружкоутворення (уздовж площини зсуву OA):

$$P = \frac{a \cdot b \cdot \tau_{\text{зсув}}}{\sin^2\left(45^\circ - \frac{\alpha_0}{2}\right)}. \quad (2.87)$$

Із залежності (2.87) випливає, що чим більший кут α_0 , тим менший кут β_1 , більше сила різання P й відповідно гіршим буде перебіг процесу стружкоутворення під час різання.

Випадок 2. Необхідно визначити дотичне напруження τ_2 , що виникає в площині OB :

$$\tau_2 = \frac{P \cdot \cos(\alpha_0 + \beta_2)}{L_2 \cdot b}, \quad (2.88)$$

де $L_2 = l / \cos \beta_2$ – довжина площини зсуву OB , м;

$l = OC$ – відстань від точки дії сили різання P до торцевої поверхні оброблюваної деталі, м.

Тоді:

$$\tau_2 = \frac{P \cdot \cos(\alpha_0 + \beta_2) \cdot \cos \beta_2}{l \cdot b}. \quad (2.89)$$

У цьому випадку має місце однозначний зв'язок між дотичним напруженням τ_2 і кутом β_2 . Зі зменшенням кута β_2 дотичне напруження збільшується. Найбільше значення τ_2 буде досягтися за умови від'ємного кута β_2 . Тому в (2.89) кут β_2 слід розглядати як від'ємний:

$$\tau_2 = \frac{P \cdot \cos(\alpha_0 - \beta_2) \cdot \cos \beta_2}{l \cdot b}. \quad (2.90)$$

У результаті отримано залежність (2.90), відповідно до якої кут β_2 неоднозначно впливає на дотичне напруження τ_2 , тобто існує екстремум функції τ_2 від кута β_2 . Для його визначення слід підпорядкувати функцію τ_2 необхідній умові екстремуму: $(\tau_2)'_{\beta_2} = 0$. Тоді:

$$(\tau_2)'_{\beta_2} = \frac{P}{l \cdot b} \cdot \sin(\alpha_0 - 2\beta_2) = 0, \quad (2.91)$$

звідси

$$\beta_2 = \frac{\alpha_0}{2}. \quad (2.92)$$

Друга похідна функції τ_1 від кута β_1 в точці екстремуму:

$$(\tau_2)''_{\beta_2} = -\frac{2 \cdot P}{l \cdot b} \quad (2.93)$$

від'ємна. Отже, у точці екстремуму має місце максимум функції τ_2 від кута β_2 . Підставляючи залежність (2.92) у залежність (2.90), можна визначити максимальне дотичне напруження $\tau_{2\max}$:

$$\tau_{2\max} = \frac{P}{l \cdot b} \cdot \cos^2 \frac{\alpha_0}{2}. \quad (2.94)$$

Як і в попередньому випадку, максимальне дотичне напруження $\tau_{2\max}$ змінюється за законом зміни кута β_2 , який визначається залежніс-

тю (2.92). За умови $\tau_{2_{\max}} = \tau_{\text{зсув}}$ в площині OB_1 , розташованій під кутом $-\beta_2$, відбудеться зсув оброблюваного матеріалу. Підкоряючи цій умові залежність (2.94), можна визначити силу різання P , яка відповідає початку зсуву оброблюваного матеріалу в площині OB_1 :

$$P = \frac{l \cdot b \cdot \tau_{\text{зсув}}}{\cos^2 \frac{\alpha_0}{2}}. \quad (2.95)$$

Зі збільшенням кута α_0 сила різання P збільшується.

За виконання умови $\tau_{1_{\max}} = \tau_{2_{\max}} = \tau_{\text{зсув}}$ зсув оброблюваного матеріалу відбудеться одночасно у двох розглянутих площинах OA й OB_1 . Порівнюючи залежності (2.86) і (2.94), можна встановити співвідношення a/l , за якого виконується умова $\tau_{1_{\max}} = \tau_{2_{\max}} = \tau_{\text{зсув}}$:

$$\frac{a}{l} = \frac{1}{2} \cdot \left(1 - \operatorname{tg} \frac{\alpha_0}{2}\right)^2. \quad (2.96)$$

На рис. 2.35 і в табл. 2.14 наведено розраховані за залежністю (2.96) значення відношень a/l і l/a , а також розраховані за залежностями (2.83) і (2.92) значення кутів β_1 і β_2 .

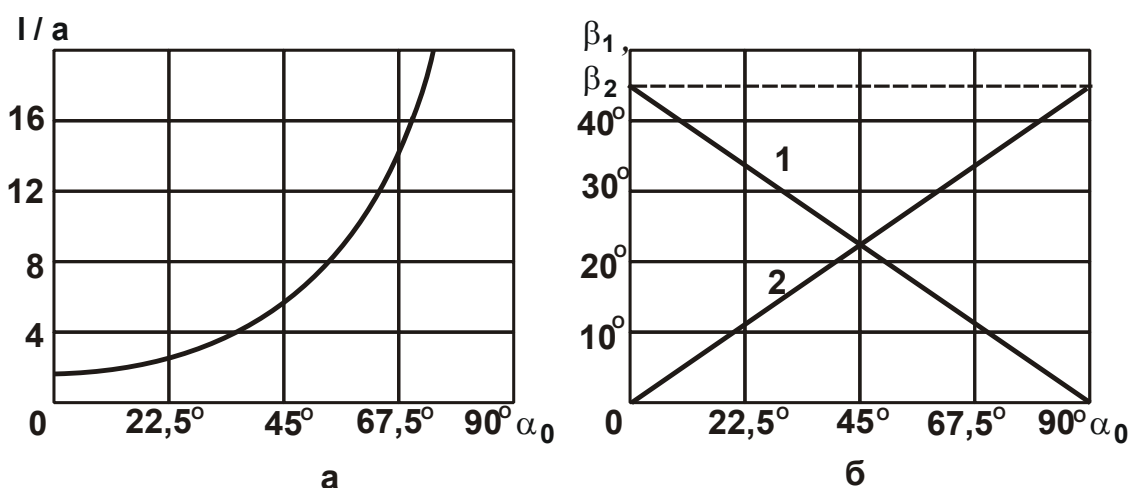


Рис. 2.35. Залежності l/a (а) і β_1, β_2 (б) від кута α_0

Умовні позначення: 1 – β_1 ; 2 – β_2 .

Як видно, зі збільшенням кута α_0 відношення l/a необмежено збільшується. Отже, зі збільшенням кута α_0 процес стружкоутворення (зсув оброблюваного матеріалу уздовж площини OA) припиняється на більшій відстані до торцевої поверхні оброблюваної деталі й відповідно починається процес зсуву матеріалу уздовж площини OB_1 . Це приводить або до утворення відколу (у випадку обробки крихких матеріалів), або до утворення задирок (при обробці пластичних матеріалів). Тому з погляду підвищення якості обробки необхідно зменшувати кут α_0 , зменшуючи тим самим розмір задирки, що утворюється, й трудомісткість наступної операції щодо її усунення. Зменшення кута α_0 передбачає зменшення радіальної складової сили різання P_y (рис. 2.36), яка пов'язана з кутом α_0 за допомогою відношення P_z/P_y :

$$\frac{P_z}{P_y} = \operatorname{tg}(90^\circ - \alpha_0) = \operatorname{ctg} \alpha_0, \quad (2.97)$$

де P_z – тангенціальна складова сили різання, Н.

Таблиця 2.14

Розрахункові значення відношень a/l , l/a і кутів β_1 і β_2

α_0 , град.	0	10	40	60	80	90
a/l	0,5	0,415	0,202	0,089	0,012	0
l/a	2	2,4	5	11,2	83,3	∞
β_1 , град.	45	40	25	15	5	0
β_2 , град.	0	5	20	30	40	45

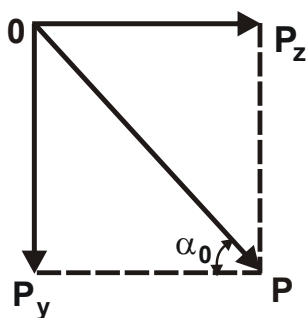


Рис. 2.36. Складові сили різання P

Як відомо, у процесі абразивної обробки коефіцієнт різання P_z/P_y менший, ніж під час лезової обробки. Так, у процесі абразивної обробки коефіцієнт різання $P_z/P_y = 0,1 \dots 1,0$, а під час лезової обробки – $P_z/P_y = 0,5 \dots 10$. Відповідно, під час абразивної обробки кут $\alpha_0 = 45 \dots 85^\circ$, а під час лезової обробки – $\alpha_0 = 5 \dots 65^\circ$. Отже,

під час абразивної обробки кут α_0 і радіальна складова сили різання P_y більші. Тому для зменшення відношення l/a необхідно використовувати лезову обробку. Основною умовою ефективного застосування абразивної обробки слід вважати підвищення різальної здатності інструмента, наприклад, за рахунок реалізації режиму самозагострювання абразивного круга в процесі шліфування, використання прогресивних методів правлення круга або застосування алмазних кругів, які характеризуються високою різальною здатністю. Однак, як показує практика, досягти істотного підвищення якості обробки в цьому випадку досить складно. Набагато ефективніше використовувати запропонований метод абразивної обробки деталей затопленими струменями, який реалізує процес різання зі зменшеною товщиною зрізу й забезпечує зниження енергоємності обробки. У цьому випадку мікротріщини на кромці оброблюваної заготовки утворюватися не будуть, а задирки, які залишилися від попередніх операцій, будуть усунуті, що дозволить підвищити якість оброблених поверхонь. Таким чином, на основі отриманих аналітичних рішень розкрито механізм утворення задирок і мікротріщин під час механічної обробки і сформульовано умови щодо їх усунення, що дозволяє науково обґрунтовано підійти до визначення шляхів підвищення якості оброблених поверхонь у кожному конкретному випадку обробки.

2.4. Аналіз умов зменшення мікронерівностей поверхні в процесі абразивної обробки деталей затопленими струменями

Як було показано, запропонований метод абразивної обробки деталей затопленими струменями може бути ефективно використаний для вирішення завдання зменшення мікронерівностей поверхні, утворених під час операцій із попередньої обробки. У цьому випадку різальне зерно буде контактувати не із суцільним оброблюваним матеріалом, а з окремими виступами (рис. 2.37), що, безсумнівно, полегшить умови стружкоутворення при мікрорізанні. В розрахунках слід вважати, що під дією сили різання P , яка виникає в результаті взаємодії різального зерна з окремим виступом (мікронерівністю), відбудеться зсув оброблюваного матеріалу в умовній площині зсуву, розташованій під кутом β . Отже,

умови стружкоутворення в цьому випадку будуть відповідати умовам стружкоутворення при різанні зі зменшеною товщиною зрізу, оскільки від розрахункової схеми, показаної на рис. 2.37а, можна перейти до розрахункової схеми, показаної на рис. 2.29. Поєднуючи ці схеми, можна прийти до схеми, наведеної на рис. 2.37б, і відповідно до теоретичного розв'язання (2.96). Кут α_1 у залежності (2.86) визначає кут підйому окремої мікронерівності.

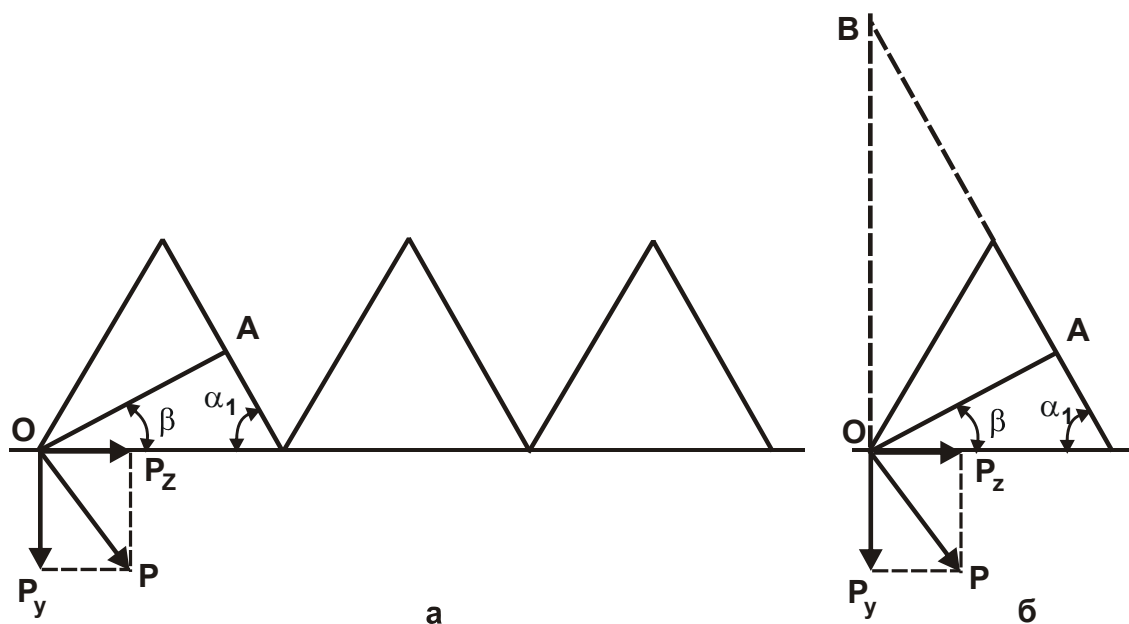


Рис. 2.37. Розрахункові схеми умовного кута зсуву матеріалу β у процесі видалення мікронерівності з оброблюваної поверхні

Як випливає із залежності (2.96), зі збільшенням кута α_1 умовний кут зсуву оброблюваного матеріалу β зменшується аж до нуля. Отже, чим "гостріша" мікронерівність, тим простіше її видалити.

Зі збільшенням кута α_1 також зменшується енергоємність обробки σ , яка визначається залежністю (2.74). Таким чином, теоретично показано можливість зниження енергоємності обробки в процесі взаємодії абразивного зерна з окремими виступами (мікронерівностями) на оброблюваній поверхні (утвореними на попередніх операціях) порівняно з обробкою суцільної поверхні. Це дозволяє розглядати метод абразивної обробки деталей затопленими струменями як важливий фактор підвищення якості обробки на фінішних оздоблювальних операціях.

2.5. Закономірності знімання матеріалу в процесі струминно-абразивної обробки з кутом атаки, що дорівнює 90°

Як впливає із залежності (2.11), мікрорізання з товщиною зрізу, що збільшується в часі, приводить до збільшення енергоємності обробки σ й відповідно до зниження ефективності обробки. Отже, із цього погляду процес струминно-абразивної обробки є недостатньо ефективним, так само, як і інші процеси абразивної обробки (наприклад, шліфування), які реалізують умови мікрорізання з товщиною зрізу, що збільшується в часі. Збільшення кута атаки α за струминно-абразивної обробки передбачає збільшення енергоємності обробки σ й зниження продуктивності.

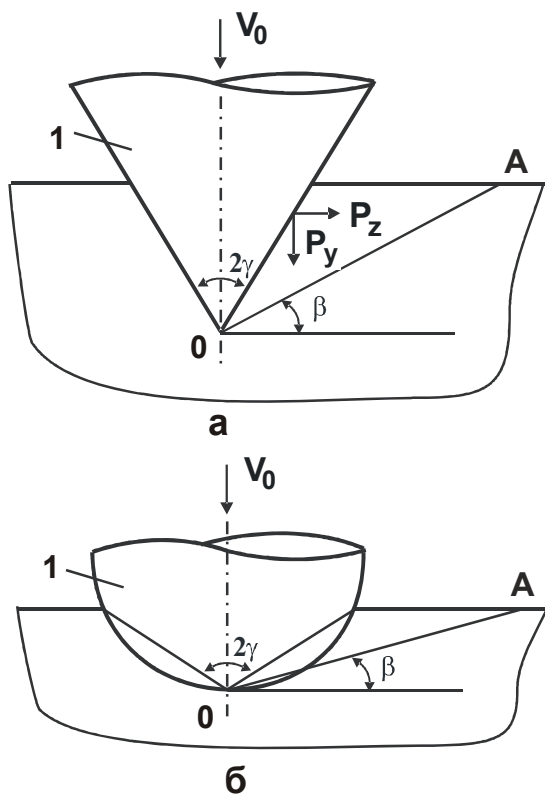


Рис. 2.38. Розрахункова схема кута β для зерна 1 у формі конуса (а) і сфери (б)

Далі слід розглянути граничний випадок струминно-абразивної обробки, який реалізує кут атаки $\alpha = 90^\circ$. Очевидно, у цьому випадку характер взаємодії абразивних зерен з оброблюваним матеріалом і знімання матеріалу будуть підкорятися іншим закономірностям, тому що відсутній рух абразивного зерна уздовж оброблюваної поверхні. Має місце лише рух зерна по нормалі до оброблюваної поверхні зі швидкістю V_0 . Для встановлення закономірностей даного процесу слід розглянути розрахункову схему (рис. 2.38а), у якій абразивне зерно для зручності аналізу подане у вигляді конуса (з кутом при вершині 2γ). Конус по нормалі входить в оброблюваний матеріал. У результаті в оброблюваному матеріалі будуть виникати дотичні напруження τ , спрямовані уздовж умовних площин, що проходять через вершину конуса.

Необхідно визначити дотичне напруження τ , що виникає в умовній площині ОА від дії сил P_z і P_y , які виникають у процесі обробки системи:

$$\tau = \frac{P_y}{2 \cdot v \cdot a \cdot \sin \psi_1} \cdot [\sin(2\beta + \psi_1) - \sin \psi_1]. \quad (2.98)$$

У результаті отримано відоме розв'язання задачі визначення дотичного напруження τ , яке виникає в умовній площині зсуву оброблюваного матеріалу (розташованій під кутом β , див. рис. 2.4) у процесі різання з постійною товщиною зрізу ($\alpha = 0$) інструментом з негативним переднім кутом γ . Даний розв'язок описується аналітичною залежністю (2.7) з розглядом у ній кута $\alpha = 0$. Тоді умовний кут зсуву оброблюваного матеріалу β , описуваний залежністю (2.8), матиме вигляд:

$$\beta = \frac{\pi}{4} - \frac{\psi_1}{2}. \quad (2.99)$$

Енергоємність обробки σ в напрямку дії складової сили різання P_z опишеться перетвореною залежністю (2.11) за умови $\alpha = 0$:

$$\sigma_z = \cos \psi_1 \cdot \frac{2 \cdot \tau_{зсув}}{[1 - \sin \psi_1]}. \quad (2.100)$$

Відповідно, енергоємність обробки σ в напрямку дії складової сили різання P_y опишеться з урахуванням залежностей (2.100) і $K_{ш} = \operatorname{ctg} \psi_1$:

$$\sigma_y = \frac{\sigma_z}{K_{ш}} = \sin \psi_1 \cdot \frac{2 \cdot \tau_{зсув}}{[1 - \sin \psi_1]}. \quad (2.101)$$

Порівнюючи залежності (2.11) і (2.100), можна побачити, що в цьому випадку ($\alpha = 0$) енергоємність обробки менша, ніж під час різання з товщиною зрізу, що збільшується ($\alpha > 0$). Отже, реалізуючи випадок струминно-абразивної обробки, коли абразивне зерно рухається перпендикулярно до оброблюваної поверхні, з'являється можливість зменшення енергоємності й відповідно підвищення продуктивності обробки. Зсув оброблюваного матеріалу буде відбуватися вздовж умовної площини зсуву ОА (див. рис. 2.38). У результаті на оброблюваній поверхні будуть

утворюватися лунки від взаємодії абразивних зерен з оброблюваним матеріалом.

Таким чином показано, що струминно-абразивна обробка з кутом атаки $\alpha = 90^\circ$ забезпечує енергоємність, рівну енергоємності мікрорізання з постійною в часі товщиною зрізу, тобто, по суті, реалізує випадок обробки $\alpha = 0$. Однак, як показано в пп. 2.2.4, енергоємність мікрорізання з постійною товщиною зрізу завжди більша від енергоємності мікрорізання зі зменшуваною в часі товщиною зрізу. Отже, кращим варіантом обробки із цього погляду необхідно вважати саме випадок мікрорізання зі зменшуваною в часі товщиною зрізу, що реалізується, наприклад, у процесі обробки кромки заготовок, усуненні задирок і зменшення мікронерівностей на оброблюваних поверхнях. Інакше кажучи, найбільш ефективною сферою застосування абразивної обробки затопленими струменями необхідно вважати обробку торцевих поверхонь деталей. Обробка плоских поверхонь деталей у цьому плані менш ефективна.

З отриманих залежностей (2.100) і (2.101) випливає, що основним шляхом зменшення енергоємності в процесі струминно-абразивної обробки, яка реалізує кут атаки $\alpha = 90^\circ$, є зменшення від'ємного переднього кута різального зерна γ й умовного кута тертя ψ . Це передбачає застосування більш гострих різальних зерен, а також зниження коефіцієнта тертя різального зерна з оброблюваним матеріалом.

Дані залежності справджуються й для абразивного зерна, поданого у формі сфери (див. рис. 2.38б), при цьому різальна поверхня зерна вважається прямолінійною з умовним переднім кутом γ .

Необхідно зауважити, що встановлені закономірності знімання матеріалу справджуються також для віброабразивної обробки, ультразвукового шліфування, коли абразивні зерна входять в оброблюваний матеріал по нормалі до оброблюваної поверхні, у результаті чого досягається ефект обробки, який виражається в збільшенні продуктивності. У відомих дослідженнях [71; 73; 74; 78] наявність даного ефекту обробки пояснюється різними факторами, тільки не з позиції зниження енергоємності обробки, як було показано.

Таким чином, отримане аналітичне рішення дозволяє розкрити фізичну сутність і технологічні закономірності, по суті, принципово нового методу абразивної обробки, пов'язаного з переміщенням абразивного зерна по нормалі до оброблюваної поверхні. Слід зазначити, що най-

більший ефект обробки в цьому випадку буде досягтися в процесі обробки відносно крихких матеріалів, для яких властиве руйнування оброблюваного матеріалу уздовж умовної площини зсуву OA (див. рис. 2.38). У процесі обробки пластичних матеріалів (наприклад, кольорових металів), очевидно, на оброблюваній поверхні будуть утворюватися лунки з виділеними на їхніх краях навалами металу. Це певною мірою знижує продуктивність даного методу обробки пластичних матеріалів.

Отриманий теоретичний розв'язок дозволяє в першому наближенні пояснити принципову відмінність струминно-абразивної обробки деталей з крихких і пластичних матеріалів, установлену експериментально й наведену на рис. 2.39 [74]. Максимуми продуктивності обробки пластичних металів (свинцю, алюмінію, міді) досягаються у випадку відносно невеликих значень кута атаки $\alpha = 10 - 30^\circ$, тоді як у процесі обробки крихких матеріалів (чавуну) – коли кут атаки $\alpha = 90^\circ$. Як видно, отримані теоретичні результати узгоджуються з експериментальними результатами, наведеними на рис. 2.39, тобто струминно-абразивну обробку деталей з крихких матеріалів доцільно виконувати з кутом атаки $\alpha = 90^\circ$, а деталей із пластичних металів – з невеликим кутом атаки $\alpha \approx 10 - 30^\circ$.

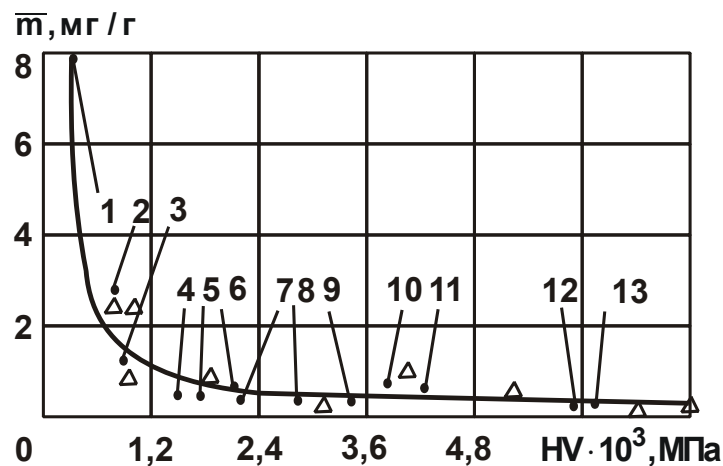


Рис. 2.39. Узагальнена залежність максимального знімання металу \bar{m} (мг/г) від твердості металу

Умовні позначення: 1 – свинець ($\alpha = 10^\circ$); 2 – алюміній Д1 ($\alpha = 30^\circ$); 3 – мідь ($\alpha = 30^\circ$); 4 – сталь 40X ($\alpha = 45^\circ$); 5 – сталь 45 ($\alpha = 45^\circ$); 6 – чавун СЧ 12 ($\alpha = 90^\circ$); 7 – сталь 40X ($\alpha = 45^\circ$); 8 – сталь 45 ($\alpha = 90^\circ$); 9 – сталь 40X ($\alpha = 45^\circ$); 10 – сталь ХІ8Н9Т ($\alpha = 45^\circ$); 11 – сталь 45 ($\alpha = 90^\circ$); 12 – сталь ШХ15 ($\alpha = 90^\circ$); 13 – сталь 65Г ($\alpha = 90^\circ$); Δ – розрахункові точки; \bullet – експериментальні точки [74]; у дужках зазначено кути атаки часток, які відповідають максимальному зніманню металу.

Спостережуване на рис. 2.39 зниження продуктивності струминно-абразивної обробки деталей із пластичних металів зі збільшенням кута атаки α також узгоджується з отриманими теоретичними рішеннями. Виходячи із залежності (2.11), процес різання здійснений, коли кут $\alpha < 90^\circ - \psi_1$. У випадку з більшим кутом атаки α стружкоутворення не відбувається, має місце лише пластичне деформування оброблюваного матеріалу. Цим і пояснюється зменшення продуктивності обробки зі збільшенням кута атаки α в процесі струминно-абразивної обробки деталей із пластичних металів (див. рис. 2.39). З'ясовано, що для пластичних металів випадок обробки з кутом атаки $\alpha = 90^\circ$ фактично не застосовується у зв'язку із пластичним витисненням металу з лунки, що утворюється, без його відділення від оброблюваної деталі. Збільшення продуктивності обробки деталей із крихких матеріалів зі збільшенням кута атаки α (див. рис. 2.39) пов'язане з перевагою розглянутого процесу входу зерна в оброблюваний матеріал під кутом атаки α , близьким до 90° .

У роботі [74] закономірності зміни знімання металу залежно від кута атаки α , показаної на рис. 2.39, пояснюються наступним чином. Коли кут атаки $\alpha \leq 30^\circ$, переважає механізм різання, викликаний ковзанням абразивних часток по оброблюваній поверхні. Коли кут атаки $30^\circ < \alpha < 90^\circ$, відбувається різання й пластичне деформування. Коли кут атаки $\alpha = 90^\circ$, знімання металу визначається поворотом абразивного зерна в лунці, який відбувається за рахунок виникнення перекидного моменту, викликаного розбіжністю між центром мас абразивної частки й точкою її контакту з оброблюваною поверхнею. Незначний (за кутом) поворот абразивної частки відбувається з усіма кутами атаки, але коли кут $\alpha < 90^\circ$, ефект винесення маси з лунки в момент повороту частки значно перебивається ефектом мікрорізання. Коли кут атаки $\alpha = 90^\circ$, поворот частки в лунці під час удару автор вважає єдиним механізмом видалення металу в процесі обробки пластичних металів. У цій же роботі показано, що чим нижча твердість оброблюваного матеріалу, тим менший кут атаки α , що відповідає максимуму знімання металу.

Експериментально встановлено, що якщо в процесі обробки свинцю ($HV < 300$) максимум знімання металу досягається з кутом атаки $\alpha = 10^\circ$, то в процесі обробки сталі 45 ($HV \geq 4\ 000$), чавуну ($HV\ 1370$) і

скла – з кутом атаки $\alpha = 90^\circ$ (рис. 2.40). Разом із тим, як зазначається в роботі [74], у науково-технічній літературі [114; 133] наводяться достатньо суперечливі дані про кути атаки α , які відповідають максимуму знімання металу для різних оброблюваних металів (рис. 2.41).

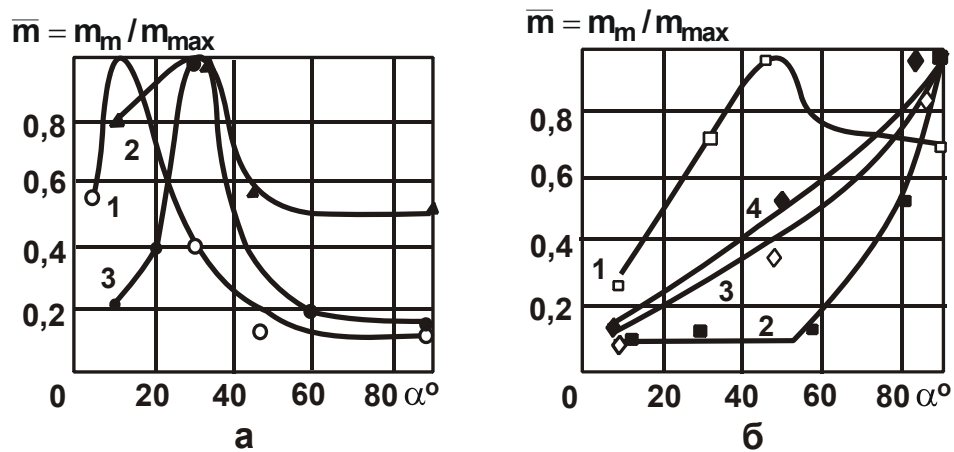


Рис. 2.40. Вплив кута атаки α абразивних часток на масу видаленого металу

Умовні позначення: а) 1 – свинець – НВ < 300 МПа, $m_{\max} = 0,0271$ г; 2 – мідь – НВ 720 МПа; $m_{\max} = 0,00535$ г; 3 – алюміній Д1 – НВ 620 МПа, $m_{\max} = 0,0106$ г; б) 1 – сталь 45 – НВ 4 440 МПа, $m_{\max} = 0,0021$ г; 2 – сталь ШХ15 – НВ 6 100 МПа, $m_{\max} = 0,001$ г; 3 – чавун СЧ12 – НВ 1 970 МПа, $m_{\max} = 0,0035$ г; 4 – скло М4, $m_{\max} = 0,0575$ г; $\bar{m} = m_m / m_{\max}$ – відносна маса видаленого металу; m_m – маса видаленого металу; m_{\max} – максимальна маса видаленого металу; абразив – А50, швидкість удару $V = 42,4$ м/с.

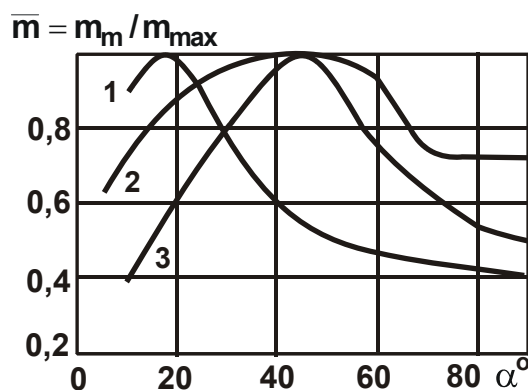


Рис. 2.41. Вплив кута атаки абразивних часток і твердості оброблюваного металу на масу видаленого металу

Умовні позначення: 1 – алюмінієвий сплав [74], (твердість не зазначена); 2 – жароміцні сталі ЕІ 437Б, ЕІ 698, ЖС 6Ф, НРС 45 ... 53 [133]; 3 – сталь 35Л [114] (твердість не зазначена).

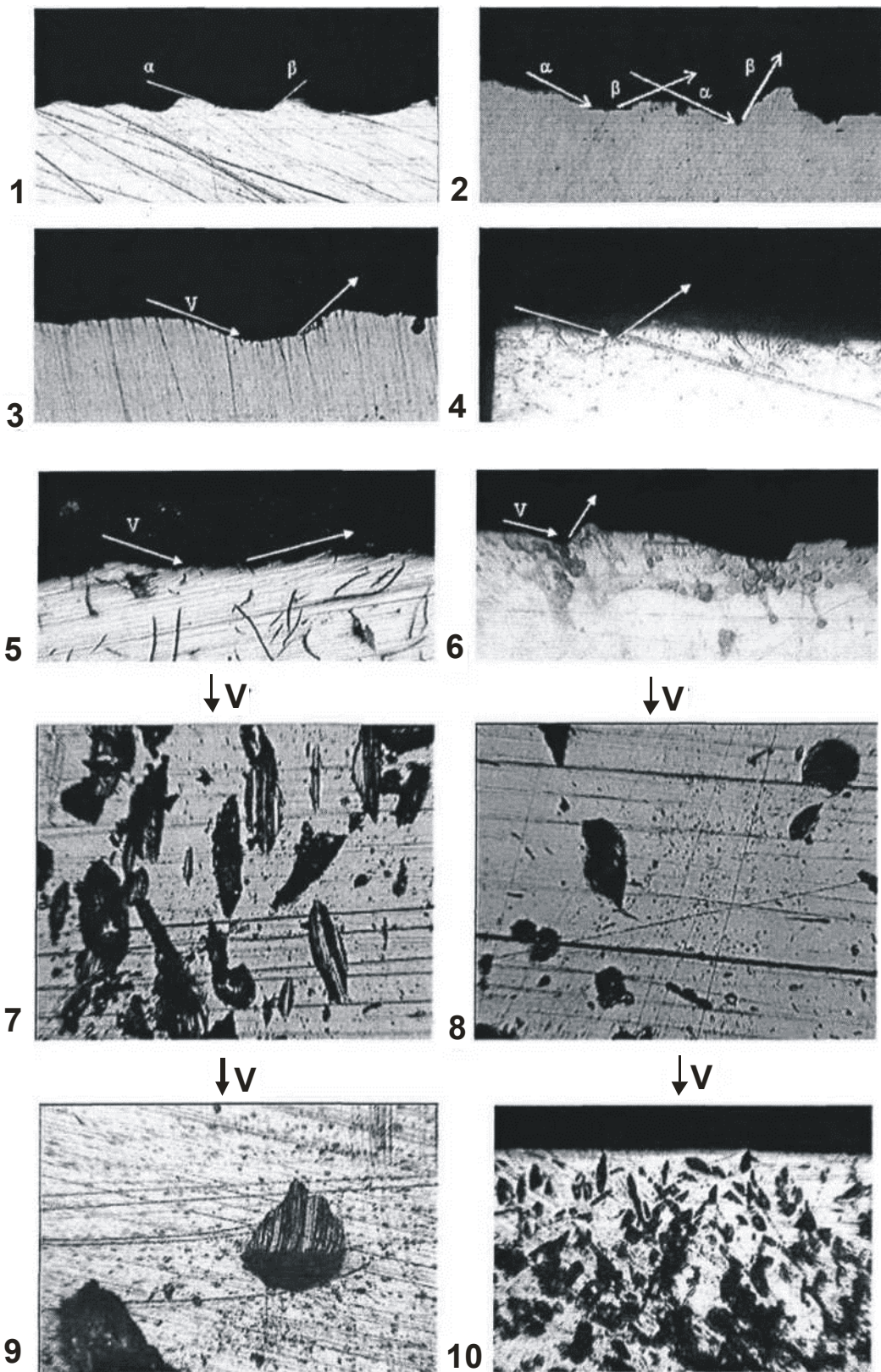


Рис. 2.42. **Форми мастильних мікрокишень, утворених під різними кутами атаки абразивних часток до оброблюваної поверхні**

На рис. 2.42 (позиції 1, 2, 3, 4, 6) [74] показано, що характерною рисою обробки пластичних металів є утворення навалів на краях лунок і

спереду від руху абразивних часток, внаслідок чого мастильні мікрокишені, що утворюються, істотно несиметричні: кут β виходу абразивної частки з мастильних мікрокишень завжди більший від кута α атаки. При проведенні експериментальних досліджень в якості абразиву використований електрокорунд білий зернистістю 50 ($D = 500 \dots 630$ мкм), швидкість різання $V = 42,4$ м/с. На рис. 2.42 прийняті наступні позначення:

- 1 – мідь, кут атаки $\alpha = 20^\circ$, кут виходу $\beta = 45^\circ$, НВ 680 МПа;
- 2 – алюміній Д1, кут атаки $\alpha = 20^\circ$, кут виходу $\beta = 45 \dots 60^\circ$, НВ 720 МПа;
- 3 – алюміній Д1, кут атаки $\alpha = 20^\circ$, кут виходу $\beta = 45^\circ$;
- 4 – сталь 20, кут атаки $\alpha = 20^\circ$, кут виходу $\beta = 40^\circ$, НВ 2 620 МПа;
- 5 – чавун СЧ12, кут атаки $\alpha = 15^\circ$, кут виходу $\beta = 15^\circ$, НВ 1 970 МПа;
- 6 – сталь Х18Н9Т, кут атаки $\alpha = 20^\circ$, кут виходу $\beta = 60^\circ$, НВ 5 200 МПа;
- 7 – сталь 20 вигляд зверху, кут атаки $\alpha = 10^\circ$, НВ 2 620 МПа;
- 8 – сталь 20 вигляд зверху, кут атаки $\alpha = 90^\circ$, НВ 2 620 МПа;
- 9 – алюміній Д1 вигляд зверху, кут атаки $\alpha = 45^\circ$, НВ 720 МПа;
- 10 – сталь ШХ15 вигляд зверху, кут атаки $\alpha = 10^\circ$, НВ 6 100 МПа.

Отримані в даній роботі теоретичні рішення не суперечать наведеним експериментально встановленій залежності зміни знімання металу від кута атаки α . Винятком є лише випадок $\alpha = 90^\circ$. Відповідно до наведеної на рис. 2.38 розрахункової схеми, процес видалення відносно крихкого матеріалу в цьому випадку можливий у результаті його зсуву уздовж умовної площини зсуву. Автор роботи [74] вважає, що знімання матеріалу можливе лише за рахунок повороту в момент удару абразивної частки у формотвірній лунці.

У принципі можливі обидва розглянуті механізми знімання металу. Однак слід віддати перевагу механізму, який впливає з розрахункової схеми, наведеної на рис. 2.38. Цей механізм у роботі [74] не розглядався й не оцінювався, тобто в даній роботі він пропонується вперше.

Висновки до розділу 2

1. Розроблено теоретичний підхід до визначення технологічних закономірностей формування параметрів якості у процесі абразивної обробки деталей затопленими струменями, заснований на 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 до 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.

2. Розроблено математичну модель визначення енергоємності обробки як основного фактора підвищення якості та продуктивності абразивної обробки деталей затопленими струменями. Проведено теоретичний аналіз умов зменшення параметрів силової напруженості процесу абразивної обробки деталей затопленими струменями, включаючи складову сили різання й енергоємність обробки.

3. Отримано аналітичні залежності для визначення енергоємності обробки за умови утворення сегментної форми зрізу абразивним зерном, тобто в момент входу різального зерна в оброблюваний матеріал (у разі різання зі збільшеною товщиною зрізу) і в момент виходу різального зерна з контакту з оброблюваним матеріалом (у разі різання зі зменшеною товщиною зрізу). Установлено, що в процесі різання зі зменшеною товщиною зрізу енергоємність обробки менша, ніж під час різання зі збільшеною товщиною зрізу. Виходячи із цього зроблено висновок про те, що основний ефект абразивної обробки деталей затопленими струменями полягає в забезпеченні процесу різання зі зменшеною товщиною зрізу, що досягається під час обробки кромки заготовки, усунення задирок і зменшення мікронерівностей на оброблюваних поверхнях.

4. Теоретично встановлено, що завдяки зменшенню від'ємного переднього кута різального зерна зі збільшенням товщини зрізу, процес різання (стружкоутворення) потенційно можливий у всьому діапазоні зміни кута входу зерна в оброблюваний матеріал (від 0 до 90°). Це вказує на можливість здійснення процесу різання під час абразивної обробки деталей затопленими струменями з кутами атаки $0 \dots 90^\circ$.

5. Отримано нову узагальнену аналітичну залежність, що встановлює взаємозв'язок між енергоємністю обробки й відношенням товщини зрізу до радіуса різального зерна. Доведено, що зі збільшенням товщини

зрізу енергоємність обробки безупинно зменшується як у випадку різання з постійною, так і у випадку зі збільшеною товщиною зрізу. При цьому, в першому випадку енергоємність обробки починає зменшуватися при нульовому значенні товщини зрізу, а в другому випадку – при товщині зрізу, що відповідає переходу від процесу пластичного деформування матеріалу до процесу стружкоутворення (різання).

6. Теоретично встановлено, що в процесі обробки пластичних матеріалів перехід від процесу пластичного деформування матеріалу до процесу стружкоутворення відбувається за менших значень кута входу зерна в оброблюваний матеріал, ніж під час обробки крихких матеріалів, для яких цей кут може набувати значень, близьких або рівних 90° .

7. Теоретично встановлено, що в процесі абразивної обробки деталей затопленими струменями мікронерівностей поверхні, утворених на попередніх операціях, енергоємність процесу значно менша, ніж під час обробки суцільної поверхні. Це дозволяє розглядати цей метод як важливий фактор зменшення мікронерівностей поверхні й відповідно підвищення якості обробки на фінішних оздоблювальних операціях.

8. У роботі на основі аналітичних рішень розкрито механізм утворення задирок і визначено оптимальні умови обробки для їх усунення. Обґрунтовано найбільш ефективні методи механічної обробки зняття задирок і підвищення якості оброблюваних поверхонь. Показано ефективність застосування для цього методу абразивної обробки деталей затопленими струменями.

9. Теоретично обґрунтовано закономірності знімання матеріалу в процесі струминно-абразивної обробки з кутом атаки, що дорівнює 90° . Доведено, що в цьому випадку енергоємність обробки менша, ніж під час струминно-абразивної обробки з кутом атаки, меншим від 90° . Це свідчить про ефективність застосування даної схеми для обробки деталей з відносно крихких матеріалів, схильних до стружкоутворення. Отримані теоретичні результати узгоджуються з відомими експериментальними даними, з яких випливає, що струминно-абразивну обробку деталей із пластичних матеріалів з погляду підвищення продуктивності ефективно виконувати з невеликими кутами атаки (на рівні $10 - 30^{\circ}$), а обробку деталей з крихких матеріалів – з більшими кутами атаки, що дорівнюють або наближаються до 90° .

Розділ 3. Розробка математичної моделі визначення шорсткості поверхні та продуктивності абразивної обробки деталей затопленими струменями

3.1. Спрощена математична модель визначення шорсткості поверхні в процесі абразивної обробки деталей затопленими струменями

У розділі 2 роботи було розглянуто питання визначення енергоємності обробки σ й умов її зменшення, що дозволило, відповідно до залежності (2.2), установити основні напрями збільшення об'єму зрізу окремим зерном $\mathcal{G}_{\text{зріз}} = a \cdot v \cdot l$ і відповідно продуктивності обробки. Для визначення умов зменшення параметра шорсткості поверхні R_{max} , відповідно до залежності (2.3), важливо знати закономірності збільшення довжини зрізу l (довжини мікронерівності, що утворюється), які обумовлені проявом динамічного фактора обробки. У зв'язку із цим, слід провести обґрунтування технологічних можливостей збільшення довжини зрізу l і зменшення параметра шорсткості поверхні R_{max} з позиції динаміки взаємодії рухомого абразивного зерна з оброблюваним матеріалом.

Для вирішення даного завдання необхідно розглянути закономірності динаміки взаємодії абразивного зерна масою m , що рухається з початковою швидкістю V_0 , з оброблюваним матеріалом (рис. 3.1 [7]). Очевидно, з боку оброблюваного матеріалу на зерно буде діяти тангенціальна складова сили різання P_z й сила інерції $m \cdot \ddot{z}(\tau)$, де $\ddot{z}(\tau)$ – прискорення руху зерна в напрямку координати z , m/c^2 ; τ – поточний час взаємодії зерна з оброблюваним матеріалом, с. Тоді переміщення зерна в часі τ буде підпорядковуватися диференціальному рівнянню [97]:

$$m \cdot \ddot{z}(\tau) = -P_z. \quad (3.1)$$

Випадок 1. Можна припустити, що тангенціальна складова сили різання P_z із часом τ залишається постійною: $P_z = P_0$, тобто не залежить

від координати z у зв'язку зі сталістю товщини зрізу. Рівняння (3.1) у цьому випадку матиме вигляд [9]:

$$m \cdot \ddot{z}(\tau) = -P_0. \quad (3.2)$$

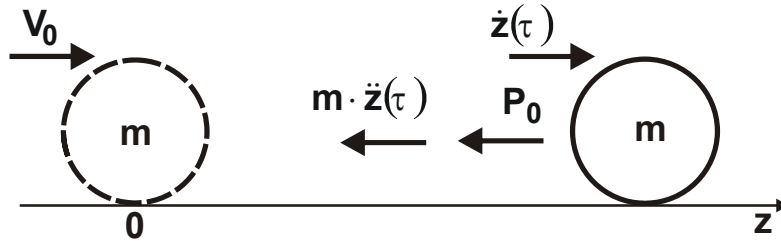


Рис. 3.1. Розрахункова схема динаміки взаємодії різального зерна масою m з оброблюваним матеріалом

Розв'язання диференціального рівняння (3.2) буде таким:

$$z(\tau) = -\frac{1}{2} \cdot \frac{P_0}{m} \cdot \tau^2 + C_1 \cdot \tau + C_2, \quad (3.3)$$

де C_1, C_2 – постійні інтегрування, що визначаються з початкових умов: $z(0) = 0; \dot{z}(0) = V_0$.

Підпорядковуючи залежність (3.3) даним початковим умовам, одержимо: $C_1 = V_0; C_2 = 0$. Тоді:

$$z(\tau) = -\frac{1}{2} \cdot \frac{P_0}{m} \cdot \tau^2 + V_0 \cdot \tau; \quad (3.4)$$

$$\dot{z}(\tau) = -\frac{P_0}{m} \cdot \tau + V_0. \quad (3.5)$$

На рис. 3.2 показано характер зміни швидкості переміщення зерна $\dot{z}(\tau)$ в часі τ . Як видно, швидкість $\dot{z}(\tau)$ із часом зменшується. За умови $\dot{z}(\tau) = 0$ зерно зупиниться. Підпорядкуємо цій умові залежність (3.5):

$$\tau = \frac{m \cdot V_0}{P_0}. \quad (3.6)$$

У результаті отримано класичний розв'язок на основі закону збереження кількості руху. Підставляючи залежність (3.6) в (3.4), можна визначити довжину шляху зерна в оброблюваному матеріалі:

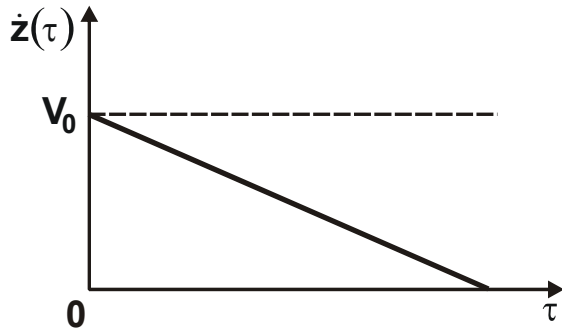


Рис. 3.2. Загальний вигляд залежності $\dot{z}(\tau)$

$$z = \frac{m \cdot V_0^2}{2 \cdot P_0}. \quad (3.7)$$

Залежність (3.7) виражає рівняння кінетичної енергії $m \cdot V_0^2 / 2$ рухомого зерна й роботи різання $P_0 \cdot z$.

У результаті отримано залежність, аналогічну залежності (2.1) за умови постійної тангенціальної складової сили різання $P_z = P_0$. У цьому випадку величина z визначає довжину зрізу окремим зерном І.

Випадок 2. Розглянемо випадок, коли різальне зерно рухається під деяким кутом α до оброблюваної поверхні 0-0' (рис. 3.3). Тангенціальна складова сили різання P_z змінюється за залежністю $P_z = \sigma \cdot a \cdot v$. У цьому випадку товщина зрізу – змінна величина (рівна відрізку BD), а ширина зрізу v – постійна величина. Кут $\angle OBD = 90^\circ$. З рис. 3.3 випливає тригонометричне співвідношення $a = z \cdot \text{tg} \alpha$. Тоді залежність для визначення P_z матиме вигляд:

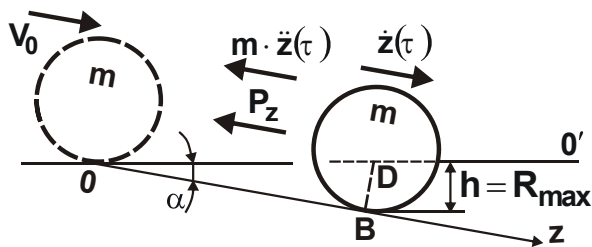


Рис. 3.3. Розрахункова схема динаміки взаємодії зерна з оброблюваним матеріалом

$P_z = A \cdot z$,
де $A = \sigma \cdot v \cdot \text{tg} \alpha$.

$$P_z = A \cdot z, \quad (3.8)$$

де $A = \sigma \cdot v \cdot \text{tg} \alpha$.

Після підстановки залежності (3.8) у рівняння (3.1), одержимо:

$$m \cdot \ddot{z}(\tau) = -A \cdot z(\tau). \quad (3.9)$$

З урахуванням залежності $k = \sqrt{\frac{A}{m}} = \sqrt{\frac{\sigma \cdot v \cdot \text{tg} \alpha}{m}}$ маємо:

$$\ddot{z}(\tau) + k^2 \cdot z(\tau) = 0. \quad (3.10)$$

Розв'язання диференціального рівняння (3.10) буде таким:

$$z(\tau) = C_1 \cdot \text{sink } \tau + C_2 \cdot \text{cosk } \tau; \quad (3.11)$$

$$\dot{z}(\tau) = C_1 \cdot k \cdot \text{cosk } \tau - C_2 \cdot k \cdot \text{sink } \tau, \quad (3.12)$$

де C_1, C_2 – постійні інтегрування, які визначаються з початкових умов: $z(0) = 0; \dot{z}(0) = V_0$.

Підпорядковуючи залежності (3.11) і (3.12) початковим умовам, маємо:

$$z(\tau) = \frac{V_0}{k} \cdot \text{sink } \tau; \quad (3.13)$$

$$\dot{z}(\tau) = V_0 \cdot \text{cosk } \tau. \quad (3.14)$$

Як видно, зміна величин $z(\tau)$ і $\dot{z}(\tau)$ в часі підпорядковується закону гармонійних коливань із частотою k . За фізичною сутністю даний розв'язок аналогічний до класичного розв'язку, що описує вільні коливання із

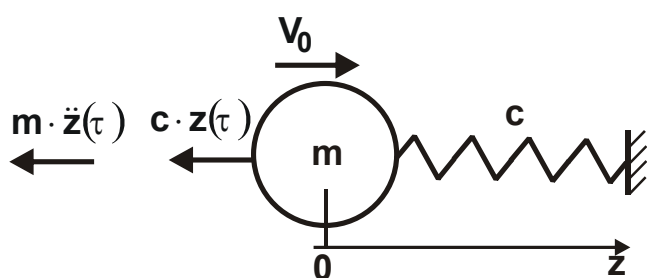


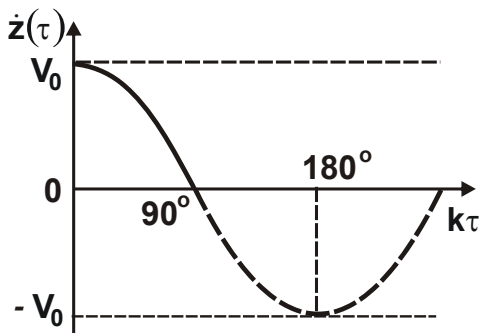
Рис. 3.4. Розрахункова схема коливань маси m на пружинці жорсткістю c

власною частотою $k = \sqrt{c/m}$ маси m на пружині жорсткістю c (рис. 3.4 [97]). Диференціальне рівняння коливань маси m для заданих початкових умов у цьому випадку ідентичне диференціальному рівнянню (3.10). Це пов'язано з тим, що тангенціальна складова сили різання $P_z = A \cdot z$

описується такою ж залежністю, як і пружно-відновлювальна сила $P_z = c \cdot z$ (див. рис. 3.4).

Як видно з рис. 3.5, що графічно описує залежність (3.14), із часом τ швидкість переміщення різального зерна $\dot{z}(\tau)$ зменшується. За умови

$\dot{z}(\tau)=0$ різальне зерно зупиниться. Підпорядковуючи цій умові залежність (3.14), визначимо час τ руху зерна в оброблюваному матеріалі:



$$\tau = \frac{\pi}{2k}. \quad (3.15)$$

Рис. 3.5. Характер зміни швидкості переміщення зерна $\dot{z}(\tau)$ в часі τ

Підставляючи залежність (3.15) у (3.13) з урахуванням $\sin \frac{\pi}{2} = 1$, визначимо довжину l шляху зерна в оброблюваному матеріалі:

$$l = z = \frac{V_0}{k} = V_0 \cdot \sqrt{\frac{m}{\sigma \cdot v \cdot \operatorname{tg} \alpha}}. \quad (3.16)$$

Як видно, величина $l = z$ тим більша, чим більша маса абразивного зерна m , початкова швидкість його руху V_0 й менше параметри σ , v , $\operatorname{tg} \alpha$. Цим показано, що довжина шляху зерна в оброблюваному матеріалі $l = z$ залежить від енергоємності обробки σ , тоді як у залежності (2.3) вони розглядалися як невзаємопов'язані. Отже, основним параметром, що визначає характер перебігу процесу, необхідно вважати енергоємність обробки σ . Знаючи величину z , з урахуванням залежності (3.16) можна визначити об'єм матеріалу, що знімається одним зерном:

$$Q_{\text{зріз}} = \frac{1}{2} \cdot z \cdot a \cdot v = \frac{m \cdot V_0^2}{2 \cdot \sigma}. \quad (3.17)$$

Виходячи з отриманої залежності (3.17), об'єм $Q_{\text{зріз}}$ не залежить від кута α входу зерна в оброблюваний матеріал, а визначається параметрами m , V_0 і σ . Причому, початкова швидкість руху зерна V_0 найбільше впливає на об'єм $Q_{\text{зріз}}$, тобто ефективно абразивну обробку деталей затопленими струменями здійснювати з максимально можливою швидкістю подання абразивних зерен у зону різання. Таким чином отримане важливе теоретичне рішення, яке вказує на те, що з погляду динаміки

процесу продуктивність обробки (яка обумовлена об'ємом $\mathcal{Q}_{\text{зріз}}$) не залежить від кута α . Знаючи величину z й виходячи з рис. 3.3, можна визначити глибину риски-подряпини h (утвореної одиничним зерном), яка за фізичною сутністю в першому наближенні дорівнює висоті мікронерівності на обробленій поверхні (тобто параметру шорсткості обробленої поверхні R_{max}):

$$h = R_{\text{max}} = z \cdot \sin \alpha = \frac{V_0}{k} \cdot \sin \alpha = V_0 \cdot \sqrt{\frac{m \cdot \sin^2 \alpha}{\sigma \cdot v \cdot \text{tg} \alpha}} = V_0 \cdot \sqrt{\frac{m \cdot \sin 2\alpha}{2 \cdot \sigma \cdot v}}. \quad (3.18)$$

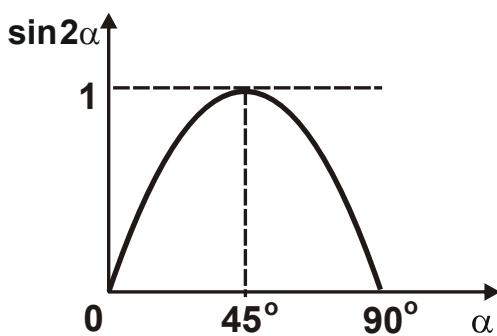


Рис. 3.6. Загальний вигляд тригонометричної функції $\sin 2\alpha$

Характер зміни функції $\sin 2\alpha$ показаний на рис. 3.6. При зміні кута α від 0° до 45° функція $\sin 2\alpha$ збільшується, а в разі зміни кута α від 45° до 90° , навпаки, зменшується аж до нуля. Отже, для того щоб зменшити параметр шорсткості поверхні R_{max} , необхідно подання абразивних зерен стосовно оброблюваної поверхні здійснювати під кутами $\alpha < 45^\circ$ або $\alpha > 45^\circ$. При цьому зміна кута α не приве-

веде до зміни об'єму зрізу окремим зерном $\mathcal{Q}_{\text{зріз}}$, тому що кут α не входить у залежність (3.17). Виражаючи залежність (3.17) відносно маси абразивного зерна m і підставляючи отриманий вираз у залежність (3.18), маємо:

$$R_{\text{max}} = \sqrt{\frac{\mathcal{Q}_{\text{зріз}} \cdot \sin 2\alpha}{v}}. \quad (3.19)$$

Таким чином, встановлено зв'язок між параметрами R_{max} й $\mathcal{Q}_{\text{зріз}}$. Як видно, більшому значенню $\mathcal{Q}_{\text{зріз}}$ відповідає більше значення R_{max} . Тому єдиним шляхом зменшення параметра R_{max} (без зменшення об'єму матеріалу $\mathcal{Q}_{\text{зріз}}$, що знімається одним зерном, і відповідно продуктивності обробки) є виконання умов: $\alpha \rightarrow 0$ і $\alpha \rightarrow 90^\circ$.

Випадок 3. Слід провести аналіз залежностей (3.17) і (3.18) з урахуванням залежності (2.11) для визначення енергоємності обробки σ :

$$g_{\text{різ}} = \frac{m \cdot V_0^2 \cdot [1 - \sin(\alpha + \psi_1)]}{4 \cdot \tau_{\text{зсув}} \cdot \cos \psi_1 \cdot \cos \alpha}, \quad (3.20)$$

$$R_{\text{max}} = V_0 \cdot \sqrt{\frac{m \cdot \sin \alpha \cdot [1 - \sin(\alpha + \psi_1)]}{2 \cdot \tau_{\text{зсув}} \cdot B \cdot \cos \psi_1}} = V_0 \cdot \sqrt{\frac{m}{2 \cdot \tau_{\text{зсув}} \cdot B}} \cdot \bar{R}_{\text{max}}, \quad (3.21)$$

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

У табл. 3.1 наведено розраховані на основі залежності (2.11) значення σ у процесі обробки латуні (межа міцності на стискання – $\sigma_{\text{ст}} \approx 2 \cdot \tau_{\text{зсув}} = 360 \cdot 10^{-6} \text{ Н/м}^2$), а в табл. 3.2 і на рис. 3.7а – розраховано значення величини $\frac{1}{\sigma} = g_{\text{різ}} \cdot \frac{2}{m \cdot V_0^2}$ ($\text{м}^2/\text{Н}$) для умови $\frac{2}{m \cdot V_0^2} = \text{const}$. Величина $1/\sigma$ визначає об'єм матеріалу $g_{\text{різ}}$, що знімається одним різальним зерном.

Таблиця 3.1

Розрахункові значення енергоємності обробки $\sigma \cdot 10^{-9}$ (у Н/м^2)

ψ_1°	α°							
	-90	-60	-30	0	20	30	45	60
30	0	0,105	0,27	0,62	1,25	2	6,48	∞
45	0	0,1	0,3	0,85	2,57	6,46	∞	
60	0	0,09	0,31	1,34	11,13	∞		
70	0	0,076	0,3	1,95	∞			
90	0	0	0	∞				

Як видно, зі збільшенням кута α величина $1/\sigma$, а відповідно й $g_{\text{різ}}$ постійно зменшуються, набуваючи нульових значень при $\alpha = 90^\circ - \psi_1$.

Отже, з погляду підвищення продуктивності ефективно обробку здійснювати з негативними або невеликими додатними значеннями кута α . Це, по суті, відповідає рішенням, наведеним у розділі 2 (див. табл. 2.12, див. рис. 2.28), тому що ефект обробки обумовлений характером зміни енергоємності обробки σ .

Таблиця 3.2

Розрахункові значення величини $10^9 / \sigma$ (у $\text{м}^2/\text{Н}$)

ψ_1°	α°							
	-90	-60	-30	0	20	30	45	60
30	∞	9,52	3,7	1,61	0,65	0,5	0,15	0
45	∞	10	3,33	1,18	0,39	0,15	0	
60	∞	11	3,22	0,75	0,09	0		
70	∞	13,16	3,33	0,51	0			
90	∞	∞	∞	0				

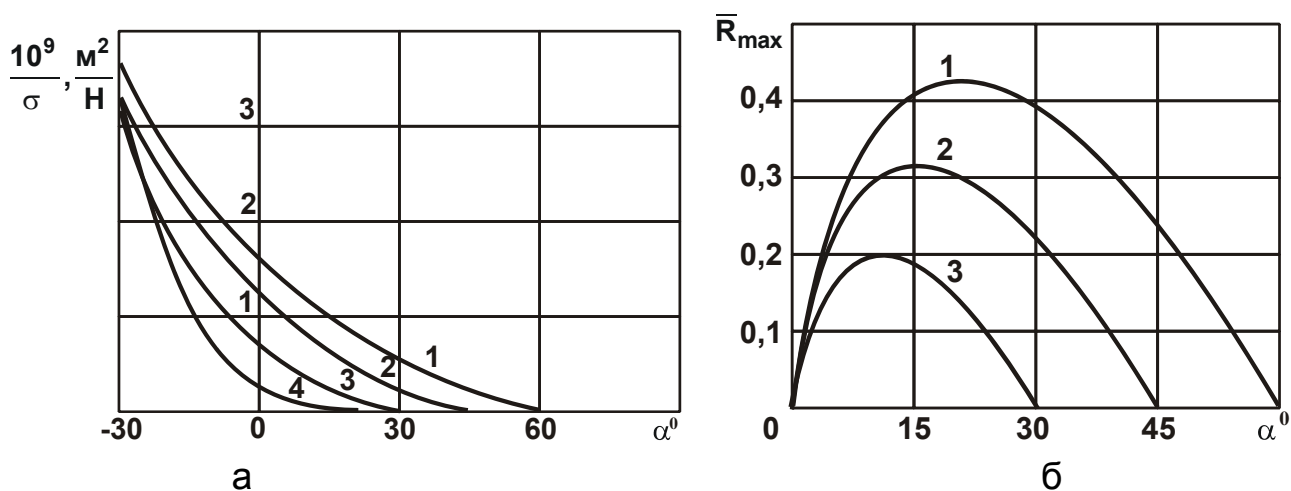


Рис. 3.7. Залежність величини $1/\sigma$ (а) і безрозмірного параметра шорсткості поверхні \bar{R}_{\max} (б) від кута α

Умовні позначення: 1 – при $\psi_1 = 30^\circ$; 2 – при $\psi_1 = 45^\circ$; 3 – при $\psi_1 = 60^\circ$; 4 – при $\psi_1 = 70^\circ$.

Безрозмірний параметр шорсткості поверхні \bar{R}_{\max} , розрахований на основі залежності (3.21), неоднозначно залежить від кута α (табл. 3.3, рис. 3.7б). Спочатку він збільшується, потім зменшується, проходячи точку максимуму. Очевидно, зменшити \bar{R}_{\max} можна двома шляхами: реа-

лізацією лівої й правої гілок залежності $\bar{R}_{\max} - \alpha$. Однак реалізація правої гілки залежності передбачає зменшення $\varrho_{\text{зріз}}$ (рис. 3.7а) і відповідно продуктивності обробки, що неефективно. Тому основним шляхом зменшення \bar{R}_{\max} слід вважати реалізацію лівої гілки залежності $\bar{R}_{\max} - \alpha$, тобто виконання умови $\alpha \rightarrow 0$, тому що при цьому забезпечується найбільш інтенсивне знімання матеріалу.

Таким чином показано, що ефективність процесу абразивної обробки деталей затопленими струменями з погляду забезпечення шорсткості обробленої поверхні й продуктивності обробки визначається умовами зменшення енергоємності обробки σ , пов'язаними зі зменшенням кута $\alpha \rightarrow 0$.

Таблиця 3.3

Розрахункові значення безрозмірного параметра шорсткості поверхні \bar{R}_{\max}

ψ_1°	α°							
	0	10	15	20	25	30	45	60
30	0	0,38	0,41	0,43	0,42	0,393	0,235	0
45	0	0,3	0,31	0,3	0,268	0,22	0	
60	0	0,2	0,19	0,144	0,08	0		

Необхідно зауважити, що отриманий розв'язок справедливий для прямолінійної траєкторії руху абразивного зерна в оброблюваному матеріалі за умови повної втрати його кінетичної енергії й зупинки в оброблюваному матеріалі (див. рис. 3.3). У цьому випадку даний розв'язок є спрощеним, тому що враховує дію на абразивне зерно, що рухається, лише тангенціальної складової сили різання P_z , тоді як у процесі обробки виникає й радіальна складова сили різання P_y , яка "виштовхує" абразивне зерно з оброблюваного матеріалу й таким чином змінює траєкторію його руху: траєкторія стає криволінійною. Очевидно, це приведе до зміни закономірностей формування параметра шорсткості поверхні R_{\max} . Тому слід розглянути уточнену математичну модель визначення шорсткості поверхні.

3.2. Уточнена математична модель визначення шорсткості поверхні в процесі абразивної обробки деталей затопленими струменями

3.2.1. Визначення траєкторії руху абразивного зерна з нульовим кутом його входження в оброблюваний матеріал

Необхідно встановити характер руху абразивного зерна масою m під дією сили різання P , яка виникає в процесі обробки, можна розкласти на дві складові: тангенціальну P_z й радіальну P_y . Відмінність даного розрахунку від наведеного в п. 3.1 буде полягати в урахуванні радіальної P_y складової сили різання, яка "виштовхує" зерно з оброблюваного матеріалу. Якщо вважати, що зерно рухається з початковою швидкістю V_0 в

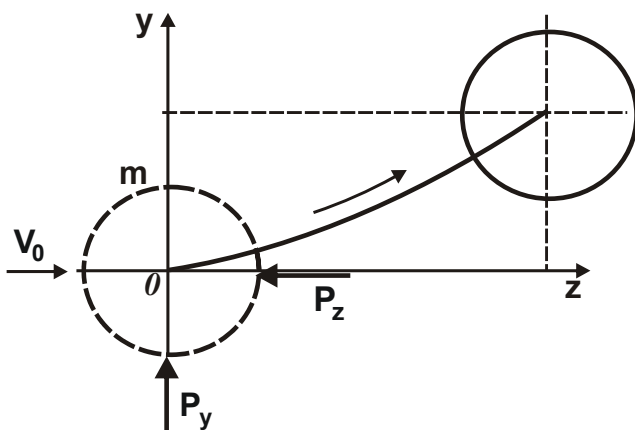


Рис. 3.8. Розрахункова схема траєкторії руху зерна в оброблюваному матеріалі

напрямку осі oz , тобто під кутом $\alpha = 0$ (рис. 3.8), тоді рівняння руху зерна в часі τ в напрямках осей oz і oy під дією тангенціальної P_z й радіальної P_y складових сили різання матимуть вигляд [16]:

$$\begin{cases} m \cdot \ddot{z}(\tau) = -P_z; \\ m \cdot \ddot{y}(\tau) = P_y, \end{cases} \quad (3.22)$$

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

Розв'язання диференціальних рівнянь (3.22) загальною формою:

$$\begin{cases} z(\tau) = -\frac{P_z}{m} \cdot \frac{\tau^2}{2} + C_1 \cdot \tau + C_2; \\ y(\tau) = \frac{P_y}{m} \cdot \frac{\tau^2}{2} + C_3 \cdot \tau + C_4, \end{cases} \quad (3.23)$$

де C_1, C_2, C_3, C_4 – постійні, що визначаються з початкових умов:

$$\begin{cases} z(\tau = 0) = 0; \\ \dot{z}(\tau = 0) = V_0; \end{cases} \quad (3.24)$$

$$\begin{cases} y(\tau = 0) = 0; \\ \dot{y}(\tau = 0) = 0. \end{cases} \quad (3.25)$$

Необхідно підпорядкувати розв'язок (3.23) початковим умовам (3.24) і (3.25):

$$\begin{cases} z(\tau) = -\frac{P_z}{m} \cdot \frac{\tau^2}{2} + V_0 \cdot \tau; \\ y(\tau) = \frac{P_y}{m} \cdot \frac{\tau^2}{2}. \end{cases} \quad (3.26)$$

Як видно, у напрямку осі ou із часом обробки τ абразивне зерно рухається рівноприскоренно із прискоренням P_y/m , а в напрямку осі oz – рівноуповільнено із прискоренням $-P_z/m$. У разі виконання умови $\dot{z}(\tau) = 0$ абразивне зерно зупиниться. Час обробки τ_k і довжина шляху зерна в оброблюваному матеріалі z_k до моменту його зупинки визначаються залежностями:

$$\tau_k = \frac{m \cdot V_0}{P_z}; \quad (3.27)$$

$$z_k = \frac{m \cdot V_0^2}{2 \cdot P_z}. \quad (3.28)$$

Час τ_k і довжина шляху зерна в оброблюваному матеріалі z_k тим більші, чим більше початкова швидкість зерна V_0 й менше прискорення його рівноуповільненого руху P_z/m .

Довжина шляху зерна в оброблюваному матеріалі y_k до моменту його зупинки визначається підстановкою залежності (3.27) у друге рівняння системи (3.26):

$$y_k = \frac{m \cdot V_0^2}{2 \cdot P_z} \cdot \frac{1}{K_{\text{ш}}} = \frac{z_k}{K_{\text{ш}}}, \quad (3.29)$$

де $K_{\text{ш}} = P_z / P_y$.

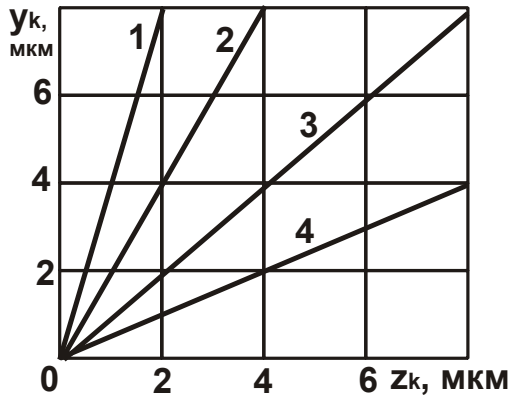


Рис. 3.9. Зв'язок між координатами y_k й z_k зерна, що рухається

Умовні позначення: 1; 2; 3; 4 – при $K_{\text{ш}} = 0,25; 0,5; 1,0; 2,0$.

На рис. 3.9 графічно показано функціональний зв'язок між координатами y_k й z_k абразивного зерна, що рухається. За умови $K_{\text{ш}} < 1$ координата y_k абразивного зерна буде більшою від координати z_k , а при $K_{\text{ш}} > 1$ навпаки. Отже, збільшуючи коефіцієнт $K_{\text{ш}}$, можна збільшити координату z_k , тобто збільшити довжину зрізу окремим зерном і відповідно підвищити ефективність процесу різання. Однак, як відомо, в процесі абразивної обробки у зв'язку з від'ємним переднім кутом різального зерна коефіцієнт $K_{\text{ш}} < 1$.

Тому координата y_k зерна завжди буде більшою від координати z_k . Це свідчить про те, що шлях зерна в напрямку осі oz і знімання матеріалу будуть незначними. Інакше кажучи, кінетичної енергії рухомого зерна буде явно недостатньо для здійснення продуктивного знімання припуску. Очевидно, з метою збільшення довжини шляху зерна в оброблюваному матеріалі необхідно обробку виконувати закріпленим зерном, яке рухається з постійною швидкістю різання, що реалізується на практиці у схемах шліфування, хонінгування й доведення зв'язаним абразивом. Із цього випливає, що струминно-абразивну обробку й зокрема запропонований метод абразивної обробки затопленими струменями доцільно використовувати в тих випадках, коли можна реалізувати невеликі за довжиною зрізи: під час обробки кромки заготовок, для усунення задирок і зменшення мікронерівностей на оброблюваних поверхнях. Це відповідає теоретичному розв'язку, отриманому у розділі 2 роботи на основі аналізу енергоємності обробки. Розв'язуючи друге рівняння системи (3.26) відносно часу τ й підставляючи отриманий вираз у перше рівняння, можна установити зв'язок між координатами z і y зерна під час різання:

$$z = V_0 \cdot \sqrt{\frac{2m \cdot y}{P_y}} - K_{\text{ш}} \cdot y. \quad (3.30)$$

Отримане рівняння (3.30) визначає траєкторію руху абразивного зерна в оброблюваному матеріалі. Слід провести його детальний аналіз, для чого потрібно визначити відношення m/P_y , яке відповідає умові (3.29), тобто моменту зупинки зерна, що рухається в оброблюваному матеріалі.

Виражаючи залежність (3.29) відносно координати z_k й підставляючи отриманий вираз у залежність (3.30), одержимо:

$$2 \cdot K_{\text{ш}} \cdot y_k = V_0 \cdot \sqrt{\frac{2m \cdot y_k}{P_y}}, \quad (3.31)$$

звідки:

$$\frac{m}{P_y} = \frac{2 \cdot K_{\text{ш}}^2}{V_0^2} \cdot y_k. \quad (3.32)$$

Підставимо залежність (3.32) в (3.30):

$$z = K_{\text{ш}} \cdot (2 \cdot \sqrt{y_k \cdot y} - y). \quad (3.33)$$

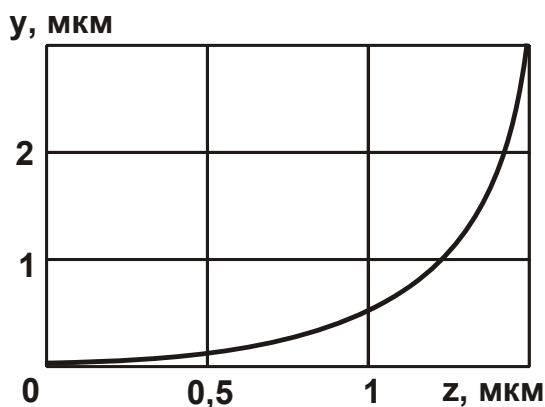


Рис. 3.10. Функціональний зв'язок між координатами y і z абразивного зерна, що рухається

У залежності (3.33) координата y_k повинна набути конкретного значення, наприклад, рівного товщині зрізу a . Тоді (3.33) матиме вигляд:

$$z = K_{\text{ш}} \cdot (2 \cdot \sqrt{a \cdot y} - y). \quad (3.34)$$

На рис. 3.10 і в табл. 3.4 наведено розраховані на основі залежності (3.34) значення координати z для ви-

хідних даних: $K_{\text{ш}} = 0,5$; $a = 3$ мкм. Як видно, траєкторія руху абразивного зерна в оброблюваному матеріалі криволінійна, спостерігається інтенсивне збільшення координати y в міру просування зерна вглиб оброблюваного матеріалу. У момент виходу зерна з контакту з оброблюваним матеріалом ($y = a = 3$ мкм) справджується умова $y > z$, яка відповідає залежності (3.29), тобто розрахунки виконані правильно.

Таблиця 3.4

Розрахункові значення координати z

y , мкм	0	0,25	0,5	1	2	3
z , мкм	0	0,74	0,975	1,232	1,45	1,5

Наведене розв'язання дає загальне уявлення про характер руху абразивного зерна масою m у процесі його взаємодії з оброблюваним матеріалом під дією постійних у часі складових сили різання P_z й P_y , тобто дане розв'язання визначає траєкторію руху абразивного зерна. Насправді складові сили різання залежать від фактичної товщини зрізу й y зв'язку з переміщенням абразивного зерна уздовж осі ou будуть змінюватися. Це внесе певні зміни в наведене вище рішення. Тому слід уточнити його, розглядаючи складові сили різання P_z й P_y у вигляді:

$$\begin{cases} P_z = v \cdot (a - y) \cdot \sigma; \\ P_y = \frac{v \cdot (a - y) \cdot \sigma}{K_{\text{ш}}}. \end{cases} \quad (3.35)$$

У першому наближенні можна вважати, що σ – постійна величина. Тоді рівняння руху абразивного зерна в напрямку осі ou матиме вигляд:

$$m \cdot \ddot{y} = \frac{v \cdot (a - y) \cdot \sigma}{K_{\text{ш}}} \quad (3.36)$$

або з урахуванням $k^2 = \frac{v \cdot \sigma}{m \cdot K_{\text{ш}}}$:

$$\ddot{y} + k^2 \cdot y = \frac{v \cdot a \cdot \sigma}{m \cdot K_{\text{ш}}} . \quad (3.37)$$

Окреме розв'язання диференціального рівняння (3.37):

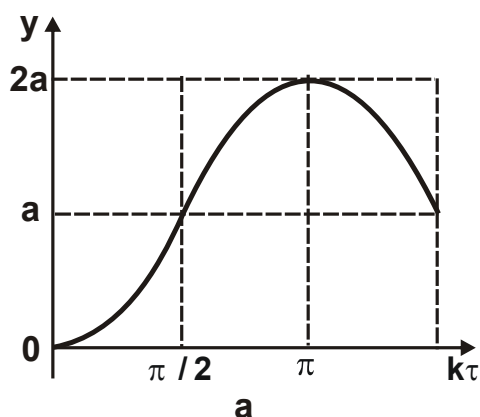
$$y = A , \quad (3.38)$$

де $A = a$.

Загальне розв'язання диференціального рівняння (3.37):

$$y = C_1 \cdot \text{sink} \tau + C_2 \cdot \text{cosk} \tau + a , \quad (3.39)$$

де C_1, C_2 – постійні інтегрування, які визначаються з початкових умов:



$$\begin{cases} y(\tau = 0) = 0; \\ \dot{y}(\tau = 0) = 0. \end{cases} \quad (3.40)$$

Підпорядковуючи отримане розв'язання (3.39) початковим умовам, маємо [92]:

$$y = a \cdot (1 - \text{cosk} \tau) . \quad (3.41)$$

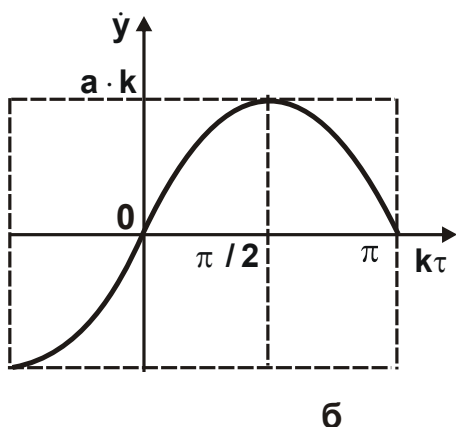


Рис. 3.11. Характер зміни координати y (а) і швидкості \dot{y} (б) абразивного зерна із часом обробки τ

Графічно залежність (3.41) показана на рис. 3.11а. Як видно, із часом τ координата y абразивного зерна змінюється за гармонійним законом, збільшуючись у діапазоні $k\tau = 0 \dots \pi$ від 0 до $2a$. Очевидно, у реальних умовах координата y не може перевищувати товщини зрізу, тобто в розрахунках необхідно приймати умову $y = a$. Тому розв'язком диференціального рівняння (3.37) є діапазон зміни величини $k\tau = 0 \dots \pi/2$. За умови $k\tau_k = \pi/2$ абразивне зерно виходить із

контакту з оброблюваним матеріалом. Тоді час τ_k руху зерна в оброблюваному матеріалі визначиться залежністю:

$$\tau_k = \frac{\pi}{2k} = \frac{\pi}{2} \cdot \sqrt{\frac{m \cdot K_{\text{ш}}}{v \cdot \sigma}}. \quad (3.42)$$

Час τ_k тим більший, чим більші маса абразивного зерна m , коефіцієнт $K_{\text{ш}} = P_z / P_y$ і менша ширина зрізу v й енергоємність обробки σ . При цьому початкова швидкість абразивного зерна V_0 не впливає на час τ_k . Характер зміни швидкості переміщення абразивного зерна $\dot{y}(\tau)$ в оброблюваному матеріалі в напрямку осі ou , виходячи із залежності (3.41), підпорядковується синусоїдальному закону:

$$\dot{y}(\tau) = a \cdot k \cdot \sin k\tau. \quad (3.43)$$

Графічно характер зміни швидкості $\dot{y}(\tau)$ в часі показаний на рис. 3.11б. У разі зміни кута $k\tau$ в межах $0 \dots \pi/2$ швидкість $\dot{y}(\tau)$ зростає. Отже, при контакті абразивного зерна з оброблюваним матеріалом швидкість $\dot{y}(\tau)$ змінюється в межах від 0 до максимального значення $a \cdot k$, що обумовлено дією сили P_y , яка "виштовхує" зерно з оброблюваного матеріалу. Знаючи характер зміни координати y в часі, можна за залежністю (3.35) визначити складові сили різання P_z і P_y :

$$\begin{cases} P_z = v \cdot a \cdot \sigma \cdot \cos k\tau; \\ P_y = \frac{v \cdot a \cdot \sigma \cdot \cos k\tau}{K_{\text{ш}}}. \end{cases} \quad (3.44)$$

Складові сили різання P_z й P_y змінюються за законом тригонометричної функції косинуса, тобто в початковий момент часу вони набувають максимальних значень, а потім зменшуються аж до нуля (за умови $k\tau = \pi/2$) у момент виходу абразивного зерна з контакту з оброблюваним матеріалом. З огляду на змінний характер складових сили різання в часі, слід уточнити отриманий розв'язок (3.21) для умови $P_z = \text{const}$. Ди-

диференціальне рівняння руху абразивного зерна в напрямку осі oz з урахуванням залежності (3.44) матиме вигляд:

$$m \cdot \ddot{z} = -a \cdot v \cdot \sigma \cdot \cos k\tau. \quad (3.45)$$

Окремий розв'язок диференціального рівняння (3.45) матиме вигляд:

$$z = A_1 \cdot \cos k\tau, \quad (3.46)$$

де A_1 – невизначена величина.

Підставляючи залежність (3.46) у рівняння (3.45), маємо:

$$A_1 = a \cdot K_{\text{ш}}. \quad (3.47)$$

Загальний розв'язок диференціального рівняння (3.45) матиме вигляд:

$$z = C_1 \cdot \tau + C_2 + A_1 \cdot \cos k\tau, \quad (3.48)$$

де C_1, C_2 – постійні інтегрування, які визначаються з початкових умов:

$$\begin{cases} z(\tau = 0) = 0; \\ \dot{z}(\tau = 0) = V_0. \end{cases} \quad (3.49)$$

Підпорядкуємо розв'язок (3.48) умовам (3.49): $C_1 = V_0$; $C_2 = -a \cdot K_{\text{ш}}$.

Тоді:

$$z = V_0 \cdot \tau - a \cdot K_{\text{ш}} \cdot (1 - \cos k\tau); \quad (3.50)$$

$$\dot{z} = V_0 - a \cdot K_{\text{ш}} \cdot k \cdot \sin k\tau. \quad (3.51)$$

Як видно, із часом τ швидкість руху абразивного зерна $\dot{z}(\tau)$ в напрямку осі oz у діапазоні $0 < k\tau < \pi/2$ зменшується (рис. 3.12). Цим показано, що із часом τ швидкість руху абразивного зерна $\dot{y}(\tau)$ збільшується,

а швидкість $\dot{z}(\tau)$, навпаки, зменшується аж до нуля. У результаті абразивне зерно під дією сили P_y прагне вийти з контакту з оброблюваним матеріалом. За умови $\dot{z}(\tau) = 0$ абразивне зерно зупиниться. Виходячи з даної умови з урахуванням залежності (3.51), можна визначити час контакту абразивного зерна з матеріалом:

$$\sin k\tau_k = \frac{V_0}{a \cdot K_{\text{ш}} \cdot k} = \frac{V_0}{a} \cdot \sqrt{\frac{m}{b \cdot \sigma \cdot K_{\text{ш}}}}; \quad (3.52)$$

$$k\tau_k = \arcsin \frac{V_0}{a} \cdot \sqrt{\frac{m}{b \cdot \sigma \cdot K_{\text{ш}}}}. \quad (3.53)$$

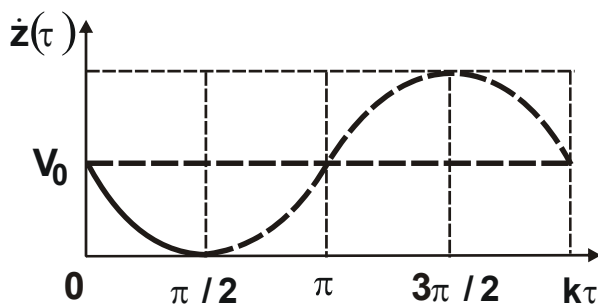


Рис. 3.12. Характер зміни швидкості $\dot{z}(\tau)$ руху зерна із часом обробки τ

Із залежності (3.53) випливає, що чим більші V_0 , m і менші $K_{\text{ш}}$, a , b , σ тим більше $k\tau_k$ (тобто час контакту абразивного зерна з оброблюваним матеріалом) і відповідно вища ефективність процесу обробки. За умови $k\tau < \pi/2$, виходячи з рис. 3.12, зерно зупиниться в оброблюваному матеріалі.

За умови $k\tau > \pi/2$, навпаки, кінетичної енергії абразивного зерна буде достатньо, щоб вийти з контакту з оброблюваним матеріалом без зупинки й здійснити повний зріз оброблюваного матеріалу.

Виконаємо чисельні розрахунки координати $z = z_k$ відповідно до залежності (3.50) для другого випадку, тобто коли кінетичної енергії абразивного зерна достатньо, щоб вийти з контакту з оброблюваним матеріалом без зупинки й здійснити повний зріз оброблюваного матеріалу. За фізичною сутністю величина z_k дорівнює довжині зрізу.

У залежність (3.50) входить невідома величина – час $\tau = \tau_k$, який можна визначити за залежністю (3.42), отриманою за умови $y = a$. Тому $\cos k\tau_k = 0$ і залежність (3.50) набуде спрощеного вигляду:

$$z_k = V_0 \cdot \tau_k - a \cdot K_{\text{ш}}. \quad (3.54)$$

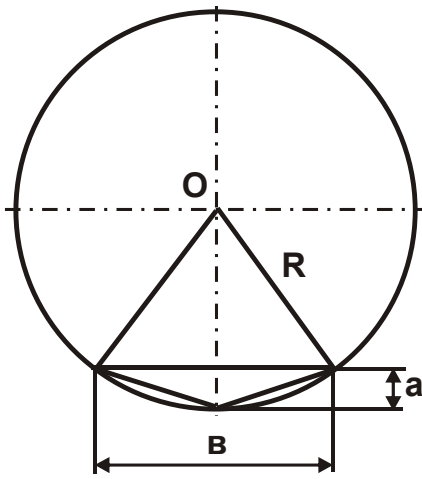


Рис. 3.13. Схема

**розрахунку параметрів
зрізу зерном**

Слід розглянути наступні вихідні дані: $V_0 = 30$ м/с; $a = 3$ мкм; $\sigma = 10^4$ Н/мм²; $K_{ш} = 0,5$. Маса абразивного зерна $m = \rho \cdot v$, 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). Вважатимемо, що $D = 50$ мкм. Ширину зрізу, утвореного зерном у формі сфери радіусом R (рис. 3.13), слід визначити:

$$b = 2 \cdot \sqrt{R^2 - (R - a)^2} \approx 2 \cdot \sqrt{D \cdot a}. \quad (3.55)$$

У результаті виконаних розрахунків встановлено: $b = 24,5$ мкм; $v = 65,4 \cdot 10^3$ мкм³; $m = 229 \cdot 10^{-9}$ г; $\tau = 3,41 \cdot 10^{-8}$ с. Після підстановки цих значень у залежність (3.54) отримано від'ємне значення z_k . Це свідчить про те, що кінетичної енергії рухомого абразивного зерна недостатньо для його впровадження в оброблюваний матеріал і утворення зрізу, тобто процес мікрорізання в цьому випадку буде відсутній. Щоб збільшити

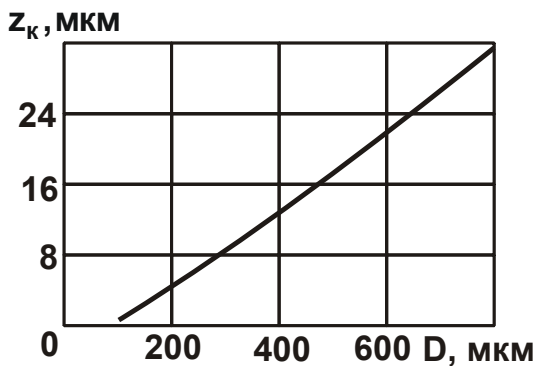


Рис. 3.14. Залежність z_k
від діаметра зерна D

кінетичну енергію рухомого абразивного зерна, слід прийняти $D = 100$ мкм. У цьому випадку час обробки τ_k збільшується до значення $3,41 \cdot 10^{-8}$ с, а координата z_k , яка розрахована за залежністю (3.54), набуває додатного значення, що дорівнює $0,94$ мкм, тобто має місце процес мікрорізання. Розрахунками встановлено (рис. 3.14, табл. 3.5), що зі збільшенням діаметра абразивного зер-

на D координата z_k постійно збільшується, а це спричиняє до збільшення довжини зрізу й інтенсифікації процесу обробки. Наведене рішення справджується для нульового кута входу зерна в оброблюваний матеріал (див. рис. 3.8) і визначає, по суті, характер утворення зрізу в процесі обробки кромки заготовки.

З рис. 3.14 і табл. 3.5 випливає, що при $D = 100$ мкм абразивне зерно фактично не здійснює знімання матеріалу. Інтенсивне знімання мате-

ріалу починається при $D > 400$ мкм. Отже, для ефективного здійснення процесу струминно-абразивної обробки й зокрема запропонованого методу абразивної обробки деталей затопленими струменями необхідно використовувати великозернистий абразив, який забезпечує достатню для знімання матеріалу кінетичну енергію абразивного зерна.

Таблиця 3.5

Розрахункові значення величини z_k

D, мкм	50	100	200	400	800
z_k , мкм	–	0,94	4,3	12,32	31,42

Слід визначити траєкторію руху абразивного зерна в оброблюваному матеріалі на основі залежностей (3.41) і (3.50). Для зручності аналізу ці залежності слід подати в безрозмірних величинах, для чого встановлюється значення параметрів k і τ_k з умови зупинки зерна в оброблюваному матеріалі при $y = a$.

Підпорядковуючи залежність (3.41) умові $y = a$, маємо: $\cos k\tau_k = 0$ або $k\tau_k = \pi/2$, звідки:

$$k = \frac{\pi}{2\tau_k}. \quad (3.56)$$

Підпорядковуючи залежність (3.52) отриманій умові $k\tau_k = \pi/2$, маємо:

$$k = \frac{V_0}{a \cdot K_{\text{ш}}}. \quad (3.57)$$

Для вихідних даних: $V_0 = 1$ м/с; $a = 3$ мкм; $K_{\text{ш}} = 0,5$, відповідно до залежності (3.57), параметр $k = 0,67 \cdot 10^6$ с⁻¹. Тоді, виходячи із залежності (3.56), час контакту абразивного зерна з оброблюваним матеріалом $\tau_k = 2,355 \cdot 10^{-6}$ с. Після підстановки розрахункового значення k в залежності (3.41) і (3.50) для заданих вихідних даних маємо:

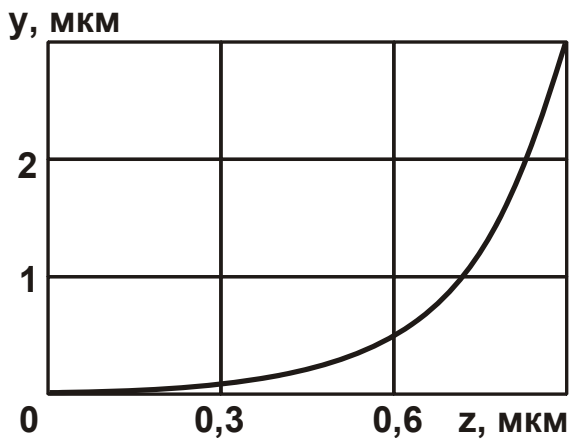


Рис. 3.15. Функціональний зв'язок між координатами y і z зерна, що рухається в оброблюваному матеріалі

$$\begin{cases} y = 3 \cdot [1 - \cos(0,67 \cdot 10^6 \cdot \tau)] \\ z = 10^6 \cdot \tau - 0,5 \cdot y. \end{cases} \quad (3.58)$$

В отриманих розрахункових залежностях час τ може змінюватися в межах: $0 < \tau \leq \tau_k$. У табл. 3.6 наведено розраховані за залежностями (3.57) значення координат y і z рухомого зерна із часом τ , а на рис. 3.15 наведено траєкторію руху зерна в оброблюваному матеріалі. З рис. 3.15 видно, що спочатку траєкторія руху зерна в

оброблюваному матеріалі несуттєво відрізняється від прямолінійної, а потім вона стає криволінійною, у результаті чого зерно виходить із контакту з оброблюваним матеріалом за невеликих значень z .

Таблиця 3.6

Розрахункові значення координат y і z зерна в оброблюваному матеріалі

$\tau \cdot 10^{-6}, \text{с}$	0	0,5	1	2	2,355
$y, \text{мкм}$	0	0,18	0,69	2,33	3
$z, \text{мкм}$	0	0,41	0,66	0,835	0,855

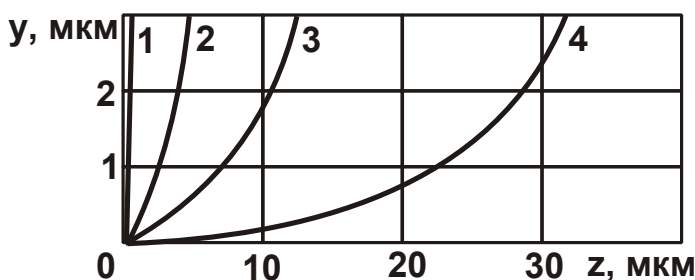


Рис. 3.16. Траєкторії руху абразивного зерна в оброблюваному матеріалі

Умовні позначення: 1; 2; 3; 4 – при $D = 100; 200; 400; 800$ мкм.

Необхідно зауважити, що траєкторії руху абразивного зерна, графічно показані на рис. 3.10 і рис. 3.15, принципово не відрізняються й мають криволінійний вигляд. Разом із тим урахування зміни товщини зрізу й сили різання в процесі обробки відповідно до залежностей (3.35) дозволило виконати уточнений розрахунок

траєкторії руху абразивного зерна в оброблюваному матеріалі. На рис. 3.16 наведено траєкторії руху абразивного зерна в оброблюваному матеріалі для різних значень зернистості абразиву. Як видно, коли діаметр абразивного зерна $D = 100$ мкм, фактично відсутній зріз матеріалу, тому що зерно відразу в початковий момент обробки виходить із контакту з оброблюваним матеріалом.

3.2.2. Розрахунок складових сили різання з урахуванням нелінійного зв'язку товщини й ширини одиничного зрізу

Необхідно зауважити, що наведений розрахунок є спрощеним, тому що в ньому в ході одержання залежностей (3.35) для визначення складових сили різання P_z й P_y товщина й ширина зрізу розглядалися не взаємозалежними. Насправді, виходячи із залежності (3.54), ці параметри пов'язані нелінійною залежністю. Тоді площа зрізу дорівнює $S = 0,5 \cdot a \cdot v = a \cdot \sqrt{D \cdot a}$.

З урахуванням переміщення абразивного зерна в напрямку осі ou площа зрізу матиме вигляд:

$$S = D^{0,5} \cdot (a - y)^{1,5}. \quad (3.59)$$

Відповідно, складові сили різання P_z й P_y , які визначаються залежностями (3.35), матимуть вигляд:

$$\begin{cases} P_z = (a - y)^{1,5} \cdot D^{0,5} \cdot \sigma; \\ P_y = \frac{(a - y)^{1,5} \cdot D^{0,5} \cdot \sigma}{K_{\text{ш}}}. \end{cases} \quad (3.60)$$

Диференціальне рівняння руху абразивного зерна в напрямку осі ou можна виразити наступним чином:

$$m \cdot \ddot{y} = \frac{(a - y)^{1,5} \cdot D^{0,5} \cdot \sigma}{K_{\text{ш}}}. \quad (3.61)$$

У результаті отримано нелінійне диференціальне рівняння другого порядку. Щоб його розв'язати, слід виконати підстановку $y_1 = a - y$, де y_1 – нова змінна. Тоді рівняння (3.61) матиме вигляд:

$$\ddot{y}_1 + k_1^2 \cdot y_1^{1,5} = 0, \quad (3.62)$$

де $k_1^2 = \frac{D^{0,5} \cdot \sigma}{m \cdot K_{ш}}$.

У роботі [55] наведено розв'язання даного класу нелінійних диференціальних рівнянь, що мають вигляд:

$$\ddot{y}_1 + k_1^2 \cdot y_1^n = 0, \quad (3.63)$$

де n – змінна величина.

Для розв'язання рівняння (3.63) вводиться нова змінна $p = \frac{dy_1}{d\tau}$, тоді

$\frac{d^2 y_1}{d\tau^2} = p \cdot \frac{dp}{dy_1}$. Диференціальне рівняння (3.63) запишеться:

$$\frac{1}{k_1^2} \cdot p \cdot dp = -y_1^n \cdot dy_1. \quad (3.64)$$

Після інтегрування маємо

$$\frac{1}{k_1^2} \cdot \frac{p^2}{2} = -\frac{1}{1+n} \cdot y_1^{1+n} + C_1 \quad (3.65)$$

або з урахуванням $C_2^2 = 2 \cdot C_1$:

$$\frac{p}{k_1} = \sqrt{C_2^2 - \frac{2}{1+n} \cdot y_1^{1+n}}. \quad (3.66)$$

Вважаючи, що $p = \frac{dy_1}{d\tau}$, одержимо диференціальне рівняння:

$$\frac{1}{k_1} \cdot \frac{dy_1}{d\tau} = \sqrt{C_2^2 - \frac{2}{1+n} \cdot y_1^{1+n}}. \quad (3.67)$$

Після його інтегрування одержимо:

$$\sqrt{\frac{2 \cdot y_1^{1+n}}{(1+n) \cdot C_2^2}} = \sin(k_1\tau + C_3); \quad (3.68)$$

$$y_1 = \left[\frac{(1+n) \cdot C_2^2}{2} \right]^{\frac{1}{1+n}} \cdot \sin^{\frac{2}{1+n}}(k_1\tau + C_3). \quad (3.69)$$

де C_3 – постійна інтегрування, що визначається з початкової умови.

У даному випадку $n = 1,5$. Тоді маємо:

$$y_1 = \left[\frac{2,5 \cdot C_2^2}{2} \right]^{0,4} \cdot \sin^{0,8}(k_1\tau + C_3); \quad (3.70)$$

$$y = a - y_1 = a - \left[\frac{2,5 \cdot C_2^2}{2} \right]^{0,4} \cdot \sin^{0,8}(k_1\tau + C_3). \quad (3.71)$$

Постійні інтегрування C_2 й C_3 можна визначити з умов (3.40):

$$C_2^2 = \frac{a^{2,5}}{1,25}; \quad (3.72)$$

$$C_3 = \frac{\pi}{2}. \quad (3.73)$$

Остаточно залежність (3.71) виразиться:

$$y = a \cdot (1 - \cos^{0,8} k_1\tau). \quad (3.74)$$

У результаті отримано залежність, близьку до аналогічної залежності (3.41), отриманої без урахування взаємозв'язку параметрів a і v . Отже, нелінійність диференціального рівняння (3.62) не вносить принципових змін у характер переміщення оброблюваного зерна в оброблюваному матеріалі. Тому з достатньою для практики точністю можна користуватися спрощеним рішенням (3.41), на основі якого виконано розрахунки величини z (див. рис. 3.14).

3.2.3. Визначення траєкторії руху абразивного зерна і шорсткості поверхні з ненульовим кутом його входження в оброблюваний матеріал

Розглянемо випадок різання абразивним зерном, що рухається з початковою швидкістю V_0 й входить в оброблюваний матеріал під деяким кутом α . У процесі різання на зерно діють тангенціальна P_z й радіальна P_y складові сили різання. Визначимо траєкторію руху абразивного зерна в оброблюваному матеріалі. Складові сили різання P_z й P_y , описувані залежностями (3.35), з урахуванням $a = \operatorname{tg}\alpha \cdot z$ можна подати як:

$$\begin{cases} P_z = v \cdot (\operatorname{tg}\alpha \cdot z - y) \cdot \sigma; \\ P_y = \frac{v \cdot (\operatorname{tg}\alpha \cdot z - y) \cdot \sigma}{K_{\text{ш}}}. \end{cases} \quad (3.75)$$

У цьому випадку P_z й P_y залежать від двох координат: y і z . Рух абразивного зерна в оброблюваному матеріалі описується системою диференціальних рівнянь (3.22). Підставляючи залежності (3.75) в (3.22), маємо:

$$\begin{cases} m \cdot \ddot{z} + v \cdot \sigma \cdot \operatorname{tg}\alpha \cdot z = v \cdot \sigma \cdot y; \\ m \cdot \ddot{y} + \frac{v \cdot \sigma}{K_{\text{ш}}} \cdot y = \frac{v \cdot \sigma \cdot \operatorname{tg}\alpha}{K_{\text{ш}}} \cdot z. \end{cases} \quad (3.76)$$

У результаті одержано складні диференціальні рівняння, що містять по дві невідомі величини y і z . Для того щоб звести рівняння до од-

ного невідомого, слід помножити друге рівняння на коефіцієнт $K_{\text{ш}}$ і підсумувати перше й друге рівняння. У результаті одержимо:

$$\ddot{z} + K_{\text{ш}} \cdot \ddot{y} = 0. \quad (3.77)$$

Інтегруючи рівняння (3.77), маємо:

$$\begin{cases} \dot{z} + K_{\text{ш}} \cdot \dot{y} = C_1; \\ z + K_{\text{ш}} \cdot y = C_1 \cdot \tau + C_2, \end{cases} \quad (3.78)$$

де C_1, C_2 – постійні інтегрування, які визначаються з початкових умов:

$$\begin{cases} z(\tau = 0) = 0; \\ \dot{z}(\tau = 0) = V_0, \end{cases} \quad (3.79)$$

$$\begin{cases} y(\tau = 0) = 0; \\ \dot{y}(\tau = 0) = 0. \end{cases} \quad (3.80)$$

Підпорядковуючи рівняння (3.78) умовам (3.79) і (3.80), визначимо постійні інтегрування: $C_1 = V_0$ і $C_2 = 0$. Тоді рівняння (3.78) матимуть вигляд:

$$\begin{cases} \dot{z} + K_{\text{ш}} \cdot \dot{y} = V_0; \\ z + K_{\text{ш}} \cdot y = V_0 \cdot \tau. \end{cases} \quad (3.81)$$

Звідки $z = V_0 \cdot \tau - K_{\text{ш}} \cdot y$; $\ddot{z} = -K_{\text{ш}} \cdot \ddot{y}$. Підставляючи дані вирази в перше рівняння системи (3.76), одержимо:

$$m \cdot K_{\text{ш}} \cdot \ddot{y} + v \cdot \sigma \cdot \text{tg} \alpha \cdot (V_0 \cdot \tau - K_{\text{ш}} \cdot y) = v \cdot \sigma \cdot y \quad (3.82)$$

або

$$\ddot{y} + k^2 \cdot y = \frac{v \cdot \sigma \cdot \text{tg} \alpha \cdot V_0}{m \cdot K_{\text{ш}}} \cdot \tau, \quad (3.83)$$

де $k^2 = \frac{v \cdot \sigma \cdot (1 + \text{tg} \alpha \cdot K_{\text{ш}})}{m \cdot K_{\text{ш}}}$.

Окреме розв'язання диференціального рівняння (3.83):

$$y = A \cdot \tau. \quad (3.84)$$

Підставимо залежність (3.84) у диференціальне рівняння (3.83):

$$A = \frac{V_0 \cdot \operatorname{tg} \alpha}{(1 + \operatorname{tg} \alpha \cdot K_{\text{ш}})}. \quad (3.85)$$

Загальне розв'язання диференціального рівняння (3.83) відоме:

$$y = C_1 \cdot \operatorname{sink} \tau + C_2 \cdot \operatorname{cosk} \tau + A \cdot \tau, \quad (3.86)$$

де C_1 , C_2 – постійні інтегрування, які визначаються з наступних умов:

$$\begin{cases} y(\tau = 0) = 0; \\ \dot{y}(\tau = 0) = 0. \end{cases} \quad (3.87)$$

Відповідно, диференціюючи за часом величину y , маємо

$$\dot{y} = k \cdot (C_1 \cdot \operatorname{cosk} \tau - C_2 \cdot \operatorname{sink} \tau) + A. \quad (3.88)$$

Підпорядковуючи залежності (3.86) і (3.88) початковим умовам (3.87), визначимо постійні інтегрування $C_1 = -\frac{A}{k}$ й $C_2 = 0$.

Тоді:

$$y = A \cdot \left(\tau - \frac{1}{k} \cdot \operatorname{sink} \tau \right) = \frac{V_0 \cdot \operatorname{tg} \alpha}{(1 + \operatorname{tg} \alpha \cdot K_{\text{ш}})} \cdot \left(\tau - \frac{1}{k} \cdot \operatorname{sink} \tau \right); \quad (3.89)$$

$$\dot{y} = A \cdot (1 - \operatorname{cosk} \tau) = \frac{V_0 \cdot \operatorname{tg} \alpha}{(1 + \operatorname{tg} \alpha \cdot K_{\text{ш}})} \cdot (1 - \operatorname{cosk} \tau). \quad (3.90)$$

Характер зміни швидкості руху \dot{y} абразивного зерна показаний на рис. 3.17. Як видно, із часом обробки τ швидкість \dot{y} збільшується в діа-

пазоні $k\tau \leq \pi$. Характер зміни координати z можна визначити на основі залежності (3.81) з урахуванням залежності (3.89):

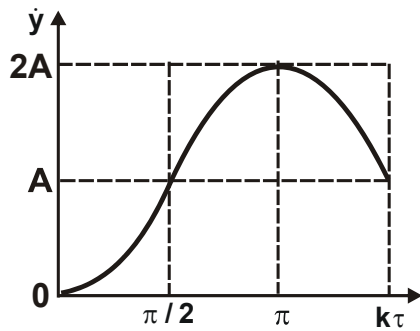


Рис. 3.17. Залежність швидкості руху \dot{y} зерна від кута $k\tau$

$$z = \frac{V_0}{(1 + \operatorname{tg} \alpha \cdot K_{\text{ш}})} \cdot \left(\tau - \frac{\operatorname{tg} \alpha \cdot K_{\text{ш}}}{k} \cdot \operatorname{sink} \tau \right). \quad (3.91)$$

Швидкість руху \dot{z} абразивного зерна в напрямку осі oz можна виразити як:

$$\dot{z} = \frac{V_0}{(1 + \operatorname{tg} \alpha \cdot K_{\text{ш}})} \cdot (1 + \operatorname{tg} \alpha \cdot K_{\text{ш}} \cdot \operatorname{cosk} \tau). \quad (3.92)$$

Визначимо глибину входження абразивного зерна в оброблюваний матеріал h , для чого скористаємося наступною залежністю, отриманою на основі розрахункової схеми, показаної на рис. 3.18:

$$h = h_1 \cdot \operatorname{cos} \alpha, \quad (3.93)$$

де $h_1 = z \cdot \operatorname{tg} \alpha - y$.

З урахуванням залежностей (3.89) і (3.91) остаточно залежність (3.93) виразиться:

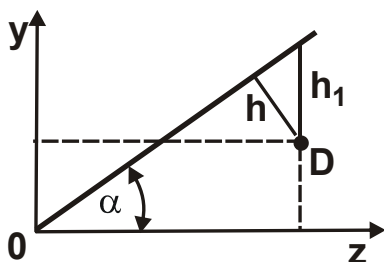


Рис. 3.18. Схема розрахунку глибини входження зерна в матеріал h

$$h = \frac{V_0 \cdot \operatorname{sin} \alpha}{k} \cdot \operatorname{sink} \tau. \quad (3.94)$$

У результаті отримано досить просту залежність, з якої впливає синусоїдальний закон зміни глибини h із часом τ контакту абразивного зерна з оброблюваним матеріалом (рис. 3.19). Дана залежність аналогічна до залежності (3.18). Їхня відмінність полягає лише

в параметрі k , який відповідно до залежності (3.83) включає коефіцієнт $K_{\text{ш}}$, що визначається залежністю [125]:

$$K_{\text{ш}} = \operatorname{ctg}(\psi + \gamma) = \operatorname{ctg} \psi_1. \quad (3.95)$$

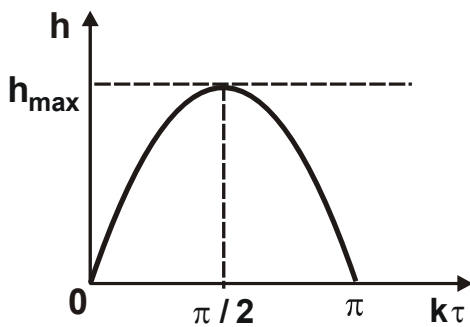


Рис. 3.19. Залежність глибини входження зерна в оброблюваний матеріал h від кута $k\tau$

Із залежності (3.95) випливає, що чим більші умовний кут тертя ψ абразивного зерна з оброблюваним матеріалом і від'ємний передній кут інструмента (зерна) γ , тим менший коефіцієнт $K_{\text{ш}}$. Отже, з погляду підвищення ефективності абразивної обробки коефіцієнт $K_{\text{ш}}$ необхідно збільшувати за рахунок зменшення кутів ψ і γ , тобто зменшення кута $\psi_1 = \psi + \gamma$.

Виражаючи параметр k із урахуванням залежності (3.95), маємо:

$$k = \sqrt{\frac{\sigma \cdot v \cdot (\operatorname{tg} \psi_1 + \operatorname{tg} \alpha)}{m}}$$

Як видно, параметр k , розрахований за даною залежністю, більший від параметра k , який визначається залежністю (3.10). Отже, виходячи із залежності (3.94), меншою буде глибина входження абразивного зерна в оброблюваний матеріал h . Із залежності (3.94) також випливає, що максимальне значення h (визначає параметр шорсткості поверхні R_{max}) досягається за умови $\sin k\tau = 1$ або $k\tau = \pi/2$, а найменше $h = 0$ – у момент виходу зерна з контакту з оброблюваним матеріалом (за умови $\sin k\tau = 0$ або $k\tau = \pi$). Тоді:

$$h_{\text{max}} = R_{\text{max}} = V_0 \cdot \sin \alpha \cdot \sqrt{\frac{m}{v \cdot \sigma \cdot (\operatorname{tg} \psi_1 + \operatorname{tg} \alpha)}} \quad (3.96)$$

Залежність (3.96) відрізняється від аналогічної залежності (3.18) лише наявністю в знаменнику додаткового доданка $\operatorname{tg} \psi_1$. Чим він більший, тим менший параметр шорсткості поверхні R_{max} . Отже, значення параметра шорсткості поверхні R_{max} , розраховані за залежністю (3.96), будуть завжди меншими від значень R_{max} , розрахованих за залежністю (3.18).

Підставляючи залежність (2.11) у залежність (3.96), маємо:

$$h_{\max} = R_{\max} = V_0 \cdot \sin \alpha \cdot \sqrt{\frac{m}{2 \cdot B \cdot \tau_{\text{зсув}}} \cdot \left[\frac{1}{\sin(\alpha + \psi_1)} - 1 \right]}. \quad (3.97)$$

Як видно, максимальна глибина входження абразивного зерна в оброблюваний матеріал h_{\max} (параметр шорсткості поверхні R_{\max}) тим більшої, чим більші початкова швидкість руху абразивного зерна V_0 , його маса m й менша ширина зрізу в й межа міцності на зсув оброблюваного матеріалу $\tau_{\text{зсув}}$. У розділі 2 роботи показано, що процес різання (стружкоутворення) здійснений за умови $\alpha + \psi_1 \leq 90^\circ$. Тому й залежність (3.97) справджується за даної умови. Із цього випливає, що екстремальний характер зміни глибини входження абразивного зерна в оброблюваний матеріал h можливий за невеликих значень кута входження зерна в оброблюваний матеріал α (приблизно рівних $10 \dots 30^\circ$). При цьому чим менший кут $\psi_1 = \psi + \gamma$, тим більшим може бути кут α .

У загальному випадку, відповідно до залежності (3.97), кут входження зерна в оброблюваний матеріал α неоднозначно впливає на глибину h_{\max} (параметр шорсткості поверхні R_{\max}). За рахунок збільшення $\sin \alpha$ глибина h_{\max} й відповідно параметр шорсткості поверхні R_{\max} буде збільшуватися, а в разі досягнення умови $\sin(\alpha + \psi_1) = 1$ справджується $h_{\max} = 0$, тобто має місце екстремум (максимум) глибини h_{\max} від кута α . Для його визначення підпорядкуємо функцію h_{\max} необхідній умові екстремуму: $(h_{\max})'_{\alpha} = 0$. У підсумку отримано тригонометричне рівняння:

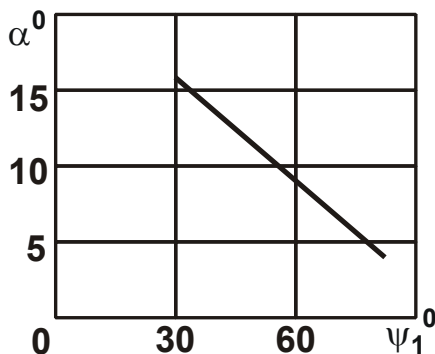


Рис. 3.20. Залежність кута α від кута ψ_1

$$1 - \sin(\alpha + \psi_1) = \frac{\text{tg } \alpha}{\text{tg}(\alpha + \psi_1)}. \quad (3.98)$$

На рис. 3.20 і в табл. 3.7 наведено розраховані на основі рівняння (3.98) екстремальні значення кута α . Як видно, зі збільшенням кута ψ_1 кут α зменшується, набуваючи досить малих значень, близьких до нуля.

Зважаючи на те, що кут $\psi_1 = \psi + \gamma$ у реальних умовах обробки наближа-

ється до 90° , то, очевидно, процес струминно-абразивної обробки ефективно вести з досить малим кутом $\alpha \rightarrow 0$. Це забезпечить найменшу шорсткість оброблюваної плоскої поверхні, а також якісну обробку торців заготовки, усуваючи задирки й округлюючи кромки. Отриманий розв'язок узгоджується з результатами теоретичних досліджень енергоємності обробки σ , отриманих без урахування динаміки взаємодії абразивного зерна з оброблюваним матеріалом і наведених у розділі 2 роботи.

Таблиця 3.7

Розрахункові значення кута α

ψ_1 , град.	30	60	70	80
α , град.	16	9	6	4

Становить інтерес аналіз координати екстремальної точки D (див. рис. 3.18), у якій реалізується максимальне значення глибини входження абразивного зерна в оброблюваний матеріал h_{\max} . Для цього в залежності (3.89) і (3.91) слід підставити значення $k\tau = \pi/2$. Тоді:

$$y = \frac{0,57 \cdot V_0 \cdot \operatorname{tg} \alpha}{k \cdot (1 + \operatorname{tg} \alpha \cdot K_{\text{ш}})}; \quad (3.99)$$

$$z = \frac{V_0}{k \cdot (1 + \operatorname{tg} \alpha \cdot K_{\text{ш}})} \cdot \left(\frac{\pi}{2} + \operatorname{tg} \alpha \cdot K_{\text{ш}} \right). \quad (3.100)$$

Відповідно:

$$\dot{y} = \frac{V_0 \cdot \operatorname{tg} \alpha}{(1 + \operatorname{tg} \alpha \cdot K_{\text{ш}})}; \quad (3.101)$$

$$\dot{z} = \frac{V_0}{(1 + \operatorname{tg} \alpha \cdot K_{\text{ш}})}; \quad (3.102)$$

$$\frac{\dot{y}}{\dot{z}} = \operatorname{tg} \alpha. \quad (3.103)$$

Як видно, швидкість руху зерна \dot{y} в напрямку осі ou менша від швидкості руху зерна \dot{z} в напрямку осі oz . На рис. 3.21 і в табл. 3.8 наведено розраховані за залежностями (3.101) і (3.102) відношення швидкостей V_0/\dot{y} і V_0/\dot{z} . Як видно, зі збільшенням кута α відношення V_0/\dot{y}

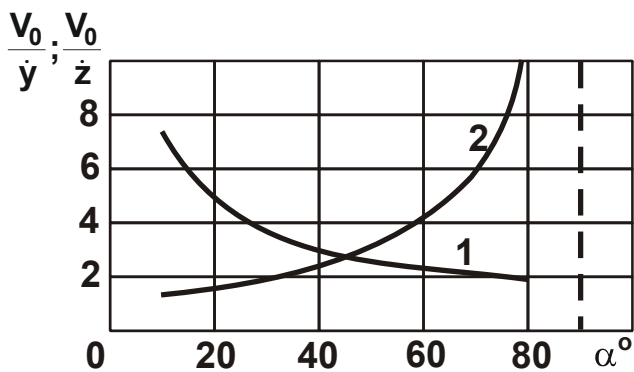


Рис. 3.21. Залежності відношень швидкостей V_0/\dot{y} (1) і V_0/\dot{z} (2) від кута α

зменшується, а відношення V_0/\dot{z} , навпаки, збільшується, набуваючи значень більших від одиниці. Це свідчить про те, що початкова швидкість V_0 руху абразивного зерна завжди більша від поточних значень швидкостей \dot{y} і \dot{z} . Заслуговує на увагу той факт, що при $\alpha < 45^\circ$ значення \dot{z} не суттєво відрізняються від початкової швидкості V_0 . Отже, за-

пасу кінетичної енергії рухомого зерна у принципі може бути достатньо для здійснення процесу стружкоутворення після проходження зерном екстремальної точки D. Інакше кажучи, у цьому випадку зерно може здійснити повний зріз оброблюваного матеріалу. В інших випадках, наприклад, при $\alpha > 45^\circ$, через недостатню швидкість \dot{z} процес стружкоутворення може припинитися в екстремальній точці D і повний зріз оброблюваного матеріалу не відбудеться, хоча швидкість \dot{z} при цьому не буде дорівнювати нулю.

Таблиця 3.8

Розрахункові значення відношень швидкостей V_0/\dot{y} і V_0/\dot{z}

α , град.	10	20	30	45	60	70	80	90
V_0/\dot{y}	7,4	4,48	3,47	2,73	2,3	2,1	1,9	–
V_0/\dot{z}	1,3	1,63	2,0	2,73	4,0	5,76	10,83	∞

У момент виходу абразивного зерна з контакту з оброблюваним матеріалом (тобто в разі виконання умови $k\tau = \pi$) залежності (3.89), (3.90), (3.91) і (3.92) матимуть вигляд:

$$y = \frac{\pi}{k} \cdot \frac{V_0 \cdot \operatorname{tg} \alpha}{(1 + \operatorname{tg} \alpha \cdot K_{\text{ш}})}; \quad (3.104)$$

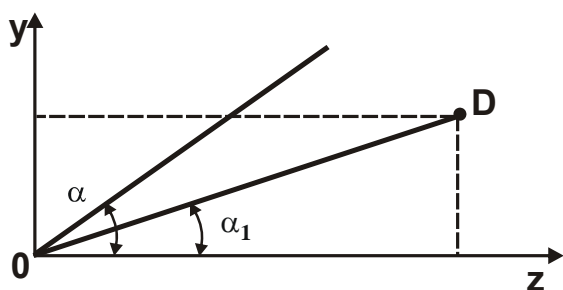
$$\dot{y} = \frac{2 \cdot V_0 \cdot \operatorname{tg} \alpha}{(1 + \operatorname{tg} \alpha \cdot K_{\text{ш}})}; \quad (3.105)$$

$$z = \frac{\pi}{k} \cdot \frac{V_0}{(1 + \operatorname{tg} \alpha \cdot K_{\text{ш}})}; \quad (3.106)$$

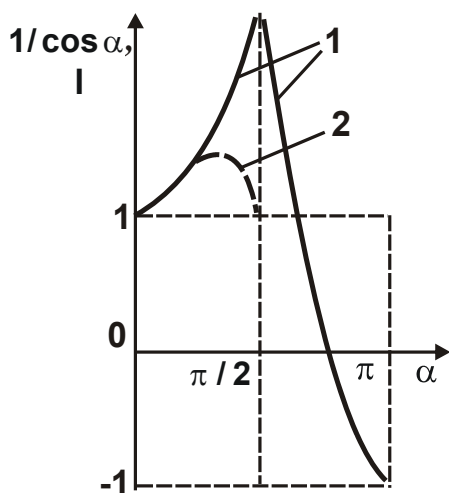
$$\dot{z} = \frac{V_0}{(1 + \operatorname{tg} \alpha \cdot K_{\text{ш}})} \cdot (1 - \operatorname{tg} \alpha \cdot K_{\text{ш}}); \quad (3.107)$$

$$\frac{y}{z} = \operatorname{tg} \alpha; \quad (3.108)$$

$$\frac{\dot{y}}{\dot{z}} = \frac{2 \cdot \operatorname{tg} \alpha}{(1 - \operatorname{tg} \alpha \cdot K_{\text{ш}})}. \quad (3.109)$$



а



б

Рис. 3.22. Схема траєкторії руху зерна в оброблюваному матеріалі (а) і характер зміни (б) функції $1/\cos \alpha$ (1) і довжини риски-подряпини зерном I (2) від кута α

Як випливає із залежностей (3.108) і (3.109), координата y завжди менша від координати z , а швидкість \dot{y} , навпаки, може бути більшою швидкості \dot{z} .

Для аналізу траєкторії руху абразивного зерна в оброблюваному матеріалі слід розглянути характер зміни кута α_1 (рис. 3.22а), що визначає положення зерна в довільний момент часу (у точці D). Для цього можна використати залежності (3.89) і (3.91):

$$\operatorname{tg} \alpha_1 = \operatorname{tg} \alpha \cdot \frac{\left(1 - \frac{\operatorname{sink} \tau}{k \tau}\right)}{\left(1 + \operatorname{tg} \alpha \cdot K_{\text{ш}} \cdot \frac{\operatorname{sink} \tau}{k \tau}\right)}. \quad (3.110)$$

Як видно, із часом τ відношення $\operatorname{sink} \tau / k \tau$ буде зменшуватися, а функція $\operatorname{tg} \alpha_1 = y/z$ збільшуватися. При пе-

вному значенні τ кут α_1 буде дорівнювати куту α й відбудеться вихід абразивного зерна з контакту з оброблюваним матеріалом. Дана закономірність здійснена за умови $\sin k\tau = 0$, тобто коли:

$$k\tau = \pi. \quad (3.111)$$

Координати точки D (див. рис. 3.22а) визначаються підстановкою залежності (3.111) у залежності (3.89) і (3.91):

$$y = \frac{\pi}{k} \cdot \frac{V_0 \cdot \operatorname{tg} \alpha}{(1 + \operatorname{tg} \alpha \cdot K_{\text{ш}})}; \quad (3.112)$$

$$z = \frac{\pi}{k} \cdot \frac{V_0}{(1 + \operatorname{tg} \alpha \cdot K_{\text{ш}})}. \quad (3.113)$$

У результаті отримано залежності (3.104) і (3.106).

Із залежностей (3.112) і (3.113) випливає, що відношення $y/z = \operatorname{tg} \alpha$ (див. рис. 3.22а), тобто розрахунки виконані правильно. Координати y і z однозначно збільшуються зі збільшенням початкової швидкості руху абразивного зерна V_0 і зменшенням коефіцієнта k .

Слід установити відстань від початку координат (див. рис. 3.22а) до точки виходу зерна з оброблюваного матеріалу, тобто відстань $OD = l$:

$$l = \frac{\pi \cdot V_0}{\cos \alpha \cdot (1 + \operatorname{tg} \alpha \cdot K_{\text{ш}})} \cdot \sqrt{\frac{m \cdot K_{\text{ш}}}{v \cdot \sigma \cdot (1 + \operatorname{tg} \alpha \cdot K_{\text{ш}})}}. \quad (3.114)$$

Відстань $OD = l$ за фізичною сутністю визначає довжину риски-подряпини абразивним зерном (довжину мікронерівності) за умови утворення повного зрізу, тобто здійснення процесу стружкоутворення на всій довжині l . У протилежному випадку риска-подряпина буде дорівнювати довжині шляху зерна в оброблюваному матеріалі до моменту припинення процесу стружкоутворення (відстані OD , показаній на рис. 3.18), що менше від довжини l .

Виходячи із залежності (3.114), довжина риски-подряпини абразивним зерном l тим більша, чим більші параметри V_0 , m , $K_{\text{ш}}$ і менші σ і v .

Кут входу зерна в оброблюваний матеріал α неоднозначно впливає на довжину l . З одного боку, зі збільшенням кута α за рахунок зменшення $\cos \alpha$ довжина l буде збільшуватися нескінченно (при $\alpha \rightarrow \pi/2$) (див. рис. 3.22б). З іншого боку, за рахунок збільшення функції $\operatorname{tg} \alpha \rightarrow \infty$ (при $\alpha \rightarrow \pi/2$) довжина l буде зменшуватися. Отже, існує екстремальне значення кута входу зерна в оброблюваний матеріал α , при якому довжина риски-подряпини абразивним зерном l буде максимальною, а процес струминно-абразивної обробки – найбільш ефективним з погляду інтенсивності знімання припуску.

Для визначення екстремуму функції l підпорядкуємо залежність (3.114) необхідній умові екстремуму: $l'_\alpha = 0$. У результаті після нескладних обчислень буде отримано тригонометричного рівняння:

$$0,5 \cdot \sin 2\alpha + \sin^2 \alpha \cdot K_{\text{ш}} = 1,5 \cdot K_{\text{ш}} . \quad (3.115)$$

Отримане рівняння (3.115) містить два параметри – α і $K_{\text{ш}}$. Отже, екстремальні значення кута входження зерна в оброблюваний матеріал α цілком однозначно визначаються коефіцієнтом $K_{\text{ш}}$.

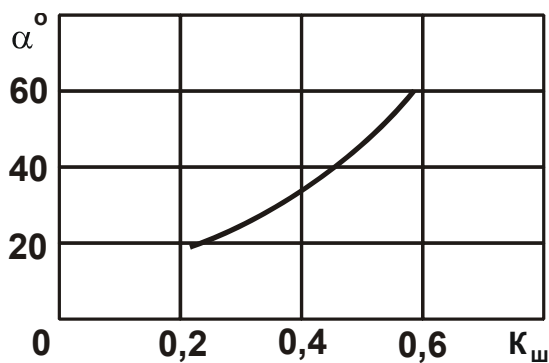


Рис. 3.23. Залежність екстремального кута входження зерна в матеріал α від коефіцієнта $K_{\text{ш}}$

На рис. 3.23 і в табл. 3.9 наведено розрахункові значення екстремального кута входження зерна в оброблюваний матеріал α залежно від коефіцієнта $K_{\text{ш}}$. Як видно, зі збільшенням коефіцієнта $K_{\text{ш}}$ кут α збільшується, а це, відповідно до залежності (3.114) і рис. 3.22б, веде до збільшення довжини риски-подряпини абразивним зерном l , що сприяє підвищенню продуктивності обробки. У реальних умовах абразивної обробки коефіцієнт $K_{\text{ш}}$, як правило, не перевищує значення 0,35.

Тому кут входження абразивного зерна в оброблюваний матеріал α може змінюватися в межах $0 \dots 30^\circ$.

Таким чином, на основі залежності (3.114) обґрунтовано основні умови збільшення довжини риски-подряпини абразивним зерном l (дов-

жини мікронерівності) і відповідно основні напрями підвищення ефективності струминно-абразивної обробки. Вони полягають у збільшенні коефіцієнта $K_{\text{ш}}$ (у тому числі й за рахунок зниження інтенсивності тертя зерна з оброблюваним матеріалом) і відповідно збільшенні кута α , який, як було показано, може змінюватися в обмежених межах (0 ... 30°).

Таблиця 3.9

Розрахункові значення екстремального кута α

$K_{\text{ш}}$	0,23	0,35	0,5	0,58
α , град.	20	30	45	60

Очевидно, максимальна глибина входження абразивного зерна в оброблюваний матеріал h_{max} і довжина риски-подряпини абразивним зерном l окремо ще не визначають однозначно інтенсивності знімання оброблюваного матеріалу й відповідно продуктивності обробки. Критерієм оцінки продуктивності обробки є об'єм матеріалу $Q_{\text{зріз}}$, що знімається одним зерном, тобто об'єм риски-подряпини (мікронерівності), утвореної окремим зерном.

Якщо розглядати траєкторію руху зерна в оброблюваному матеріалі не криволінійною, а у вигляді двох прямих ліній (рис. 3.24), то $Q_{\text{зріз}} = h_{\text{max}} \cdot v \cdot l / 3$. Тоді, з урахуванням залежностей (3.95) і (3.114) об'єм матеріалу, що знімається одним зерном, визначиться так:

$$Q_{\text{зріз}} = \frac{m \cdot V_0^2}{3} \cdot \frac{\pi \cdot K_{\text{ш}} \cdot \text{tg} \alpha}{(1 + \text{tg} \alpha \cdot K_{\text{ш}}) \cdot \sigma} \quad (3.116)$$

Структурно залежність (3.116) відповідає аналогічній спрощеній залежності (2.2), однак містить два додаткових параметри: α і $K_{\text{ш}}$. Перший з них визначає форму зрізу, а другий – енергоємність обробки σ .

Відповідно до отриманої залежності (3.116), збільшити $Q_{\text{зріз}}$ можна збільшенням маси абразивного зерна m й швидкості його руху V_0 , а також збільшенням відношення $K_{\text{ш}} / \sigma$ за рахунок збільшення $K_{\text{ш}}$ й зменшення σ , тобто за рахунок зменшення енергоємності обробки.

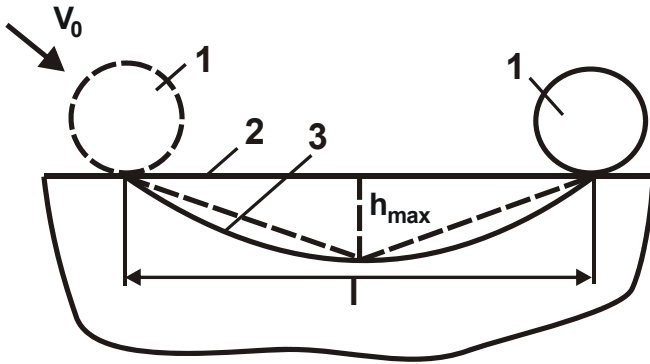


Рис. 3.24. Форма зрізу одиничним зерном у процесі струминно-абразивної обробки

струминно-абразивної обробки

Умовні позначення: 1 – різальне зерно; 2 – матеріал; 3 – траєкторія руху зерна.

Кут входження α зерна в оброблюваний матеріал неоднозначно впливає на параметр $\mathcal{Q}_{\text{зріз}}$. Очевидно, в разі збільшення кута α до значення 45° і більше, об'єм матеріалу $\mathcal{Q}_{\text{зріз}}$, що знімається одним зерном, буде збільшуватися, а в разі подальшого збільшення кута α – фактично залишатися постійним, тому що $(1 + \text{tg}\alpha \cdot K_{\text{ш}}) \approx \text{tg}\alpha \cdot K_{\text{ш}}$. Отже, виходячи із залежності

(3.116), у широкому діапазоні зміни кута α параметр $\mathcal{Q}_{\text{зріз}}$ буде набувати максимальних значень. Насправді, як впливає із залежності (2.11), енергоємність обробки σ не залишається постійною величиною зі зміною кута α . Тому в процесі визначення об'єму матеріалу $\mathcal{Q}_{\text{зріз}}$, що знімається одним зерном, слід враховувати зміну σ залежно від кута α . Для цього параметр $\mathcal{Q}_{\text{зріз}} = h_{\text{max}} \cdot v \cdot l / 3$ слід визначити з урахуванням залежностей (3.96), (3.114) і (2.11):

$$\mathcal{Q}_{\text{зріз}} = \frac{m \cdot V_0^2}{2} \cdot \frac{\pi \cdot K_{\text{ш}} \cdot \text{tg}\alpha \cdot [1 - \sin(\alpha + \psi_1)]}{3 \cdot \tau_{\text{зсуб}} \cdot \cos\alpha \cdot \cos\psi_1 \cdot (1 + \text{tg}\alpha \cdot K_{\text{ш}})^2} \quad (3.117)$$

Як впливає із залежності (3.117), об'єм матеріалу $\mathcal{Q}_{\text{зріз}}$, що знімається одним абразивним зерном, однозначно визначається кінетичною енергією $\frac{m \cdot V_0^2}{2}$ рухомого зерна. Чим вона більша, тим більше значення $\mathcal{Q}_{\text{зріз}}$ й відповідно інтенсивність знімання оброблюваного матеріалу. Збільшити $\mathcal{Q}_{\text{зріз}}$ можна також збільшенням коефіцієнта $K_{\text{ш}}$, який визначається залежністю (3.95).

Кут входження абразивного зерна в оброблюваний матеріал α неоднозначно впливає на $\mathcal{Q}_{\text{зріз}}$. З його збільшенням (за рахунок збільшення функції $\text{tg}\alpha$) спочатку об'єм $\mathcal{Q}_{\text{зріз}}$ буде збільшуватися, а потім внаслідок

збільшення множника $(1 + \operatorname{tg} \alpha \cdot K_{\text{ш}})^2$ і зменшення $[1 - \sin(\alpha + \psi_1)]$ буде зменшуватися, проходячи точку максимуму.

Отриманий теоретичний розв'язок узгоджується з відомими експериментальними даними, наведеними в розділі 1. Так, виходячи з рис. 1.10 [59], зі збільшенням кута атаки α знімання матеріалу спочатку збільшується, потім зменшується, проходячи точку максимуму. Найбільше знімання матеріалу досягається приблизно при куті атаки $\alpha = 45^\circ$. В межах $40^\circ < \alpha < 50^\circ$ знімання металу несуттєво (у межах 5 – 10 %) відрізняється від максимального значення. Відповідно до залежності (3.117), екстремальне значення кута атаки α буде залежати, у першу чергу, від кута $\psi_1 = \psi + \gamma$. Якщо цей кут змінюється в межах від 0 до 45° , то екстремальне значення кута атаки α також буде близьким до 45° . Якщо ж кут $\psi_1 = \psi + \gamma$ у реальних умовах абразивної обробки буде близький до 90° , то очевидно, екстремальні значення кута $\alpha \rightarrow 0$. У цьому випадку найбільший об'єм матеріалу $\mathcal{Q}_{\text{зріз}}$, що знімається одним зерном, буде досягатися при невеликому куті α , тобто під час мікрорізання фактично з постійною товщиною зрізу. Таким чином показано, що метод абразивної обробки затопленими струменями ефективно використовувати для обробки кромки заготовок, усунення задирок і зменшення мікронерівностей на оброблюваних поверхнях. Це узгоджується з теоретичними розв'язками, отриманими в розділі 2, на основі статичного подання процесу обробки без урахування динаміки взаємодії абразивного зерна з оброблюваним матеріалом. Крім того, на основі статичного й динамічного подання процесу абразивної обробки деталей затопленими струменями отримано одне рішення. Це вказує на те, що запропонований метод обробки доцільно використовувати у випадку реалізації невеликого кута входження абразивного зерна в оброблюваний матеріал $\alpha \rightarrow 0$.

3.3. Експериментальне оцінювання отриманих теоретичних рішень

Для оцінювання вірогідності отриманих теоретичних рішень розрахунково-експериментальним шляхом слід визначити енергоємність обробки σ на основі перетвореної залежності (2.2):

$$\sigma = \frac{m \cdot V_0^2}{2 \cdot \varrho_{\text{зріз}}} \quad (3.118)$$

Використовуючи експериментальні значення параметрів m , V_0 і $\varrho_{\text{зріз}}$, із залежності (3.118) можна встановити кількісні значення параметра σ . Для цього масу зерна слід подати у вигляді $m = \rho \cdot \pi \cdot D^3 / 6$, де ρ – щільність матеріалу абразивного зерна ($\rho = 3,5 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$); D – розмір абразивного зерна ($D = 630 \text{ мкм}$). Тоді $m = 0,459 \cdot 10^{-6} \text{ кг}$.

Як установлено експериментально [7], у процесі абразивної обробки затопленими струменями деталей з латуні параметри зрізів (утворених мікронерівностей) набувають значень, показаних на рис. 3.25 (h_a – висота валика; R – радіус сферичної вершини зерна). Тоді для швидкості $V_0 = 2 \text{ м/с}$; $l = 10 \text{ мкм}$ і $\varrho_{\text{зріз}} = l \cdot b \cdot a / 6 = 10 \cdot 6 \cdot 6 / 6 = 60 \text{ мкм}^3 = 60 \cdot 10^{-18} \text{ м}^3$ (де $b = 6 \text{ мкм}$ – ширина зрізу; $a = 6 \text{ мкм}$ – товщина зрізу). Після підстановки цих значень у залежність (3.118) отримано $\sigma = 15 \cdot 10^3 \text{ Н/мм}^2$ [15]. Межа міцності на розтягання латуні дорівнює $\sigma_p = 360 \text{ Н/мм}^2$.

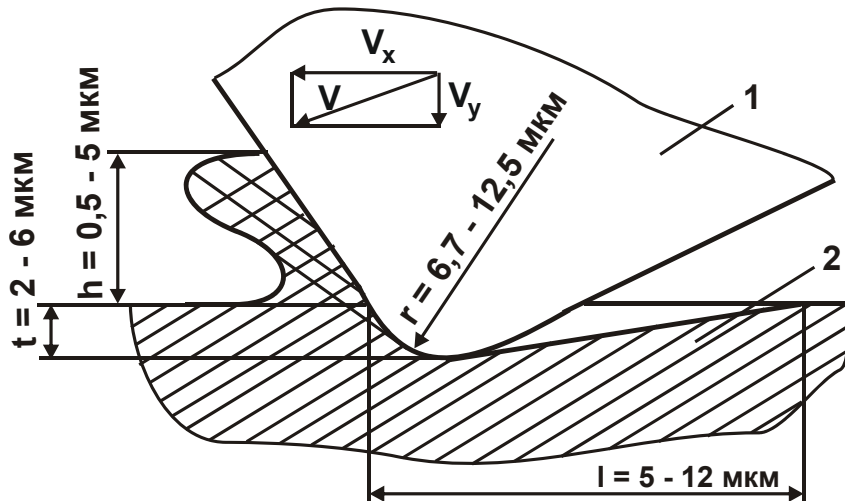


Рис. 3.25. Схема взаємодії вершини абразивного зерна (1) з оброблюваним матеріалом (2)

Як видно, розбіжність значень σ і σ_p істотна (становить 41,6 раза) і обумовлена особливостями процесу різання у зв'язку з високою пластичністю латуні й несприятливими умовами стружкоутворення, а також інтенсивним тертям різального зерна з оброблюваним матеріалом (латун-

ню). Відповідно до залежності (2.19) і наведених у табл. 2.4 розрахункових за нею значень $\sigma/2\tau_{зсув} \approx \sigma/\sigma_p$ така велика розбіжність у значеннях σ і σ_p передбачає 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, коли кут $\alpha = 10^\circ$, кут $\psi_1 > 70^\circ$, коли кут $\alpha = 20^\circ$, кут $\psi_1 > 60^\circ$, коли кут $\alpha = 30^\circ$, кут $\psi_1 > 45^\circ$. Із цього випливає, що в процесі обробки деталей із латуні може мати місце як процес різання (з утворенням стружки), так і процес пластичного деформування латуні (без утворення стружки), все залежить від суми кутів $\alpha + \psi_1$. Чим вона більша, тим більші розбіжності між σ й σ_p і тим імовірніше, що знімання металу в процесі обробки буде відбуватися шляхом його пластичного деформування (без утворення стружки).

Отримані результати підтверджуються експериментальними даними [120], згідно з якими умовне напруження різання (енергоємність обробки σ) під час мікрорізання латуні за жорсткою схемою (з постійною швидкістю різання $V_0 = 1$ м/с і товщиною зрізу 30 мкм) спеціально виготовленим індентором (алмазним конусом з кутом при вершині $2\alpha = 120^\circ$) на маятниковому приладі набуває значення $\sigma = 12 \cdot 10^3$ Н/мм², що несуттєво відрізняється від наведеного значення.

Таким чином, визначено умовне напруження різання (енергоємність абразивної обробки деталей затопленими струменями) і показано, що вона приблизно така ж, як і під час мікрорізання одиничним зерном з незмінною в часі швидкістю різання [120]. Отже, в першому наближенні для аналізу силової напруженості (енергоємності обробки) процесу абразивної обробки деталей затопленими струменями може бути використана залежність (3.118). За даною залежністю, задаючи значення σ або m , V_0 , можна визначити геометричні параметри мікронерівностей, що утворюються (включаючи параметр шорсткості поверхні $R_{\max} \approx a$, значення $\mathcal{G}_{зріз}$ тощо) в процесі абразивної обробки затопленими струменями деталей з різних за фізико-механічними властивостями матеріалів. Це дозволяє розрахунковим шляхом оцінити продуктивність обробки й силу різання, що відкриває нові можливості для інтенсифікації обробки.

Виходячи із залежності (3.118), зі збільшенням енергоємності обробки σ об'єм матеріалу, що знімається одним зерном $\mathcal{G}_{зріз}$, буде змен-

шуватися, а геометричні параметри зрізу будуть набувати значень, менших за значення, показані на рис. 3.25. Це дозволяє метод абразивної обробки затопленими струменями ефективно застосовувати для видалення задирок і зменшення мікронерівностей на поверхні, утворених у ході попередньої операції, оскільки розміри одиничного зрізу порівнянні з розмірами мікронерівностей і задирок. Так, встановлено, що кромки плоских деталей піддаються більш інтенсивній обробці, ніж сама площа.

Необхідно зауважити, що запропонований метод абразивної обробки деталей затопленими струменями, як і інші методи струминно-абразивної обробки, незважаючи на високі значення енергоємності, все-таки є менш енергоємним порівняно з методом шліфування, де основна частка в енергетичному балансі обумовлена тертям зв'язки шліфувального круга з оброблюваним матеріалом. Це дозволяє забезпечити високу якість обробки, виключити утворення на них припикань та інших температурних дефектів, традиційних для процесу шліфування.

Підводячи підсумки проведеного аналізу, слід зазначити, що процес взаємодії абразивного зерна з оброблюваним матеріалом і механізм знімання такого пластичного матеріалу, як латунь, підпорядковується закономірностям процесу різання й стружкоутворення. Про це свідчить незначна відмінність розрахункових і експериментальних значень умовної напруги різання σ . У роботі [120] встановлено, що експериментально отримане значення σ за фізичною сутністю є характеристикою процесу стружкоутворення при різанні. Отже, отримані з позиції теорії різання матеріалів теоретичні розв'язки про силову напруженість процесу абразивної обробки деталей затопленими струменями є правочинними, тому що вони засновані на відомих достовірних результатах експериментальних досліджень.

3.4. Визначення умов підвищення продуктивності абразивної обробки деталей затопленими струменями

3.4.1. Спрощений підхід до визначення продуктивності обробки

Отримані теоретичні рішення дозволяють обґрунтувати умови підвищення продуктивності абразивної обробки затопленими струменями. Для цього продуктивність обробки слід виразити залежністю:

$$Q = \frac{g}{\tau}, \quad (3.119)$$

де $g = N \cdot g_{\text{зріз}}$ – об'єм матеріалу, що видаляється з поверхонь оброблюваних деталей за певний час τ , м³;

$N = k_0 \cdot n$ – кількість мікрорізів на оброблюваних поверхнях деталей, утворених абразивними зернами за час τ ;

k_0 – кількість абразивних зерен, що беруть участь у процесі струминно-абразивної обробки;

n – кількість зіткнень зерна з оброблюваними деталями за час τ .

Для спрощених розрахунків продуктивності обробки Q параметр $g_{\text{зріз}}$ може бути виражений залежністю (2.2), а параметр n – залежністю

$n = \frac{\tau}{\tau_0}$, де $\tau_0 = \frac{2H}{V_0}$ – час між двома наступними зіткненнями абразивного

зерна з оброблюваною деталлю, с; H – відстань від сопла до оброблюваної деталі, м.

Підставляючи залежність (2.2) в (3.119), після перетворень маємо:

$$Q = \frac{k_0 \cdot m \cdot V_0^3}{4 \cdot \sigma \cdot H}. \quad (3.120)$$

Як видно, збільшити продуктивність обробки Q можна збільшенням кількості абразивних зерен k_0 , маси зерна m й швидкості його руху V_0 , а також зменшенням енергоємності обробки σ і відстані від сопла до оброблюваної деталі H (рис. 3.26). При цьому найбільше впливає на Q зі всіх параметрів, що входять у залежність (3.120), швидкість руху абразивного зерна V_0 , тому що вона входить у залежність у третьому ступені, і її невелика зміна приводить до істотної зміни продуктивності обробки Q . Отже, основним напрямком підвищення продуктивності абразивної обробки деталей затопленими струменями необхідно вважати збільшення швидкості руху зерна V_0 за рахунок застосування ефективних технологічних рішень щодо управління потоками руху абразивних зерен і оброблюваних деталей. Із цього випливає, що основний ефект абразивної обробки затопленими струменями полягає в можливості збільшення V_0 .

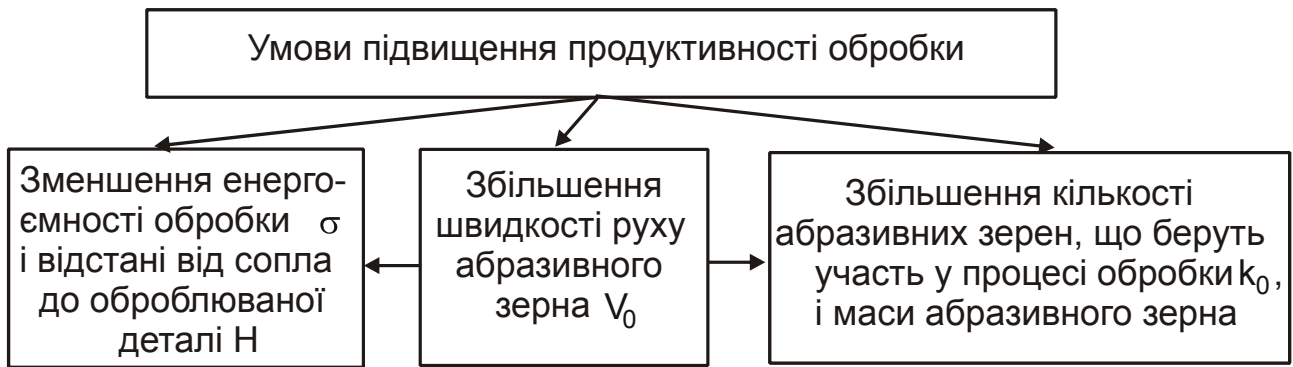


Рис. 3.26. Структурна схема умов підвищення продуктивності обробки

Досягти збільшення продуктивності обробки Q від збільшення кількості абразивних зерен k_0 , очевидно, можна до певної межі, оскільки подальше збільшення k_0 призведе до зменшення продуктивності обробки Q . Отже, для ефективного ведення процесу обробки необхідно використовувати оптимальну кількість абразивних зерен k_0 , за якої забезпечується баланс двох потоків, що рухаються: оброблюваних деталей і абразивних зерен. Разом із тим аналітично описати даний баланс з огляду на складність фізичних процесів не можливо. Його можна досліджувати лише експериментально на основі визначення об'єму матеріалу, що видаляється з оброблюваних деталей за певний проміжок часу. За аналогією можна встановити вплив маси абразивного зерна m на продуктивність обробки Q , оскільки зі зміною m відбувається зміна швидкості руху абразивного зерна V_0 , що веде до зміни продуктивності обробки Q .

Таким чином показано, що вплив параметрів, які входять у залежність (3.120), на продуктивність обробки Q в остаточному підсумку пов'язаний зі зміною V_0 . Ті фактори, які призводять до збільшення V_0 , безсумнівно впливають на збільшення Q . Тому цілком можливо, що зміна ряду параметрів, які входять у залежність (3.120), буде сприяти збільшенню V_0 й продуктивності обробки Q . Інші параметри, навпаки, будуть знижувати продуктивність обробки Q , хоча, виходячи із залежності (3.120), їхнє збільшення передбачає збільшення Q . Однак спрогнозувати за залежністю (3.120) такий характер зміни Q складно у зв'язку зі складністю різних за фізичною природою процесів, які відбуваються в процесі обробки. Необхідно додатково встановити аналітичні залежності, які узгоджують параметри обробки зі швидкістю руху абразивних зерен

V_0 , що є складним завданням. Тому пошук оптимальних рішень в остаточному підсумку повинен проводитися експериментальним шляхом, безсумнівно, з використанням отриманих аналітичних рішень, які є свого роду еталоном, що визначає граничні технологічні можливості досліджуваного методу абразивної обробки деталей затопленими струменями.

Із залежності (3.120) також впливає, що збільшення продуктивності обробки Q у зв'язку зі зменшенням σ (відповідно до теоретичних рішень, наведених у пп. 2.2.4) передбачає здійснення процесу різання зі зменшуваною в часі товщиною зрізу, тобто в процесі обробки гострих кромek заготовки, видалення задирок, зменшення мікронерівностей на оброблюваній поверхні заготовки. Зменшення σ передбачає також обробку матеріалів із незначною твердістю й міцністю, наприклад, кольорових металів та ін.

Якщо ж параметр k_0 виразити через загальну масу абразивних зерен $M = k_0 \cdot m$, то з урахуванням відношення $k_0 = M/m$ залежність (3.120) матиме вигляд:

$$Q = \frac{M \cdot V_0^3}{4 \cdot \sigma \cdot H} . \quad (3.121)$$

У даному випадку продуктивність обробки Q цілком однозначно визначається параметром M : чим він більший, тим більше Q . Зернистість абразивного порошку, по суті, не впливає на продуктивність обробки Q . Найбільше впливає на Q швидкість руху абразивних зерен V_0 . Цілком можливо, що зі збільшенням зернистості абразивного порошку (за умови $M = \text{const}$) швидкість руху абразивних зерен V_0 буде збільшуватися, а це приведе до збільшення Q . Однак установити дану закономірність і оцінити можливість підвищення продуктивності обробки Q за рахунок збільшення зернистості абразиву можна експериментальним шляхом.

3.4.2. Уточнений підхід до визначення продуктивності обробки

Як встановлено експериментально, у реальних умовах абразивної обробки деталей затопленими струменями у міру віддалення від сопла швидкість руху абразивного зерна змінюється [7]. Спочатку вона збіль-

шується, а потім зменшується у зв'язку із втратою зерном кінетичної енергії. Тому необхідно перетворити залежність (3.119) з урахуванням змінної швидкості руху абразивного зерна до моменту його контакту з оброблюваною деталлю. Припустимо, що на абразивне зерно масою m протягом часу τ_0 (до моменту його контакту з оброблюваною деталлю) з боку повітряного струменя діє постійна сила P і зерно рухається рівноприскорено із прискоренням:

$$\bar{a} = \frac{P}{m}. \quad (3.122)$$

За час τ_0 абразивне зерно переміститься на величину H , що дорівнює відстані від сопла до оброблюваної деталі:

$$H = \frac{\bar{a} \cdot \tau_0^2}{2}, \quad (3.123)$$

звідси:

$$\tau_0 = \sqrt{\frac{2 \cdot H}{\bar{a}}}. \quad (3.124)$$

За цей час швидкість руху абразивного зерна збільшиться від 0 до значення V_0 , яке визначається наступною залежністю:

$$V_0 = \bar{a} \cdot \tau_0. \quad (3.125)$$

Тоді кількість зіткнень n абразивного зерна з оброблюваними деталями за певний час обробки τ відповідно до залежностей $n = \tau / \tau_0$ і (3.125) можна виразити як:

$$n = \frac{\tau}{V_0} \cdot \bar{a}. \quad (3.126)$$

Об'єм матеріалу $\mathcal{G} = N \cdot \mathcal{G}_{\text{зріз}}$, що видаляється з поверхонь оброблюваних деталей за певний час τ , із урахуванням (2.2), визначиться так:

$$g = k_0 \cdot \frac{\tau}{V_0} \cdot \bar{a} \cdot g_{\text{зріз}} = k_0 \cdot \frac{\tau}{V_0} \cdot \bar{a} \cdot \frac{m \cdot V_0^2}{2 \cdot \sigma}. \quad (3.127)$$

Тоді:

$$g = \frac{k_0 \cdot \tau \cdot P \cdot V_0}{2 \cdot \sigma}. \quad (3.128)$$

Відповідно, продуктивність обробки визначиться:

$$Q = \frac{g}{\tau} = \frac{k_0 \cdot P \cdot V_0}{2 \cdot \sigma}. \quad (3.129)$$

Як видно, збільшити продуктивність обробки Q можна збільшенням параметрів k_0 , P , V_0 і зменшенням σ . У цьому випадку всі параметри, що входять у залежність (3.129), однаковою мірою впливають на Q , тоді як, відповідно до залежності (3.120), найбільше впливає на продуктивність обробки Q швидкість руху абразивного зерна V_0 . У загальному випадку швидкість V_0 залежить від умов обробки. Тому її можна аналітично виразити відповідно до залежності (3.125) з урахуванням залежностей (3.122) і (3.124):

$$V_0 = \sqrt{2 \cdot H \cdot \bar{a}} = \sqrt{\frac{2 \cdot H \cdot P}{m}}. \quad (3.130)$$

Виходячи з отриманої залежності, збільшити швидкість V_0 можна збільшенням параметрів H , P і зменшенням m . Підставляючи залежність (3.130) у залежність (3.129), маємо:

$$Q = \frac{k_0 \cdot P}{\sigma} \cdot \sqrt{\frac{H \cdot P}{2 \cdot m}}. \quad (3.131)$$

У цьому випадку найбільше впливає на продуктивність обробки Q сила P , яка обумовлена повітряним напором. Параметр k_0 у загальному випадку залежить від багатьох факторів, і його складно виразити аналі-

тично. Разом із тим, вважаючи в першому наближенні, що всі абразивні зерна беруть участь у зніманні матеріалу, цей параметр можна виразити через масу абразивних зерен $M = k_0 \cdot m$. Звідси $k_0 = M/m$. Тоді залежність (3.131) матиме вигляд:

$$Q = \frac{M \cdot P}{m \cdot \sigma} \cdot \sqrt{\frac{H \cdot P}{2 \cdot m}} \quad (3.132)$$

Силу P можна подати у вигляді:

$$P = p \cdot \pi \cdot R^2, \quad (3.133)$$

де p – тиск, що діє на абразивне зерно з боку повітряного струменя, H/m^2 ;

R – радіус абразивного зерна, м.

Масу абразивного зерна можна виразити залежністю: $m = \rho \cdot v$, де ρ – щільність абразивного матеріалу, кг/м^3 ; $v = \frac{\pi \cdot D^3}{6}$ – об'єм абразивного зерна (у формі сфери діаметром $D = 2 \cdot R$), м^3 . Тоді:

$$m = \frac{\pi \cdot D^3 \cdot \rho}{6} \quad (3.134)$$

Підставляючи залежності (3.133) і (3.134) в (3.132), маємо:

$$Q = \frac{1,3 \cdot M}{\rho \cdot D \cdot \sigma} \cdot \sqrt{\frac{H \cdot p}{\rho \cdot D}} \quad (3.135)$$

Як видно, зі збільшенням зернистості абразивного порошку D (за умови $M = \text{const}$) продуктивність обробки Q зменшується, що пов'язано зі зменшенням кількості абразивних зерен k_0 , які беруть участь у процесі обробки. Однак, як зазначалося вище, це ідеальний випадок. Насправді, далеко не всі абразивні зерна $k_0 = M/m$ беруть участь у зніманні матеріалу й тому розрахунок продуктивності обробки Q слід виконувати для

цілком конкретного числа абразивних зерен k_0 . Тоді залежність (3.135) з урахуванням відношення $M = k_0 \cdot m$ й залежності (3.134) може бути подана як:

$$Q = \frac{0,68 \cdot k_0 \cdot D^{1,5}}{\sigma} \cdot \sqrt{\frac{H \cdot p}{\rho}}. \quad (3.136)$$

У цьому випадку зернистість абразивного порошку D входить у чисельник залежності. Однак характер зміни продуктивності обробки Q зі збільшенням зернистості абразивного порошку D буде залежати від характеру зміни параметра k_0 зі збільшенням D . Якщо інтенсивність зменшення параметра k_0 зі збільшенням D буде перевищувати інтенсивність збільшення множника $D^{1,5}$, що входить у чисельник залежності (3.136), то продуктивність обробки Q буде зменшуватися. У протилежному випадку Q буде збільшуватися, що більш імовірно. Очевидно, установити характер зміни продуктивності обробки Q зі збільшенням зернистості абразивного порошку D можна експериментальним шляхом.

Заслуговує на увагу аналіз зміни швидкості руху зерна V_0 зі збільшенням зернистості абразивного порошку D . Для цього залежність (3.130) з урахуванням залежностей (3.133) і (3.134) слід виразити як:

$$V_0 = \sqrt{\frac{1,5 \cdot H \cdot p}{\rho \cdot D}}. \quad (3.137)$$

Як видно, зі збільшенням зернистості абразивного порошку D швидкість руху абразивного зерна V_0 зменшується. За аналогією визначається кінетична енергія $W = m \cdot V_0^2 / 2$ абразивного зерна у момент зіткнення з оброблюваною деталлю, для чого слід скористатися залежностями (3.134) і (3.137):

$$W = 0,125 \cdot \pi \cdot D^2 \cdot H \cdot p. \quad (3.138)$$

Виходячи із залежності (3.138), зі збільшенням зернистості абразивного порошку D кінетична енергія W абразивного зерна збільшується

ся. Це вказує на можливість утворення більш повних мікрорізів на оброблюваній поверхні й збільшення продуктивності обробки.

Заслуговує на увагу й той факт, що зі збільшенням зернистості абразивного порошку (маси абразивного зерна m) відповідно до залежності (3.97) максимальна глибина входження абразивного зерна в оброблюваний матеріал h_{\max} збільшується. Це передбачає збільшення максимальної висоти мікронерівностей обробленої поверхні (параметра шорсткості поверхні R_{\max}). Отже, між продуктивністю обробки Q й параметром шорсткості поверхні R_{\max} існує однозначний зв'язок, який виражається у збільшенні Q зі збільшенням параметра R_{\max} (через збільшення зернистості абразивного порошку). Однак вірогідність його існування може бути встановлена лише експериментальним шляхом.

3.5. Дослідження закономірностей руху абразивних зерен у струменях стисненого повітря

У науково-технічній літературі накопичено значний досвід експериментального дослідження струминно-абразивної обробки, заснованої на прокачуванні абразивної суспензії через сопла [53; 56; 64; 71 – 77; 79; 90], і фактично відсутні наукові праці, у яких розглядається процес обробки за допомогою струменів стисненого повітря, затоплених абразивною суспензією [7]. Це забезпечує збереження сопел, які подають робочий агент (рис. 3.27). Установлено, що струмені стисненого повітря перед входженням в абразивну суспензію на відносно короткій ділянці рухаються у вільному стані, після чого відбувається їхнє розширення [20]. Тому кількість абразивних зерен, залучених у процес, є функцією розрідження середовища в струменях, затоплених абразивною суспензією. Специфікою процесу обробки є обмежена ежекція абразивних зерен із суспензії в струмінь і повідомлення їм запасу кінетичної енергії, достатньої для мікрорізання поверхні оброблюваних деталей.

У процесі струминно-абразивної обробки абразивне зерно, що рухається в початковий момент разом із водогазовим потоком з постійною швидкістю, перш ніж зіштовхнутися з оброблюваними деталями, перетинає певний демпфівальний газоводяний шар, який розташований перед оброблюваною деталлю й, умовно кажучи, перебуває в спокої відно-

сно неї. Розмір цього шару може бути прийнятий таким, що дорівнює або дещо менший від "обтічного" розміру оброблюваної деталі, тобто меншим від розміру проекції деталі на площину, перпендикулярну до вектора швидкості, наприклад, на поверхню листової штампованої деталі.



Рис. 3.27. Фрагмент соплового апарата струминно-абразивної установки

Для оцінювання інтенсивності гальмування абразивного зерна слід визначити зв'язок гальмівного шляху L , початкової V_n та кінцевої V_k швидкості [10; 20].

У процесі обробки струменями стисненого повітря, затопленими у воді, з абразивними зернами зернистістю D 63 (630 мкм) (рис. 3.28), які рухаються зі швидкістю 20 м/с, критерій Рейнольдса визначається [82]:

$$Re = \frac{D \cdot V \cdot \rho_c}{\eta}, \quad (3.139)$$

де D – розмір абразивного зерна, м;

V – швидкість руху абразивного зерна, м/с;

η – в'язкість середовища (для повітря $\eta = 2 \cdot 10^{-5}$ кг/м·с);

ρ_c – щільність середовища (для повітря $\rho_c = 1,2$ кг/м³).

Для вихідних даних: $D = 630$ мкм; $V = 20$ м/с; $\eta = 2 \cdot 10^{-5}$ кг/м·с; $\rho_c = 1,2$ кг/м³ розрахунками встановлено, що $Re = 756$.

Для діапазону значень числа Рейнольдса, у який входить отримане значення, запропоновано кілька емпіричних залежностей для визначення

коефіцієнта опору f для критерію Рейнольдса й відповідно сили опору F руху компактного тіла з розміром D :

$$F = f \cdot D^2 \cdot \rho_c = \frac{V^2}{2}. \quad (3.140)$$

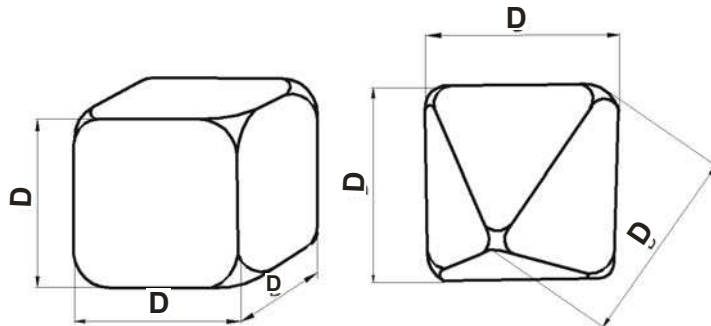


Рис. 3.28. Одиничні абразивні зерна

Заслуговує на увагу залежність для визначення коефіцієнта опору f , запропонована в роботі [82]:

$$f = \frac{24}{Re} + \frac{4}{\sqrt[3]{Re}}. \quad (3.141)$$

Користуючись цією залежністю, можна встановити зв'язок швидкості руху абразивного зерна й пройденого шляху. У цьому випадку другий закон Ньютона запишеться так:

$$D^3 \cdot \rho_{абр} \cdot \frac{dV}{d\tau} = - \frac{2 \cdot D^2 \cdot \rho_c}{V^2 \cdot \left(\frac{24 \cdot \eta}{D \cdot V \cdot \rho_c} + \frac{4 \cdot \eta^{1/3}}{D^{1/3} \cdot V^{1/3} \cdot \rho_c^{1/3}} \right)}, \quad (3.142)$$

де $\rho_{абр}$ – щільність абразивного зерна, кг/м³.

Використовуючи відомий вираз $dt = dl/dV$, де l – шлях, пройдений зерном, одержимо рівняння:

$$-\frac{dV}{dl} = \frac{18 \cdot \eta}{D^2 \cdot \rho_{абр}} + \frac{3 \cdot \eta^{1/3} \cdot V^{2/3} \cdot \rho_c^{2/3}}{D^{4/3} \cdot \rho_{абр}}. \quad (3.143)$$

Інтегруючи це рівняння, маємо:

$$\int_{V_n}^{V_k} \frac{dV}{b_1 + a_1 \cdot V^{2/3}} = \int_{L_n}^{L_k} dl, \quad (3.144)$$

$$\text{де } a_1 = \frac{3 \cdot \eta^{1/3} \cdot \rho_c^{2/3}}{D^{4/3} \cdot \rho_{абр}};$$

$$b_1 = \frac{18 \cdot \eta}{D^2 \cdot \rho_{абр}}.$$

Індекси "п" і "к" позначають, відповідно, початковий і кінцевий стан зерна. Введемо позначення: $L = l_k - l_n$; $V_k = k \cdot V_n$, де $k = 0 \dots 1$. Після інтегрування рівняння (3.144) отримано залежність:

$$L = \frac{3}{a_1 \cdot V_n^{1/3} \cdot (1 - k^{1/3})} - \sqrt{\frac{b_1}{a_1}} \cdot \left(\arctg \left(k^{1/3} \cdot V_n^{1/3} \cdot \sqrt{\frac{a_1}{b_1}} \right) - \arctg \left(V_n^{1/3} \cdot \sqrt{\frac{a_1}{b_1}} \right) \right). \quad (3.145)$$

Підставляючи в цю залежність різні значення k , можна визначити шлях, пройшовши який, абразивне зерно, що рухається в водяному середовищі, буде мати меншу швидкість залежно від початкової швидкості V_n , розміру зерна D , його щільності $\rho_{абр}$ й параметрів середовища: в'язкості η й щільності ρ_c . Наприклад, при $k = 0$ одержимо шлях до повної зупинки зерна; при $k = 0,5$ – шлях втрати 50 % швидкості й 75 % кінетичної енергії; при $k = 1/\sqrt{2}$ – шлях втрати 50 % кінетичної енергії.

На практиці дані результати дослідження дозволять вибрати оптимальну форму сопла, яка відповідає тим параметрам абразивного матеріалу, енергоносія й середовища, за яких передбачається їхня робота. Наприклад, використання циліндричних або конічних сопел за високого початкового тиску неефективне, тому що в цьому випадку швидкість у вихідному перетині не може перевищувати критичної швидкості V , яка дещо нижча від швидкості звуку загальмованого стисненого повітря:

$$V = V_{зв} \cdot \sqrt{\frac{2}{n+1}}, \quad (3.146)$$

де $V_{зв}$ – швидкість звуку ($V_{зв} = 330$ м/с);

$n = C_p / C_v$ – показник адиабати газу, тобто відношення теплоємності газу за умови постійного тиску до теплоємності за умови постійного обсягу.

У результаті це приведе до марних витрат енергії. У випадку обробки деталей великозернистим абразивом за допомогою затоплених струменів стисненого повітря необхідно враховувати відому з газодинаміки різницю тисків [1]:

$$P = \left(\frac{n+1}{2} \right)^{\frac{n}{n-1}}, \quad (3.147)$$

де $n = 1,4$.

Тоді критична швидкість V досягається при значенні $P = 0,19$ МПа, початковій температурі 300 К і становить $V = 310$ м/с. За умови більш високого тиску необхідно використовувати сопло з розширенням (надзвукове сопло Лаваля).

На рис. 3.29 показано характер зміни швидкостей плоскої деталі з орієнтацією в струмені: ребром, площиною і під кутом до потоку, а на рис. 3.30 наведено залежність відносної швидкості абразивних зерен і деталей V_{max} і V_{min} за умови орієнтації деталі у струмені: ребром $V_{д.реб.}$, площиною $V_{д.пл.}$ і під кутом до струминного потоку $V_{д.кут.}$.

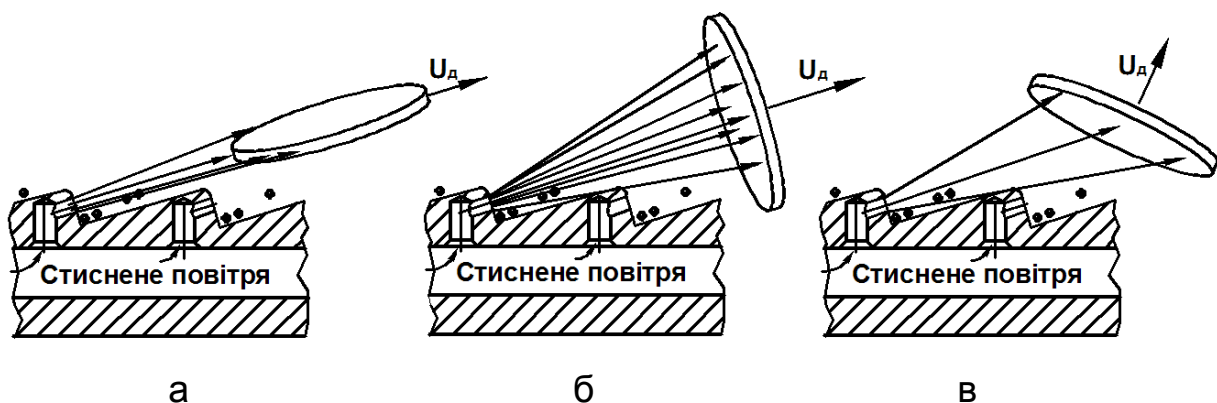


Рис. 3.29. Характер зміни швидкостей плоскої деталі з орієнтацією у струмені: а – ребром; б – площиною; в – під кутом до потоку

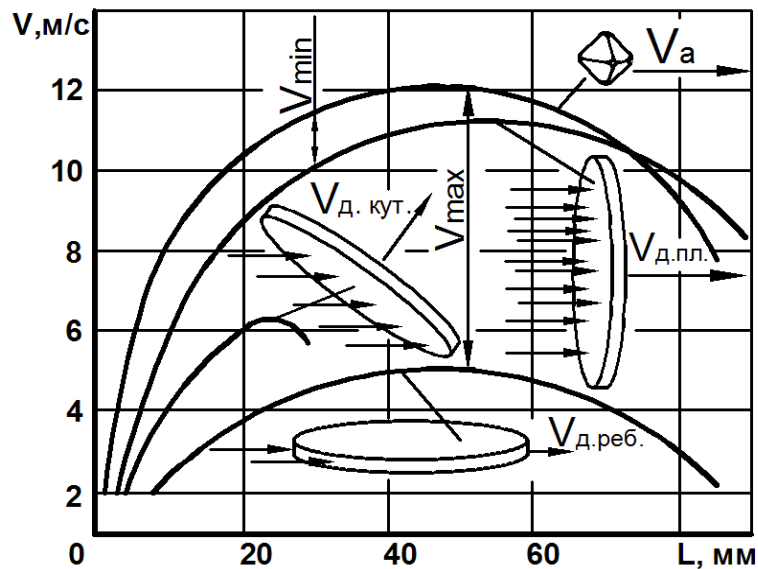


Рис. 3.30. Залежність відносної швидкості абразивних зерен і деталей V_{\max} і V_{\min} під час орієнтації деталі в струмені: ребром $V_{\text{д.реб.}}$, площиною $V_{\text{д.пл.}}$; під кутом до струминного потоку $V_{\text{д.кут.}}$.

У поздовжньому перетині струмінь, що витікає із сопла, має прямолінійні межі початкової ділянки (рис. 3.31) і, продовжуючись у цілому, утворює зрізаний конус, однією з основ якого є перетин сопла, а другою основою – певна площадка, яка зливається із загальним потоком. У початковій ділянці струменя є ядро, у якому повітря рухається з такою ж швидкістю W_0 , як і на виході із сопла.

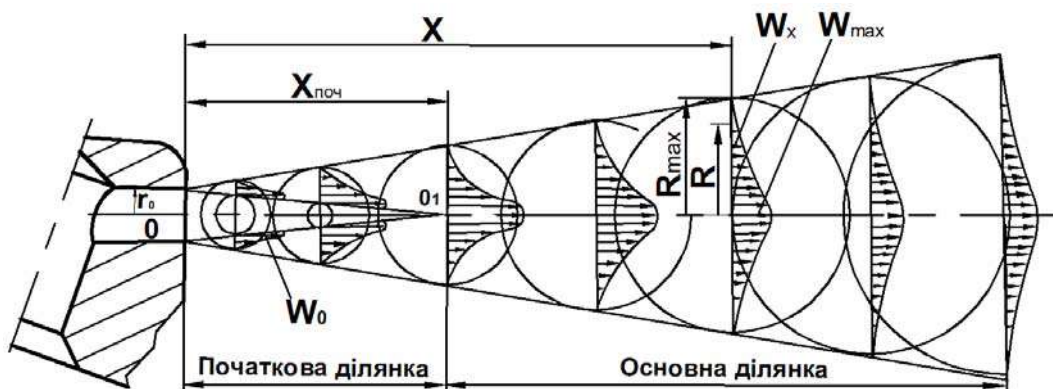


Рис. 3.31. Схема повітряного струменя в робочій камері з абразивною суспензією

Відомо [20], що за умови турбулентного режиму витікання вісесиметричного струменя швидкість W_x у довільній точці залежить від коор-

динат X і R , початкової швидкості W_0 на виході з сопла і його радіуса r_0 . Відношення швидкостей може бути виражене функцією:

$$\frac{W_x}{W_0} = f\left(\frac{X}{r_0}; \frac{R}{X}\right). \quad (3.148)$$

Об'ємна витрата повітря через будь-який поперечний переріз струменя виражається залежністю:

$$V_x = \int_s W_x \cdot dS, \quad (3.149)$$

де S – площа поперечного перерізу струменя, m^2 .

Повітряний струмінь розпорошує і захоплює рідину й абразив з навколишнього простору [57], тому об'ємна витрата повітря V_x зростає в разі збільшення координати X . Відношення об'ємної витрати газу V_x , який проходить через розглянутий перетин з координатою X , до об'ємної витрати повітря V_0 на виході із сопла, можна виразити функцією:

$$\frac{V_x}{V_0} = \int_s \frac{W_x dS}{W_0 S_0}, \quad (3.150)$$

де S_0 – площа поперечного перерізу сопла, m^2 .

Відношення кількості руху потоку в різних перетинах:

$$\frac{M_x}{M_0} = \int_s \frac{\rho \cdot W_x^2 dS}{\rho \cdot W_0^2 S_0} = f \cdot \frac{X}{r_0}, \quad (3.151)$$

де ρ – щільність потоку, kg/m^3 .

Статичний тиск у кожному поперечному перерізі струменя практично постійний і дорівнює тиску в навколишньому просторі [57], тому:

$$\frac{M_x}{M_0} = 1. \quad (3.152)$$

Оскільки маса абразивних зерен однакова, глибина відбитків на екрані є функцією їхньої кінетичної енергії, а отже, пропорційна квадрату швидкості руху абразивного зерна, яку воно мало в момент зіткнення з екраном. Тоді з великим ступенем імовірності можна стверджувати, що потоки у всіх перетинах струменя динамічно подібні й розподіл швидкостей руху абразивних зерен усередині дифузійної зони виражається однією функцією. Ці експериментальні дані [57] з високою достовірністю можна описати функцією розподілу ймовірностей Гауса з характерним значенням середнього квадратичного відхилення швидкостей руху абразивних зерен для кожного перетину:

$$\Phi(W) = \frac{1}{\sigma \cdot \sqrt{2\pi}} \cdot \int_0^{\tau} e^{-\frac{(W_x - W_{cp})^2}{2 \cdot \sigma^2}} dW, \quad (3.153)$$

де σ – середнє квадратичне відхилення швидкостей руху абразивних зерен, яке визначається за формулою:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n} \sum (W_x - W_{cp})^2 \cdot m}. \quad (3.154)$$

Для опису картини швидкостей абразивних зерен, інжекттованих осесиметричним струменем, слід знайти подвоєне значення інтеграла, який визначає половину площі, обмеженої кривою Гауса й розглянутим перетином з координатою X, яка є віссю абсцис.

Вираз (3.153) можна записати в нормованому вигляді у формі відомої функції Лапласа:

$$\Phi(t) = \frac{1}{\sigma \cdot \sqrt{2\pi}} \cdot \int_0^t e^{-\frac{t^2}{2}} dt. \quad (3.155)$$

Значення цієї функції табульовані [55] залежно від нормованого параметра розподілу t , який визначається як:

$$t = \frac{W_x - W_{cp}}{\sigma}. \quad (3.156)$$

Відомо, що розв'язання функції Лапласа залежить не від конкретних значень $(W_x - W_{cp})$ і σ , а від їх відношення, яке визначається залежністю (3.156). Розрахункові значення функції Лапласа в заданих поперечних перерізах дозволяють оцінити сумарну кінетичну енергію абразивних зерен, які інжектуються у струмінь. При цьому в межах одного поперечного перерізу

$$\frac{\Delta W}{\sigma} = t = \text{const}, \quad (3.157)$$

де $\Delta W = W_x - W_{cp}$.

Загальна оцінка основних характеристик струменя отримана експериментально-аналітичним методом на основі побудови математичної моделі з використанням запланованого експерименту. Критерієм оцінювання швидкості руху абразивних зерен, довжини початкової й основної ділянок, інжекції абразивних зерен по перетину потоку, а також кута розкриття струменя є відбитки зерен на полірованих пластинах із латуні, установлених по черзі в різних перетинах струменя у вигляді екранів. Математичні моделі становлять показникові функції вигляду:

$$X = C \cdot r_0^y \cdot P^z; \quad (3.158)$$

$$\varphi = C_1 \cdot r_0^y \cdot P^z; \quad (3.159)$$

$$X_{\text{поч}} = C_2 \cdot r_0^y \cdot P^z, \quad (3.160)$$

де X – ефективна довжина струменя;

φ – кут розкриття струменя;

$X_{\text{поч}}$ – початкова ділянка струменя;

C, C_1, C_2 – емпіричні коефіцієнти;

r_0 – радіус сопла;

P – тиск стисненого повітря;

y – показник ступеня при радіусі, який визначає його вплив на критерії ($X, \varphi, X_{\text{поч}}$);

z – показник ступеня за умови тиску стисненого повітря.

Швидкість руху абразивних зерен оцінювалася глибиною відбитків, яка вимірювалася на інтерферометрі з точністю до 0,27 мкм:

$$X = 124,3 \cdot r^{1,3} \cdot P^{0,9}; \quad (3.161)$$

$$\varphi = 17,4 \cdot \frac{r^{1,25}}{P^{0,15}}; \quad (3.162)$$

$$X_{\text{поч}} = 2,2 \cdot r^{1,9} \cdot P^{1,5}. \quad (3.163)$$

У процесі проектування струминно-абразивної установки ефективна довжина струменя й кут її розкриття є найважливішими параметрами, які визначають габаритні розміри робочої камери. Відбитки абразивних зерен на пластинах із латуні у процесі витікання стисненого повітря із циліндричних і конічних сопел у районі ядра струменя по її довжині утворюють кільцеві ділянки. Пояснюється це тим, що усередині струменя біля зрізу сопла утворюється конусоподібний потік стисненого повітря, який запобігає інжекції абразивного матеріалу усередину струменя.

Структура струменя, що витікає з надзвукового сопла Лавалю, відрізняється від згаданих струменів тим, що на його початку немає ядра (початкової частини), яке б протидіяло інжекції абразиву, як у разі використання циліндричних сопел. Цей факт є першопричиною підвищеної інжекції абразиву в струмінь, що є підставою для вибору сопла з метою обробки затопленими струменями.

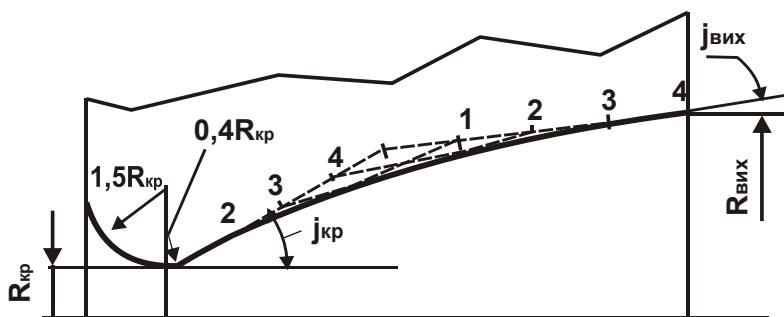


Рис. 3.32. Схема побудови контуру надзвукового сопла Лавалю [60]

Відповідно до рекомендацій, наведених у роботі [1], геометричний профіль надзвукового сопла можна одержати відповідно до схеми, наведеної на рис. 3.32. Для цього необхідно задати вихідні дані, включаючи

критичний радіус $R_{кр}$ надзвукового сопла; довжину каналу сопла, яка повинна бути не меншою ніж $10 \cdot R_{кр}$ і не більшою ніж $18 \cdot R_{кр}$; діаметр сопла

на зрізі (виході) сопла, який повинен бути не меншим ніж $3 \cdot R_{кр}$ і не більшим ніж $6 \cdot R_{кр}$. Інші параметри повинні перебувати в залежності від вихідних даних.

Геометричний метод побудови сопла дає контури, дуже близькі до оптимальних. Критичний перетин такого сопла (див. рис. 3.32) описується двома з'єднаними колами: дозвуковою частиною радіуса $1,5 \cdot R_{кр}$ і надзвуковою частиною радіуса $0,4 \cdot R_{кр}$, де $R_{кр}$ – радіус критичного (найбільш вузького) перетину сопла. До відрізка дуги радіуса $0,4 \cdot R_{кр}$ під заданим кутом $j_{кр}$ до осі сопла проводиться дотична до перетину з відрізком, який проходить через зріз сопла й нахилений до осі сопла на кут $j_{вих}$. Величини кутів нахилу $j_{кр}$ й $j_{вих}$ визначаються на підставі даних графіка, де суцільними лініями показані кути $j_{кр}$, а кути $j_{вих}$ – штриховими лініями за заданими величинами відносної довжини сопла $l/R_{кр}$ й відносного радіуса вихідного перетину $R_{вих}/R_{кр}$. Проведені під заданими кутами відрізки продовжують до взаємного перетину й ділять на рівні частини, пронумерувавши їх

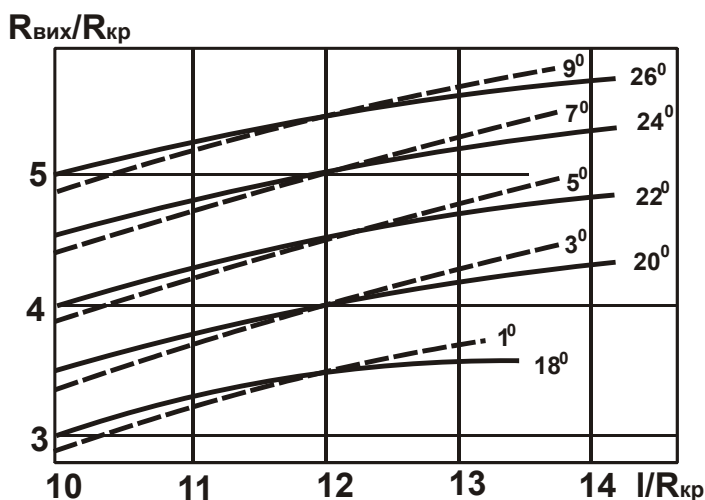


Рис. 3.33. Залежність кутів $j_{кр}$ (суцільні лінії) і $j_{вих}$ (штрихові лінії) від відносних значень довжини й радіуса на виході (зрізі) сопла [3]

відповідно до рис. 3.32. Точки розподілу ділянки від критичного перетину з'єднують із однойменними точками розподілу відрізка вихідного перетину. Крива, що обгинає отриману сітку прямих, визначає контур надзвукового сопла Лавалю.

З рис. 3.33 впливає різноманіття варіантів одержання правильного профілю надзвукового сопла. Це дає можливість розміщувати сопла й у

важкодоступних місцях робочої камери. Крім того, різні діаметри критичного перетину сопел і тиск стисненого повітря (рис. 3.34) дозволяють вибирати відповідні значення витрати стисненого повітря і довжини струменів, затоплених абразивною суспензією.

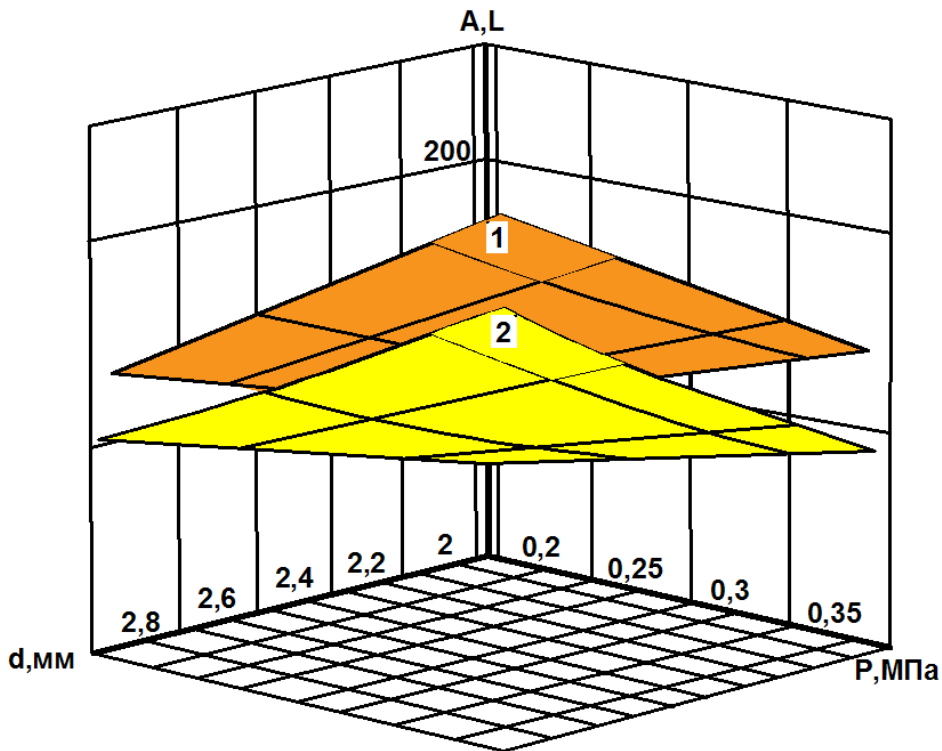


Рис. 3.34. Залежність витрати стисненого повітря A і довжини струменя L (в умовних одиницях) від тиску P й діаметра сопла d

Таким чином, у досліджуваному процесі взаємодія абразивних зерен з оброблюваним матеріалом у повітряно-крапельному середовищі є позитивною властивістю, оскільки гальмування (демпфірування) зерна перед зіткненням з оброблюваною поверхнею мінімальне. Водночас наявність невеликого демпфірування певною мірою сприяє збереженню (відсутності або, принаймні, зниженню) дроблення абразивних зерен у результаті ударів, що є запорукою стабільності технологічного процесу абразивної обробки затопленими струменями.

Крім того, застосування надзвукових сопел Лавалля дозволяє збільшити запас кінетичної енергії максимальної кількості інжектованих в струмінь абразивних зерен, що забезпечує досягнення подвійного позитивного ефекту від застосування технологічного процесу абразивної обробки затопленими струменями.

Висновки до розділу 3

1. 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. Це відкриває нові можливості для науково обґрунтованого вибору оптимальних умов абразивної обробки деталей заопленими струменями.

2. На основі спрощеного аналітичного подання динаміки взаємодії абразивного зерна з оброблюваною деталлю, що враховує лише тангенціальну складову сили різання, обґрунтовано можливість зменшення шорсткості оброблюваної поверхні при одночасному підвищенні продуктивності обробки за рахунок зменшення кута входження зерна в оброблюваний матеріал.

3. Установлено, що з урахуванням як тангенціальної, так і радіальної складових сили різання за аналітичного подання динаміки взаємодії абразивного зерна з оброблюваною деталлю траєкторія руху абразивного зерна в оброблюваному матеріалі стає криволінійною (замість прямолінійної). Це наближає розрахункові значення до експериментальних даних. Однак, як і в спрощеному аналітичному розв'язанні, зменшення шорсткості поверхні за одночасного підвищенні продуктивності обробки також обумовлене зменшенням кута входження абразивного зерна в оброблюваний матеріал, що вказує на переважний вплив тангенціальної складової сили різання у формуванні шорсткості поверхні.

4. Теоретично доведено визначальний вплив на шорсткість поверхні й продуктивність обробки швидкості руху абразивних зерен, яка на відміну від традиційної струминно-абразивної обробки істотно залежить від різних технологічних параметрів процесу.

5. Виконано розрахунок траєкторії руху абразивного зерна в оброблюваному матеріалі з урахуванням нелінійного зв'язку товщини й ширини одиничного зрізу. На основі розв'язання нелінійного диференціального рівняння другого порядку, що описує характер переміщення різального зерна в оброблюваному матеріалі, установлено, що нелінійність зв'язку товщини й ширини одиничного зрізу не вносить принципових змін у траєкторію руху абразивного зерна. Тому з достатньою для практики точністю можна користуватися спрощеним рішенням, що не враховує нелінійного зв'язку товщини й ширини одиничного зрізу.

6. Теоретично встановлено, що існує екстремальне значення кута входження зерна в оброблюваний матеріал, за якого довжина зрізу абразивним зерном буде максимальною, а процес абразивної обробки деталей затопленими струменями – найбільш ефективним з погляду інтенсивності знімання припуску. Доведено, що екстремальне значення кута входження зерна в оброблюваний матеріал може змінюватися в межах $0 \dots 30^\circ$ залежно від суми умовного кута тертя абразивного зерна з оброблюваним матеріалом та від'ємним переднім кутом різального зерна. Чим менша ця сума кутів, тим більшими можуть бути кут входження зерна в оброблюваний матеріал і відповідно довжина зрізу зерном.

7. Розрахунками встановлено, що об'єм матеріалу, який видаляється абразивним зерном, так само, як і глибина й довжина зрізу, зі зміною кута входження абразивного зерна в оброблюваний матеріал змінюється за екстремальною залежністю, проходячи точку максимуму. Причому для реальних умов струминно-абразивної обробки екстремальні значення кута входження абразивного зерна в оброблюваний матеріал близькі до нуля. Отже в разі використання методу абразивної обробки деталей затопленими струменями доцільно обробляти кромки заготовок, усувати задирки й зменшувати мікронерівності на оброблюваних поверхнях. Це узгоджується з теоретичними рішеннями, отриманими в розділі 2 на основі статичного подання процесу обробки без урахування динаміки взаємодії абразивного зерна з оброблюваним матеріалом.

8. Виконано оцінювання вірогідності отриманих теоретичних рішень. Розрахунково-експериментальним шляхом встановлено, що в процесі взаємодії абразивного зерна з оброблюваним матеріалом (латунню) під час абразивної обробки затопленими струменями умовне напруження різання (енергоємність обробки) набуває значень, які в 41,6 раз перевищують межу міцності оброблюваного матеріалу на розтягування. Це узгоджується з відомими експериментальними даними, отриманими в процесі мікрорізання (за жорсткою схемою) латуні одиничним зерном, і вказує на несприятливі умови стружкоутворення й інтенсивне тертя різального зерна з оброблюваним матеріалом (латунню). Розрахунками встановлено, що значна розбіжність між умовним напруженням різання (енергоємністю обробки) і межею міцності оброблюваного матеріалу на розтягування передбачає перехід від процесу різання до процесу пластичного деформування оброблюваного матеріалу. Із цього впли-

ває, що в процесі обробки деталей з латуні може мати місце як процес різання (з утворенням стружки), так і процес пластичного деформування матеріалу (без утворення стружки).

9. Теоретично встановлено, що основною умовою підвищення інтенсивності знімання матеріалу в процесі абразивної обробки деталей затопленими струменями є збільшення кінетичної енергії абразивного зерна, що рухається, за рахунок збільшення швидкості його руху й зернистості абразиву. Це досягається застосуванням ефективних технологічних рішень щодо керування потоками руху абразивних зерен і оброблюваних деталей, наприклад, збільшенням тиску, що діє на абразивне зерно з боку повітряного струменя, і відстані від сопла до оброблюваної деталі.

10. Аналізуючи вектори швидкостей руху абразивних зерен (у відносному вимірі), розсіювання величин яких має форму кривих нормального розподілу Гауса, можна судити про відношення величини середнього квадратичного відхилення в різних перетинах струменя. Так, порівнюючи криву Гауса на початку основної ділянки й у фіксованому перетині можна стверджувати, що квадратичне відхилення в цьому перетині в два рази більше. Отже, більше й розсіювання швидкостей, що для даного методу обробки небажано.

11. З огляду на специфіку струминно-абразивної обробки деталей, вільно поміщених у робочу камеру, ефективна обробка може досягатися в разі забезпечення значного градієнта швидкостей потоків у зоні знаходження оброблюваної деталі. У зв'язку із цим поперечні перерізи потоків абразиву в струменях повинні бути меншими габаритних розмірів деталей, тоді швидкість зерен буде більшою від швидкості переміщення оброблюваних деталей. Таким чином, зменшення діаметрів сопел для обробки дрібних деталей має привести до підвищення продуктивності обробки порівняно з обробкою в робочих камерах з більшими діаметрами сопел.

12. Відповідно до закону нормального розподілу кількість абразивних зерен, які мають максимальну швидкість i , як наслідок, максимальний запас кінетичної енергії, обмежується точками перегину кривої на відстані квадратичного відхилення $\pm \sigma$ від її вершини. Частина $\pm 2\sigma$ струменя, що залишилася, неефективна, тому може бути зайнята суміжними струменями, наприклад, зустрічного напрямку.

Розділ 4. Методики проведення експериментальних досліджень абразивної обробки деталей затопленими струменями

4.1. Загальна методика проведення експериментальних досліджень

Отримані в розділах 2 і 3 роботи на основі аналізу механіки утворення мікрорізів теоретичні рішення дозволили розкрити фізичну сутність і обґрунтувати основні напрями ефективного застосування методу абразивної обробки деталей затопленими струменями. Однак дані рішення отримані без урахування багатьох важливих параметрів обробки, які достатньо складно описати математично. Це стосується опису руху оброблюваних деталей у потоці рідини, хаотичного руху абразивних зерен під впливом повітряного струменя, визначення швидкості руху й кількості зіткнень абразивних зерен з оброблюваною деталлю та ін. Тому становить інтерес порівняння отриманих теоретичних рішень із результатами експериментальних досліджень технологічних параметрів процесу обробки. Оскільки теоретичні рішення, по суті, визначають потенційні технологічні можливості розглянутого процесу, то за ступенем розбіжності теоретичних і експериментальних результатів досліджень можна буде визначити причини недовикористання можливостей обробки і шляхи їх усунення. Тому запропонований підхід дозволить максимальною мірою виявити, обґрунтувати й реалізувати потенційні можливості такого складного за фізичною природою методу абразивної обробки деталей затопленими струменями.

У зв'язку із цим на першому етапі проведення експериментальних досліджень поставлене завдання визначення характеру утворення мікрорізів на оброблюваній поверхні деталі в результаті її взаємодії з окремими абразивними зернами, що рухаються. Для цього необхідно провести комплексні експериментальні дослідження закономірностей утворення мікрорізів для різних умов обробки. При цьому важливо встановити роль процесів різання (стружкоутворення) і пластичного деформування в утворенні мікрорізів, тобто встановити, який із цих процесів домінує в утворенні мікрорізів. Важливо також визначити геометричні

параметри мікрорізів, їхню кількість і характер розташування на оброблюваній поверхні деталі, кількість абразивних зерен (зі всіх зерен, які проконтактували з оброблюваною поверхнею), які привели до утворення мікрорізів. Отримані таким чином експериментальні дані дозволять відповісти на наступні питання: чи достатньо кінетичної енергії абразивного зерна, що рухається, щоб утворити мікроріз на оброблюваній поверхні, і якою повинна бути в цьому випадку швидкість руху зерна; на якій ділянці оброблюваної поверхні найбільш імовірно утворення мікрорізів – на площині чи торцях оброблюваної деталі. В остаточному підсумку це дозволить оцінити вірогідність отриманих теоретичних рішень, згідно з якими найбільш ефективно застосування методу абразивної обробки деталей затопленими струменями для усунення задирок, округлення гострих кромки заготовки і зменшення шорсткості оброблюваної поверхні.

На другому етапі проведення експериментальних досліджень поставлене завдання встановлення закономірностей формоутворення поверхонь під час абразивної обробки деталей затопленими струменями, тобто визначення параметрів якості обробки. При цьому важливо встановити емпіричні залежності для визначення інтенсивності знімання матеріалу й шорсткості оброблюваної поверхні з урахуванням у тому числі й тих параметрів процесу, які не були враховані в аналітичних залежностях у зв'язку зі складністю їх математичного подання. Отримані таким чином емпіричні залежності дозволять кількісно оцінити вплив різних параметрів обробки на вихідні (технологічні) показники процесу. Виходячи із цього буде встановлено, наскільки результати теоретичних досліджень відрізняються від експериментальних даних, які параметри обробки впливають на вихідні (технологічні) показники процесу й за рахунок яких факторів можна досягти найбільш істотного підвищення ефективності обробки. Спільний аналіз аналітичних і емпіричних залежностей дозволить більш повно розкрити фізичну сутність розглянутого процесу і його технологічні можливості, науково обґрунтовано підійти до вибору раціональних параметрів обробки й визначення умов ефективного застосування методу абразивної обробки деталей затопленими струменями. Необхідно зауважити, що першому етапу експериментальних досліджень технологічних закономірностей абразивної обробки деталей затопленими струменями присвячений розділ 5 роботи, а другому етапу – розділи 6 і 7 роботи.

4.2. Методика визначення швидкості руху абразивних зерен

Як було зазначено, спосіб одержання декоративної поверхні за допомогою струменів стисненого повітря, затоплених абразивною суспензією, відрізняється від аналогічних способів тим, що абразивний матеріал, який перебуває у складі абразивної суспензії, приєднується до струменя стисненого повітря за межами сопла, а не прокачується через нього, що, як правило, приводить до швидкого зношування, насамперед, каналу сопла. Оскільки в процесі абразивної обробки затопленими струменями використовується вільний зернистий абразив, то повністю виключаються припикання, температурні й силові деформації оброблюваних деталей. Управляючи швидкістю й концентрацією абразивних часток у повітряному струмені, який їх несе, можна одержати не тільки декоративну поверхню, але й очистити її від окисної плівки, окалини, корозії, лакофарбових покриттів, видалити задирки, округлити гострі кромки, виключити утворення відблисків завдяки утворенню матової поверхні, зміцнити поверхневий шар, підготувати поверхні під гальванопокриття. Привабливою стороною абразивної обробки затопленими струменями є висока стійкість повітряних сопел, можливість застосування для обробки деталей складної просторової форми, безперервність процесу, керованість процесом і простота технологічного устаткування.

Повітряно-абразивний струмінь, затоплений в абразивній суспензії, належить до гетерогенного динамічного середовища – до класу водоповітряної абразивної суспензії, основною особливістю якої є спільний рух повітряного середовища, краплі рідини й розподілених у ній абразивних часток. При цьому повітряна фаза є несучим середовищем, її рух визначає рух абразивних зерен і краплі рідини.

Найважливішою частиною дослідження є визначення швидкості руху абразивних часток, отриманої ними в процесі струминно-абразивної обробки по довжині й ширині повітряно-абразивного струменя.

Одержання достовірної величини швидкості руху абразивних часток дозволить виявити найбільш ефективну конструкцію сопла (конфігурацію й габаритні розміри), раціональну відстань оброблюваної поверхні від зрізу сопла, оптимальну відстань між сусідніми соплами, марку і зернистість абразивного матеріалу (порошку), а також режим подачі стисне-

ного повітря (шпаруватість імпульсів, тобто відношення періоду повторення до тривалості імпульсу).

Технологічні характеристики струменя визначаються його обробною здатністю, що залежить від кінетичної енергії удару абразивних часток, концентрації, а також їхньої різальної здатності.

Оскільки маса абразивних зерен у процесі обробки незмінна, доцільним є досягнення максимально можливої швидкості руху часток, від яких залежить глибина відбитків на оброблюваній поверхні.

Швидкість руху абразивних часток визначають за допомогою циліндра 1 (рис. 4.1), що обертається із заданою швидкістю з отвором 2, внутрішній діаметр якого виражає відстань H від зрізу сопла до оброблюваної поверхні. У середині циліндра 1 нерухомо встановлений плоский розтруб 3 на кронштейні 4 так, що вісь його симетрії збігається з віссю пневматичного сопла 5. Над зрізом сопла встановлено жолоб з абразивними частками 6. На протилежній відносно отвору внутрішній поверхні циліндра розташовано екран 7 з липким шаром для вловлювання часток.

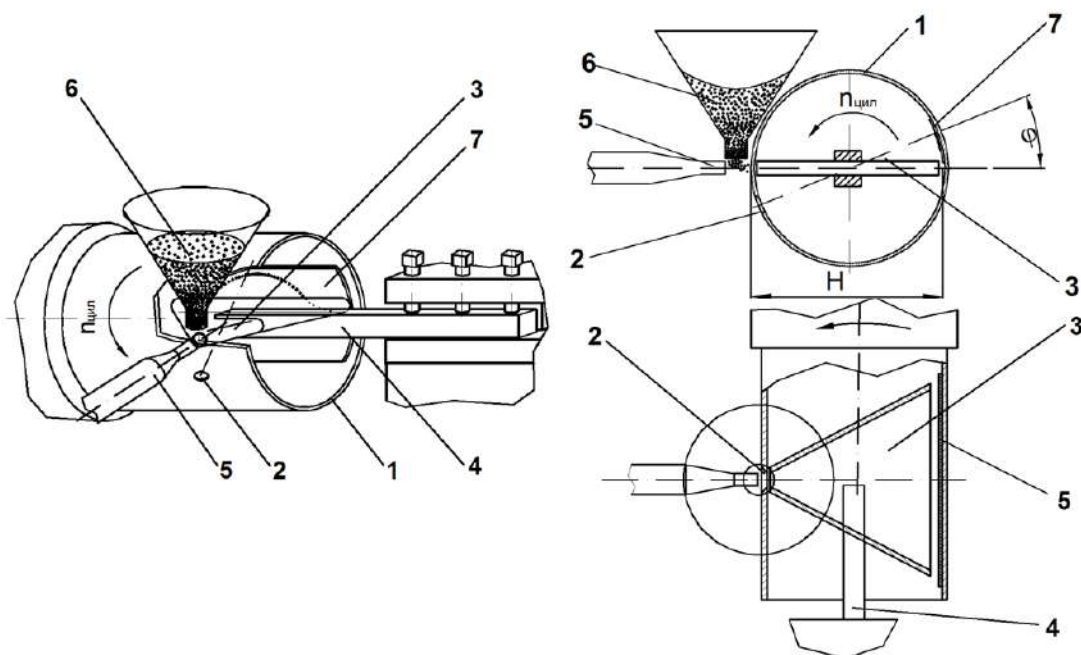


Рис. 4.1. Пристрій для визначення швидкості руху абразивних часток у струмені стисненого повітря

Експерименти проведено на базі токарного верстата з різними діаметрами циліндрів і відповідних розмірів розтрубами. Частоту обертання шпинделя (циліндра) визначено за допомогою електронного тахометра мод. DT-2234C⁺ (рис. 4.2).



Рис. 4.2. Електронний тахометр моделі DT-2234C⁺

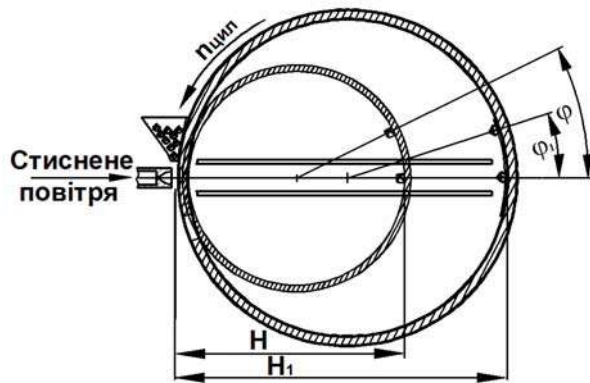


Рис. 4.3. Схема визначення швидкості руху частки

На рис. 4.3 наведено схему розташування попереднього й наступного циліндрів. На основі проведених дослідів із двома діаметрами циліндрів було отримано швидкості в п'яти точках, тобто в початковій, середній і кінцевій точках для першого циліндра, а також у середній і кінцевій точках для другого циліндра. Циліндр із отвором закріплювали в трикулачковому патроні, а сопло, жолоб з абразивним порошком і плоский розтруб – у різцеутримувачі. Пневматичне сопло сполучали з радіальним отвором у циліндрі й віссю симетрії плоского розтруба. Циліндру задавали певну частоту обертання, через сопло подавали стиснене повітря, а з жолоба подавали абразивний матеріал.

У моменти співпадання отвору циліндра з отворами сопла й плоского розтруба порція абразивних часток проходить довжину розтруба й, досягши протилежної внутрішньої липкої поверхні циліндра, залишається на ній.

За час проходження абразивною часткою діаметра циліндра (усередині нерухомого розтруба), циліндр повернеться на деякий кут φ . Величина кута φ спільно з відомими частотою обертання циліндра $n_{\text{цил}}$ і його діаметром дозволяють визначити середню швидкість руху абразивних часток на ділянці від зрізу сопла до протилежної стінки циліндра, тобто на ділянці H :

$$\tau = \frac{H_{\text{цил}}}{V_{\text{абр}}} = \frac{l_{\text{дуги}}}{V_{\text{цил}}}, \quad (4.1)$$

де τ – час польоту абразивної частки усередині циліндра й одночасно повороту циліндра на кут φ , с;

$H_{\text{цил}}$ – шлях польоту абразивної частки всередині циліндра (відстань до оброблюваної поверхні), м;

$V_{\text{абр}}$ – середня швидкість руху абразивної частки на шляху H , м/с;

$l_{\text{дуги}}$ – довжина дуги повороту циліндра, яка відповідає куту φ , м;

$V_{\text{цил}}$ – лінійна швидкість циліндра, м/с.

Із залежності (4.1) випливає:

$$V_{\text{абр}} = \frac{H_{\text{цил}} \cdot V_{\text{цил}}}{l_{\text{дуги}}}. \quad (4.2)$$

Параметри $V_{\text{цил}}$ і $l_{\text{дуги}}$ слід подати через відомі формули:

$$V_{\text{цил}} = \frac{\pi \cdot H_{\text{цил}} \cdot n_{\text{цил}}}{1\,000}; \quad (4.3)$$

$$l_{\text{дуги}} = \frac{\pi \cdot H_{\text{цил}} \cdot \varphi}{360}. \quad (4.4)$$

Підставивши формули (4.2) і (4.3) в (4.1), одержимо:

$$V_{\text{абр}} = \frac{\frac{H_{\text{цил}} \cdot \pi \cdot H_{\text{цил}} \cdot n_{\text{цил}}}{1\,000}}{\frac{\pi \cdot H_{\text{цил}} \cdot \varphi}{360}}. \quad (4.5)$$

Тоді середню швидкість руху абразивної частки буде виражено наступною формулою:

$$V_{\text{абр}} = \frac{360 \cdot H_{\text{цил}} \cdot n_{\text{цил}}}{1\,000 \cdot \varphi}. \quad (4.6)$$

Отримана формула проста й зручна для визначення середньої швидкості абразивного зерна на ділянці, яка відповідає діаметру циліндра. Для визначення швидкості на інших ділянках необхідно використо-

увати циліндри відповідного діаметра. Інші параметри, тобто частота обертання циліндра $n_{\text{цил}}$ і кут зсуву циліндра φ , визначаються на основі проведених експериментів.

4.3. Методика вибору конфігурації сопла для абразивної обробки затопленими струменями

Визначення оптимальних параметрів сопел є одним із найбільш важливих напрямів досліджень процесу абразивної обробки затопленими струменями. Використання розробленої методики визначення швидкості руху абразивних часток дозволило виявити найбільш ефективне сопло (рис. 4.4 і 4.5). Технологічні можливості сопел різної конфігурації [94] досліджували з урахуванням швидкості руху абразивних зерен і розмірів їхніх відбитків на спеціальних полірованих латунних екранах. Отримані відбитки оцінювали за допомогою профілографа-профілометра моделі 201.

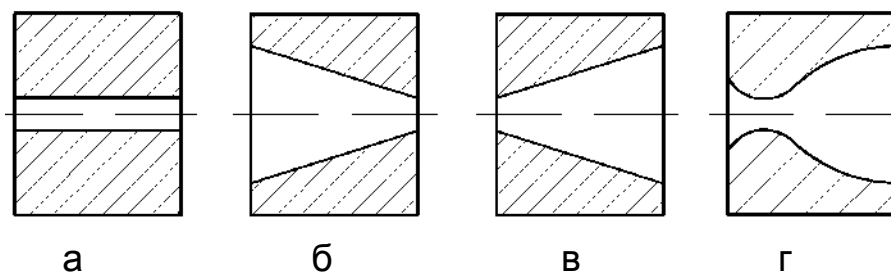


Рис. 4.4. Сопла для обробки затопленими струменями:

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

У табл. 4.1 наведено фотографії й профілограми відбитків абразивних зерен, інжектованих у струмінь стисненого повітря, затопленого в абразивній суспензії. У результаті численних дослідів установлено відсутність початкової ділянки та ядра струменя, характерного для струменів, які витікають із циліндричних сопел. За наявності початкової ділянки у процесі дослідження циліндричних сопел на екранах утворювалися кільцеві сліди, які окреслювали діаметр перетину ядра. Цим можна пояснити більшу кількість абразивних зерен, залучених у струмінь, а отже й більшу ефективність процесу.

Як приклад, у табл. 4.1 наведено відбитки тільки струменів із сопел Лаваля. Умови й режими обробки: абразивна обробка зразка з латуні ЛС59.1 затопленим струменем протягом 5 с. Застосовано сопло Лаваля, діаметр критичного перетину 2 мм, відстань від зрізу сопла 10 мм, тиск стисненого повітря 0,5 МПа, зернистість абразивного зерна 63С (карбїду кремнію зеленого) № 40 (400 мкм), зерновий склад 63П.

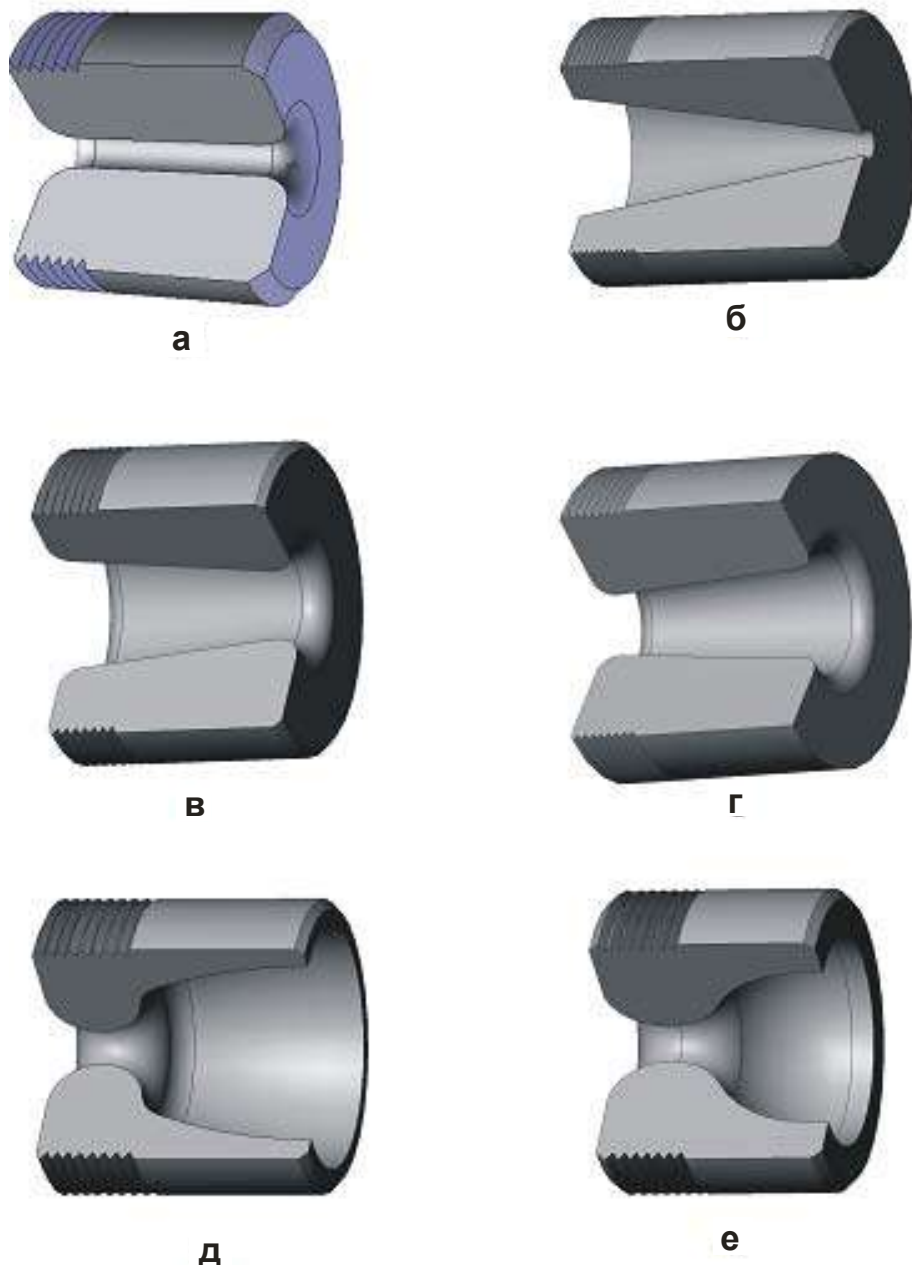


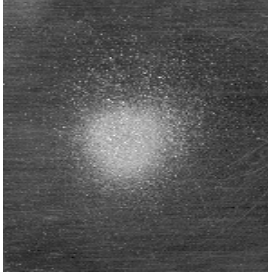



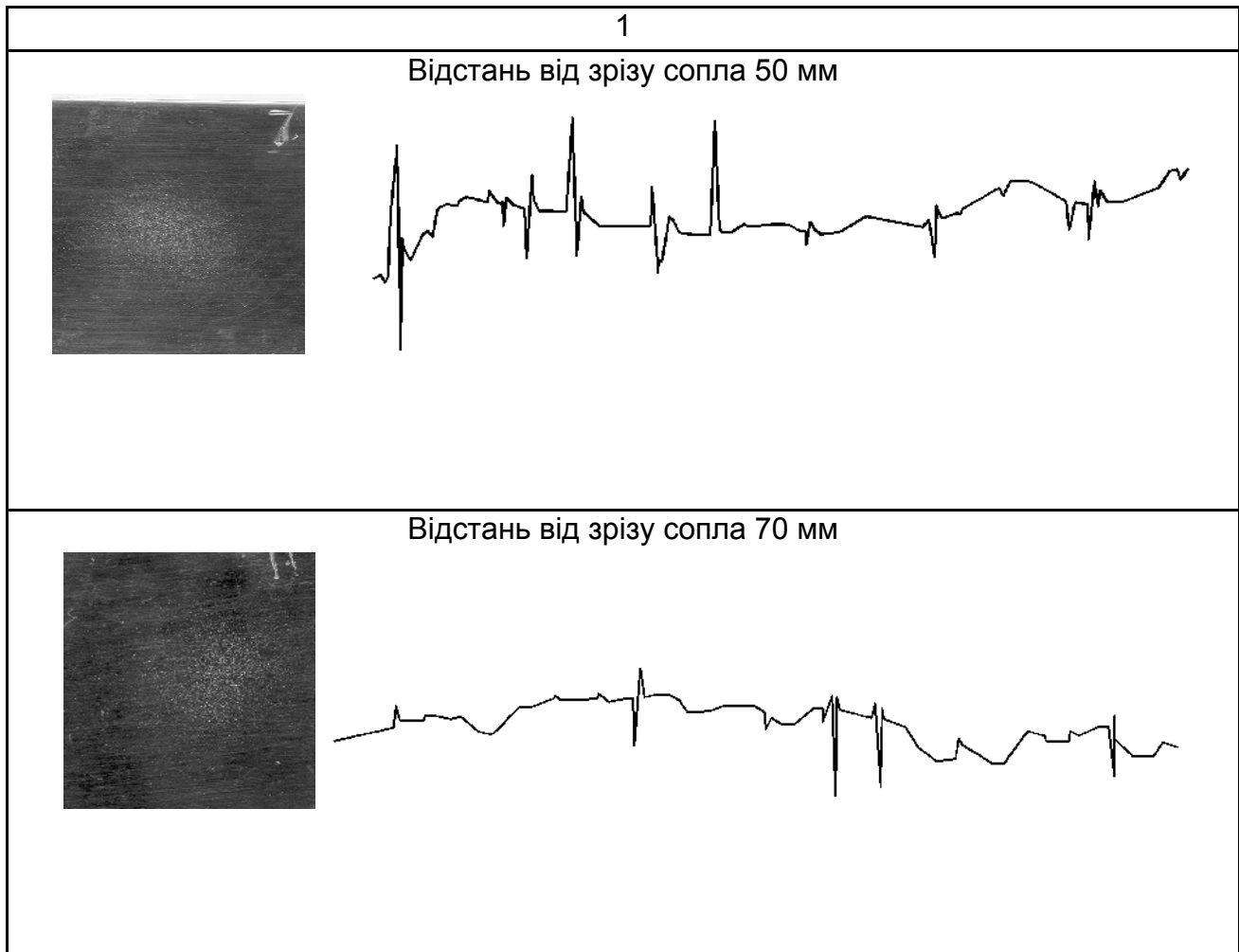


Рис. 4.5. Конструкції сопел: а – циліндричне; б – зі оберненим конусом (критичний діаметр – 1,5 мм); в – зі оберненим конусом (критичний діаметр – 2,5 мм); г – із прямим конусом (критичний діаметр – 2,5 мм); д – сопло Лаваля; е – укорочене сопло Лаваля

Приклад вихідних даних для вибору конфігурації повітряного сопла, габаритних розмірів і компонування інших елементів робочої камери

Відбитки абразивних зерен на поверхні контрольного зразка й відповідні їм профілограми з вертикальним збільшенням 4 000; з горизонтальним збільшенням 200	
1	
Відстань від зрізу сопла 10 мм	
	
Відстань від зрізу сопла 20 мм	
	
Відстань від зрізу сопла 30 мм	
	



Швидкості руху абразивних часток центральної частини струменя отримані на основі наступних міркувань.

Оскільки абразивні частки приєднуються до струменя стисненого повітря після зрізу сопла, їхня початкова швидкість руху дорівнює нулю. Ґрунтуючись на раніше наведених даних та враховуючи, що на початковій ділянці абразивні частки рухаються рівноприскорено, середню швидкість руху слід визначати за відомою формулою:

$$V_{\text{cp}} = \frac{V_0 + V}{2}. \quad (4.7)$$

Тоді з урахуванням нульової початкової швидкості руху абразивної частки до моменту зіткнення кінцева швидкість складе:

$$V = 2 \cdot V_{\text{cp}}. \quad (4.8)$$

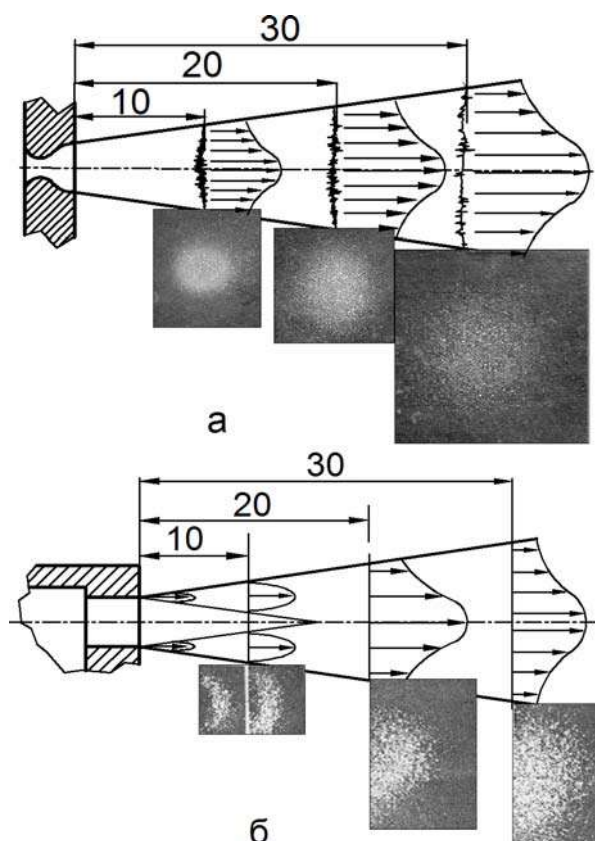


Рис. 4.6. Схеми струменів, побудованих за відбитками зерен на латунних зразках: а – ті, що витікають із сопла Лаваля; б – ті, що витікають із циліндричного сопла

абразивних зерен на аналогічних екранах. За відбитках у початковому перетині (на відстані 10 мм) можна побачити, що в осьовому перетині абразивні зерна в струмені були відсутні. Відповідно до роботи [1], у початковому перетині струменя є ядро у вигляді конуса з тиском, який відповідає тиску в каналі сопла, у зв'язку із чим інжекція абразивних зерен у ядро струменя неможлива.

4.4. Методика визначення ділянки струменя з максимальною швидкістю руху абразивних зерен

У наступних перетинах середню швидкість руху абразивних зерен визначали, обробляючи експериментальні дані, отримані за результатами дослідів на циліндрах із діаметрами 40 і 70 мм.

На рис. 4.6 у вигляді схем наведено потоки абразивних зерен, приєднаних до струменів, що витікають із сопла Лаваля (схема а) та із сопла із циліндричним каналом (схема б). Потоки абразивних зерен виявляли за допомогою полірованих латунних екранів, по черзі встановлюваних у різних перетинах струменів. Відбитки на екранах за схемою, показаною на рис. 4.6а, на початковій ділянці суцільні, тобто абразивні зерна інжектуються в струмінь відразу ж після зрізу сопла. Це пояснюється тим, що частина сопла Лаваля, що розширюється, створює низький тиск уже у вихідному перетині. Це і є причиною швидкого заповнення перетину струменя абразивними зернами. На схемі, показаній на рис. 4.6б, наведено потік абразивних зерен, який залишив відбитки

Середня швидкість руху абразивних зерен на ділянках від 0 до 40 мм дорівнює $V_{\text{ср} \cdot 60} = 29,2$ м/с.

Час для проходження абразивним зерном діаметра циліндра визначали із залежності:

$$\tau = \frac{H_{\text{цил}}}{V_{\text{ср}}} \quad (4.9)$$

Тоді:

$$\tau_{40} = \frac{0,04}{34,65} = 0,00129, \quad (4.10)$$

де t_{40} – час проходження циліндра діаметром 40 мм;

$$V_{40} = \frac{360 \cdot 70 \cdot 770}{1000 \cdot 11} = 29,4 \text{ м/с.} \quad (4.11)$$

Час для проходження зерном циліндра діаметром 70 мм:

$$t_{70} = \frac{0,07}{29,2} = 0,00239 \text{ с.} \quad (4.12)$$

Час для проходження зерном ділянки від 40 до 70 мм слід визначати як різницю:

$$t_{40-70} = t_{70} - t_{40}; \quad t_{40-70} = 0,00239 - 0,00129 = 0,0011 \text{ с.} \quad (4.13)$$

Швидкість руху на ділянці від 40 до 70 мм слід визначати так:

$$V_{40-70} = \frac{0,07 - 0,04}{0,0011} = 27,2 \text{ м/с.} \quad (4.14)$$

Аналогічно виконано розрахунки для поздовжніх перетинів струменя у міру віддалення від осі в радіальному напрямку в межах плоского розтруба. Отримані результати свідчать про значну різницю у швидкостях руху абразивних часток, які проходять через сопло, й часток, що приєднуються до струменя, затопленого абразивною суспензією, а отже,

й про кінетичну енергію, повідомлювану часткам у першому й другому способах струминно-абразивної обробки.

4.5. Методика визначення продуктивності абразивної обробки затопленими струменями

Досліджуваний технологічний процес призначений для видалення задирок і одержання матової поверхні з досягненням заданої шорсткості поверхонь, у зв'язку із чим оцінювання ефективності обробки має бути засноване на кількісній зміні стану кромek деталей, а також шорсткості обробленої поверхні.

Як уже було показано, видалення задирок є процесом багаторазової пластичної деформації й поступового видалення мікрооб'ємів металу з поверхневого шару, у тому числі й кромek деталей. У зв'язку із цим оцінювання продуктивності обробки затопленими струменями може бути здійснене шляхом підрахунку кількості слідів абразивних часток, отриманих у результаті обробки протягом, наприклад, 1 хвилини, охоплюваних полем об'єктива мікроскопа на поверхні зразків. При цьому сліди абразивних зерен на контрольних зразках відрізняються розмірами й формою, що ускладнює одержання об'єктивної оцінки продуктивності процесу. Однак у межах поверхні одного зразка не дуже складно підрахувати кількість рівноцінних слідів на контрольних площадках, обмежених полем видимості мікроскопа.

Другим методом оцінювання продуктивності абразивної обробки затопленими струменями вважають величину зменшення маси контрольних зразків, оброблених затопленими в абразивній суспензії струменями стисненого повітря протягом 30 хвилин.

Оскільки видалення часток металу з поверхні оброблюваних деталей, як показано в роботі [7], відбувається в 5 – 6 % ударів абразивних зерен, оцінювання продуктивності в цьому випадку має низьку чутливість, що значною мірою знижує конкурентоспроможність даного методу оцінювання. Якість матової поверхні визначають за рівнем відбивної здатності поверхні з одночасним контролем шорсткості поверхонь або вимірюваннями висоти мікронерівностей обробленої поверхні. Дослідження поверхні зразків дозволило виявити закономірності зміни інтенсивності впливу зерен у міру наближення до кромek оброблюваної деталі.

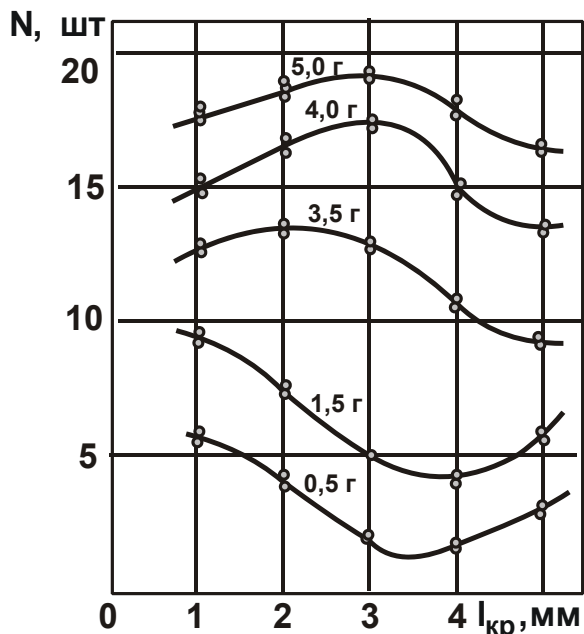


Рис. 4.7. Залежність N від $I_{кр}$
 Умовні позначення: m_d – одинична маса, яка зазначена над кривими.

На рис. 4.7 показаний зв'язок між щільністю розподілу відбитків зерен N на поверхні зразків із латуні, відстанню до кромки $I_{кр}$ й одиничною масою зразків m_d (тобто різною формою й масою). Як видно, максимальна кількість слідів часток для деталей масою від 0,5 до 3,5 г припадає на кромки, а для деталей більшої маси максимум дещо зміщений до середньої частини. Це тому, що деталі з меншою масою здатні протистояти потоку стисненого повітря, рідини й абразивного матеріалу тільки тоді, коли вони орієнтовані кромками до сопел, тоб-

то положенням, які відповідають найменшому лобовому опору.

Деталі з більшою масою утримуються в струминному потоці триваліший час і орієнтуються майже рівнозначно сторонами, які відповідають меншому й більшому лобовому опору. Таким чином установлено, що для листових штампованих деталей масою від 0,5 до 3,5 г металознімання локалізується уздовж кромки, де й розташовані задирки. У зв'язку із цим зручним критерієм з погляду простоти контролю є величина металознімання з контрольних зразків за одиницю часу. Тим паче, що визначення маси зразків до й після обробки з високою точністю можна здійснювати на аналітичних вагах з маніпулятором для важелів.

Крім зазначених якостей, критерій оптимізації регламентується необхідністю пропорційної залежності від часу. Із цією метою проведено експерименти зі зважуванням спеціально виготовлених контрольних зразків з листової латуні ЛС59-1 ($\sigma = 294$ МПа) і берилієвої бронзи БрБ2 ($\sigma = 588$ МПа). На основі проведених дослідів побудовано графіки, де по осі абсцис відкладено час обробки τ у хвилинах, а по осі ординат – знімання металу M у грамах. Із графіків, наведених на рис. 4.8, видно, що збільшення знімання металу M незалежно від межі міцності металу відбувається пропорційно до часу обробки протягом усього періоду, тому ефективність процесу можна характеризувати зніманням металу [19].

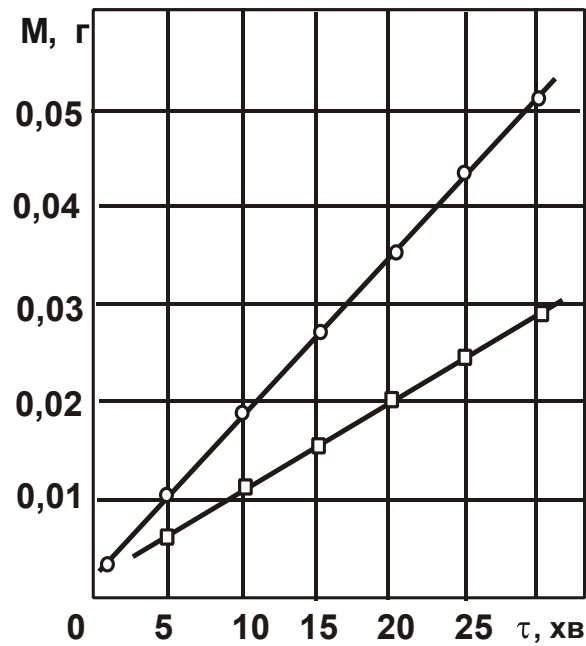


Рис. 4.8. Залежність знімання металу M від часу обробки τ

Умовні позначення: \circ – зразки із латуні ЛС59-1 ($\sigma = 294$ МПа); \square – зразки із берилієвої бронзи БрБ2 ($\sigma = 588$ МПа).

Таким чином на основі проведених досліджень встановлено, що максимальна кількість слідів часток для плоских деталей масою від 0,5 до 3,5 г, припадає на кромки, а для компактних за формою деталей характерний рівномірний розподіл слідів абразивних зерен.

4.6. Методика дослідження топографії поверхні деталі після струминно-абразивної обробки

Дотепер одержання чіткого зображення мікрорельєфу поверхні в разі більш ніж 200 – 300-кратного збільшення під оптичним мікроскопом практично неможливо через малу глибину різкості. Застосування електронного мікроскопа пов'язане зі значними витратами на підтримання його в робочому стані, трудомісткістю підготовки й складністю пошуку фрагментів поверхні, що цікавлять дослідника. У зв'язку із цим для детального вивчення стану рельєфу поверхні використано методику комп'ютерного тривимірного моделювання за допомогою мікроінтерферометра з електронною камерою *ScopeTek MDC 140N*. Моделювання рельєфу поверхні за допомогою переходу від фрагментарних горизонтальних (пошарових) знімків перетинів мікрорельєфу *ScopePhoto* до тривимірного топографічного подання дозволило досліджувати тенденцію зміни мікро-

рельєфу. Для побудови моделі використовували програмне середовище тривимірного моделювання *Helicon 3D Viever*.

Побудову тривимірної моделі поверхні здійснювали в кілька етапів. На першому етапі збирали фотоінформацію для одержання чіткого зображення елементів рельєфу від найбільш глибокої западини до найбільш високого виступу. Для цього на досліджуваній поверхні з різкістю, яка відповідає максимальній глибині мікрорельєфу, виконували знімок, який заносили в базу даних (електронну папку). Далі із кроком 2 мкм переводили різкість вгору до найбільш високої точки мікрорельєфу, виконуючи в кожному перетині знімок, і заносили його в базу даних. Далі, на другому етапі, для можливості обробки за допомогою обчислювальної техніки виконувалися: аналіз, селекція й підсумовування знімків для одержання результативного зображення. На наступному етапі запускали програмне середовище тривимірного моделювання *Helicon 3D Viever* і відкривали отриману базу даних. Файли зі знімками, отримані на різних висотах, передавалися в середовище тривимірного моделювання *Helicon 3D Viever*. Наступним етапом було створення базової моделі поверхні. Далі базова модель візуалізувалася відповідно до отриманих знімків і набувала форми поверхні, адекватної реальній. У результаті створено ряд моделей поверхонь з використанням мікроінтерферометра моделі MII-4B42 (рис. 4.9а), модернізованого з метою одержання зображення на моніторі комп'ютера (рис. 4.9б).



Рис. 4.9. Мікроінтерферометр моделі MII-4B42 (а)
і мікроінтерферометр моделі MII-4B42 з електронною насадкою
моделі *ScopeTek MDC 140N* фірми "Levenhuk"

Моделювався стан поверхні до обробки й через кожні 2 – 5 с, а також через 15 – 20 хв обробки. Відповідно до запропонованого алгоритму було отримано знімки, а також моделі оброблених у процесі струминно-абразивної обробки поверхонь зразків з латуні ЛС59-1 (рис. 4.10 і 4.11).

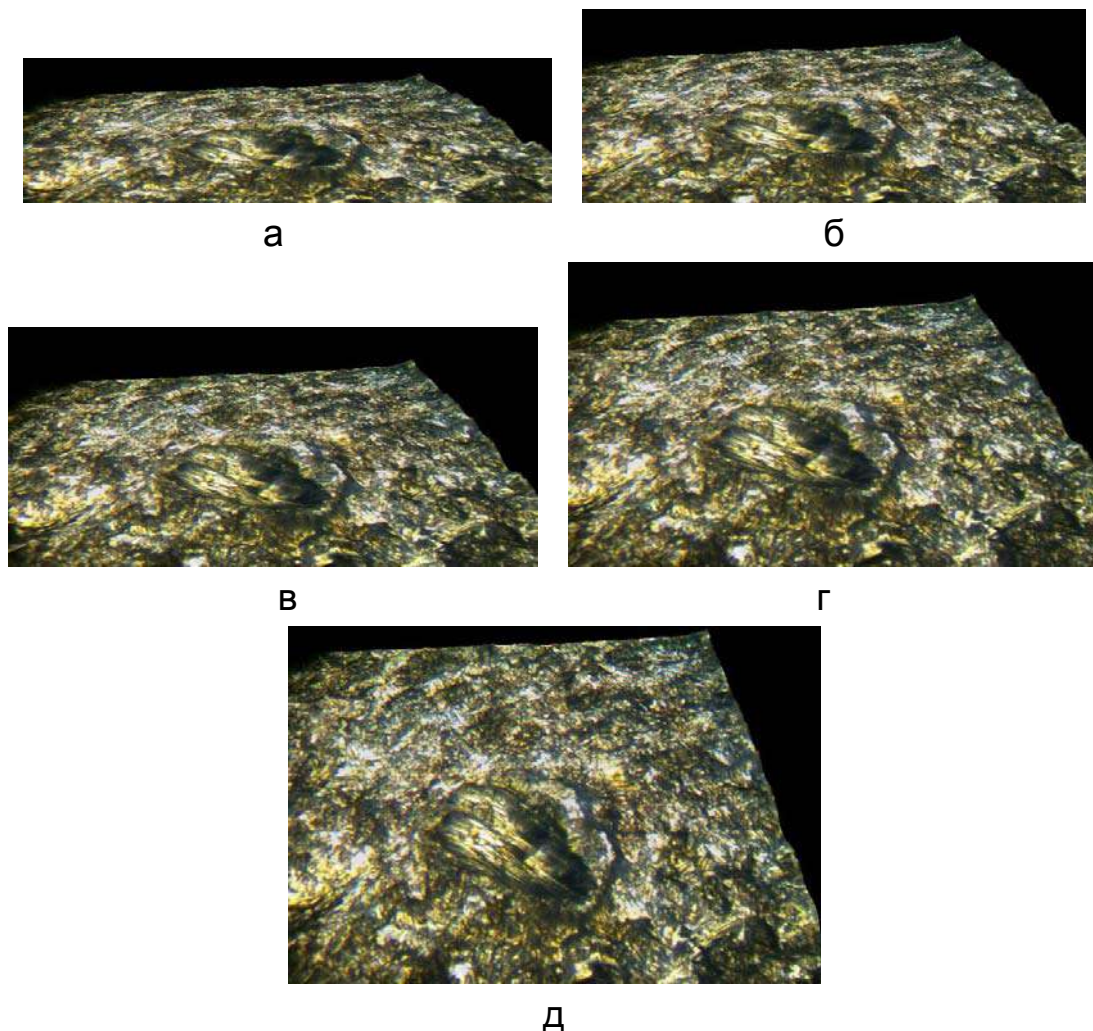


Рис. 4.10. Панорама поверхні деталі з латуні ЛС59.1 зі слідом абразивного зерна після 5 с абразивної обробки затопленими струменями при куті зору: а – 7°; б – 15°; в – 30°; г – 45°; д – 60°

Профіль сліду абразивної частки одержано наступним чином. Два попередньо відполірованих квадратних зразки (35×35 мм) товщиною 2 мм із латуні ЛС59-1 щільно з'єднано гвинтами, щоб вони були повернуті полірованими поверхнями один до одного. У результаті одержано чотири торцевих поверхні, що містять межі між двома зразками. Ці поверхні обробляли фрезеруванням з подачами, які відповідають одержанню шорсткості поверхні $R_{\max} = 1,4$ мкм; $R_{\max} = 2,25$ мкм; $R_{\max} = 3,1$ мкм, і одну з

поверхонь полірували. Оброблені торці з'єднаних зразків піддавали абразивній обробці затопленими струменями протягом 30-ти секунд. Після промивання зразки рознімали й вивчали кромки під мікроскопом зі сторони рознімання, використовуючи методику, наведену в даному розділі.

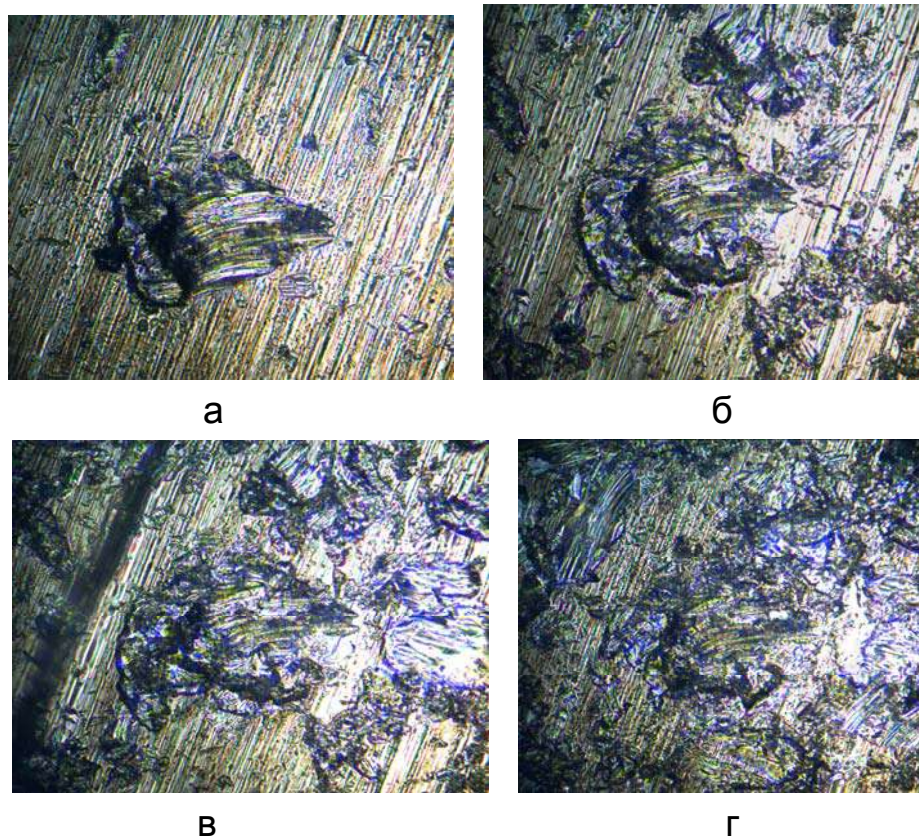


Рис. 4.11. Фрагмент шліфованої поверхні з послідовною зміною сліду абразивного зерна: а – 1 с обробки; б – 2 с; в – 3 с; г – 8 с

Таким чином, розроблено модель половини сліду (у поздовжньому перетині), який утворився на межі двох полірованих пластин, з'єднаних гвинтами, під час експерименту.

4.7. Створення лабораторної установки й умови проведення експериментальних досліджень

Для перевірки правильності теоретичних рішень і висновків шляхом проведення експериментальних досліджень, спрямованих на виявлення фактичних закономірностей взаємодії абразивних зерен з поверхнею деталі, визначення продуктивності і якості обробки, виготовлено лабораторну установку, яка здійснює абразивну обробку затопленими струме-

нями (рис. 4.12). Вона складається з робочої камери 1, соплового апарата (завихрювача) 2, решіт для деталей 3 та для абразивних зерен 4, бака-відстійника 5, витискального бака 6, трубопроводів для подачі води 7, стисненого повітря у витискальний бак 8 та подачі стисненого повітря до сопел 9, трубопровода для підведення води в робочу камеру 10 і рукоятки подачі стисненого повітря й води у робочу камеру 11.

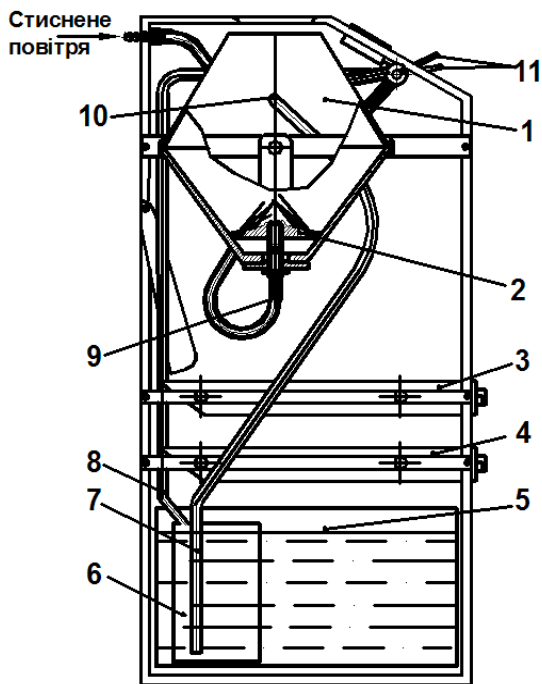


Рис. 4.12. Схема лабораторної установки з об'ємом робочої камери 30 літрів

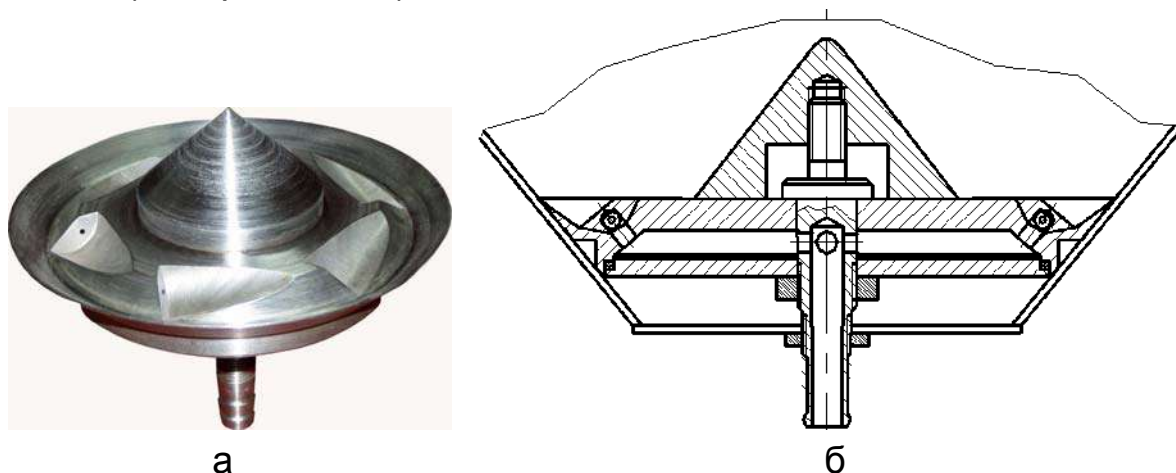
роблюваності різанням латуні ЛС59.1, завдяки тому, що для одержання цієї властивості до її складу додано свинець.

Корозійна стійкість також є важливим чинником на користь зробленого вибору, оскільки практично незначуща кількість окислів, які утворюються на поверхні контрольних зразків після обробки, не дає похибок у процесі зважування зразків у наступних дослідках. Це пов'язано з тим, що в процесі оцінювання продуктивності обробки важливим є відділення металу за рахунок мікрорізання, а не за рахунок опадання окислів з поверхні зразків.

Сопловий апарат (завихрювач) є порожнім фігурним диском із трамплінами по колу й ніпелем для подання стисненого повітря всередину його до сопел (рис. 4.13а). У вертикальних стінках трамплінів роз-

Головною частиною експериментальної установки є робоча камера, яка становить ємність, утворену двома зрізаними конусами, з'єднаними великими основами. Сопловий апарат є одночасно і дном робочої камери, завдяки чому забезпечуються безперервна обробка й перемішування оброблюваних деталей [7]. У якості оброблюваних деталей використано прямокутні пластини з латуні ЛС59.1 габаритними розмірами 35x35x1,5 мм. Із цього ж матеріалу були виготовлені й контрольні зразки. Вибір матеріалу контрольних зразків базується на корозійній стійкості й достатньо високій об-

міщені сопла для подачі струменів стисненого повітря всередину робочої камери (4.13б). В експериментальній установці сопловий апарат є швидкознімальним вузлом, який притягується до фальшдно нижнього зрізаного конуса робочої камери за допомогою гайки й різьблення, виконаного на ніпелі (див. рис. 4.13а).



**Рис. 4.13. Донна частина (завихрювач) робочої камери установки для абразивної обробки затопленими струменями:
а – загальний вигляд; б – у розрізі**

Для проведення дослідів з іншою кількістю сопел й іншим їхнім діаметром у робочу камеру встановлено відповідні завихрювачі. У процесі дослідження надзвукових сопел Лавалю фігурну частину сопла виготовлено окремо і вкручено різбовою частиною у вертикальні стінки трамплінів завихрювача (рис. 4.14).



Рис. 4.14. Завихрювачі зі змінними надзвуковими соплами Лавалю

Для одержання абразивної суспензії в робочу камеру (за умови слабкої подачі стисненого повітря із сопел з метою запобігання їхньому

засміченню) через верхню горловину заливали задану кількість води й додавали абразивний матеріал заданої зернистості й заданого об'єму. Після включення подачі стисненого повітря тиском 0,5 МПа завантажували в робочу камеру оброблювані деталі й попередньо зважені контрольні зразки. Кількість деталей, які завантажуються, повинна бути максимальною, але такою, що дозволяє переміщуватися в робочій камері всій завантаженій масі деталей. Оцінювання продуктивності обробки здійснювалося за результатами зважування деталей в грамах за 30 хвилин обробки.

Продуктивність обробки і якість поверхні деталей досліджували залежно від технологічних параметрів: одиничної й сумарної маси зразків, що імітують оброблювані деталі, марки, зернистості й об'єму абразивного матеріалу, кількості рідини, а також конструктивних параметрів: кількості й діаметра сопел, їхнього розміщення на дні робочої камери й орієнтації осей сопел у горизонтальному й вертикальному напрямках.

Після закінчення обробки робочу камеру перевертали на півосях, у результаті чого суспензія зливалася в бак-відстійник, розташований під робочою камерою, а деталі вивантажувалися на решето з наступним промиванням водою. Контрольні зразки сортували і після промивання й сушіння зважували, а потім контролювали шорсткість.

Зважування контрольних зразків до й після обробки виконували на аналітичних вагах моделі ВЛА-200. Шорсткість поверхні заміряли за допомогою інтерферометра моделі МІІ-В.42 (див. рис. 4.9б) і профілографа-профілометра мод. 201 із самописом на термографічному папері, що дозволяло визначати параметр R_{\max} .

Експериментальні дослідження проводилися із застосуванням зразків, виготовлених з алюмінію, латуні ЛС59.1, латуні Л63, берилієвої бронзи БрБ2, титанового сплаву ВТ-1 і дуралюмініу Д16. У якості абразивних матеріалів використовувався карбід кремнію зелений 63С зернистістю 20 ... 80 (200 ... 800 мкм). Тиск стисненого повітря перед соплом змінювався в межах 0,5 – 1,2 МПа.

4.8. Методика вибору форми і розмірів робочої камери

Основною частиною робочої камери, яка визначає її розміри, є дно, що одночасно слугує джерелом струменів стисненого повітря. Численні

експерименти показали, що найбільша продуктивність обробки досягається в разі розміщення сопел на дні робочої камери з можливістю транспортування вмісту між соплами [7]. Відстань між соплами в сукупності з їхньою кількістю визначають розміри донної частини робочої камери. Кількість сопел необхідно варіювати з обмеженням у витратах стисненого повітря. Найбільша припустима величина витрати стисненого повітря за умови використання промислової пневмомережі – $1 \text{ м}^3/\text{хв}$.

Для запобігання утворенню заторів у робочій камері в процесі обробки, тобто для забезпечення повільного, але надійного переміщення деталей і абразивного матеріалу усередині ємності неприпустимі гострі кути й зустрічні (стосовно руху маси завантаження) виступи.

Особливо важливим слід вважати кут між дном (сопловим апаратом) і нижнім конусом робочої камери. З іншого боку, нижній конус повинен мати кут відносно горизонту, достатній для мимовільного падіння (повернення) деталей і абразиву з її поверхні вниз, у зону обробки. Верхній конус робочої камери призначений для запобігання розбризкуванню суспензії, тобто утворення частково закритої ємності. Крім того, верхній конус забезпечує спрямоване зливання суспензії й вивантаження оброблених деталей.

Для гарантованого вивантаження деталей верхній конус зроблено похилим, у результаті чого одна з його твірних стає вертикальною (рис. 4.15а). У цій частині конуса і здійснюється вивантаження вмісту робочої камери. Перераховані обмеження приводять до цілком визначеної форми робочої камери, остаточні розміри якої будуть отримані за результатами розробки математичної моделі процесу обробки.

Одним із варіантів напрямку осей сопел у робочій камері є їхній напрямок під невеликим кутом до нижнього твірного конуса робочої камери. У цьому випадку донна частина робочої камери значно зменшується, а гальмування деталей відносно струменя, який несе абразивні зерна, досягається за рахунок сили тяжіння, тоді як струмінь має значно більшу далекобійність за вертикального розташування осі сопла через прагнення стисненого повітря в рідкому середовищі підніматися вгору. Для дослідження затоплених струменів, які пронизують абразивну суспензію знизу вгору, виготовлено стенд, у якому в клиноподібному дні встановлено сопло, спрямоване вертикально вгору (рис. 4.15б). Експериментально встановлено ефективність обробки поверхонь за вертикального

або близького до вертикального напрямку струменів стисненого повітря, затопленого абразивною суспензією. Однак надійне перемішування дрібних деталей за такої схеми одержати не вдається. У зв'язку із цим дану схему доцільно застосовувати для обробки закріплених або таких деталей, що рівномірно рухаються відносно сопла.

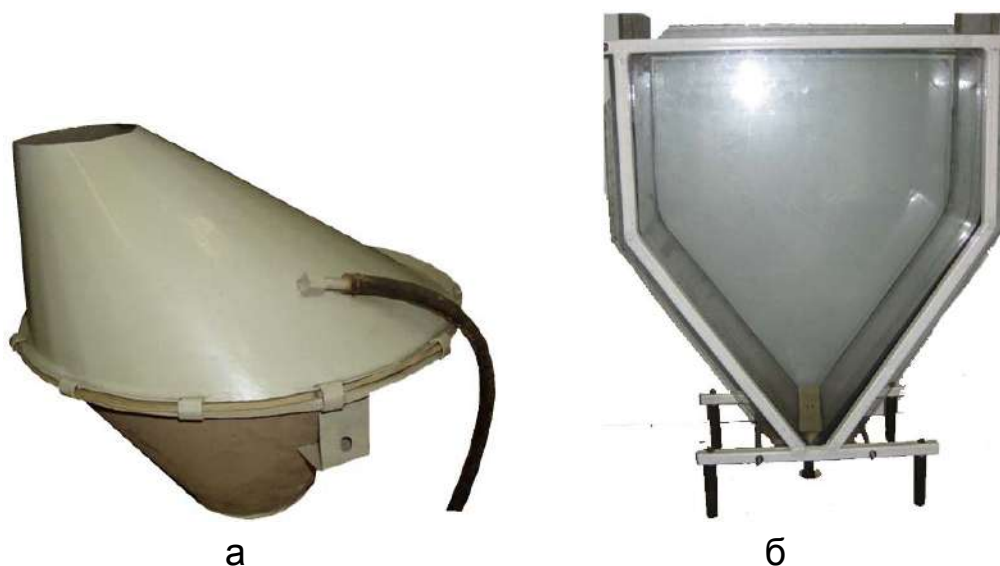


Рис. 4.15. Робоча камера (а) і експериментальна установка для дослідження процесу обробки вертикальним затопленим струменем (б)

Паралельно з експериментами, спрямованими на перевірку теоретичних результатів, отриманих у розділах 2 і 3 даної роботи, були розроблені технічні рішення, захищені авторськими свідоцтвами, з метою доведення конструкцій установок до промислового використання. У зв'язку із цим виготовлено й випробувано пристрої для виділення абразивного матеріалу із суспензії для повторного використання в технологічній операції із частковим очищенням від забруднень.

Висновки до розділу 4

1. Розроблено загальну методику проведення експериментальних досліджень, яка передбачає визначення на першому етапі закономірностей утворення мікрорізів і формоутворення оброблюваної поверхні деталі, а на другому етапі – установлення емпіричних залежностей для визначення інтенсивності знімання матеріалу й шорсткості оброблюваної

поверхні з урахуванням у тому числі й тих параметрів процесу, які не були враховані в аналітичних залежностях у зв'язку зі складністю їх математичного подання. Такий спільний аналіз аналітичних і емпіричних залежностей дозволить більш повно розкрити фізичну сутність розглянутого процесу і його технологічних можливостей, науково обґрунтовано підійти до вибору раціональних параметрів обробки й визначення умов ефективного застосування методу абразивної обробки деталей затопленими струменями.

2. Розроблено нову методику визначення швидкості руху абразивних 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 зерна на протилежній (зі зсувом на певний кут) внутрішній поверхні циліндра. Знання значень швидкості руху абразивних зерен дозволить, по-перше, оцінити ефективність запропонованого методу абразивної обробки деталей затопленими струменями відносно традиційно використовуваних методів струминно-абразивної обробки, по-друге, науково обґрунтовано підійти до встановлення й дотримання умов збільшення швидкості руху абразивних зерен. Це стосується до виявлення найбільш ефективної конструкції сопла (конфігурації й габаритних розмірів), оптимальної відстані оброблюваної поверхні від зрізу сопла, а також оптимальної відстані між сусідніми соплами, марки й зернистості абразивного матеріалу.

3. Розроблено методику вибору конфігурації сопла для абразивної обробки деталей затопленими струменями, засновану на дослідженні швидкості руху абразивних зерен і розмірів їхніх відбитків на спеціальних полірованих латунних екранах. Знаючи площі розсіювання відбитків зерен на екранах, можна визначити кількість абразивних зерен, залучених у струмінь, а отже, й ефективність застосування різних сопел. Це відкриває принципово нові можливості вибору конфігурації повітряного сопла, габаритних розмірів і komponування інших елементів робочої камери установки для здійснення абразивної обробки деталей затопленими струменями.

4. Розроблено методику визначення продуктивності абразивної обробки затопленими струменями, засновану як на вимірюванні маси контрольних зразків до й після обробки, так і на підрахунку кількості слі-

дів абразивних часток, 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 за різних режимів обробки, але й визначити, які частини деталей піддаються більш-менш інтенсивній обробці. З'ясовано, що максимальна кількість слідів часток для плоских деталей масою від 0,5 до 3,5 г, припадає на кромки, а для компактних за формою деталей характерний рівномірний розподіл слідів абразивних зерен. Це підтверджує вірогідність теоретичних рішень, наведених у розділі 2 роботи, і дозволяє в першу чергу рекомендувати запропонований метод для обробки торцевих поверхонь дрібних плоских деталей.

5. Розроблено методику дослідження 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, одержуваних у процесі обробки зразків з латуні ЛС59.1, алюмінію, титанового сплаву ВТ-1 через кожні 2 – 5 секунд, а також через 15 – 20 хвилин обробки. Розроблено модель половини сліду (у поздовжньому перетині), який утворився на межі двох полірованих пластин на час експерименту, з'єднаних гвинтами.

6. Розроблено методику визначення напруженого стану поверхні зразків після обробки затопленими струменями. Вона заснована на парній обробці зразків зі сплаву ВТ-1 з вираженими пружними властивостями й полягає в захисті однієї сторони кожного зразка від абразивного впливу за рахунок з'єднання з аналогічним зразком пайкою на кромках.

7. Створено лабораторну установку для здійснення абразивної обробки деталей затопленими струменями (з вертикальною віссю сопла) і описано умови проведення експериментальних досліджень основних параметрів обробки, включаючи продуктивність обробки, шорсткість обробленої поверхні, параметри мікрорізів і напруженого стану обробленої поверхні.

8. Розроблено методику вибору раціональної форми й розмірів робочої камери. Показано, що головною частиною, яка визначає конструкцію робочої камери, є сопловий апарат, який одночасно виконує функцію дна робочої камери.

Розділ 5. Експериментальні дослідження закономірностей знімання матеріалу й формування параметрів якості в процесі абразивної обробки затопленими струменями

5.1. Експериментальні дослідження закономірностей утворення мікрорізів на поверхнях деталей у процесі абразивної обробки затопленими струменями

Для оцінювання вірогідності отриманих теоретичних рішень, наведених у розділах 2 і 3 роботи, проведено експериментальні дослідження технологічних параметрів абразивної обробки затопленими струменями деталей, виготовлених із пластичних матеріалів, на установці, показаній на рис. 4.12. Відповідно до загальної методики проведення експериментальних досліджень, наведеної в п. 4.1, на першому етапі поставлено завдання визначення закономірностей утворення мікрорізів на оброблюваній поверхні деталі в результаті її взаємодії з окремими зернами в процесі абразивної обробки затопленими струменями. У зв'язку із цим розроблено нову методику дослідження топографії поверхні деталі після її абразивної обробки затопленими струменями на основі комп'ютерного тривимірного моделювання з використанням програмного середовища *Helicon 3D Viever* за допомогою мікроінтерферометра з електронною камерою *ScopeTek MDC 140N*. Перехід від фрагментарних горизонтальних (пошарових) знімків перетинів мікрорельєфу *ScopePhoto* до тривимірного топографічного подання дозволив досліджувати тенденцію зміни мікрорельєфу обробленої поверхні. Опис даної методики наведено в п. 4.6.

На основі цієї методики були отримані знімки, а також моделі обробленої поверхні деталі з латуні ЛС59.1 (рис. 5.1) із чітким зображенням сліду абразивного зерна після п'яти секунд абразивної обробки затопленими струменями. Для наочності на рис. 4.10 наведено знімки сліду абразивного зерна під різними кутами зору (у межах $7 - 60^\circ$), що є свого роду панорамою поверхні деталі зі слідом абразивного зерна. Це дає повне уявлення про форму сліду зерна, його геометричні розміри і характер утворення, що відкриває нові можливості для дослідження топографії поверхні деталі після абразивної обробки затопленими струменями.

Як впливає з рис. 4.11, слід абразивного зерна становить поглиблення (кратер), на бічних поверхнях і спереду в якого є відносно невеликі навали металу, утворені в результаті його пластичного деформування.

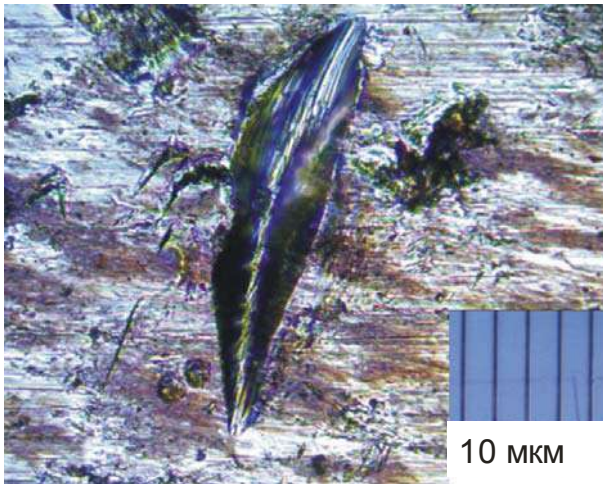


Рис. 5.1. Слід абразивного зерна на поверхні зразка із латуні ЛС59.1

(зі збільшенням у 625 разів)

Умови обробки: абразивний матеріал: шліфзерно – 63С (карбід кремнію зелений), зернистість 63П (630 мкм).

тається, тому що борозни за довжиною постійні, хоча реакція сили різання, прикладеної по дотичній до вписаного в багатогранник сфери (зерна), повинна була б після першого ж дотику надати абразивному зерну обертання, у результаті чого зерно повинне покотитися по поверхні деталі. Із цього випливає, що маса абразивного зерна, а отже, й момент інерції відносно центра маси значно перевищує момент сили різання. Тому можна з великим ступенем упевненості стверджувати, що абразивні зерна з однаковими габаритними розмірами, але з більшою щільністю матеріалу будуть залишати довші борозни й, отже, забезпечувати підвищення продуктивності обробки. Питання лише в тому, чи можна повідомити високу швидкість затопленим струменем зернам з більшою питомою вагою, таку ж, як і зернам з меншою питомою вагою.

З метою статистичного аналізу характеру утворення слідів абразивних зерен у процесі абразивної обробки затопленими струменями було отримано знімки топографії оброблених поверхонь деталей для різних випадків. Так, на рис. 5.1 наведено фотографію плоскої поверхні зразка з

Але основна частина металу із кратера все-таки вилучена у вигляді мікростружки. Це свідчить про те, що в цьому випадку кінетичної енергії абразивного зерна достатньо для того, щоб забезпечити повний мікрозріз і не зупинитися в оброблюваній деталі.

На рис. 4.11 також видно, що на дні поглиблення (кратера) залишаються характерні борозни, які відповідають профілю поверхні абразивного зерна. Проведений аналіз борозен по довжині сліду вказує на те, що абразивне зерно в міру впровадження в метал під гострим кутом практично не повертається,

латуні ЛС59.1, де видно слід зерна. Не складно помітити, що форма сліду абразивного зерна (мікрозрізу) відповідає сегментоподібній формі, прийнятій в розрахункових схемах у розділах 2 і 3 роботи, тобто в цьому випадку утворюється повний зріз, що має ділянки входу й виходу абразивного зерна з контакту з оброблюваною деталлю. Як показали дослідження, кут входу зерна в оброблюваний метал у цьому випадку невеликий – у межах 20° . Це відповідає відомим експериментальним даним, отриманим у процесі дослідження струминно-абразивної обробки деталей із пластичних матеріалів (див. рис. 2.39 і 2.40а) [74], згідно з яким процес знімання пластичного матеріалу найбільш ефективний при невеликих кутах атаки: $10 - 30^\circ$. У цьому випадку утворюється повний мікрозріз – абразивне зерно не зупиняється в оброблюваному матеріалі. На рис. 2.39 [74] показано, що в разі струминно-абразивної обробки крихких матеріалів при таких невеликих кутах атаки мікрозріз не утворюється, має місце пружно-пластичне відтискання металу, а найбільш інтенсивне видалення металу відбувається лише при кутах атаки, близьких або що дорівнюють 90° .

Таким чином, експериментально встановлено, що в умовах абразивної обробки затопленими струменями, так само, як і під час звичайної струминно-абразивної обробки пластичних матеріалів [74], формування повного мікрозрізу відбувається при невеликому куті входу абразивного зерна в оброблюваний метал. Це підтверджується численними фотографіями одиничних зрізів, утворених на оброблюваній поверхні деталі від роботи окремих зерен (див. рис. 5.1 і 5.2б, в).

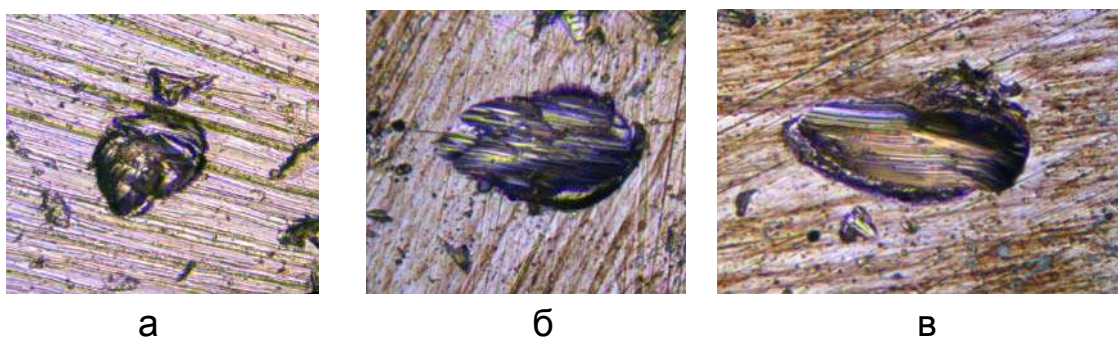


Рис. 5.2 . Слід від удару абразивного зерна по нормалі (а) і під гострим кутом (б, в) до поверхні зразка із латуні ЛС59.1 (зі збільшенням у 625 разів)

Умови обробки: абразивний матеріал – шліфзерно 63С (карбід кремнію зелений), зернистість 63П (630 мкм).

Зі збільшенням кута входження абразивного зерна в оброблюваний метал, як правило, повний зріз не утворюється (див. рис. 5.2а і 5.3), тому що абразивне зерно повністю втрачає швидкість і, по суті, зупиняється в

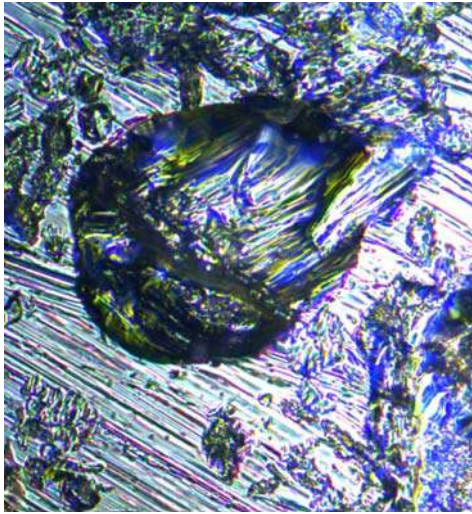


Рис. 5.3. Слід зерна з утворенням валика в напрямку удару

оброблюваному металі. Тому даний випадок є найбільш типовим для розглянутого методу абразивної обробки затопленими струменями, оскільки на оброблюваній поверхні деталі формуються в основному саме такі форми мікрорізів. Це підтверджується експериментальними дослідженнями топографії обробленої поверхні (див. рис. 5.2).

В узагальненому вигляді дана форма мікрорізу показана на рис. 3.25.

Із цього можна зазначити, що зі збільшенням кута входження абразивного зерна в оброблюваний метал його кінетичної енергії недостатньо для здійснення повного зрізу й тому відбувається ніби зупинка зерна в металі. Слід "тупикової" форми (див. рис. 3.25) свідчить про те, що наприкінці сліду вершина абразивного зерна в міру заглиблення в метал втратила швидкість, однак це ще не означає, що й саме зерно зупинилося. У переносному значенні можна було б вважати, що, наближаючись під гострим кутом до поверхні, абразивне зерно ніби "спіткнулося", залишило невелику борозну й покотилося. Це підтверджується тим, що довжина борозни відносно поперечного розміру абразивного зерна становить усього 2 – 5 % (рис. 5.4).

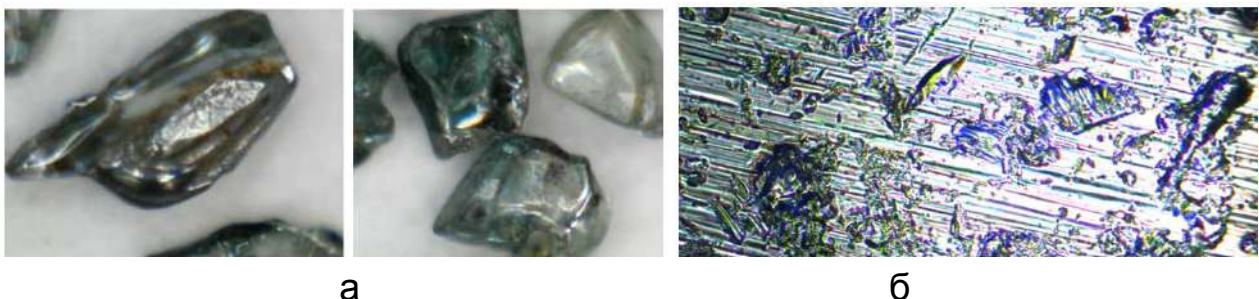


Рис. 5.4. Співвідношення габаритних розмірів абразивних зерен 63С зернистістю 40 (400 мкм) (а) та їхніх слідів на зразку із латуні ЛС59.1(б) (зі збільшенням у 50 разів)

Отже, для утворення повного зрізу необхідно збільшити кінетичну енергію рухомого абразивного зерна шляхом збільшення швидкості його руху або маси (зернистості абразивного порошку). Щоб оцінити значення швидкості руху абразивного зерна в момент зіткнення з оброблюваним металом, а також оцінити вплив зернистості абразивного порошку на швидкість руху абразивного зерна, у розділі 6 роботи наведено результати експериментальних досліджень швидкості руху абразивних зерен для різних умов обробки. Це дозволило остаточно оцінити технологічні можливості методу абразивної обробки затопленими струменями.

Було проведено експериментальні дослідження характеру (форми) вилученого металу в процесі взаємодії окремого зерна з деталлю. Установлено, що вилучений метал має форму мікрорізу, типового для процесів шліфування, зокрема, отриманого в процесі мікрорізання латуні (див. табл. 1.5) [120]. Це вказує на те, що процес знімання металу підпорядковується законам різання (стружкоутворення). Отже, правомірним є розгляд процесу утворення мікрорізів з позиції теорії різання, як зазначено в розділі 2.

5.2. Експериментальні дослідження закономірностей формування поверхонь деталей у процесі абразивної обробки затопленими струменями

Для більш повного уявлення про закономірності формоутворення поверхонь в умовах абразивної обробки затопленими струменями важливо знати характер накладення й перекриття слідів абразивних зерен. Для цього були отримані фотографії оброблюваної поверхні деталі з латуні ЛС59.1 у різні моменти часу (див. рис. 4.11). Оброблювана поверхня попередньо шліфувалася.

На рис. 4.11а видно яскраво виражений (утворений протягом 1 секунди обробки) слід від абразивного зерна. Навколо цього сліду видні окремі вм'ятини від контакту абразивних зерен з оброблюваним металом. Однак кінетичної енергії цих зерен було недостатньо для видалення металу з оброблюваної поверхні.

Через 2 секунди обробки (див. рис. 4.11б) свої сліди залишила на поверхні достатньо велика кількість абразивних зерен. Однак за величиною вони значно менші від першого сліду.

Через 3 секунди обробки (див. рис. 4.11в) кількість слідів зерен значно збільшилася, а через 8 секунд обробки (див. рис. 4.11г) фактично вся оброблювана поверхня була покрита слідами від абразивних зерен. Причому, судячи з фотографії, спостерігаються різні за величиною сліди, які хаотично розташовані на оброблюваній поверхні. Отже, на противагу процесам абразивної обробки за жорсткою кінематичною схемою (шліфування, хонінгування та ін.), коли відбувається впорядковане накладення слідів від працюючих зерен і формується чітко впорядкована оброблювана поверхня, в процесі абразивної обробки затопленими струменями має місце хаотичне накладання слідів зерен і формування невпорядкованої оброблюваної поверхні (рис. 5.5). При цьому на відміну від традиційної струминно-абразивної обробки, абразивні зерна можуть входити в оброблюваний метал під різними кутами – у межах $0 \dots 90^\circ$.

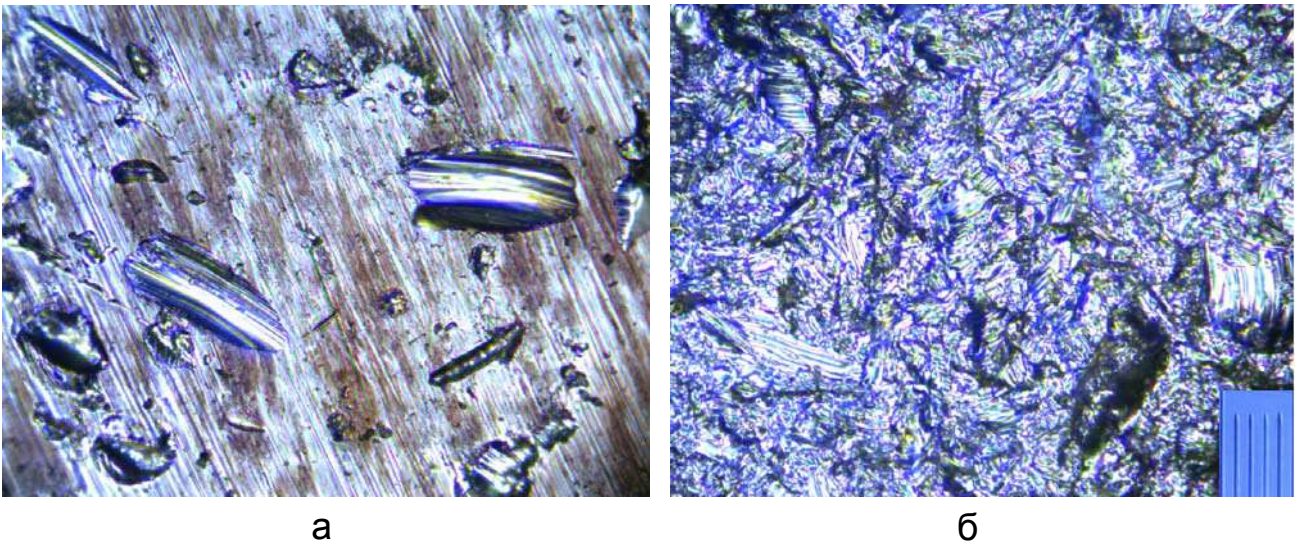


Рис. 5.5. Поверхня зразка із латуні, обробленого абразивним методом затопленими струменями протягом 1 хв (а) та 35 хв (б) (зі збільшенням у 625 разів)

Умови обробки: обробка у вільному стані; абразивний матеріал – шліфзерно 63С (карбід кремнію зелений), зернистість 63П (630 мкм); ціна розподілу об'єкта-мікрометра 0,01 мм.

Експериментально встановлено, що в момент входження зерна в оброблювану деталь по нормалі до поверхні вал витиснутого металу розташовується нерівномірно навколо заглиблення (див. рис. 5.2а). Це можна пояснити неправильною формою абразивного зерна. У разі невеликого кута входження зерна в оброблювану деталь метал може витіс-

нятися як по один, так і по обидва боки від сліду в напрямку руху абразивного зерна (див. рис. 5.2б, в).

Характер слідів і форма витиснутого металу залежать від конфігурації абразивного зерна, його орієнтації в момент удару об поверхню,

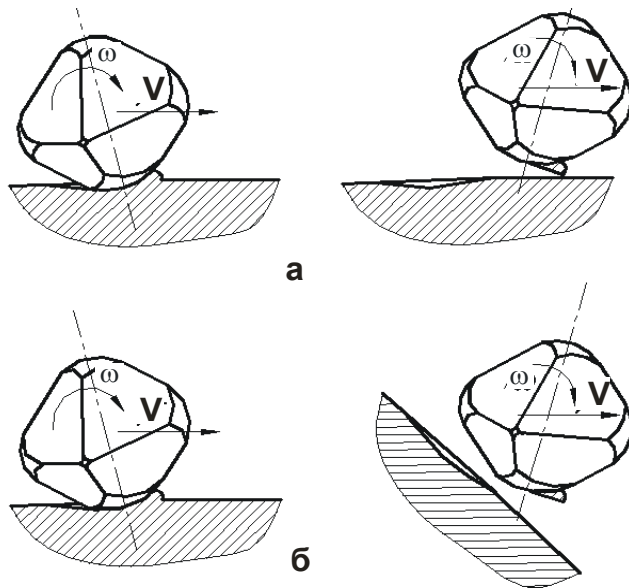


Рис. 5.6. Схеми варіантів видалення металу мікрорізанням: а – зміна траєкторії руху зерна під дією складової сили різання P_y з видаленням металу; б – зміна траєкторії руху оброблюваної деталі з видаленням металу

від кінетичної енергії й, зокрема, від швидкості руху абразивного зерна, кута атаки, а також від фізико-механічних властивостей оброблюваного матеріалу. Раніше експериментально було встановлено [7] існування слідів абразивних зерен, у яких матеріал поверхні, що утворилася, а також витиснутий навколо сліду, утворює зону підвищеної щільності з порушенням зв'язків (утворенням дислокацій) глибиною до 4 – 6 мкм.

Відповідно до результатів експериментальних досліджень оброблених поверхонь деталей і теоретичного аналізу, у процесі взаємодії багатогранного абразивного зерна з оброблюваною поверхнею відбувається процес мікрорізання металу (рис. 5.6 і 5.7).

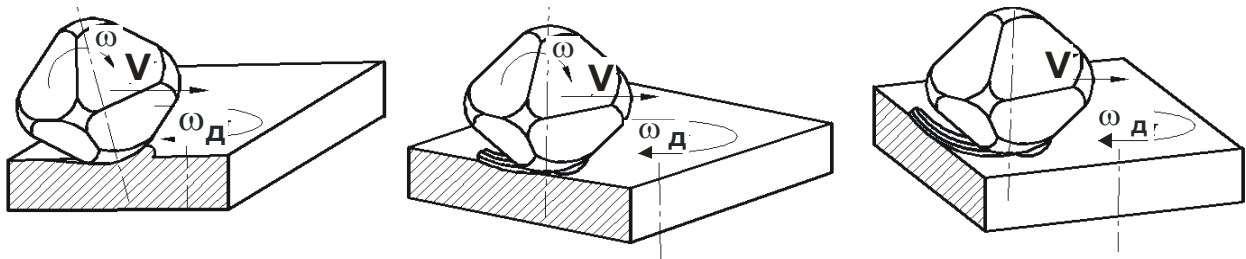


Рис. 5.7. Схеми послідовного утворення криволінійного сліду мікрорізання

Умовні позначення: V – вектор швидкості абразивного зерна; ω – обертання абразивного зерна; ω_d – обертання деталі.

Причому мікрорізання здійснюється як вершинами абразивних зерен, так і їхніми ребрами. Через велику швидкість і нетривалий контакт воно має неочевидний характер. Сліди після такого контакту залежать від кута між вектором швидкості абразивного зерна й проекцією вектора на оброблювану поверхню, а також від характеру руху деталі. Так, у процесі обертання плоскої деталі відносно осі, яка проходить уздовж площини, кут атаки може змінюватися в широкому діапазоні від 0 до 90° (не більше), тому що в разі досягнення кута, що близький або дорівнює 90° , кінетична енергія зерна повністю витратиться на прямий удар, у результаті утвориться слід від "тупикової" форми. У випадку зміни кута атаки від 90 до 0° найбільш імовірний повний зріз металу (рис. 5.6б). Це повністю узгоджується з математичним описом взаємодії зерна з оброблюваною поверхнею, наведеним у розділі 3 роботи, так само, як у випадку виштовхування абразивного зерна із заглиблення (див. рис. 5.6а).

У процесі обертання плоскої деталі відносно осі, яка проходить по нормалі до найбільшої площини, незважаючи на прямолінійний рух абразивного зерна, найбільш імовірно утворення криволінійного сліду на цій поверхні (див. рис. 5.7). У разі ударів багатогранні абразивні зерна, витісняючи метал за межі заглиблення, роблять його вразливим для подальшого руйнування (рис. 5.8). В інших, більш рідкісних випадках (як було показано), зерна зрізають метал з поверхні в основному при невеликому куті їх входження в оброблюваний метал ($10 - 30^\circ$). Однак такі випадки мають місце лише в $6 - 7$ % зіткнень у процесі абразивної обробки затопленими струменями (див. рис. 5.5б).

У загальному випадку видалення металу з оброблюваної поверхні відбувається в результаті пластичної деформації, мікрорізання й крихкого руйнування. Подряпини спостерігаються в разі несприятливих для різання передніх кутів зерна, тоді як додатні й невеликі від'ємні передні кути зерна є передумовою для здійснення процесу різання.

У процесі розгляду руйнування, викликаного одиничними абразивними зернами, необхідно враховувати той факт, що поверхня втрачає окисні плівки й стає вразливою для корозії після закінчення процесу обробки. Щоб запобігти можливості швидкого окислювання оброблених деталей, необхідно передбачити заходи захисту, наприклад, гаряче сушіння. Так, наприклад, нелегована сталь виявляється досить чутливою до корозії, що проявляється вже через $15 - 30$ хвилин, коли на поверхні

деталей утворюються темні плями. Таким чином, у разі зіткнення одного абразивного зерна з оброблюваною поверхнею можна відзначити наступні етапи: утворення заглиблення, витискання металу з утворенням вала (кореня стружки), мікрорізання з різною довжиною.

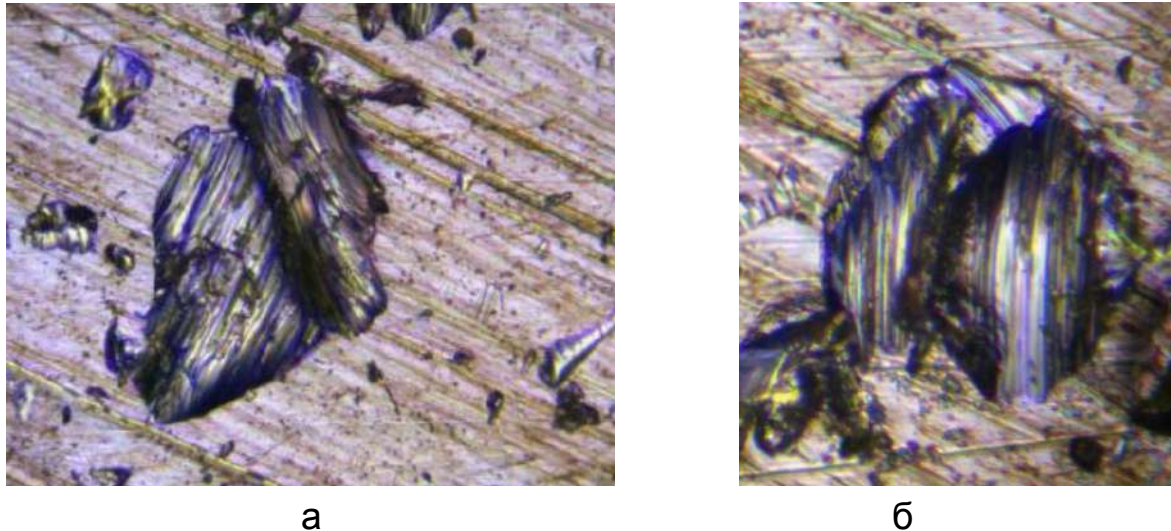


Рис. 5.8. Співпадання двох ударів абразивних зерен: а – часткове видалення валика (кореня стружки); б – повне видалення валика попереднього сліду (зі збільшенням у 625 разів)

Умови обробки: абразивний матеріал – шліфзерно 63С (карбід кремнію зелений), зернистість 63П (630 мкм).

Усунення металу з оброблюваної поверхні в разі її обробки потоком абразивних зерен здійснюється в результаті ряду одночасно виконуваних процесів: багаторазових знакозмінних навантажень на окремі елементи поверхні; нагромадження металу на слідах, що утворилися раніше; кавітаційне руйнування поверхні.

У процесі розгляду обробки нерухомої поверхні струменем (поток) абразивних зерен ураховують: зіткнення абразивних зерен між собою всередині струминного потоку; можливе подрібнення окремих абразивних зерен; екранування ввігнутих оброблюваних поверхонь абразивними зернами, що вже відпрацювали; широкий діапазон кутів атаки абразивних зерен; поверхневий напружений стан матеріалу, викликаний багаторазовими ударами абразивних зерен; зниження міцності оброблюваного матеріалу з утворенням валів поруч із кратерами оброблюваної поверхні. На відміну від традиційних методів струминно-абразивної обробки, абразивна обробка затопленими струменями вільна від ряду

перерахованих факторів, зокрема в результаті руху оброблюваних деталей разом з абразивними зернами практично не спостерігається подрібнення зерен через зіткнення всередині струминного потоку або екранування оброблюваної поверхні в результаті відскакування від неї абразивних зерен.

Таким чином, на основі проведених експериментальних досліджень закономірностей знімання металу й формування поверхонь деталей у процесі абразивної обробки затопленими струменями встановлено, що в процесі обробки відбувається хаотичне (неспрямоване) накладення слідів абразивних зерен на поверхні, у результаті чого формується матова оброблена поверхня, яка складається з окремих різних за величиною неспрямованих заглиблень і виступів (див. рис. 5.5а). За структурою мікрогеометрії ця поверхня відрізняється від поверхонь, утворених під час шліфування й струминно-абразивної обробки (рис. 5.9).



Рис. 5.9. Зовнішній вигляд поверхонь деталей, утворених у результаті шліфування (а) і абразивної обробки затопленими струменями (б)

Із цього можна зробити висновок про можливість створення принципово нової неорієнтованої мікрогеометрії поверхні в процесі абразивної обробки затопленими струменями, що є новим у технології машинобудування й відкриває перспективи підвищення експлуатаційних властивостей і товарного вигляду поверхонь деталей, наприклад, за рахунок створення матових поверхонь, які завдяки зачеканюванню приховують дрібні поверхневі дефекти, а також завдяки відсутності відблисків приховують відхилення елементів виробу від правильної геометричної форми.

5.3. Аналіз закономірностей знімання металу й формування продуктивності обробки

Дотепер загальної теорії гідроабразивної обробки, що відображає основні сторони процесу, поки не існує. Як показують результати експериментальних досліджень і теоретичні рішення, наведені в розділах 2 і 3 даної роботи, ця теорія повинна базуватися на теорії різання металів, а також на експериментальних і теоретичних дослідженнях у ході вивчення даного процесу.

Вивчення процесів ерозії (руйнування) металів було виконане Козирєвим С. П. [83], який теоретично описав процес усунення металу під дією абразивного струменя з рідким носієм. Розглядаючи роботу абразивного зерна в процесі входження в поверхню під кутом 90° і з урахуванням сили динамічної реакції, отримано вираз для розрахунку ваги знятого металу:

$$\Delta G = \frac{k \cdot a \cdot \gamma_1 \cdot \gamma_2 \cdot V \cdot \Pi \cdot N \cdot v_1^2 \cdot (1 - k_1^2)}{2 \cdot g \cdot H_M}, \quad (5.1)$$

де a – коефіцієнт, який враховує відстань між слідами абразивних зерен, м;

k – безрозмірний коефіцієнт;

γ_1 – щільність матеріалу абразивного зерна, кг/м^3 ;

γ_2 – щільність матеріалу оброблюваного металу, кг/м^3 ;

V – об'ємний показник струменя суспензії, по якому завдають удару зразком, л;

Π – вміст абразивних зерен у суспензії, %;

N – число слідів зерен на зразку, шт.;

v_1, k_1 – швидкість абразивного зерна (м/с) і безрозмірний коефіцієнт швидкості;

g – прискорення вільного падіння ($g = 9,81 \text{ м/с}^2$);

H_M – твердість металу за Моосом [83].

Як зазначає автор роботи [83], розрахункові значення, отримані на основі цієї залежності, і експериментальні дані мають високий ступінь збіжності. Однак залежність (5.1) не враховує таких параметрів, як розмі-

ри абразивних зерен, кути атаки зерен, тиск повітря, довжину струменя та ін.

У процесі струминно-абразивної обробки присутність рідини значно впливає на характер перебігу процесу взаємодії абразивних зерен з поверхнею. Однак відсутність відомостей про основні показники ударного впливу абразивного струменя в присутності водяних крапель [57] на досліджувану поверхню (більша частина з яких перебуває у взаємозв'язках, що важко врахувати й вимірювати) ускладнюють створення математичної моделі процесу обробки вільним абразивним зерном. Професор Проволоцький О. Є. [114] запропонував розглядати руйнування поверхні гідро-абразивним струменем подібно до клину, що впроваджується, а процес знімання металу описати рівнянням:

$$\frac{dx}{d\tau} = k \cdot (Q - x), \quad (5.2)$$

звідки

$$x = Q \cdot \left(1 - e^{-k\tau(1-0,5\beta\tau)}\right), \quad (5.3)$$

де Q – загальний припуск, що знімається, мм;

x – знімання металу за період часу τ , мм;

k – безрозмірний коефіцієнт руйнування;

β – коефіцієнт, який враховує зниження абразивної (різальної) здатності одиниці об'єму суспензії.

Залежність (5.3) узгоджується з результатами експериментів, однак ураховує тільки конкретні умови струминно-абразивної обробки.

Механізм знімання матеріалу, розглянутий у розділах 2 і 3 роботи, здійснюваний завдяки потоку абразивних зерен, залучених у струмись стисненого повітря, затоплений абразивною суспензією, дозволяє охарактеризувати струминно-абразивну обробку деталей як процес, який має резерви підвищення ефективності обробки.

Основним показником, що характеризує ефективність будь-якого методу обробки деталей, безсумнівно, слід вважати продуктивність. У процесі струминно-абразивної обробки продуктивність визначається періодом часу, протягом якого можуть бути отримані необхідна точність і шорсткість поверхні.

Для кількісного оцінювання продуктивності струминно-абразивної обробки прийнято величину знімання металу за одиницю часу. Передбачається, що продуктивність струминно-абразивної обробки в основному залежить від наступних параметрів: зернистості абразиву, концентрації абразивних зерен у суспензії, тиску стисненого повітря, характеру абразивного матеріалу (насипної щільності матеріалу, питомої ваги, середнього кута загострення вершин, міцності зерен та ін.).

Абразивні зерна після початку контакту з оброблюваним матеріалом входять в нього і проходять певну відстань, здійснюючи пластичну деформацію з усіма ознаками процесу різання. У роботі [74] у процесі розгляду зношування поверхонь за участю абразивних зерен з урахуванням фізико-механічних властивостей оброблюваної деталі й абразивного зерна, форми окремих абразивних зерен, відношення радіуса округлення вершин зерен до глибини їхнього впровадження, міцності тощо, виділяються три етапи послідовного впливу на матеріал: пружне входження, потім пластична деформація й далі мікрорізання. Оскільки абразивні зерна характеризуються неправильною формою й у момент початку впливу можуть бути довільно орієнтовані відносно оброблюваної поверхні, динаміка процесів, які відбуваються в контактній зоні, не буде постійною, незважаючи на сталість таких параметрів, як марка й зернистість абразивних зерен.

Макрорельєф абразивного зерна є комбінацію ребер, виступів (вершин), плоских і східчастих граней та западин. Радіус загострення вершин і відповідно кути при вершинах певною мірою залежать від зернистості абразиву. Дослідження слідів, залишених на поверхні деталей абразивними зернами, показали, що в разі незначної інтенсивності обробки, тобто невеликого (до 0,2 МПа) тиску стисненого повітря, сліди на поверхні металу залишають в основному гострі вершини абразивних зерен. У разі збільшення тиску до 0,3 – 0,5 МПа, а отже, і швидкості руху абразивних зерен, розміри слідів збільшуються і відсоток слідів, залишених ребрами зерен, зростає.

Теоретично рух абразивних зерен по оброблюваній поверхні повинен супроводжуватися зміною кінематичного кута передньої поверхні зерна від 90° (початку входження) до 0° (входження з поступовим зростанням або зменшенням глибини, порівнянної з радіусом). Як було зазначено, еквідистантні лінії на дні слідів абразивних зерен, залишені суб-

мікрорельєфом їхньої різальної частини, свідчать про незначну величину зміни переднього кута абразивного зерна. Оскільки деформувальна частина абразивного зерна є умовно сферою, то можна припустити, що в момент закінчення процесу різання зерно провертається навколо центра сферичної вершини подібно до шарніра в заглибленні й далі викочується з нього під дією сили інерції, прикладеної до центра мас зерна.

На рис. 5.10 наведено схему взаємодії одиничного абразивного зерна з деталлю з урахуванням вектора швидкості до удару V_1 та після удару V_2 , а також обертання навколо центра сферичної вершини ω_1 і

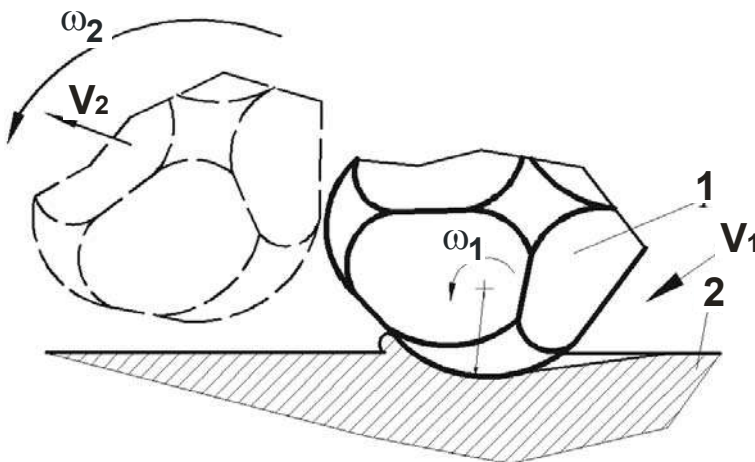


Рис. 5.10. Схема взаємодії абразивного зерна з деталлю

навколо центра мас зерна ω_2 . З аналізу стану поверхонь, оброблених затопленими струменями, можна зробити висновок про правомірність умов взаємодії абразивного зерна й оброблюваної поверхні, прийнятих у розділах 2 і 3 даної роботи, зокрема:

1. Частина слідів абразивних зерен має сегментоподібну форму і всі

ознаки наявності процесу мікрорізання (див. рис. 5.5а), тобто кожний слід можна розділити на ділянку різання зі збільшенням товщини шару, що зрізається, і після досягнення максимальної глибини на ділянці, зі зменшенням товщини шару, що зрізається. Із цього випливає, що в процесі абразивної обробки затопленими струменями можлива передача абразивному зерну кінетичної енергії, достатньої для здійснення повного зрізу металу, як показано в розділі 2.

2. Друга, більша частина слідів також характеризується наявністю процесу різання зі збільшенням товщини шару, який зрізається, що супроводжується зсувом (сколюванням) металу й утворенням валика (кореня стружки). Такі сліди є резервом для наступного знімання металу, тому що валики, які утворилися (коріння стружки), є об'єктами, які легко видаляються під час чергових ударів по них абразивних зерен, що добре видно на рис. 5.8.

3. Резервом для підвищення продуктивності обробки є забезпечення сприятливих умов для повного зрізання металу: максимальної кінетичної енергії, переданої струменем стисненого повітря абразивному зерну, й гострого кута атаки, тобто кута між вектором швидкості абразивного зерна й проекцією цього вектора на оброблювану поверхню.

5.4. Визначення кількості абразивних зерен, які беруть участь у зніманні металу з оброблюваної поверхні

У роботі [7] виконано розрахунок кількості слідів абразивних зерен на поверхнях полірованих зразків, з яких вилучений метал. Ці сліди становлять 5 – 6 % від їх загальної кількості. Оскільки стан кромки інших слідів свідчив про зсув металу з утворенням валиків наприкінці сліду, передбачалося, що знімання металу здійснюється лише в цих 5 – 6 % від загальної кількості зіткнень абразивних зерен і зразків.

З огляду на спрощеність даного підходу до визначення кількості абразивних зерен, які беруть участь у зніманні металу з оброблюваної поверхні, у роботі запропоновано новий уточнений підхід, який дозволяє більш об'єктивно оцінити відсоток робочих зерен. Суть його полягає в наступному. Спочатку визначається маса металу M , яка видаляється в результаті обробки, що припадає на одиницю поверхні, а також маса металу, вилученого з одиничного сліду:

$$M_1 = \frac{M}{S_{\text{бічн}}} = \frac{0,02}{3500} = 5,7 \cdot 10^{-6} \text{ г/мм}^2, \quad (5.4)$$

де M – знімання металу з 10 латунних зразків розміром $10 \times 15 \times 1$, г;
 $S_{\text{бічн}}$ – повна бічна поверхня 10 зразків, мм^2 .

Маса металу, вилученого з одиничного сліду, визначалася за допомогою вимірювання геометричних параметрів середнього сліду: ширини сегмента b і його глибини h всередині подряпини. Об'єми початкової й кінцевої частини сліду визначали як дві половини об'єму кульового сегмента радіусом зерна R (мм) і глибиною h (мм) за відомою формулою:

$$V_{\text{зріз.торц}} = \frac{1}{3} \pi \cdot h^2 \cdot (3R_{\text{абр}} - h). \quad (5.5)$$

Площа поперечного перерізу визначалася за формулою, яка допускає похибки від 0,3 до 0,5 % (рис. 5.11):

$$S_{\text{сегм}} = \frac{2}{3} \cdot b \cdot h, \quad (5.6)$$

де b – ширина сліду (хорда), мм;
 h – глибина сліду (стрілка хорди), мм.

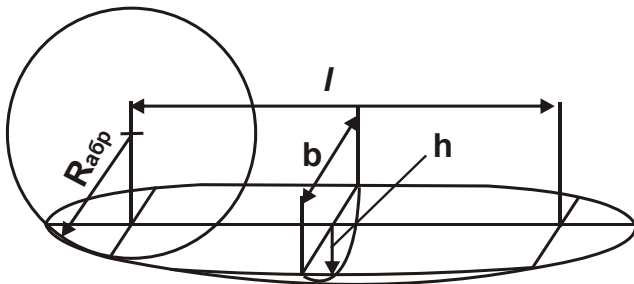


Рис. 5.11. Схема розрахунку об'єму металу, який видаляється в результаті мікрорізу зерном

Маса металу, вилученого з одиничного сліду (в грамах):

$$M_0 = (g_{\text{зріз.торц}} + S_{\text{сегм}} \cdot l) \cdot \rho, \quad (5.7)$$

де l – довжина одиничного сліду, мм;

ρ – щільність матеріалу, г/мм³.

У результаті розрахунків отримано:

$$M_0 = (0,0000054 + 2/3 \cdot 0,03 \cdot 0,025 \cdot 0,003) \cdot 0,0083 = 1,2 \cdot 10^{-8} \text{ г.}$$

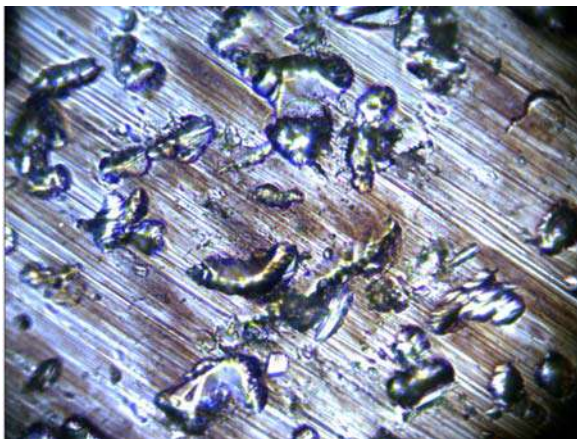


Рис. 5.12. Ділянки поверхні зразка, обмежені полем видимості камери й монітора, для підрахунку кількості відбитків, які припадають на одиницю площі

Грунтуючись на припущенні про належність вилученого в результаті обробки металу тільки до одного різновиду слідів, можна визначити їх кількість, поділивши величину знімання металу, віднесену до одиниці поверхні (тобто слідів/мм²), на масу металу, вилученого з одиничного сліду, яка визначається за залежністю (5.7):

$$N_0 = \frac{M_1}{M_0} = \frac{5,7 \cdot 10^{-6}}{1,2 \cdot 10^{-8}} = 475 \frac{\text{шт.}}{\text{мм}^2}. \quad (5.8)$$

Кількість слідів, утворених протягом 30 хв обробки, що перебувають у полі видимості камери мікроскопа й монітора (рис. 5.12):

$$N_{\text{поле}} = n \cdot \tau = 18 \cdot 30 = 540 \frac{\text{шт.}}{\text{поле}}, \quad (5.9)$$

де n – загальна кількість слідів, що перебувають у полі зору камери мікроскопа й монітора, отриманих за 1 хв обробки;

τ – час обробки ($\tau = 30$ хв).

Слід визначити кількість усіх видів слідів абразивних зерен, що припадає на 1 мм^2 за 30 хв обробки:

$$N_{\Sigma} = \frac{N_{\text{поле}}}{S_{\text{мікр}}} = \frac{540}{0,08} = 6750 \frac{\text{шт.}}{\text{мм}^2}, \quad (5.10)$$

де $S_{\text{мікр}}$ – площа поля зору камери мікроскопа й монітора, мм.

Отримана розрахункова кількість слідів з вилученим металом дозволяє визначити відсоток слідів, а отже, й зіткнень абразивного зерна та зразка, у результаті яких знімається метал:

$$\frac{N \cdot 100\%}{N_{\Sigma}} = \frac{475 \cdot 100}{6750} = 7,03 \%. \quad (5.11)$$

Таким чином встановлено, що кількість зіткнень абразивних зерен і оброблюваних зразків, у результаті яких зрізаються частки металу, не перевищує 7 % від кількості всіх зіткнень.

Отримані дані є основою для визначення величини знімання металу в процесі обробки партії деталей протягом заданого проміжку часу. Крім того, отримані дані дозволяють визначити інтенсивність роботи окремого абразивного зерна за одну операцію за умови завантаження заданого об'єму абразивного матеріалу. Наприклад, у разі завантаження в робочу камеру 0,1 літра абразивних зерен з карбіду кремнію зеленого (63С) зернистістю № 40 (по FEPA F60, осередок сита – 425 мкм) з урахуванням того, що об'єм абразивного зерна дорівнює $0,033 \text{ мм}^3$, загальна кількість абразивних зерен: $k_0 = 100 \ 000 / 0,033 = 3 \ 030 \ 303$ шт.

За 30 хв обробки один контрольний зразок (з повною бічною поверхнею, що дорівнює 350 мм^2) сприймає $6 \ 750$ ударів/мм². Тоді на всю оброблювану поверхню контрольного зразка припадає: $k_{0\text{сум}} = 6 \ 750 \cdot 350 = 2 \ 362 \ 500$ шт.

Відповідно під час обробки 100 зразків (або деталей) із сумарною бічною поверхнею кількість зерен дорівнює:

$$k_{\text{сум. партії}} = 6\,750 \cdot 350 \cdot 100 = 236\,250\,000 \text{ шт.}$$

У підсумку отримана наступна кількість ударів одним зерном:

$$k_0^1 = 236\,250\,000 / 3\,030\,303 = 78 \text{ ударів.}$$

Порівнюючи кількість ударів абразивних зерен за час роботи установки під час виконання однієї операції на 100 зразках і кількість абразивних зерен, завантажених у робочу камеру, можна зробити висновок про те, що протягом 30 хв в обробці одного зразка буде задіяне абразивне зерно менш ніж один раз. Даний результат отриманий з урахуванням рівномірної участі в обробці всієї маси абразивного порошку (тобто 0,1 л абразиву), завантаженого в робочу камеру. Із цього випливає, що абразивний матеріал недостатньо інтенсивно використовується в процесі обробки деталей затопленими струменями, чим обумовлює можливість його експлуатації протягом необмеженого часу. Разом із тим, цілісність зерен забезпечується також порівняно невеликою їхньою швидкістю, яка задається затопленими струменями за межами зрізу сопла.

У зв'язку із цим слід відзначити, що процес абразивної обробки затопленими струменями вигідно відрізняється від традиційних методів струминно-абразивної обробки, за яких абразивний матеріал прокачується через сопло, зношуючи тим самим канал сопла, і далі з високою швидкістю бомбардуючи оброблювану поверхню, розколюючись при цьому на дрібні уламки. Оскільки для таких методів струминно-абразивної обробки характерний жорсткий взаємозв'язок між шорсткістю поверхні й продуктивністю, з одного боку, і зернистістю абразивного матеріалу, з іншого боку, то для повторного використання його необхідно розглядати як матеріал з меншою зернистістю, що веде до зменшення висоти мікронерівностей і відповідно зниження продуктивності обробки.

Незважаючи на сприятливі умови експлуатації абразивного матеріалу в процесі обробки затопленими струменями, його втрати потребують періодичного поповнення. Це пов'язано з тим, що в розглянутому процесі, хоч і незначно (до 0,7 %), але все-таки спостерігається дроблення абразивних зерен.

На рис. 5.13 наведено графік залежності продуктивності процесу обробки затопленими струменями й зношування абразивного матеріалу (у зв'язку із дробленням абразивних зерен) від тиску стисненого повітря.

Із графіка видно, що зі збільшенням тиску стисненого повітря знімання металу зростає пропорційно, а дроблення зерен несуттєво інтенсифікується до тиску стисненого повітря 0,57 МПа, після чого вміст робочої камери вихром піднімається над зоною роботи струменів і процес обробки порушується.

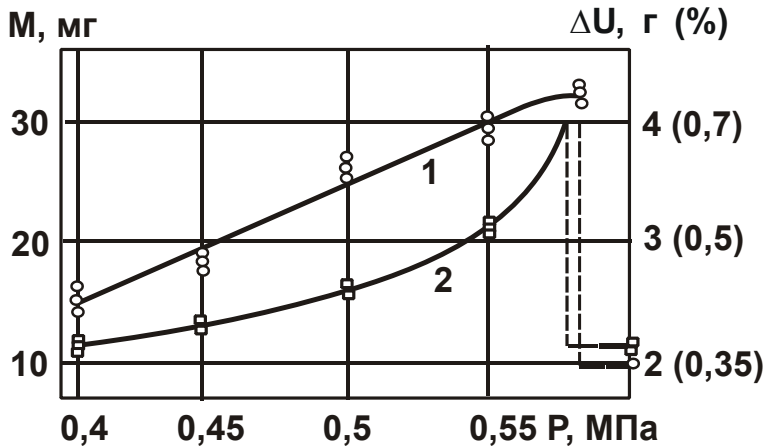


Рис. 5.13. Залежність продуктивності обробки M (1) і зношування абразивного матеріалу ΔU (2) від тиску стисненого повітря P

Умови обробки: абразивний матеріал 63С, зернистість 40 (400 мкм), час обробки 30 хвилин.

зних часток осідати в рідині з характерною для них швидкістю. У процесі експлуатації установок з метою проведення експериментальних досліджень було встановлено, що абразивні зерна осідають на дно бака-відстійника швидше від усіх інших перерахованих складових (побічних продуктів процесу), а відходи чергової операції осідають на верхньому шарі абразивного матеріалу.

Для отримання дози абразиву, очищеного від відходів, необхідно, повертаючи рукоятку упівоберта за годинниковою стрілкою, надавати руху спеціальній важільній системі, скаламучуючи осад відходів над шаром абразивного матеріалу (рис. 5.14, позиція 1), а потім по дугоподібній траєкторії (рис. 5.14, позиції 2, 3) зачерпувати абразивний матеріал закріпленою ємністю, яка переміщується за допомогою тієї ж системи важелів, але з поворотом рукоятки за годинниковою стрілкою здовж циліндричного дна бака-відстійника. Ці дії повторюються під час кожного наступного завантаженні протягом робочої зміни.

У процесі відділення відходів обробки від абразивного матеріалу разом із ними втрачаються й абразивні зерна. Тому в рамках цієї роботи розпочато спробу і знайдено технічне рішення, спрямоване на зниження витрат часу й абразивного матеріалу в процесі експлуатації установок. У зазначеному технічному рішенні використано ефект "гідралічної крупності", тобто використовуються властивості рі-

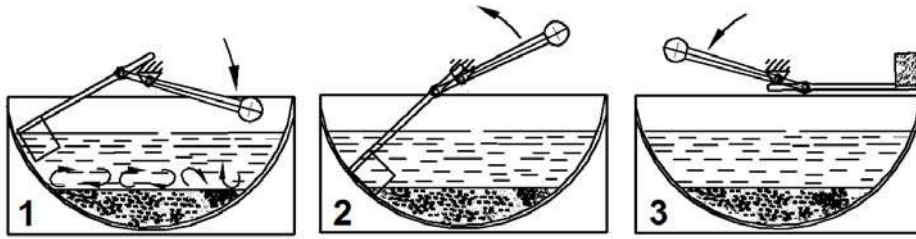


Рис. 5.14. Схема пристрою для очищення абразивного матеріалу від відходів

Умовні позначення: 1 – скаламучення розчину; 2, 3 – забір дози абразивного матеріалу.

Наприкінці обробки (наприкінці робочої зміни) оператор через зливальний отвір, який знаходиться над шаром абразивного матеріалу (майже на межі), зливає з бака-відстійника скаламучену рідину (разом із нею й невелику кількість абразивного матеріалу) і заливає чистий розчин для подальшого використання. При цьому втрачається незначна кількість абразивного матеріалу, який необхідно періодично поповнювати.

У якості абразивного матеріалу для обробки в цій роботі в основному використовується карбід кремнію зелений 63С – 65С. Він має зерна із гладкою поверхнею граней, чітко виражені різальні кромки, гострі вершини, тобто менші кути загострення вершин і різноманітну конфігурацію порівняно з іншими абразивними матеріалами. Незважаючи на високий рейтинг серед абразивних матеріалів (4-й після алмазу, ельбору (кубічного нітриду бору й карбиду бору)), карбід кремнію зелений має відносно невисоку ціну й різноманітний зерновий склад. У процесі виконання розрахунків урахувували технічні характеристики карбиду кремнію зеленого: щільність матеріалу – $3,2 \text{ г/см}^3$; насипна щільність – 1,49; мікротвердість – 32,4 ... 35,3 ГПа. Підтвердженням того, що зерно карбиду кремнію зеленого має гострі вершини, тобто "променисту" форму, є розбіжності більш ніж у два рази в щільності матеріалу й насипній щільності. У насипному вигляді сумарні об'єми зерен і простору між ними однакові.

Таким чином, у даному параграфі розрахунково-експериментальним шляхом визначено кількість абразивних зерен, які беруть участь у зніманні металу з оброблюваної поверхні в процесі абразивної обробки заtoplеними струменями. Установлено, що вона становить усього 7 % від загальної кількості зерен, які контактували з оброблюваною поверхнею. Це дозволило уточнити відомі дані про кількість абразивних зерен, що беруть участь у зніманні металу з оброблюваної поверхні, і зробити вис-

новок про незначне використання потенційних можливостей процесу абразивної обробки затопленими струменями й необхідності подальшого пошуку нових рішень щодо його інтенсифікації.

5.5. Експериментальні дослідження шорсткості обробленої поверхні

Стан поверхневого шару після механічних і фізико-механічних методів обробки характеризується в основному параметрами шорсткості, залишковими напруженнями й наклепом (глибиною і ступенем зміцнення). Поверхневий шар після абразивної обробки затопленими струменями характеризується такими ж параметрами.

Шорсткість поверхні після абразивної обробки затопленими струменями головним чином залежить від вихідної шорсткості, швидкості й розміру абразивних зерен та часу обробки. При цьому розглядаються дві стадії формування мікрорельєфу поверхні. На першій стадії відбувається видалення найбільш виступних нерівностей, а на другій стадії – формування однорідного в усіх напрямках мікрорельєфу поверхні. Мікрорельєф поверхні є сукупністю слідів (лунок), що залишають на поверхні абразивні зерна, причому розташування лунок має випадковий характер. Формування мікрорельєфу поверхні відбувається протягом певного часу

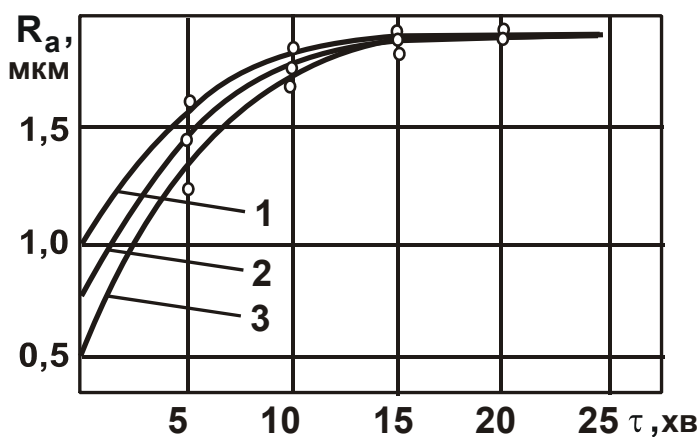


Рис. 5.15. Залежність шорсткості поверхні R_a від часу обробки τ

Умовні позначення: 1; 2; 3 – при вихідній шорсткості поверхні $R_{a,вих} = 1,0; 0,75; 0,5$ мкм. Умови обробки: абразив 63С (карбід кремнію зелений) зернистістю 63.

(10 ... 25 хвилин обробки), а потім процес стабілізується і мікрорельєф поверхні не змінюється. Відповідно не змінюються й параметри шорсткості поверхні.

Підтвердженням цього є результати експериментальних досліджень, наведені на рис. 5.15. Як видно, із часом обробки τ висота мікронерівностей (параметр шорсткості поверхні R_a) спочатку збільшується, а потім стабілізується й залишається незмінною.

Причому дана закономірність справджується для різних значень вихідної шорсткості оброблюваної поверхні $R_{a.вих}$, які змінюються в межах 0,5 ... 1,0 мкм. Як впливає з рис. 5.15, чим менша вихідна шорсткість поверхні $R_{a.вих}$, тим менша шорсткість поверхні R_a , утворена в процесі обробки. При цьому вихідна шорсткість поверхні $R_{a.вих}$ фактично не впливає на час обробки, за якого настає стабілізація шорсткості поверхні R_a . У даному випадку найбільше значення шорсткості поверхні $R_a = 1,8$ мкм утворюється приблизно за 15 хвилин обробки. Таким чином, експериментально встановлено, що одна й та сама шорсткість поверхні може бути отримана за різних значень вихідної шорсткості поверхні $R_{a.вих}$.

Як впливає з рис. 5.16, зі збільшенням вихідної шорсткості поверхні в межах $R_{a.вих} = 1,0 \dots 1,5$ мкм має місце збільшення шорсткості пове-

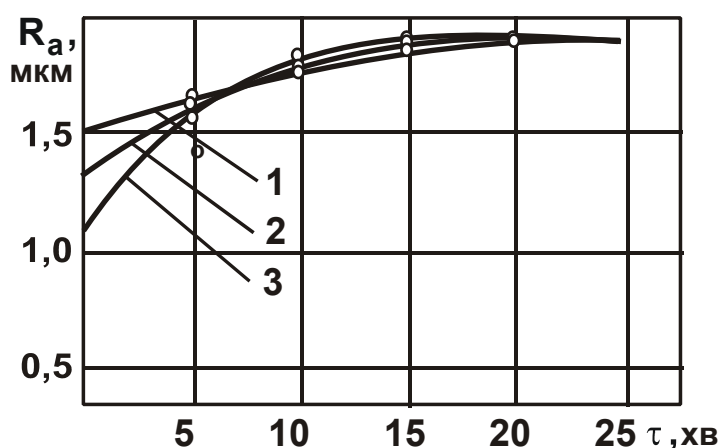


Рис. 5.16. Залежність шорсткості поверхні R_a від часу обробки τ

Умовні позначення: 1; 2; 3 – при вихідній шорсткості поверхні $R_{a.вих} = 1,5; 1,25; 1,0$

рхні R_a із часом обробки τ , а потім її стабілізація в часі. Найбільша шорсткість поверхні $R_a = 1,8$ мкм і фактично не залежить від вихідної шорсткості поверхні $R_{a.вих}$, що відповідає попередньому випадку (див. рис. 5.15). Однак час обробки, за який відбувається стабілізація в часі шорсткості поверхні, збільшується до 25 хвилин (рис. 5.16). Отже, чим вища вихідна шорсткість поверхні $R_{a.вих}$, тим більший час, необ-

хідний для забезпечення стабілізації мікрорельєфу обробленої поверхні. Таким чином, експериментально встановлено залежність шорсткості поверхні від часу обробки за різної вихідної шорсткості $R_{a.вих}$, а також визначено час, необхідний для забезпечення стабілізації мікрорельєфу обробленої поверхні. Параметри обробки бралися наступні: абразивний матеріал – шліфзерно 63С (карбід кремнію зелений) зернистістю 40П (400 мкм); тиск стисненого повітря перед соплом 0,5 МПа; кількість абразивного матеріалу 0,18 л; об'єм води в робочій камері 3 л.

На основі отриманих експериментальних даних можна зазначити, що в процесі формування шорсткості можливі три випадки: у ході обробки

вихідна шорсткість поверхні збільшується; формується новий мікрорельєф без зміни показника вихідної шорсткості; шорсткість поверхні в процесі обробки зменшується. Очевидно, виникнення того чи іншого випадку залежить від висоти нерівностей вихідної поверхні, розмірів лунок, що залишають абразивні зерна, кількості зерен, що контактують із оброблюваною поверхнею, а також від часу, необхідного для формування нового мікрорельєфу. Таким чином, реальні технологічні особливості процесу формування мікрорельєфу дозволяють подати його у вигляді послідовності одиничних актів контактної взаємодії на елементарній ділянці оброблюваної поверхні. Такий підхід дозволяє визначити параметри шорсткості після абразивної обробки затопленими струменями на основі моделювання процесу формування мікрорельєфу оброблюваної поверхні. У процесі моделювання необхідно враховувати мікрорельєф вихідної поверхні, параметри потоку абразивних зерен, контактну взаємодію зерен з поверхнею й мікрорельєф поверхні після її обробки. У рамках запропонованої моделі вихідний стан мікрорельєфу обробленої поверхні характеризується максимальною висотою нерівностей профілю R_{\max} .

Кількість абразивних зерен, які взаємодіють з оброблюваною поверхнею на елементарній ділянці, залежить від зернистості й концентрації абразивного матеріалу в суспензії, часу обробки, кількості й

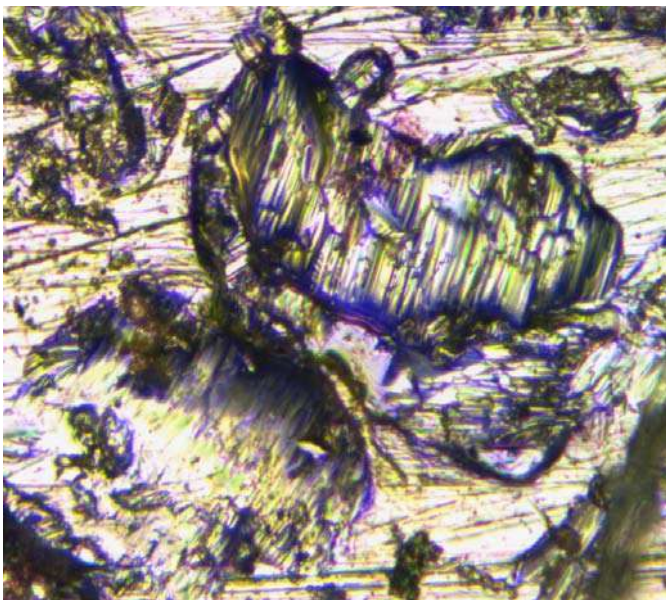


Рис. 5.17. Фотографія одиничного сліду абразивного зерна на поверхні зразка із латуні (зі збільшенням у 625 разів)

одиночної маси деталей, кількості сопел, їхнього діаметра, напрямку осей сопел у вертикальній і горизонтальній площинах.

Кожний одиничний акт контактної взаємодії викликає певні зміни на оброблюваній поверхні. Відбувається деформація виступів профілю, видалення матеріалу з лунки, в зоні контакту формується новий мікрорельєф поверхні. На рис. 5.17 показана фотографія одиничних контактів взаємодії абразивних зерен з оброблюваною поверхнею. Ре-

альний процес відбувається протягом певного проміжку часу, і кількість абразивних зерен, які взаємодіють із поверхнею, відоме (визначається підрахунком кількості слідів у полі зору мікроскопа після обробки протягом декількох секунд) (див. рис. 5.12). Тому під час аналізу формоутворення поверхні за відомою кількістю взаємодій кінцевий результат із достатньою точністю відповідає реальному процесу.

Для більш повного уявлення про закономірності формування шорсткості поверхні й умови її зменшення в наступному розділі 6 роботи будуть наведені емпіричні залежності шорсткості поверхні від параметрів обробки. Дослідження проводилися на таких самих зразках, які використовувалися під час встановлення залежностей, наведених на рис. 5.15 і 5.16. Результати досліджень були математично оброблені відповідно до методики планування експериментів з одержанням лінійного рівняння регресії й степеневої функції другого порядку. У якості параметра оптимізації була обрана глибина профілю обробленої поверхні R_{max} . Вихідна шорсткість поверхні зразків $R_a = 0,1 \dots 0,2$ мкм була завідомо меншою від шорсткості поверхні, яку можна було одержати за будь-яких сполучень параметрів обробки, тобто вона не впливала на формування мікрорельєфу поверхні.

5.6. Експериментальні дослідження напруженого стану поверхневого шару деталі

Напружений стан поверхневого шару деталі в процесі абразивної обробці затопленими струменями залежить, насамперед, від її габаритних розмірів, маси й швидкості абразивних зерен (яка визначається тиском стисненого повітря на вході в сопловий пристрій, розташований на дні робочої камери). Як було встановлено, в разі відносно малих розмірів абразивних зерен їхня здатність виконувати мікрорізання й пластичне деформування знижується. У поверхневих шарах деталі виникають незначні деформації, у результаті чого не забезпечується необхідне їх зміцнення. Зі збільшенням розміру абразивних зерен збільшується напруження, що виникає в зоні контакту зерен і поверхні металу, і знімання металу відбувається в основному за рахунок мікрорізання й пластичного відтискання металу. Для з'ясування ступеня впливу кожного із цих параметрів на залишкове напруження й наклеп були проведені експерименти

на зразках, виготовлених із титанового сплаву ВТ1 і сталі 65Г, які характеризуються пружними властивостями, за наступних технологічних параметрів абразивної обробки затопленими струменями: абразивний матеріал – карбід кремнію зелений 63С зернистістю 63П об'ємом 0,18 л; витрата стисненого повітря 1 м³/хв при тиску стисненого повітря 0,5 МПа; час обробки 30 хв. Дослідження залишкового напруження проводилися на зразках з розмірами 60×20×0,18 мм. Зразки до обробки не мали помітних відхилень від правильної геометричної форми, що не виключало напруженого стану металу. Для зняття можливого поверхневого напруження усі зразки піддавалися прискореному (вібраційному) старінню на вібраційному стенді з частотою коливань 23,3 Гц протягом 60 хв.

Після операції старіння наявність внутрішнього напруження перевіряли збурюванням металу з однієї сторони контрольного зразка. У результаті підбурення поверхневого шару металу зразок не змінив початкової форми, що свідчило про відсутність напруження поверхневого шару. Перед початком обробки зразки попарно спаювали припоєм по кутах пайкою так, щоб одна плоска сторона зразка була ізольована від струминно-абразивної дії (рис. 5.18).

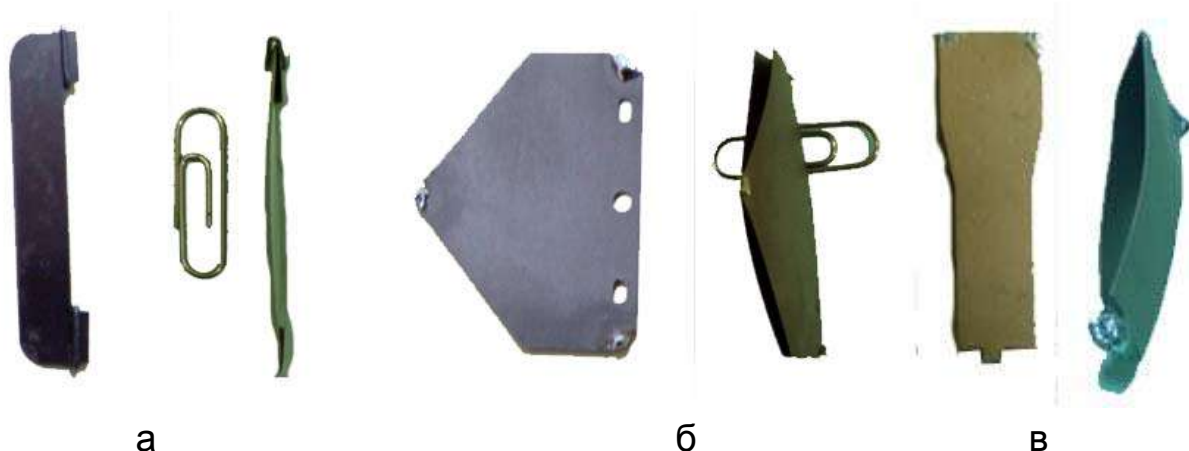


Рис. 5.18. Зовнішній вигляд спарених деталей до й після абразивної обробки затопленими струменями: а – титановий сплав ВТ-1; б – сталь 65Г; в – берилієва бронза БрБ2

Після обробки протягом 30 хвилин попарно з'єднані зразки ставали двоопуклими, тобто утворювали два кульових сегменти із прямокутним периметром. Після розпаювання досягалася рівновага в напруженнях із двох протилежних сторін зразків – обробленої й необробленої. Глибина напруженого шару визначалася шляхом вимірювання дефор-

мації зразка (рис. 5.19) при безперервному підбуренні металу з обробленої струминно-абразивним методом сторони зразка доти, поки зразок не вирівнювався й не ставав плоским. У результаті підбурення металу товщина зразків зменшилася від 5 до 6 мкм. Вимірювання товщини контрольних зразків виконували на горизонтальному оптичному мікрометрі з наступним розрахунком за формулою Саверіна М. М. [116]:

$$\sigma_{\text{ср}} = \frac{8 \cdot E \cdot I \cdot e}{B^2 \cdot \varepsilon \cdot \Delta F}, \quad (5.12)$$

де $\sigma_{\text{ср}}$ – середнє значення напруження в наклепаному шарі, Н/мм²;

E – модуль пружності матеріалу, Н/мм²;

I – момент інерції пластини, мм⁴;

ε – відстань між центром наклепаного шару й центром ваги всього перетину пластини, мм;

B – довжина пластини, мм;

e – вигин пластини (стрілка хорди), мм;

ΔF – площа поперечного перерізу наклепаного шару, мм².

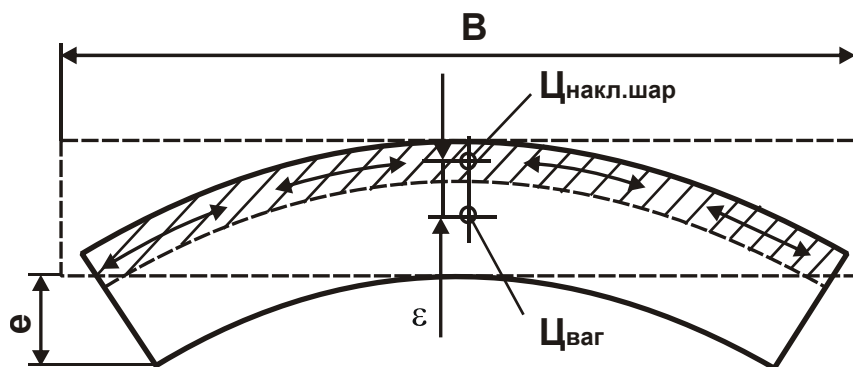


Рис. 5.19. Розрахункова схема для визначення середнього значення напруження в наклепаному шарі

Умовні позначення: $\text{Ц}_{\text{ваг}}$ – центр ваги пластини; $\text{Ц}_{\text{накл.шар}}$ – центр ваги наклепаного шару; заштрихована ділянка – середнє значення напруження в наклепаному шарі.

На рис. 5.19 наведено розрахункову схему за формулою (5.12) [116]. На схемі зображено зразок з наклепанним шаром, який характеризується стискаючим напруженням. Формальною ознакою наявності стискаючого напруження у наклепаному шарі є його опуклість. Величина прогину (стрілка хорди) визначається вимірюванням зразка, розміщеного на

плоскій поверхні, за допомогою рейсмаса за винятком товщини зразка (див. рис. 5.19). На рис. 5.20 наведена залежність прогину пластини (з найбільшим габаритним розміром, що дорівнює 60 мм) у результаті утворення поверхневого напруження від часу обробки. Отримано наступні результати вимірів прогину, віднесеного до 60 мм довжини пластини: деталь із титанового сплаву ВТ-1 – $e = 3,75$ мм; зі сталі 65Г – $e = 3,5$ мм; із берилієвої бронзи – $e = 3,25$ мм.

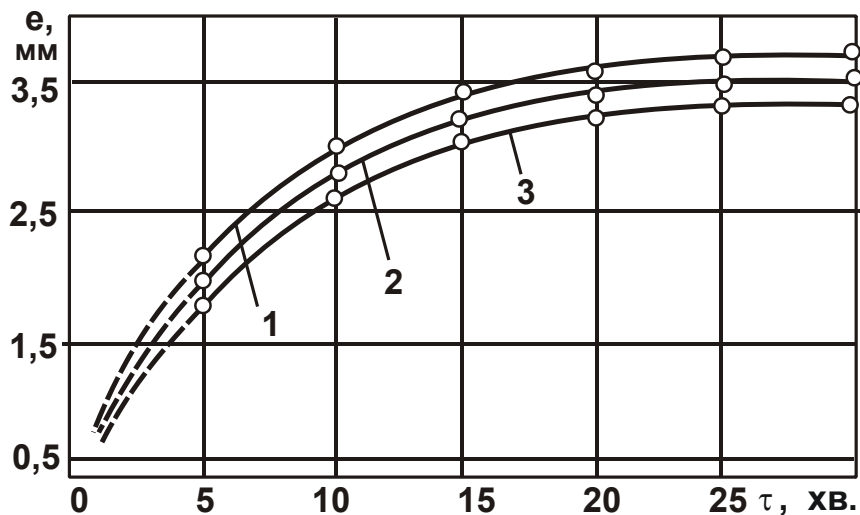


Рис. 5.20. Залежність прогину пластини e від часу обробки τ

Умовні позначення: 1 – титановий сплав ВТ-1 товщиною 0,18 мм; 2 – сталь 65Г товщиною 0,2 мм; 3 – берилієва бронза БрБ2 товщиною 0,25 мм.

Глибину напруженого (наклепаного) шару визначали шляхом його підбурення. Ознакою видалення наклепаного шару, а отже, й усунення напруження, є відновлення площинності зразка в міру підбурення шару металу. У результаті вимірювання встановлено, що товщина шарів на зразках із титанового сплаву ВТ-1 і сталі 65Г дорівнює 5 мкм, а на зразку із берилієвої бронзи БрБ2 – дорівнює 6 мкм. Таким чином, можна вважати, що глибина наклепаного шару для різних матеріалів приблизно однакова. Використовуючи отримані дані, за залежністю (5.11) можна визначити середнє значення напруження в наклепаному шарі для зразка зі

$$\text{сталі 65Г: } \sigma_{\text{cp}} = \frac{8 \cdot 2,2 \cdot 10^5 \cdot 0,0033 \cdot 3,5}{3600 \cdot 0,1 \cdot 0,016} = 3529,16 \text{ г/мм}^2 = 35,29 \text{ Н/мм}^2.$$

Аналогічно визначено середні значення напруження в наклепаному шарі для зразків з титанового сплаву ВТ-1 і берилієвої бронзи БрБ2, які відповідно дорівнюють: $\sigma_{\text{cp}} = 37,81 \text{ Н/мм}^2$ і $\sigma_{\text{cp}} = 32,77 \text{ Н/мм}^2$.

Як видно, найбільш схильні до утворення напруження титановий сплав ВТ-1 і сталь 65Г. Разом із тим, з рис. 5.20 впливає однакова інтенсивність зростання наклепу в трьох досліджуваних матеріалах. Отже, в умовах абразивної обробки затопленими струменями спостерігається стійка тенденція до утворення стискаючого напруження, яке підвищує твердість та міцність на вигин. При цьому в міру збільшення тривалості часу обробки не виникає перенаклепу і не знижується знімання металу, що можна пояснити стабільністю ударів абразивних зерен по оброблюваній поверхні під гострим кутом.

З рис. 5.20 видно, що зі збільшенням часу обробки до 20 – 25 хвилин прогин пластини безупинно збільшується, а потім фактично залишається незмінним. Це корелюється з експериментальними даними зміни шорсткості поверхні (див. рис. 5.15) і свідчить про стабілізацію параметрів процесу через 20 – 25 хвилин обробки. Таким чином, експериментально встановлено, що в процесі абразивної обробки 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 оброблюваних поверхонь.

Додатковим підтвердженням часу формування поверхневого шару оброблюваних деталей є результати вимірювань мікротвердості (за Віккерсом) поверхонь деталей із різних матеріалів до й після обробки на мікротвердомірі ПМТ-3. Вимірювання мікротвердості виконували за допомогою алмазної піраміди з витримкою навантаження 1,5 Н протягом 15 с. На кожному зразку виконували по 10 вимірювань. Поетапна зміна мікротвердості деталей з алюмінію АД, латуні ЛС59.1, латуні Л63, сталі Ст3, сталі 65Г (рис. 5.21) завершується через 20 – 25 хвилин і далі стабілізується на різних рівнях залежно від схильності матеріалів до наклепу.

Із графіків, наведених на рис. 5.21, видно, що найбільш сприйнятливими до наклепу в процесі абразивної обробки затопленими струменями з розглянутих матеріалів є алюміній АД і сталь 65Г.

У процесі абразивної обробки затопленими струменями абразивні частки взаємодіють із оброблюваною поверхнею в повітряно-рідинному потоці. При цьому краплі рідини постійно змочують абразивні частки, проникають безпосередньо в зону контакту. У зв'язку із цим на закономірності формування нової поверхні в процесі абразивної обробки

затопленими струменями може істотно впливати ефект Ребіндера П. А. Для його реалізації необхідне включення до складу суспензії якої-небудь із поверхнево активних речовин, таких, як жирні кислоти, наприклад, олеїнова кислота.

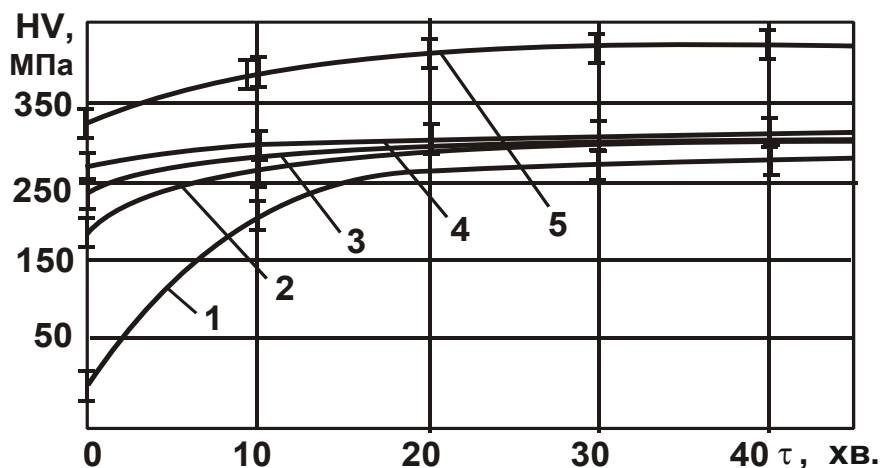


Рис. 5.21. Залежність мікротвердості HV (за Віккерсом) деталей від часу їхньої обробки τ

Умовні позначення: 1 – алюміній АД; 2 – латунь ЛС59.1; 3 – латунь Л63; 4 – сталь Ст3; 5 – сталь 65Г.

Сутність цього явища полягає в полегшенні процесів деформування й руйнування твердих тіл і мимовільному перебігу в них структурних змін у результаті зниження їх вільної поверхневої енергії в разі контакту із середовищем, яке містить речовини, здатні до адсорбції на міжфазній поверхні.

Ефект Ребіндера П. А. проявляється у випадку спільної дії середовища (у даному випадку рідкої складової суспензії) і механічних напружень, створюваних ударами абразивних зерен. Сутність ефекту полягає в зниженні міцності й виникненні крихкості оброблюваного металу. Після абразивної обробки затопленими струменями необхідне промивання деталей чистою водою для того, щоб зазначений ефект не виявився в процесі функціонування (експлуатації) готових деталей у виробі. Теплові структурні зміни в зоні контакту не можуть вплинути на сусідні об'єми металу, у зв'язку із чим аналогічні зміни в поверхневому шарі деталей за таких умов малоімовірні. Тому виникнення залишкових напружень обумовлене деформаційними процесами, які відбуваються при багаторазових ударах абразивних зерен по оброблюваній поверхні.

5.7. Особливості утворення мікрорізів і знімання металу на кромках оброблюваної деталі

У вивченні формоутворення поверхні в процесі абразивної обробки затопленими струменями особливої уваги потребує вивчення механізму округлення гострих кромок і видалення задирок. На рис. 5.22 наведено фотографію кромки одного з торців листової деталі зі слідом абразивного зерна, яка є результатом 20 знімків зі зсувом різкості від вершини кромки по 1 – 2 мкм у глибину зображення.

Кромка (ребро) оброблюваної деталі, яка перебувала в робочій камері протягом 5 – 7 секунд, була розташована на столі мікроскопа так, що обидві грані, які прилягають до ребра, становили кути по 45° до площини стола мікроскопа. Ця деталь не має задирок, однак має потребу в округленні гострих кромок. На рис. 5.22 видно, що одне з абразивних зерен залишило свій слід на кромці, із чого власне й почався процес її округлення.



Рис. 5.22. Фотографія кромки одного з торців листової деталі зі слідом абразивного зерна, збільшена у 850 разів

Необхідно зазначити, що, на відміну від слідів зерен, які утворюються в процесі обробки плоскої поверхні (див. рис. 5.3), під час обробки кромки деталі слід абразивного зерна має чітко виражену форму, фактично відсутні навали деформованого металу з обох сторін і попереду сліду. Інакше кажучи, кінетичної енергії рухомого абразивного зерна достатньо для утворення повного мікрорізу, тоді як у процесі обробки плоскої поверхні деталі утворюються, як правило, неповні зрізи, а рухомі абразивні зерна фактично втрачають свою кінетичну енергію й зупиняються в оброблюваному металі. Із цього можна зробити висновок про те, що під час обробки кромки деталі енергоємність процесу менша, ніж під час обробки плоскої поверхні, і тому

інтенсивність знімання металу в цьому випадку більша. Зроблений висновок узгоджується з теоретичними рішеннями, отриманими в розділі 2 роботи, і свідчить про те, що кромку деталі простіше обробити, ніж

плоску поверхню. Підтвердженням тому є наведені на рис. 5.23 фотографії кромки деталей зі слідами абразивних зерен на кромках, на яких видно чіткі повні мікрорізи, що свідчить про високу якість обробки кромки деталі. Глибина різкості отримана в результаті програмної обробки 20 фотографій.

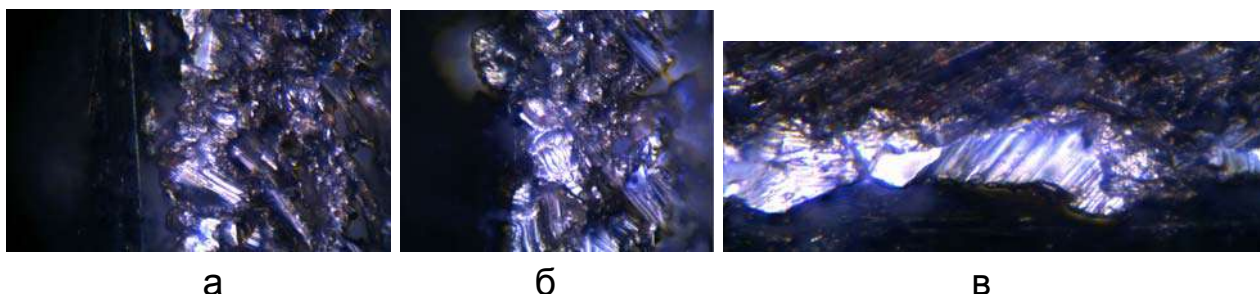


Рис. 5.23. Фотографії фрагментів кромки листової деталі з латуні зі слідами абразивних зерен зі збільшенням у 500 (а), 650 (б) і 850(в) разів

У процесі обробки деталей у вільному (незакріпленому) стані найбільш вразливими для руйнування виявляються задирки, тому що вони не захищені півпростором із двох протилежних сторін, а в перпендикулярному напрямку мають у якості захисту такі ж легкоруйнівальні задирки. Загальновідомо, що задирки на дрібних листових штампованих деталях утворюються через зазори між пуансоном і матрицею штампа. Причому, чим більше товщина й зазор, тим товща й вища задирка. Коли зазор дорівнює товщині штампованої деталі, здійснюється загин металу. Оскільки даний метод обробки не має нескінченної можливості знімання металу, необхідно обмежити величину припустимих задирок у процесі абразивної обробки затопленими струменями. Обмеження встановлювали, керуючись середньою довжиною сліду абразивного зерна на оброблюваній поверхні, отриманою на основі аналітичних висновків, і шляхом вимірювання розмірів слідів під мікроскопом. Довжина сліду становить 0,03 – 0,04 мм. Зазначений діапазон значень є найкращим для обробки деталей із шириною в основі задирки, що не перевищує 0,04 мм. Висота задирки – це величина, яка залежить від її ширини, матеріалу штампованої заготовки, а також від гостроти пуансона й матриці штампа. Як правило, висота задирки не перевищує три його товщини. Обробка деталей із задирками, ширина яких більша від зазначеної величини, вимагає більше 30 хвилин машинного часу для обробки.

Особливістю абразивної обробки затопленими струменями деталей з листового штампування є те, що, на відміну від усіх відомих методів обробки, значні задирки спочатку загинаються на площині, а потім зрізаються в основі, тобто реалізується випадок, коли створюються сприятливі за енергоємністю умови обробки зі зменшеною глибиною мікрорізання. Для інших методів обробки характерне загинання задирок в отвори, пази й на торці через "пакування" плоских деталей. Ця особливість методу абразивної обробки затопленими струменями дозволяє вирішувати проблеми зачищення від задирок вузьких пазів, у яких повинні переміщуватися без зазорів і заїдань стержні або втулки.

Стабільність процесу абразивної обробки затопленими струменями значною мірою залежить від сталості в часі кількості та якості всіх технологічних і конструктивних параметрів. Інакше кажучи, необхідно зберегти в часі: діаметр сопел, тиск стисненого повітря, а отже, витрату стисненого повітря, розмір зерен, кількість абразивного матеріалу й кількість рідкої складової абразивної суспензії.

Збереження діаметра сопел, як уже зазначалося, у даному процесі забезпечується принциповою схемою здійснення методу (операції).

Сталість тиску стисненого повітря як у лабораторних, так і у виробничих умовах забезпечується пневматичним редуктором, який передбачений на вході стисненого повітря в пневматичну систему установки.

Сталість витрати стисненого повітря є функцією двох попередніх параметрів, тобто діаметра сопел (сумарного перетину) і тиску стисненого повітря в пневматичній системі установки.

Збереження розміру абразивних зерен, як було показано, забезпечується швидкістю абразивних зерен, які приєднуються до струменя за межами зрізу сопла, у результаті чого зерна не одержують надмірного запасу кінетичної енергії, що викликає розколювання зерен на уламки в результаті ударів по оброблюваній поверхні. Абразивний матеріал підтримується в постійній кількості завдяки тому, що перебуває, так само, як і оброблювані деталі, в обмеженому просторі робочої камери установки для здійснення процесу абразивної обробки затопленими струменями.

Водяний розчин інгібітора корозії в складі абразивної суспензії – найбільш вразлива частина при здійсненні процесу абразивної обробки затопленими струменями. Основною причиною зменшення кількості рідини є те, що через неї пропускається стиснене повітря у вигляді спря-

мованих струменів з тиском 0,5 МПа. Обертюва рідинно-абразивна маса разом із деталями транспортується по замкнутій траєкторії, описує тороїдальну поверхню зі зміною елементів цієї маси. Одночасно із цим здійснюється обробка деталей, яка супроводжується виділенням водяного туману й утворенням окремих крапель води, які не завжди можуть потрапляти назад у робочу камеру. У зв'язку із зазначеним, знайдено технічне рішення, яке дозволяє зберігати в межах робочої камери весь її вміст. Докладний опис принципу роботи очисника відпрацьованого стисненого повітря наведено в розділі 7 роботи.

На рис. 5.24 показано характер зміни основних параметрів обробки за час роботи установки (2,5 години), що в 5 разів перевищує час здійснення однієї технологічної операції. Виконувалася обробка деталей з латуні ЛС59.1 при тиску стисненого повітря 0,5 МПа.

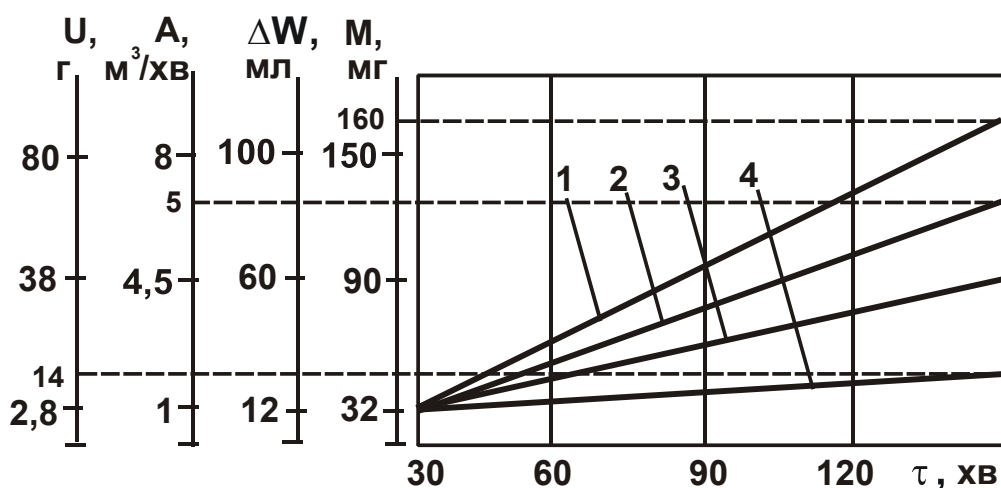


Рис. 5.24. Залежність знімання металу M (1), зношування абразиву U (2), витрати стисненого повітря A (3) і втрати рідини ΔW (4) від часу обробки τ

Наведені графіки вказують на високу стабільність основних параметрів процесу обробки, оскільки відхилення, які виражаються в зниженні знімання металу й збільшенні витрати стисненого повітря, відсутні. Відхилення, пов'язані зі зношуванням абразиву за час операції (30 хвилин), становлять 0,5 – 0,7 %, а з втратами рідини – 2 %. Цим показано, що метод абразивної обробки затопленими струменями, на відміну від відомих методів струминно-абразивної обробки, за рахунок виключення зношування сопел дозволяє стабілізувати в часі основні параметри обробки.

5.8. Узагальнення результатів експериментальних досліджень продуктивності та якості обробки

За характером абразивного впливу абразивну обробку затопленими струменями можна вважати змішаним процесом мікрорізання й пластичної деформації оброблюваної поверхні потоком абразивних зерен. Фізичну картину, що відображає процес формоутворення поверхневого шару оброблюваного матеріалу потоком абразивних зерен, треба, насамперед, розглядати як явище, викликане ударом окремого абразивного зерна. Удар абразивного зерна по оброблюваній поверхні приводить до виникнення заглиблення. Дослідження заглиблень дозволило зробити висновок про те, що метал витісняється з них як з утворенням, так і без утворення стружки.

За фізичною сутністю абразивна обробка затопленими струменями є процесом витікання струменів стисненого повітря в робочу камеру, заповнену абразивною суспензією й деталями. При цьому абразивні зерна суспензії інжектуються в струмені стисненого повітря, набирають швидкість і бомбардують оброблювані деталі. Обробка досягається завдяки значній різниці у швидкостях деталей і абразивних зерен. Різниця швидкостей абразивних зерен і оброблюваних деталей, які перебувають у струмені, забезпечується їхньою різною щільністю й габаритними розмірами. Завдяки тому, що абразивні зерна приєднуються до струменів стисненого повітря після їхнього виходу із сопла, забезпечується збереження діаметра їхніх каналів. Ця схема обробки є основною відмінною рисою процесу абразивної обробки затопленими струменями від традиційних процесів струминно-абразивної обробки.

Абразивну обробку затопленими струменями доцільно застосовувати для обробки дрібних (масою до 3 – 5 г) деталей невеликої жорсткості, які характеризуються складною просторовою формою. Метод обробки забезпечує одночасне видалення задирок, округлення гострих кромки, зменшення мікронерівностей на оброблюваних поверхнях, зміцнення поверхневого шару оброблюваних поверхонь, надання деталям товарного вигляду за допомогою створення рівної матової поверхні. Таким чином, крім значного зниження часу обробки цей спосіб дозволяє здійснити механізацію процесу оздоблювальних операцій і поліпшити умови праці в процесі обробки дрібних деталей (рис. 5.25).

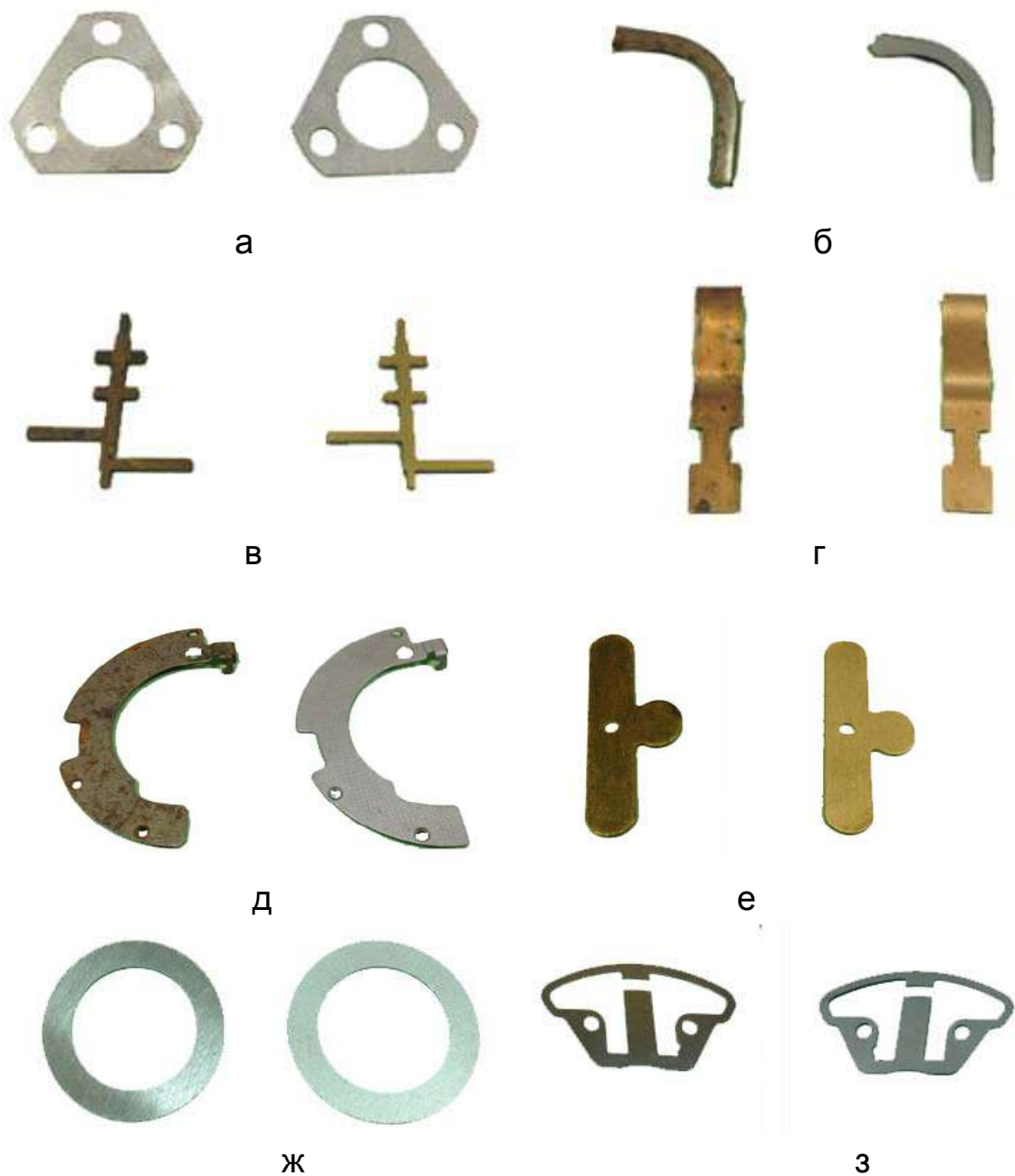


Рис. 5.25. Зовнішній вигляд деталей з різних матеріалів до й після обробки: а – алюміній; б – сталь 3; в – латунь ЛС59.1; г – берилієва бронза БрБ2; д – сталь 3; е – латунь Л63; ж – титановий сплав ВТ-1; з – сталь 65Г

На відміну від процесів різання, після яких на обробленій поверхні залишаються оброблювальні риски й мікротріщини, абразивна обробка затопленими струменями не створює спрямованої шорсткості, забезпечує зміцнення оброблюваної поверхні, внаслідок чого підвищується міцність деталей, а також поліпшуються інші експлуатаційні властивості оброблених деталей, виключаються припикання на їхніх поверхнях. Як

правило, процеси різання із застосуванням абразивного інструмента супроводжуються виникненням значних сил різання, які викликають деформації в оброблюваній поверхні з виділенням у зоні деформації великої кількості енергії. У процесі абразивної обробки затопленими струменями, як показали вимірювання, температура суспензії й оброблюваних деталей через 5 – 7 хвилин обробки знижується з 20° до 8 – 12°.

Дана закономірність пов'язана з аерацією рідкої складової суспензії, яка викликає штучне випарювання рідини, що, як відомо, охолоджує оброблювану поверхню. У цих умовах локальне нагрівання, викликане відділенням стружки абразивним зерном, усувається потоком або краплями суспензії, які омивають це абразивне зерно.

Висновки до розділу 5

1. Проведено комплексні експериментальні дослідження закономірностей утворення мікрорізів у процесі абразивної обробки затопленими струменями деталей із пластичних матеріалів і встановлено, що в цьому процесі формуються як повні, так і неповні мікрорізи. Повні мікрорізи утворюються при невеликих кутах входження абразивних зерен в оброблюваний метал (10 – 30°), а неповні зрізи – при більших кутах внаслідок недостатньої кінетичної енергії рухомих абразивних зерен, що узгоджується з відомими експериментальними даними, отриманими під час струминно-абразивної обробки. З'ясовано також, що відділення металу в процесі обробки відбувається в результаті утворення мікростружок і пластичного відтискування металу. Це підтверджує правочинність аналітичного подання розглянутого процесу обробки з позиції теорії різання металів з урахуванням закономірностей переходу від процесу пластичного деформування металу до процесу різання (стружкоутворення).

2. Проведено комплекс експериментальних досліджень закономірностей знімання металу й формування поверхонь деталей у процесі абразивної обробки затопленими струменями на основі аналізу топографії мікропрофілю оброблених поверхонь. З'ясовано, що в процесі обробки відбувається хаотичне неорієнтоване накладення слідів абразивних зерен на оброблюваній поверхні, у результаті чого формується безформна оброблена поверхня, яка складається з окремих різних за величиною неорієнтованих заглиблень і виступів. За структурою мікрогеометрії ця

поверхня відрізняється від поверхонь, утворених під час шліфування, доведення й струминно-абразивної обробки. Із цього зроблено висновок про можливість створення принципово нової неорієнтованої мікрогеометрії поверхні під час абразивної обробки затопленими струменями, що відкриває перспективи підвищення експлуатаційних властивостей поверхонь деталей, наприклад, за рахунок створення матових поверхонь та ін.

3. Розрахунково-експериментальним шляхом визначено кількість абразивних зерен, які беруть участь у зніманні металу з оброблюваної поверхні в процесі абразивної обробки затопленими струменями. Установлено, що вона становить усього 7 % від загальної кількості зерен, які проконтактували з оброблюваною поверхнею. Це дозволило зробити висновок про незначне використання потенційних можливостей процесу й необхідність подальшого пошуку нових рішень інтенсифікації обробки.

4. Експериментально визначено шорсткість поверхні в процесі абразивної обробки затопленими струменями і встановлено, що із часом обробки вона стабілізується на одному рівні незалежно від вихідної шорсткості поверхні. Так, з'ясовано, що коли вихідна шорсткість поверхні $R_a = 0,5 \dots 1,5$ мкм і зернистість абразиву № 40 стабілізація шорсткості поверхні на рівні $R_a = 0,8 \dots 1,25$ мкм відбувається через 15 ... 25 хвилин обробки. Отже, формування шорсткості поверхні в процесі абразивної обробки затопленими струменями триває 15 ... 25 хвилин.

5. Розроблено нову методику визначення залишкового напруження у поверхневому шарі деталі після її абразивної обробки затопленими струменями. На її основі встановлено, що в процесі обробки виникає наклеп глибиною 5 – 6 мкм. Величина залишкового напруження у поверхневому шарі деталі збільшується протягом 20 ... 25 хвилин обробки, після чого стабілізується. При цьому оброблена поверхня стає опуклою, тобто виникають стискальні залишкові напруження. Це вказує на перевагу силового фактора над тепловим фактором у процесі обробки й свідчить про високу якість оброблюваних поверхонь.

6. Зроблено вимірювання мікротвердості (за Віккерсом) поверхонь деталей з різних матеріалів до й після обробки на твердомірі ПМТ-3 за допомогою алмазної піраміди яка витримує навантаження 1,5 Н протягом 15 секунд. У результаті встановлено, що із часом обробки відбувається збільшення мікротвердості 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 матеріалів до наклепу. Найбільш сприйнятливими до наклепу в процесі абразивної обробки затопленими струменями з розглянутих матеріалів є алюміній АД і сталь 65Г. Із цього зроблено висновок про можливість підвищення якості поверхневого шару деталей у процесі обробки.

7. Експериментально встановлено, що, незважаючи на сприятливі умови експлуатації абразивного матеріалу в процесі обробки, його втрачати потребують періодичного поповнення. Це пов'язано з тим, що в процесі обробки, хоч і несуттєво (до 0,7 %), але все-таки спостерігається дроблення абразивних зерен. З'ясовано, що в разі зміни тиску стисненого повітря до значення 0,57 МПа знімання металу пропорційно збільшується, а дроблення зерен дещо 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 перебігу процесу обробки є встановлення тиску стисненого повітря не вище 0,57 МПа.

8. Виконано експериментальне оцінювання стабільності основних параметрів процесу обробки. Установлено відсутність відхилень, пов'язаних зі зниженням знімання металу і збільшенням витрати стисненого повітря за час роботи установки (2,5 години), що в 5 разів перевищує час здійснення однієї технологічної 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 розглянутий метод обробки, на відміну від відомих методів струминно-абразивної обробки, за рахунок виключення зношування сопел дозволяє стабілізувати в часі основні параметри обробки.

9. Установлено, що метод абразивної обробки затопленими струменями забезпечує одночасне видалення задирок, округлення гострих кромки, зміцнення оброблюваних поверхонь і надає деталям товарного вигляду за допомогою створення рівної матової поверхні. У процесі обробки забезпечується сталість (збереження) діаметра сопел, тиску стисненого повітря, а отже, витрати стисненого повітря й зернистості, тобто збереження цілості розміру зерен, кількості абразивного матеріалу й кількості рідкої складової абразивної суспензії, що важливо для стабільного перебігу процесу обробки.

Розділ 6. Експериментальні дослідження технологічних параметрів абразивної обробки деталей затопленими струменями

6.1. Вибір конструкції сопла за критерієм передачі максимальної швидкості руху абразивним зернам, які перебувають за його межами

На відміну від відомих способів струминно-абразивної обробки, досліджуваний метод характеризується меншим запасом кінетичної енергії. У зв'язку із цим необхідно виявити конструкцію сопла, яка забезпечує максимальну швидкість руху абразивних зерен. Визначення оптимальних параметрів сопла є одним із найбільш важливих напрямів досліджень процесу абразивної обробки затопленими струменями. Загальновідомо, що чим легші абразивні зерна, тим за менший час вони досягають високої швидкості руху. Однак у граничному шарі оброблюваної деталі відбувається гальмування зерен. Для більш легких зерен це веде до різкого зниження швидкості під час взаємодії з оброблюваною поверхнею. Водночас, чим масивніші абразивні зерна, тим гірше вони розганяються потоком, але тим краще зберігають швидкість руху в разі наближення до оброблюваної поверхні. У зв'язку із цим співвідношення щільності матеріалу абразивних зерен, їхнього розміру й форми є важливим чинником для оптимізації процесу струминно-абразивної обробки.

Експериментальне визначення швидкості руху абразивних часток виконувалося за методикою, наведеною в п. 4.2 (див. рис. 4.1 – 4.3). У пристрої для визначення швидкості руху абразивних зерен у струмені стисненого повітря використовувалися різні змінні сопла, показані на рис. 6.1 (позиції а, б, в, г). Прийняті позначення на рис. 6.1 такі ж, як і на рис. 4.1. Експерименти проводили на базі токарного верстата із трьома циліндрами діаметрами 40, 60 і 80 мм і відповідними розмірами розтрубів. Величину кута φ (описану в п. 4.2) визначали за допомогою оптичної ділильної головки й рейсмаса (рис. 6.2). Середню швидкість руху абразивного зерна визначали за залежністю (4.3).

На рис. 6.3 наведено графік зміни середньої швидкості руху V абразивних зерен у тривимірному просторі в міру віддалення H від зрізу

сопла в діапазоні від 20 до 80 мм в напрямку осі струменя та в міру віддалення r від середини до периферії струменя.

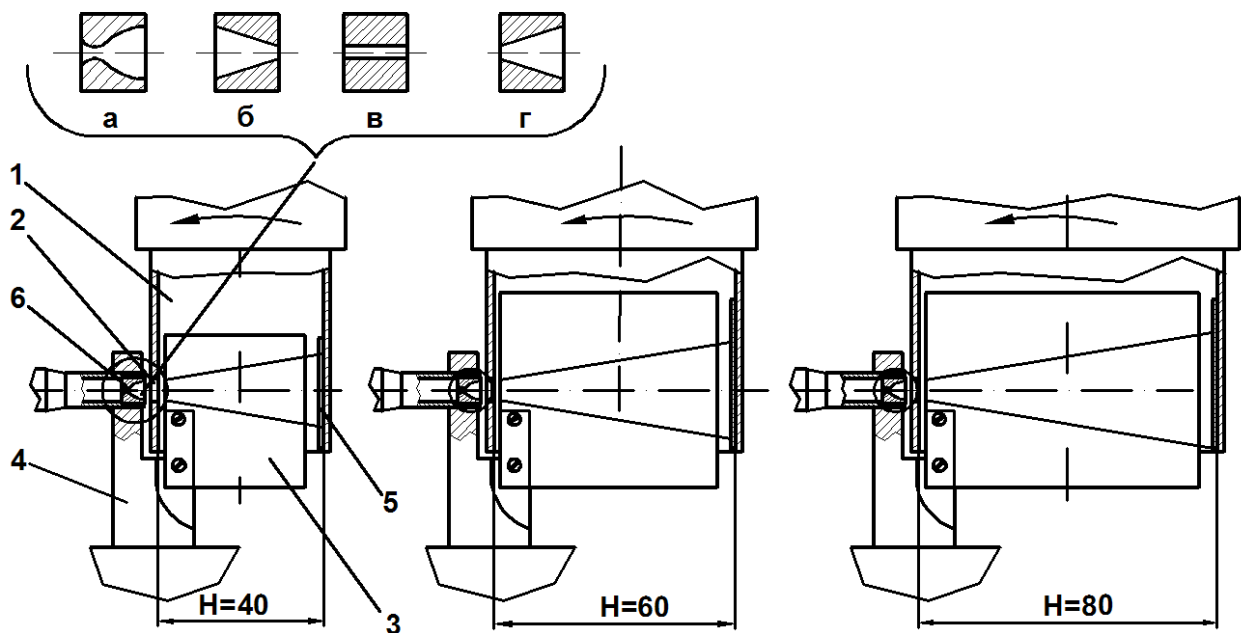


Рис. 6.1. Пристрій для визначення швидкості руху абразивних зерен у струмені стисненого повітря зі змінними соплами: а – надзвукове сопло Лаваля; б – звужуване конічне сопло; в – циліндричне сопло; г – розширюване конічне сопло

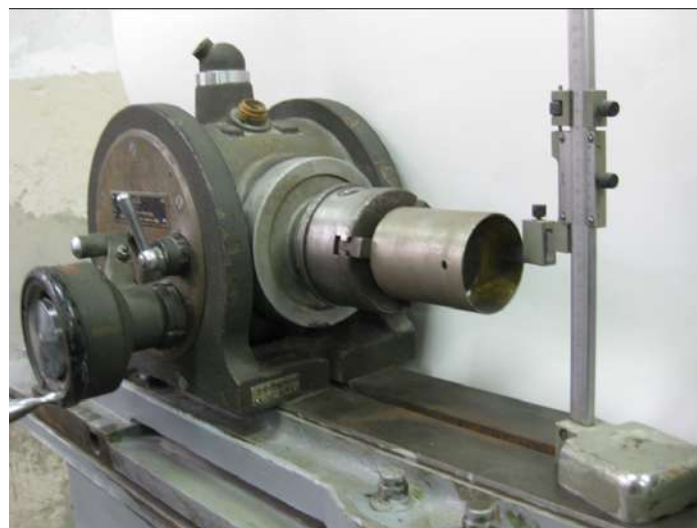


Рис. 6.2. Оптична ділильна головка з встановленим у трикулачковому патроні циліндром для визначення за допомогою рейсмаса кута повороту циліндра φ

Швидкості руху абразивних зерен центральної частини струменя отримані за залежностями (4.4) і (4.5). У наступних перетинах середню

швидкість руху визначали, обробляючи експериментальні дані, отримані за результатами дослідів для циліндрів з діаметрами: 40, 60, 80 мм. Середня швидкість руху абразивних зерен на ділянці від 0 до 40 мм дорівнює $V_{\text{ср.40}} = 11,6$ м/с. За умови рівноприскореного руху ця швидкість відповідає середині ділянки, тобто відстані 20 мм. Кінцева швидкість руху на ділянці від 0 до 40 мм дорівнює:

$$V_{\text{ср.40}} = \frac{V_0 + V_{\text{х.40}}}{2}; \quad (6.1)$$

$$2 \cdot V_{\text{ср.40}} = V_{\text{х.40}}, \quad (6.2)$$

тобто $2 \cdot 11,6$ м/с = 23,2 м/с.

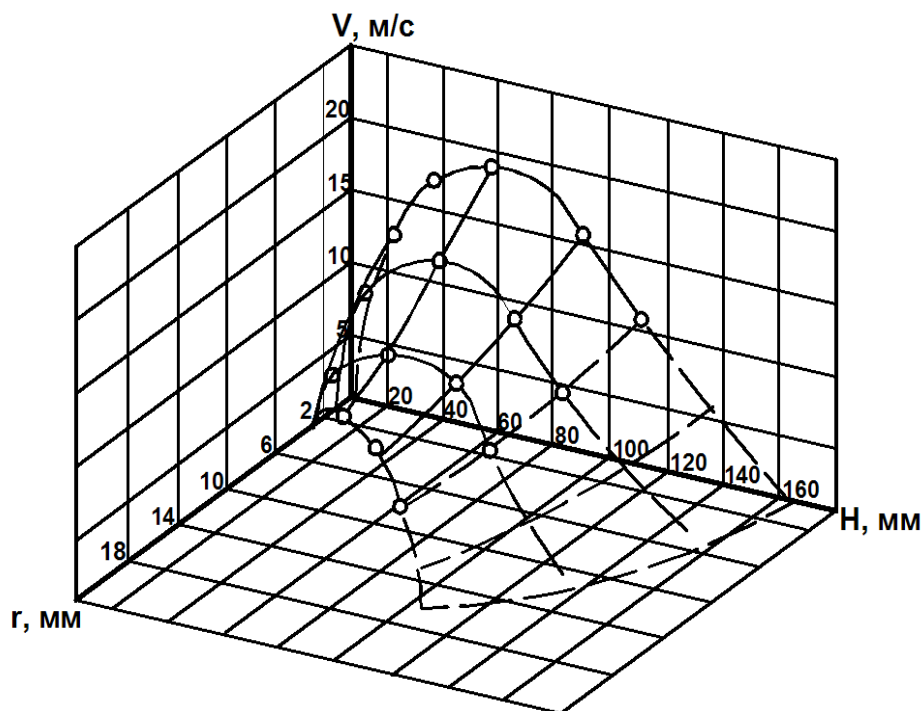


Рис. 6.3. Залежність V від H і r

Умови обробки: тиск стисненого повітря 0,4 МПа; діаметр сопла 2 мм. Штрихові лінії графіка добувані екстраполяцією.

За результатами експерименту для циліндра діаметром 60 мм середня швидкість руху склала $V_{\text{ср.60}} = 12,3$ м/с. Середню швидкість на ділянці від 40 до 60 мм визначено на основі попереднього й наступного за ним дослідів:

$$V_{\text{ср.60}} = \frac{V_{40} + V_{\text{х.60}}}{2}; \quad (6.3)$$

$$2 \cdot V_{\text{ср.60}} - V_{40} = V_{\text{х.60}}. \quad (6.4)$$

Тоді приріст швидкості руху на ділянці від 40 до 60 мм складе: $2 \cdot 12,3 \text{ м/с} - 23,2 \text{ м/с} = 1,4 \text{ м/с}$. Величина зміни швидкості руху додатня, отже, на ділянці 40 – 60 мм розгін часток триває. Експеримент із циліндром діаметром 80 мм показав середню швидкість руху $V_{\text{ср.80}} = 9 \text{ м/с}$. Середню швидкість руху на ділянці 60 – 80 мм визначено так само, з використанням попередніх даних:

$$V_{\text{ср.80}} = \frac{V_{60} + V_{\text{х.80}}}{2}; \quad (6.5)$$

$$2 \cdot V_{\text{ср.80}} - V_{60} = V_{\text{х.80}}. \quad (6.6)$$

Тоді $2 \cdot 9 \text{ м/с} - 2 \cdot 12,3 \text{ м/с} = - 6,6 \text{ м/с}$, тобто на ділянці 60 – 80 мм отримане від'ємне прискорення, тобто має місце уповільнення. Отже, ефективною слід вважати довжину струменя до $H = 60 \text{ мм}$. Аналогічно виконано розрахунки для поздовжніх перетинів струменя в міру віддалення від осі в радіальному напрямку в межах плоского розтруба.

Отримані результати свідчать про значну різницю у швидкостях руху абразивних зерен, які прокачуються через сопло, і зерен, що приєднуються до струменя, затопленого абразивною суспензією, а отже, і про кінетичну енергію, повідомлювану зернам у першому й другому способах струминно-абразивної обробки. Однак швидкість руху абразивних зерен у струмені, затопленому абразивною суспензією, можна збільшити завдяки використанню стисненого повітря високого тиску, оскільки таке збільшення не призведе до підвищеного зношування каналу сопла.

Використовуючи наведену вище методику, проведено дослідження швидкості руху абразивних часток, які приєднуються до струменів, що витікають з різних за конструкцією сопел, включаючи надзвукове сопло Лавалю, звужувані та розширювані конічні сопла й циліндричне сопло. Результати досліджень залежностей швидкості руху абразивних часток від довжини каналу сопла графічно зображені на рис. 6.4. Умови обробки наступні: абразивні зерна 63С (зернистість абразиву – 40П); тиск стисне-

ного повітря перед соплом 0,5 МПа; критичний (у найменшому перетині) діаметр сопел 2 мм; частота обертання циліндра – 770 хв⁻¹; внутрішній діаметр циліндрів – 40, 60, 80 мм. Як видно з наведених графіків, зі збільшенням відстані від зрізу сопла Н швидкість руху абразивних часток спочатку збільшується, а потім зменшується, проходячи точку максимуму. При цьому найбільші екстремальні значення швидкості руху абразивних часток і відстані від зрізу сопла досягаються в разі використання надзвукового сопла Лаваля, яке забезпечує надзвукову швидкість витікання стисненого повітря, що вказує на ефективність його застосування.

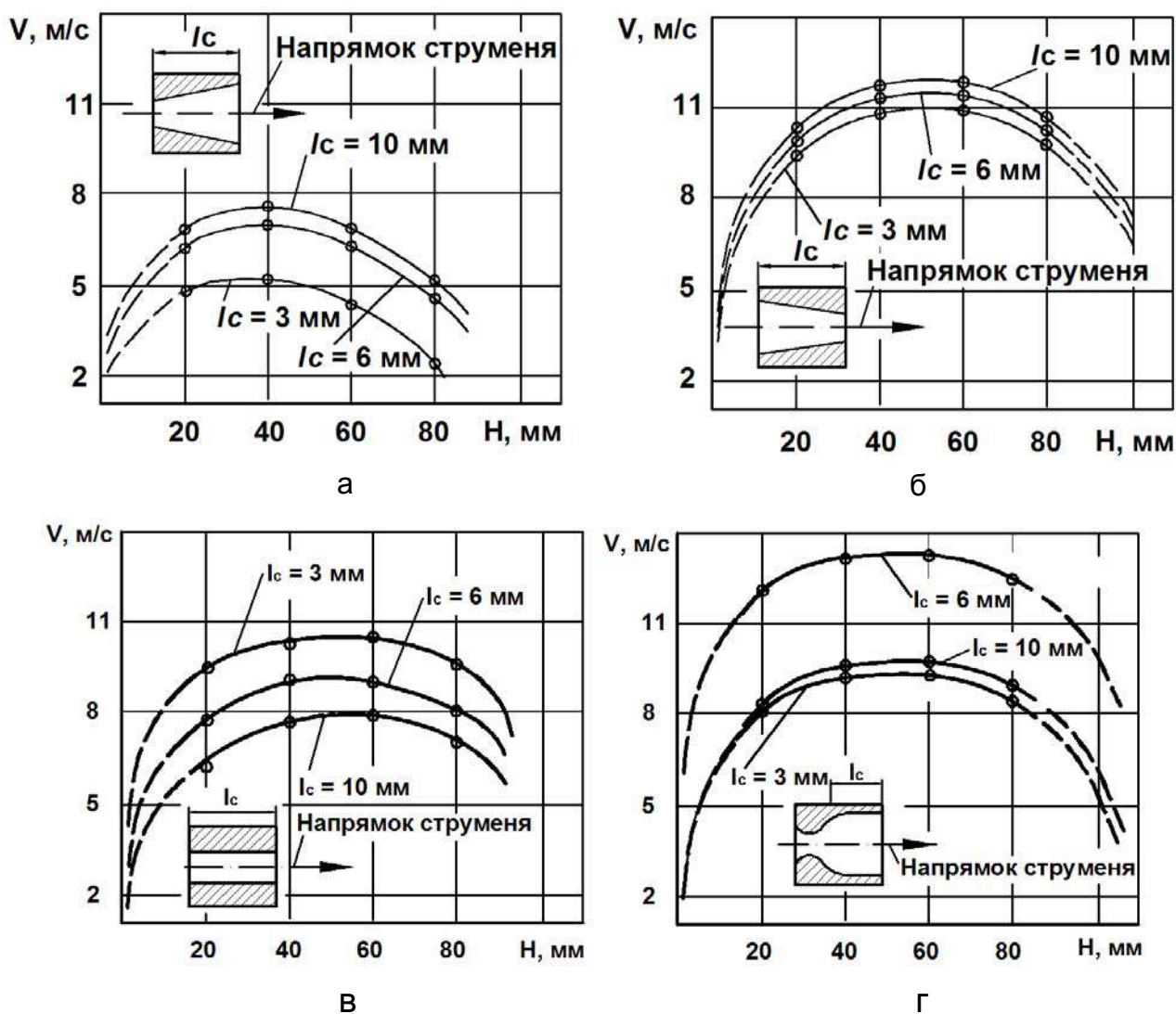


Рис. 6.4. Зміна швидкості V руху абразивних часток, що приєднуються до струменя стисненого повітря, в міру віддалення H від зрізу звужуваного (а) і розширюваного (б) конічних сопел; циліндричного сопла (в); надзвукового сопла Лаваля (г)
Умовне позначення: l_c – довжина надзвукової частини каналу сопла Лаваля.

Експериментально також встановлено, що довжина каналу сопла l_c неоднозначно впливає на швидкість руху абразивних часток. Так, у випадку використання звужуваних та розширюваних конічних сопел (рис. 6.4а, рис. 6.4б), зі збільшенням довжини каналу сопла l_c швидкість абразивних часток збільшується, а в разі використання циліндричного сопла (див. рис. 6.4в), навпаки, зменшується. Як видно, для надзвукового сопла Лаваля (див. рис. 6.4г) має місце екстремум (максимум) швидкості руху абразивних часток від довжини надзвукової частини каналу сопла l_c . Найбільша швидкість досягається за умови $l_c = 6$ мм. З фізичної точки зору це обумовлено відповідністю реального профілю сопла рекомендованому в роботі [1], тобто розрахунковому профілю.

Таким чином, виконано вибір і обґрунтування конструкції сопла за критерієм передачі максимальної швидкості абразивним зернам, які перебувають за його межами. Експериментально доведено ефективність застосування надзвукового сопла Лаваля, яке забезпечує найбільшу швидкість абразивних зерен.

Необхідно зауважити, що в умовах абразивної обробки деталей затопленими струменями швидкість руху абразивних зерен менша, ніж за звичайної струминно-абразивної обробки. Це пов'язано із приєднанням абразивних зерен до струменя після зрізу сопла, отже, їх рух у районі зрізу сопла починається з нульової швидкості, тоді як швидкість руху абразивних зерен, які прокачуються через сопло, у районі зрізу сопла близька до швидкості стисненого повітря. Отже, пошук шляхів збільшення швидкості руху абразивних зерен у процесі абразивної обробки деталей затопленими струменями є основним напрямом інтенсифікації цього прогресивного методу обробки.

Порівняльний аналіз графіків на рис. 6.4а дозволяє зробити висновок про достатньо високу швидкість, повідомлювану струменем абразивним зернам, близьку до швидкості, досягнутої абразивними зернами, приєднаними до надзвукового струменя. Ця властивість сопла, яке звужується, пояснюється тим, що згідно з роботою [1], швидкість витікання повітря в цих умовах у критичному перетині досягає швидкості звуку в даному середовищі, тобто в ущільненому повітрі, але не перевищує швидкість звуку.

Швидкість абразивних зерен, які приєднуються до струменя, що витікає із циліндричного сопла (див. рис. 6.4в), знижується зі збільшенням

довжини каналу. Це пояснюється наявністю аеродинамічного опору, який тим більший, чим довший канал. Найнижча швидкість абразивних часток, які приєднуються до струменя, що витікає з конічного (див. рис. 6.4б) сопла, яке розширюється, пояснюється тим, що на вході в сопло потік повітря через гострі кромки та значний місцевий опір не набирає звукової швидкості, а на виході – ще більше втрачає її.

Надзвукове сопло Лавалю за визначенням дає максимальну швидкість потоку струменя повітря. Причому звукова швидкість характерна для критичного (найбільш вузького) перетину сопла, після якого спеціальне профілювання забезпечує збільшення швидкості до надзвукової, без збільшення витрати стисненого повітря.

Експериментально також встановлено характер зміни швидкості руху абразивних зерен, приєднаних до струменя за зрізом сопла, залежно від зернистості абразиву (рис. 6.5а). У цьому випадку розглядаються максимальні значення швидкості руху абразивних зерен залежно від відстані до зрізу сопла H (див. рис. 6.4б). Як впливає з рис. 6.5а, швидкість руху абразивних зерен зменшується зі збільшенням зернистості абразиву.

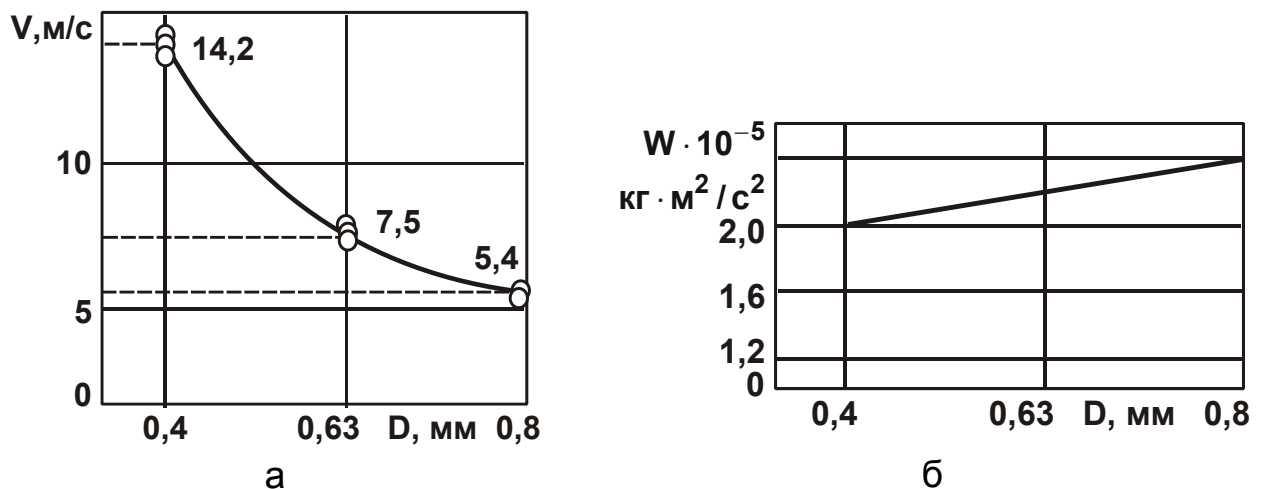


Рис. 6.5. Залежності швидкості руху V (а) та кінетичної енергії W (б) абразивних зерен, приєднаних до струменя за зрізом надзвукового сопла Лавалю, від зернистості абразиву D

Умови обробки: шліфзерно – 63С (карбід кремнію зелений); діаметр критичного перетину сопла – 2 мм; тиск стисненого повітря перед соплом – 0,5 МПа; відстань від зрізу сопла – 40 мм.

На відміну від відомих методів струминно-абразивної обробки, коли через інтенсивне зношування використовують найбільш прості за кон-

струкцією й відносно стійкі до абразивного зношування циліндричні сопла, абразивна обробка деталей затопленими струменями дозволяє використовувати сопла будь-якої конфігурації, у тому числі й надзвукове сопло Лаваля.

Даний результат відповідає аналітичній залежності (3.137), що свідчить про вірогідність розробленої моделі взаємодії абразивного зерна з оброблюваним матеріалом в умовах абразивної обробки затопленими струменями.

Використовуючи експериментально встановлену залежність швидкості абразивного зерна від зернистості абразиву (див. рис. 6.6а), можна визначити запас кінетичної енергії, повідомлюваної струменями стисненого повітря абразивним зернам. Як відомо, маса і швидкість абразивних зерен, що входять у формулу для визначення кінетичної енергії, в умовах досліджуваного процесу виявляються залежними величинами, тому що не можна в разі збільшення маси одночасно зберегти швидкість і прямо пропорційно збільшувати кінетичну енергію абразивних зерен, а отже, продуктивність обробки і глибину слідів абразивних зерен.

Графік залежності запасу кінетичної енергії рухомого абразивного зерна від його розмірів (зернистості) з урахуванням зміни маси зерна від $2,0 \cdot 10^{-10}$ кг (для зернистості № 40) до маси зерна $1,6 \cdot 10^{-9}$ кг (для зернистості № 80) показаний на рис. 6.5б.

Із графіка, наведеного на рис. 6.5б, видно, що в разі зміни зернистості D у два рази – з 0,4 мм до 0,8 мм (тобто на 100 %), а отже, й зміни маси зерна у 8 разів (тобто на 800 %), кінетична енергія W абразивного зерна збільшилася лише на 16 %. Невеликий приріст кінетичної енергії порівняно зі значним збільшенням маси абразивного зерна пояснюється тим, що струмінь стисненого повітря здатен повідомити у певному діапазоні мас деякий запас кінетичної енергії абразивному зерну практично незалежно від його маси.

6.2. Експериментальні дослідження конфігурації сопел за критерієм кількості інжектованих зерен

Відповідно до запропонованої в п. 4.3 методики дослідження конфігурації сопел за критерієм максимальної швидкості руху абразивних зерен, на першому етапі випробувані циліндричні, конічні розширювані та

звужувані, й надзвукові сопла з довжиною каналів 3, 6, 10 мм. Другий етап дослідження присвячений виявленню сопла, яке забезпечує максимальну кількість абразивних зерен, інжектованих у струмінь, що витікає в абразивну суспензію. Критерієм вибору найкращої конфігурації сопла є кількість відбитків абразивних зерен, інжектованих у струмінь після зрізу сопла, на полірованих латунних пластинах-екранах. Екрани встановлювали перед соплом на відстані 10, 20, 30 і 50 мм і утримували нерухомо протягом 5 секунд. Експерименти виконували на лабораторній установці (див. рис. 4.12) із завихрювачем (сопловим апаратом), оснащеним змінними соплами й заглибленнями перед ними на зазначених відстанях. Поліровану латунну пластину у вигляді екрана встановлювали перед соплом за допомогою прямого пристрою (рис. 6.6), завдяки чому забезпечувалася можливість точної витримки періоду 5 секунд і відстані від зрізу сопла до екрана.

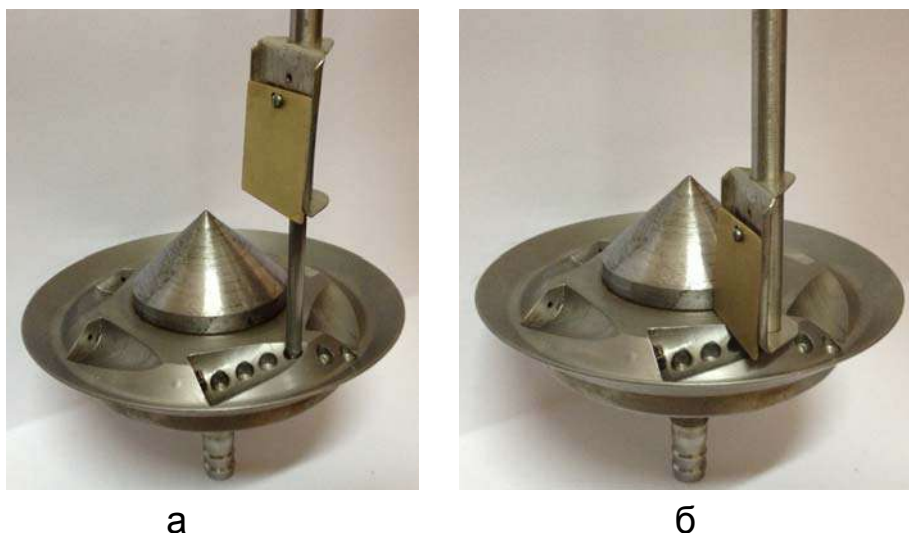


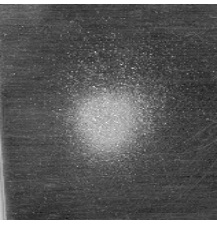
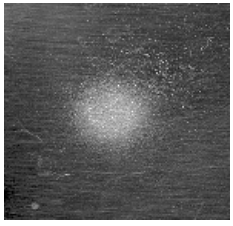
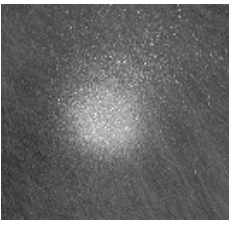
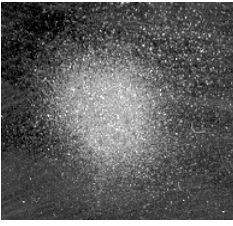
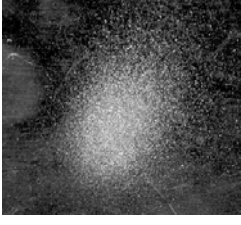

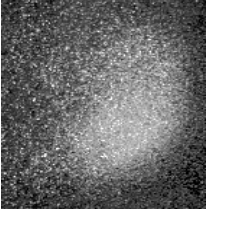
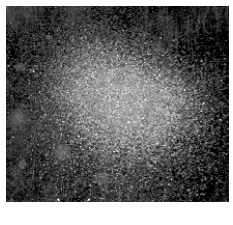



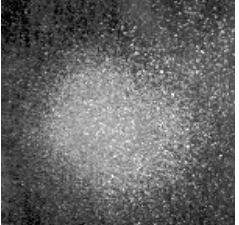
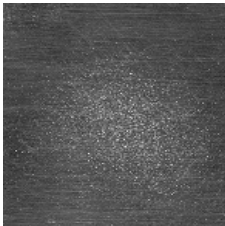
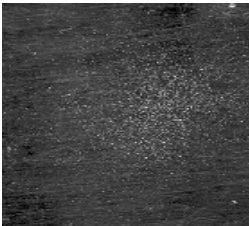
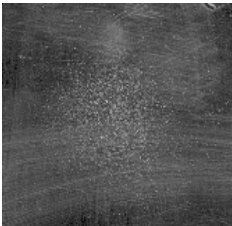
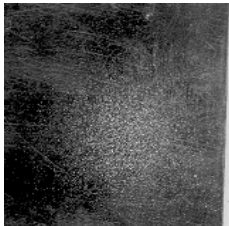
Рис. 6.6. Пристрій для встановлення екрана перед соплом завихрювача на період, що дорівнює 5 с: а – положення над соплом (поза струменем); б – перед соплом (в зоні дії струменя)

Важливою умовою проведення експериментів є сталість концентрації абразивної суспензії й умов подачі абразивного матеріалу в зону розташування випробуваного сопла. У зв'язку із цим використовували завихрювачи із шістьма соплами діаметром 2 мм і суспензію з кількісним складом: 3 л води та 0,18 л абразивного матеріалу, в якості якого використовували шліфзерно 63С (карбід кремнію зелений) зернистістю

63П (630 мкм). Конфігурацію й довжини каналів сопел змінювали відповідно до наведеного переліку дослідів із виявлення найбільшої швидкості. У результаті кожного дослідів одержували відбитки зерен у вигляді плями на полірованій пластині. Кожний зразок фотографували (табл. 6.1) й знімали профілограму по лінії, яка проходить через центр плями.

Таблиця 6.1

**Порівняльна характеристика відбитків абразивних зерен
на полірованих латунних зразках**

Відстань до зрізу сопла, мм	Розширюване конічне сопло	Звужуване конічне сопло	Циліндричне сопло	Надзвукове сопло
10				
20				
30				
50				

Примітка. Умови обробки: абразивний матеріал – шліфзерно 63С (карбід кремнію зелений), зернистість 63П (630 мкм); тиск стисненого повітря – 0,4 МПа; час обробки – 5 с.

З табл. 6.1 видно, що найбільш щільними за кількістю слідів на одиницю площі є відбитки, отримані в процесі застосування надзвукового сопла Лаваля. Особливістю інжекції в струмінь, який витікає із цього сопла, є приєднання більшої кількості абразивних зерен на початку струменя, тобто на відстані 10 мм від зрізу сопла. Це пояснюється відсутністю ядра струменя у вигляді конуса на відстані 3 – 4-х діаметрів каналу сопла, тобто на відстані 6 – 8 мм від зрізу сопла, який характерний для циліндричних і конічних сопел (див. рис. 4.6). Профілограми, зняті з ділянок зосередження слідів абразивних зерен на полірованих екранах, записані на електротермічну стрічку з поперечним збільшенням у 2 000 разів і поздовжнім збільшенням в 400 разів (рис. 6.7 і 6.8).

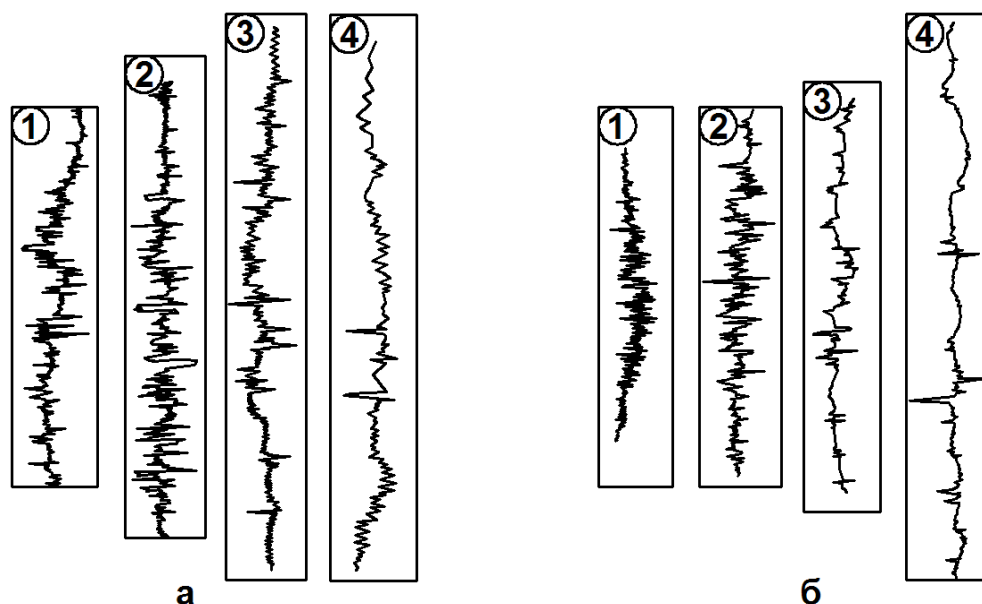


Рис. 6.7. Профілограми відбитків абразивних зерен, приєднаних до струменів, які витікають із розширюваного конічного сопла (а) і звужуваного конічного сопла (б)

Умовні позначення: 1, 2, 3, 4 – відстань до зрізу сопла відповідно 10, 20, 30, 50 мм.

Із чотирьох різновидів профілограм, знятих з оброблених латунних екранів, явно виділяються профілограми зі зразків, оброблених із застосуванням надзвукового сопла Лаваля. Характер профілограм свідчить про те, що відбитки мають не тільки найбільш щільне розташування слідів абразивних зерен, але й найбільшу глибину, судячи з розмаху кривої. Отже, підтверджуються результати експериментів, отримані в п. 6.1, оскільки, відповідно до формули кінетичної енергії $W = m \cdot V^2 / 2$ (де m – маса зерна, кг; V – швидкість руху зерна, м/с), найбільша глибина слідів

відповідає найбільшій швидкості руху за незмінної маси абразивних зерен. Порівняно з базовою установкою, яка оснащена соплами із циліндричним каналом, знімання металу за 30 хв збільшилося на 39 %.

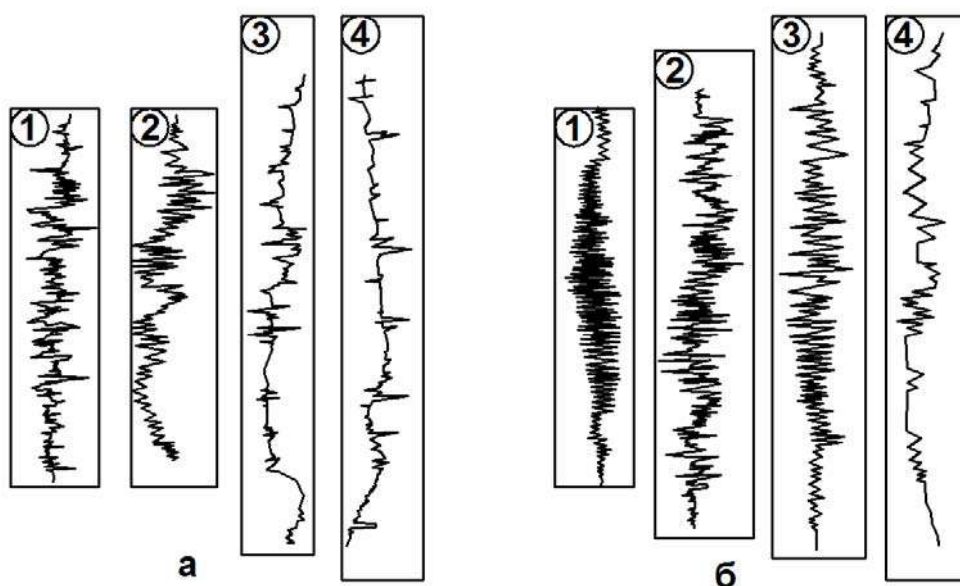


Рис. 6.8. Профілограми відбитків абразивних зерен, приєднаних до струменів, які витікають із циліндричного сопла (а) та надзвукового сопла Лаваля (б)

Умовні позначення: 1, 2, 3, 4 – відстань до зрізу сопла відповідно 10, 20, 30, 50 мм.

На основі проведених дослідів можна зробити висновок про ефективність використання надзвукового сопла Лаваля з точки зору забезпечення високої швидкості руху зерен, про що свідчать результати експериментів, наведені в п. 6.1, та підвищеної кількості абразивних зерен, інжектованих у струмінь, який витікає в абразивну суспензію, про що свідчать результати експериментів, наведені в даному параграфі.

6.3. Експериментальні дослідження продуктивності обробки й шорсткості поверхні

6.3.1. Розробка математичних моделей визначення продуктивності й шорсткості поверхні в процесі абразивної обробки дрібних деталей затопленими струменями

У розділі 5 роботи наведено результати експериментальних досліджень технологічних закономірностей процесу абразивної обробки дета-

лей затопленими струменями, які пов'язані з обґрунтуванням механізму взаємодії абразивних зерен з оброблюваною деталлю й утворенням мікрорізів на оброблюваній поверхні. Це дозволило провести аналіз процесу обробки на рівні мікрорізів одиничними зернами. Насправді в процесі обробки бере участь велика кількість абразивних зерен, і тому характер перебігу процесу підпорядковується більш складним законами.

Як показано в попередніх розділах, основні техніко-економічні показники обробки визначаються безліччю різноманітних за природою факторів. Однак у розрахункових схемах, наведених у розділах 2 і 3 роботи, вдалося врахувати лише частину з них у зв'язку зі складністю математичного подання. Тому оцінити вплив інших факторів на основні техніко-економічні показники обробки можна лише на основі експериментальних досліджень, застосувавши для цього метод багатофакторного планування експерименту. У першу чергу це стосується визначення впливу параметрів обробки на продуктивність процесу і якість оброблюваних поверхонь. У зв'язку із цим дослідження впливу умов обробки на продуктивність процесу й шорсткість поверхні виконана за планом дробового факторного експерименту з побудовою математичних моделей. Експериментальні дослідження проводилися на експериментальній установці (див. рис. 4.12). Оброблялися зразки із латуні ЛС59.1.

На базі запланованого дробового факторного експерименту $2 \cdot 10^6$ (1/8 репліки) побудовано математичні моделі визначення продуктивності обробки (як критерій оцінки прийнято металознімання M у мг за 30 хвилин обробки) і шорсткість поверхні (за критерієм R_{\max} , мкм).

Побудова математичних моделей ґрунтується на наступних міркуваннях. Оскільки аналітичне вираження досліджуваних функцій невідоме, слід подати їх у вигляді лінійних поліномів, побудова яких можлива в будь-якій точці багатофакторного гіперпростору:

$$y = b_0 + \sum_{i=1}^k b_i x_i + \sum_i b_{ij} x_i x_j, \quad (6.7)$$

де b_0 , b_i , b_j , $b_{i,j}$ – коефіцієнти регресії, які можна одержати, використовуючи результати експериментів;

x_i , x_j – кодовані фактори.

Побудова математичної моделі передбачає: визначення меж існування процесу; кодування факторів; складання плану-матриці проведення експериментів; реалізацію плану проведення експериментів; перевірку відтворюваності дослідів; перевірку адекватності лінійної моделі. Попередньо проведені досліді дозволили встановити межі існування процесу абразивної обробки затопленими струменями, у тому числі встановлено мінімальну й максимальну зернистість абразивного порошку, одиничну й сумарну маси оброблюваних деталей, мінімальну та максимальну кількість рідини в робочій камері, припустимий інтервал, у якому можна досліджувати вплив діаметрів сопел на вихідні показники процесу, межі варіювання кількості сопел за постійної витрати стисненого повітря, межі діаметрів кола, на якому можуть бути розташовані сопла, а також межі горизонтального й вертикального напрямків орієнтації осей сопел у робочій камері.

Завантаження абразивного матеріалу (карбіду кремнію зеленого (63С, від 40П до 80П), 0,5 % водяного розчину кальцинованої соди (Na_2CO_3)) і попередньо зважених контрольних зразків здійснювали через

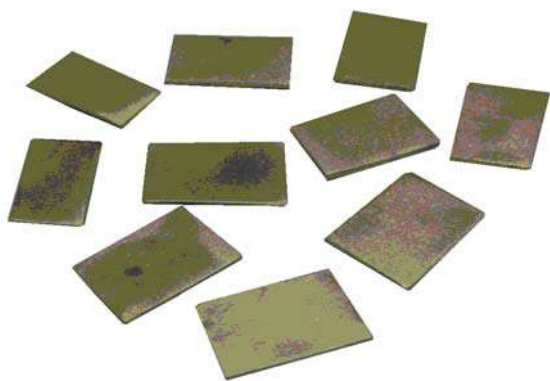


Рис. 6.9. Контрольні зразки для визначення продуктивності обробки

горловину установки, а вивантаження на решето – перекиданням робочої камери, установленної на поворотній осі установки.

Контрольні зразки (рис. 6.9) габаритними розмірами 20x10x2 мм, а також діаметром 20x0,5; 20x1; 20x2; 20x4; 20x8 (рис. 6.10) зважували до й після обробки на аналітичних вагах моделі ВЛА-200 і використовували повторно. Зразки для визначення глибини слідів абразивних зерен таких самих габаритних розмірів для кожного

експерименту полірували, а після абразивної обробки (див. рис. 4.12) вимірювали глибину двома методами. У першому методі акцентувалась увага на вершини мікрорельєфу, фіксували значення на барабані мікрометричного гвинта, потім – на западини мікрорельєфу й за різницею значень отримували результат. Металознімання M за одиницю часу з контрольних зразків вимірювали в міліграмах.



Рис. 6.10. 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)

Другий метод був більш точним. За допомогою мікрометричного гвинта фокусували мікроінтерферометр на досліджуваній поверхні. Включали інтерференційну головку, при цьому в полі зору з'являлися інтерференційні смуги. За допомогою мікрометричного гвинта досягали найбільш різкого зображення смуг досліджуваної поверхні. У процесі вимірювання глибини западини було визначено, на яку частку інтервалу між смугами або на скільки інтервалів вигинається смуга в місці знаходження западини. Дослідження проводили з білим світлом, тому глибину западини R_{\max} (в мкм) визначали за наступною формулою:

$$R_{\max} = 0,27 \cdot \Delta N, \quad (6.8)$$

де ΔN – величина вигину інтерференційної смуги в частках інтервалу.

Для вимірювання з високою точністю гвинтовий окулярний мікрометр МОВ-1-15, який є в комплекті інтерферометра, встановлено на тубус мікроінтерферометра до упору. Після цього було закріплено гвинтовий окулярний мікрометр затискним гвинтом. Для визначення величини нерівності вимірено величину інтервалу між смугами, величину вигину смуг і потім обчислено висоту нерівності.

Фактори, рівні й інтервали варіювання, які прийняті за результатами постановочних дослідів і закодовані у вигляді "+" і "-", наведені в табл. 6.2. Рандомізація дослідів призначена за таблицею випадкових чисел [6] і наведена в табл. 6.3.

У процесі вибору факторів, які входять у математичну модель, на особливу увагу потребують взаємозалежні фактори, що відображають енергетичну характеристику процесу. До них належать: тиск і витрата стисненого повітря, діаметр і кількість повітряних сопел.

Перераховані фактори неможливо варіювати незалежно один від одного, оскільки сумісність факторів є безумовною вимогою побудови

математичної моделі. Так, певному тиску стисненого повітря при заданому сумарному перетині сопел відповідає певна витрата стисненого повітря. Разом з тим такі конструктивні параметри з перерахованих, як кількість і діаметр сопла, досить важливі для розробника устаткування, отже, їх необхідно враховувати в математичній моделі.

Таблиця 6.2

Фактори, рівні й інтервали варіювання факторів

Фактори	Рівні варіювання			Інтервали варіювання
	+	0	-	
X_1 – об'єм абразиву, що завантажується V_a , л	0,18	0,14	0,1	0,04
X_2 – зернистість абразиву D , мм	0,8	0,6	0,4	0,2
X_3 – одинична маса оброблюваних деталей m_d , г	3	1,75	0,5	1,25
X_4 – сумарна маса оброблюваних деталей Σ , кг	0,4	0,25	0,1	0,15
X_5 – об'єм рідини, що заливається $W_{рід}$, л	3,0	2,0	1,0	1,0
X_6 – діаметр сопел d_c , мм	3	2,5	2	0,5
X_7 – кількість сопел n_c , шт.	8	7	6	1
X_8 – діаметр розміщення сопел $D_{розм}$, м	0,11	0,1	0,09	0,01
X_9 – кут осі сопла до горизонту ξ , град.	25	15	5	10
X_{10} – кут між віссю сопла й дотичною до кола в точці її розміщення δ , град.	15	10	5	5

Оскільки струминно-абразивні установки призначаються для експлуатації у виробничих умовах, слід розраховувати на промислову пневмомережу, де тиск стисненого повітря становить $0,5 \pm 0,1$ МПа. У зв'язку із цим варіювати тиск стисненого повітря під час створення математичної моделі недоцільно.

Таблиця 6.3

Матриця планування дробового факторного експерименту $2 \cdot 10^{-6}$ для визначення металознімання

Рандомізація дослідів	Фіктивна змінна x_0	Об'єм абразиву x_1	Зернистість абразиву x_2	Одинична маса деталей x_3	Сумарна маса деталей x_4	Об'єм рідини x_5	Діаметр сопел x_6	Кількість сопел x_7	Діаметр кола розміщення сопел x_8	Кут між віссю сопла й горизонтом x_9	Кут між віссю сопла й дотичною x_{10}	Металознімання, мг			$S_u^2 = \frac{4^2}{2}$	$Ig_{\text{відклик}}$	Відкликання $U_{\text{відклик}}$
												$y_{u \min}$	$y_{u \max}$	$y_u = \frac{y_{u \min} + y_{u \max}}{2}$			
16	+	-	-	-	-	+	+	+	+	+	+	24,16	23,44	23,8	0,04	1,34	21,90
12	+	+	-	-	-	-	-	-	+	+	+	14,64	14,95	14,8	0,05	1,19	15,60
2	+	-	+	-	-	-	+	+	-	-	+	15,00	16,20	15,6	0,02	1,22	16,50
3	+	+	+	-	-	+	-	-	-	-	+	17,45	17,75	17,6	0,05	1,25	17,89
7	+	-	-	+	-	+	-	+	-	+	-	19,92	20,00	19,6	0,07	1,32	20,87
14	+	+	-	+	-	-	+	-	-	+	-	16,16	16,44	16,3	0,04	1,21	16,23
15	+	-	+	+	-	-	-	+	+	-	-	17,32	17,08	17,2	0,03	1,22	16,58
8	+	+	+	+	-	+	+	-	+	-	-	21,10	20,90	21,0	0,02	1,28	19,34
9	+	-	-	-	+	+	+	-	+	-	-	28,16	28,44	28,3	0,04	1,46	29,32
13	+	-	+	-	+	-	+	-	-	+	-	24,64	24,95	24,8	0,05	1,38	24,43
1	+	+	+	-	+	+	-	+	-	+	-	32,00	32,20	32,1	0,02	1,49	30,92
4	+	-	-	+	+	+	-	-	-	-	+	27,45	27,75	27,6	0,05	1,43	26,84
11	+	+	-	+	+	-	+	+	-	-	+	27,92	28,28	28,1	0,07	1,44	27,30
5	+	-	+	+	+	-	-	-	+	+	+	23,16	23,44	23,3	0,04	1,36	23,10
6	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	30,32	30,08	30,2	0,03	1,50	31,64
10	+	+	-	-	+	-	-	+	+	-	-	27,10	27,90	27,5	0,02	1,44	27,68

Витрата стисненого повітря для даного процесу обмежена верхньою межею, яка визначає умову існування процесу. Постановні експерименти дозволили встановити граничну витрату стисненого повітря, що дорівнює 1,2 м³/хв. Подальше збільшення витрати за рахунок збільшення сумарного перетину сопел, тобто кількості сопел або їхнього діаметра, призводить до винесення вмісту робочої камери, спочатку рідини, а потім і абразивного матеріалу. Таким чином, під час проведення дослідів було прийнято умову: максимальна витрата стисненого повітря становить 1,0 м³/хв, а тиск – 0,5 МПа. Інші конструктивні й технологічні параметри, необхідні для створення устаткування, включені в матрицю планування експериментів і наведені в табл. 6.3.

Визначення значень коефіцієнтів рівняння регресії за критерієм продуктивності обробки (металознімання) і шорсткості поверхні з визначенням параметра R_{\max} здійснювалося в результаті проведення дослідів на лабораторній установці (див. рис. 4.12), оснащений комплектом соплових пристроїв, які дозволили реалізувати будь-яке поєднання умов (тобто забезпечити сумісність умов), наведених у матриці планування експерименту. У загальному вигляді рівняння регресії виражене так [6]:

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_4x_4 + b_5x_5 + b_6x_6 + b_7x_7 + b_8x_8 + b_9x_9 + b_{10}x_{10}. \quad (6.9)$$

Коефіцієнти рівняння регресії $b_0, b_1, b_2, b_3, b_4, b_5, b_6, b_7, b_8, b_9, b_{10}$ визначаються відповідно до результатів дослідів і рівнів варіювання факторів (див. табл. 6.3) за наступними залежностями:

$$b_0 = \frac{Y_{u1} + Y_{u2} + Y_{u3} + \dots + Y_{u14} + Y_{u15} + Y_{u16}}{16};$$

$$b_1 = \frac{-Y_{u1} + Y_{u2} - Y_{u3} + \dots - Y_{u14} + Y_{u15} + Y_{u16}}{16}; \quad (6.10)$$

.....;

$$b_{10} = \frac{Y_{u1} + Y_{u2} + Y_{u3} + \dots + Y_{u14} + Y_{u15} - Y_{u16}}{16},$$

де $Y_{u1...16} = \frac{Y_{u\min} + Y_{u\max}}{2}$ – результати експериментів.

Результати розрахунків за вищенаведеними залежностями подано в табл. 6.4.

Таблиця 6.4

Розрахункові значення коефіцієнтів регресії

b_0	b_1	b_2	b_3	b_4	b_5	b_6	b_7	b_8	b_9	b_{10}
22,9	0,46	-0,26	-0,08	4,75	2,03	0,53	1,28	0,28	0,13	-0,36

На розрахованих коефіцієнтів отримано поліном, який є лінійною математичною моделлю:

$$y = 22,9 + 0,46x_1 - 0,26x_2 - 0,075x_3 + 4,75x_4 + 2,03x_5 + 0,525x_6 + 1,275x_7 + 0,275x_8 + 0,125x_9 - 0,362x_{10}. \quad (6.11)$$

Перевірка адекватності отриманої лінійної моделі здійснюється через підстановку значень $x_1, x_2, x_3, \dots, x_{10}$ відповідно до їх знаків у матрицю планування експериментів. Величина розбіжності оцінюється за допомогою F_ϕ – критерію Фішера:

$$F_\phi = \frac{S_{ад}^2}{S_y^2}, \quad (6.12)$$

де $S_{ад}^2$ – дисперсія адекватності;

S_y^2 – дисперсія, яка характеризує помилку дослідів.

Модель адекватна, тому що значення F_ϕ не перевищує відповідного табличного значення при 5-відсотковому рівні значущості.

Для зручності використання отриманого результату в конструкторсько-технологічних розрахунках наведений поліном доцільно звести за допомогою відомих залежностей [6] з урахуванням умов, наведених у табл. 6.2, до натуральних змінних:

$$x_1 = \frac{V_a - 0,14}{0,04}; \quad x_2 = \frac{D - 0,6}{0,2}; \quad x_3 = \frac{m_d - 1,75}{1,25}; \quad x_4 = \frac{\Sigma - 0,25}{0,15};$$

$$x_5 = \frac{W_{\text{рід}} - 2,0}{1,0}; \quad x_6 = \frac{d_c - 2,5}{0,5}; \quad x_7 = \frac{n_c - 7,0}{1,0}; \quad x_8 = \frac{D_{\text{розм}} - 0,1}{0,01};$$

$$x_9 = \frac{\xi - 15,0}{10,0}; \quad x_{10} = \frac{\delta - 10,0}{5,0}.$$

Підставивши змінні $x_1, x_2, x_3, \dots, x_{10}$ у натуральному вираженні величин, можна одержати лінійну математичну модель:

$$M = -3,502 + 11,5 \cdot V_a - 1,3 \cdot D - 0,06 \cdot m_d + 31,6 \cdot G +$$

$$+ 2,03 \cdot W_{\text{рід}} + 1,05 \cdot d_c + 1,275 \cdot n_c + 27,5 \cdot D_{\text{розм}} + 0,01 \cdot \xi - 0,07 \cdot \delta. \quad (6.13)$$

Для подання математичної моделі у вигляді степеневі функції, здатної відобразити нелінійну залежність, необхідно прологарифмувати результати експериментів і розрахувати коефіцієнти за аналогічними формулами, наведеними далі:

$$lgb_0 = \frac{lgy_{\text{відкл1}} + lgy_{\text{відкл2}} + lgy_{\text{відкл3}} \dots + lgy_{\text{відкл14}} + lgy_{\text{відкл15}} + lgy_{\text{відкл16}}}{16};$$

$$lgb_1 = \frac{-lgy_{\text{відкл1}} + lgy_{\text{відкл2}} - lgy_{\text{відкл3}} \dots - lgy_{\text{відкл14}} + lgy_{\text{відкл15}} + lgy_{\text{відкл16}}}{16};$$

.....

$$lgb_{10} = \frac{lgy_{\text{відкл1}} + lgy_{\text{відкл2}} + lgy_{\text{відкл3}} \dots + lgy_{\text{відкл14}} + lgy_{\text{відкл15}} - lgy_{\text{відкл16}}}{16}, \quad (6.14)$$

де $U_{\text{відкл}}$ – розрахункова величина логарифма відкликання.

Розрахункові значення логарифмів коефіцієнтів для математичної степеневі моделі за критерієм продуктивності обробки (металознімання) наведені в табл. 6.5.

У логарифмічному вигляді рівняння регресії набуває такого вигляду:

$$y_M = 1,34 + 0,04x_1 + 0,007x_2 + 0,0008x_3 + 0,251x_4 + 0,038x_5 + \\ + 0,008x_6 + 0,025x_7 + 0,003x_8 + 0,003x_9 - 0,005x_{10}. \quad (6.15)$$

Співвідношення зведення до натуральних величин мають наступний вигляд:

$$x_1 = \frac{2(\lg V_a - \lg V_{a\max})}{\lg V_{a\max} - \lg V_{a\min}} + 1; \quad x_2 = \frac{2(\lg D - \lg D_{\max})}{\lg D_{\max} - \lg D_{\min}} + 1;$$

$$x_3 = \frac{2(\lg m_{\text{д}} - \lg m_{\text{д max}})}{\lg m_{\text{д max}} - \lg m_{\text{д min}}} + 1; \quad x_4 = \frac{2(\lg \Sigma - \lg \Sigma_{\max})}{\lg \Sigma_{\max} - \lg \Sigma_{\min}} + 1;$$

$$x_5 = \frac{2(\lg W_{\text{рід}} - \lg W_{\text{рід max}})}{\lg W_{\text{рід max}} - \lg W_{\text{рід min}}} + 1; \quad x_6 = \frac{2(\lg d_c - \lg d_{c\max})}{\lg d_{c\max} - \lg d_{c\min}} + 1;$$

$$x_7 = \frac{2(\lg n_c - \lg n_{c\max})}{\lg n_{c\max} - \lg n_{c\min}} + 1; \quad x_8 = \frac{2(\lg D_{\text{розм}} - \lg D_{\text{розм max}})}{\lg D_{\text{розм max}} - \lg D_{\text{розм min}}} + 1;$$

$$x_9 = \frac{2(\lg \xi - \lg \xi_{\max})}{\lg \xi_{\max} - \lg \xi_{\min}} + 1; \quad x_{10} = \frac{2(\lg \delta - \lg \delta_{\max})}{\lg \delta_{\max} - \lg \delta_{\min}} + 1.$$

З урахуванням умов, наведених у табл. 6.2, залежності необхідно підставити в поліном і потенціювати:

$$M = 1,602 + 0,313 \cdot \lg V + 0,046 \cdot \lg z_a + 0,002 \cdot \lg m_{\text{д}} + 0,833 \cdot \lg Q + \\ + 0,16 \cdot \lg W_{\text{рід}} + 0,088 \cdot \lg d_c + 0,4 \cdot \lg n_c + 0,074 \cdot \lg D + 0,009 \cdot \lg y - 0,02 \cdot \lg \psi. \quad (6.16)$$

В остаточному варіанті математична модель продуктивності обробки (металознімання) подається у вигляді степеневої функції:

$$M = 39,9 \frac{V^{0,313} \cdot D^{0,046} \cdot m_{\text{д}}^{0,002} \cdot \Sigma^{0,833} \cdot W_{\text{рід}}^{0,16} \cdot d_c^{0,088} \cdot n_c^{0,4} \cdot D_{\text{розм}}^{0,074} \cdot \xi^{0,009}}{\delta^{0,02}}. \quad (6.17)$$

Аналогічно розроблено математичну модель шорсткості поверхні. Висоту мікронерівностей заміряли від найбільш глибокої западини до найбільш високого виступу на мікроінтерферометрі МІІ-4 безконтактним способом у монохромному світлі. Для цього за допомогою окулярного мікрометричного гвинта вимірювали величину вигину інтерференційної лінії, яка становить 0,27 мкм для монохромного світла, і накладали на інтервал між лініями. Цей спосіб вимірювання прийнятний для дрібних поглиблень. У процесі вимірювання більш глибоких відбитків абразивних зерен контроль глибини здійснювали за допомогою мікрометричного гвинта – вертикального переміщення об'єкта дослідження, наводячи різкість спочатку на западину, а потім на виступ нерівності.

Контрольні зразки для вимірювання висоти мікронерівностей з латуні ЛС59.1, сталі Х18Н9Т і алюмінію марки Д16 (дуралюмінію) попередньо полірували, промивали, потім завантажували в робочу камеру установки для проведення чергового експерименту разом зі зразками для контролю продуктивності обробки. Після закінчення чергового експерименту зразки промивали, сушили й перевіряли глибину западин в 7 – 8-ми різних точках поверхні. На рис. 6.11 показано фрагменти поверхні дисків діаметром 20 мм (див. рис. 6.10), оброблених протягом 10 с.

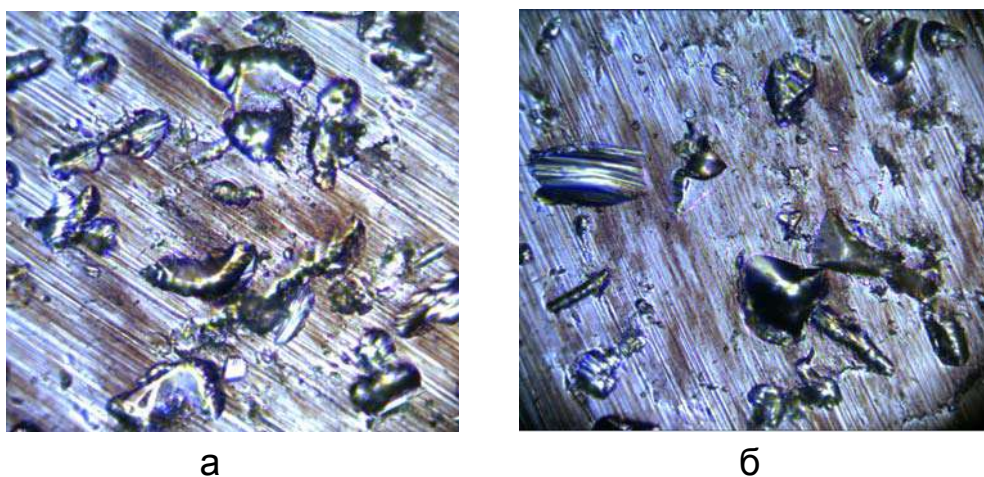


Рис. 6.11. Сліди абразивних зерен на дисках після обробки протягом 10 с (зі збільшенням у 1 000 разів): а – в центрі; б – на периферії диска діаметром 20 мм й товщиною 2 мм

З рис. 6.11 випливає високий рівень рівномірності обробки партії деталей і зокрема контрольних зразків. Разом із тим детальне вивчення поверхні плоских зразків, оброблених протягом однієї, трьох, п'яти і біль-

ше секунд від початкового моменту обробки свідчить про те, що на полірованій поверхні плоских зразків щільність покриття слідами абразивних зерен збільшується від середини до крамок (рис. 6.12). При цьому на торцях їхня кількість значно більша, ніж на плоских поверхнях.

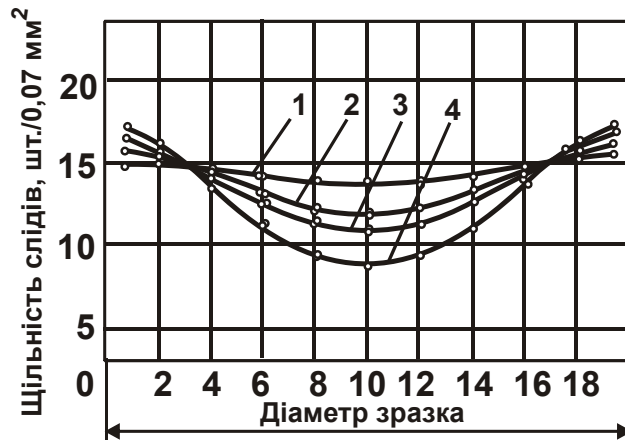


Рис. 6.12. Розподіл слідів зерен у діаметральному напрямку зразків у формі диска

Умови обробки: 1 – товщина диска 4,0 мм; 2 – 2,0 мм; 3 – 1,0 мм; 4 – 0,5 мм; розмірність шт./0,7 мм² – кількість слідів у полі зору об'єктива.

Таким чином, можна вважати, що процес поверхневої обробки плоских деталей затопленими струменями більш інтенсивний на їхніх кромках. Цей факт слід вважати особливістю розглянутого процесу, який властивий тільки схемі обробки плоских деталей, наприклад, листових штампованих деталей затопленими струменями. Зазначена особливість не є обмеженням для застосування методу до компактних (неплоских) деталей. На рис. 6.10б показано поверхню диска товщиною 8 мм, де з такою ж ефективністю, як і на плоских деталях, вилучені задирки на торцях, які утворилися після відрізання на токарному верстаті. Оскільки видалення задирок, знімання металу і формоутворення поверхні здійснюються одночасно, доцільно побудувати емпіричну модель шорсткості поверхні. Матриця планування експериментів і результати вимірювань висоти мікронерівностей для побудови математичної моделі абразивної обробки затопленими струменями за критерієм "шорсткість поверхні" наведена в табл. 6.6.

Послідовність обробки результатів проведених експериментів аналогічна до побудови моделі продуктивності процесу абразивної обробки затопленими струменями.

Таблиця 6.6

Матриця планування дробового факторного експерименту $2 \cdot 10^{-6}$ для визначення шорсткості поверхні

Рандомізація дослідів	Фіктивна зміна x_0	Об'єм абразиву x_1	Зернистість абразиву x_2	Одинична маса деталей x_3	Сумарна маса деталей x_4	Об'єм рідини x_5	Діаметр сопел x_6	Кількість сопел x_7	Діаметр кола розміщення сопел x_8	Кут між віссю сопла й горизонтом x_9	Кут між віссю сопла й дотичною x_{10}	Шорсткість поверхні R_{\max}			$S_R^2 = \frac{4^2}{2}$	$I_{g_{\text{Відклик}}}$	Відкликання $y_{R_{\text{Відклик}}}$
												$y_{R_{\min}}$	$y_{R_{\max}}$	$y_R = \frac{y_{R_{\min}} + y_{R_{\max}}}{2}$			
16	+	-	-	-	-	+	+	+	+	+	+	2,1	1,9	2,0	0,02	0,3	1,9
12	+	+	-	-	-	-	-	-	+	+	+	1,6	1,9	1,75	0,045	0,24	1,8
2	+	-	+	-	-	-	+	+	-	-	+	1,2	1,4	1,3	0,02	0,11	1,2
3	+	+	+	-	-	+	-	-	-	-	+	1,7	2,2	1,95	0,12	0,29	2,3
7	+	-	-	+	-	+	-	+	-	+	-	1,9	1,9	1,9	0,0	0,27	1,8
14	+	+	-	+	-	-	+	-	-	+	-	1,5	1,7	1,6	0,02	0,2	1,65
15	+	-	+	+	-	-	-	+	+	-	-	1,64	1,8	1,72	0,03	0,23	2,0
8	+	+	+	+	-	+	+	-	+	-	-	2,7	2,9	2,8	0,02	0,44	2,9
9	+	-	-	-	+	+	+	-	+	-	-	2,2	2,4	2,3	0,04	0,36	2,4
13	+	-	+	-	+	-	+	-	-	+	-	3,4	2,5	2,95	0,05	0,46	2,5
1	+	+	+	-	+	+	-	+	-	+	-	3,2	2,8	3,0	0,02	0,47	2,8
4	+	-	-	+	+	+	-	-	-	-	+	2,5	2,5	2,5	0,05	0,39	2,5
11	+	+	-	+	+	-	+	+	-	-	+	2,8	3,1	2,95	0,07	0,46	3,1
5	+	-	+	+	+	-	-	-	+	+	+	2,1	2,5	2,3	0,04	0,36	2,5
6	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	3,1	3,3	3,2	0,03	0,5	3,3
10	+	+	-	-	+	-	-	+	+	-	-	2,6	2,9	2,75	0,02	0,44	2,9

Коефіцієнти рівняння регресії розраховані за результатами вимірювань мікронерівностей на латунних зразках за формулами:

$$b_{R_{\max}0} = \frac{Y_{R_{\max}1} + Y_{R_{\max}2} + Y_{R_{\max}3} + \dots + Y_{R_{\max}14} + Y_{R_{\max}15} + Y_{R_{\max}16}}{16};$$

$$b_{R_{\max}1} = \frac{-Y_{R_{\max}1} + Y_{R_{\max}2} - Y_{R_{\max}3} + \dots - Y_{R_{\max}14} + Y_{R_{\max}15} + Y_{R_{\max}16}}{16};$$

.....;

$$b_{R_{\max}10} = \frac{Y_{R_{\max}1} + Y_{R_{\max}2} + Y_{R_{\max}3} + \dots + Y_{R_{\max}14} + Y_{R_{\max}15} - Y_{R_{\max}16}}{16}, \quad (6.18)$$

де $Y_{R_{\max}1...16} = \frac{Y_{(R_{\max})\min} + Y_{(R_{\max})\max}}{2}$ – результати експериментів.

Числові значення коефіцієнтів, розраховані за наведеними залежностями, подані в табл. 6.7.

Таблиця 6.7

Числові значення коефіцієнтів

b_0	b_1	b_2	b_3	b_4	b_5	b_6	b_7	b_8	b_9	b_{10}
2,31	0,266	0,091	0,304	0,433	0,145	0,076	0,041	0,041	0,026	0,308

На основі проведених експериментів і розрахованих коефіцієнтів рівняння регресії набуде вигляду:

$$Y_{R_{\max}} = 2,31 + 0,266x_1 + 0,091x_2 + 0,304x_3 + 0,433x_4 + 0,145x_5 + 0,076x_6 + 0,041x_7 + 0,041x_8 + 0,026x_9 + 0,308x_{10}. \quad (6.19)$$

У результаті підстановки в залежність (6.19) натуральних значень змінних, розрахованих за формулами перетворення:

$$x_1 = \frac{V_a - 0,14}{0,04}; \quad x_2 = \frac{D - 0,6}{0,2}; \quad x_3 = \frac{m_d - 1,75}{1,25}; \quad x_4 = \frac{\Sigma - 0,25}{0,15}; \quad x_5 = \frac{W_{\text{рід}} - 2,0}{1,0};$$

$$x_6 = \frac{d_c - 2,5}{0,5}; x_7 = \frac{n_c - 7,0}{1,0}; x_8 = \frac{D_{\text{розм}} - 0,1}{0,01}; x_9 = \frac{\xi - 15,0}{10,0}; x_{10} = \frac{\delta - 10,0}{5,0},$$

отримано:

$$R_{\text{max}} = -3,0 + 11,25 \cdot V_a + 0,9 \cdot D + 0,19 \cdot m_d + 5,72 \cdot \Sigma + \\ + 0,28 \cdot W_{\text{рід}} + 0,86 \cdot d_c + 0,056 \cdot n_c + 2,3 \cdot D_{\text{розм}} - 0,013 \cdot \xi - 0,008 \cdot \delta. \quad (6.20)$$

Математичну модель також можна подати у вигляді степеневої функції. Для цього необхідно прологарифмувати результати вимірювань зразків. Логарифми значень шорсткості поверхні наведені в табл. 6.8.

Таблиця 6.8

Логарифми значень шорсткості поверхні контрольних зразків

lg b ₀	lg b ₁	lg b ₂	lg b ₃	lg b ₄	lg b ₅	lg b ₆	lg b ₇	lg b ₈	lg b ₉	lg b ₁₀
0,363	0,035	0,0125	0,011	0,085	0,032	0,008	0,0025	0,013	0,05	-0,013

Слід виконати розрахунок коефіцієнтів при змінних за залежностями:

$$\text{lg} b_{R_{\text{max}} 0} = \frac{\text{lg} y_{\text{відкл}R_{\text{max}} 1} + \text{lg} y_{\text{відкл}R_{\text{max}} 2} + \text{lg} y_{\text{відкл}R_{\text{max}} 3} \dots + \text{lg} y_{\text{відкл}R_{\text{max}} 14} + \text{lg} y_{\text{відкл}R_{\text{max}} 15} + \text{lg} y_{\text{відкл}R_{\text{max}} 16}}{16};$$

$$\text{lg} b_{R_{\text{max}} 1} = \frac{-\text{lg} y_{\text{відкл}R_{\text{max}} 1} + \text{lg} y_{\text{відкл}R_{\text{max}} 2} - \text{lg} y_{\text{відкл}R_{\text{max}} 3} \dots - \text{lg} y_{\text{відкл}R_{\text{max}} 14} + \text{lg} y_{\text{відкл}R_{\text{max}} 15} + \text{lg} y_{\text{відкл}R_{\text{max}} 16}}{16};$$

.....;

$$\text{lg} b_{R_{\text{max}} 10} = \frac{\text{lg} y_{\text{відкл}R_{\text{max}} 1} + \text{lg} y_{\text{відкл}R_{\text{max}} 2} + \text{lg} y_{\text{відкл}R_{\text{max}} 3} \dots + \text{lg} y_{\text{відкл}R_{\text{max}} 14} + \text{lg} y_{\text{відкл}R_{\text{max}} 15} - \text{lg} y_{\text{відкл}R_{\text{max}} 16}}{16}, \quad (6.21)$$

де $y_{\text{відкл}R_{\text{max}} 1-16}$ – розрахункова величина логарифма відкликання.

У результаті отримано рівняння регресії в логарифмічному вигляді:

$$\text{lg} y_{R_{\text{max}}} = 0,363 + 0,035x_1 + 0,0125x_2 + 0,011x_3 + 0,085x_4 + \\ + 0,032x_5 + 0,008x_6 + 0,0025x_7 + 0,013x_8 + 0,05x_9 - 0,013x_{10}. \quad (6.22)$$

Підставивши в нього відомі значення x_1, \dots, x_{10} , маємо:

$$\begin{aligned}
 y_{R_{\max}} = & 0,363 + 0,05 \left[\frac{2(\lg V_a - \lg V_{a \max})}{\lg V_{a \max} - \lg V_{a \min}} + 1 \right] + 0,0125 \left[\frac{2(\lg D - \lg D_{\max})}{\lg D_{\max} - \lg D_{\min}} + 1 \right] + \\
 & + 0,011 \left[\frac{\lg m_d - \lg m_{d \max}}{\lg m_{d \max} - \lg m_{d \min}} + 1 \right] + 0,085 \left[\frac{2(\lg \Sigma - \lg \Sigma_{\max})}{\lg \Sigma_{\max} - \lg \Sigma_{\min}} + 1 \right] + \\
 & + 0,032 \left[\frac{2(\lg W_{\text{рід}} - \lg W_{\text{рід. max}})}{\lg W_{\text{рід. max}} - \lg W_{\text{рід. min}}} + 1 \right] + 0,008 \left[\frac{2(\lg d_c - \lg d_{c \max})}{\lg d_{c \max} - \lg d_{c \min}} + 1 \right] + \\
 & + 0,0025 \left[\frac{2(\lg n_c - \lg n_{c \max})}{\lg n_{c \max} - \lg n_{c \min}} + 1 \right] + 0,013 \left[\frac{2(\lg D_{\text{розм}} - \lg D_{\text{розм. max}})}{\lg D_{\text{розм. max}} - \lg D_{\text{розм. min}}} + 1 \right] + \\
 & + 0,05 \left[\frac{2(\lg \xi - \lg \xi_{\max})}{\lg \xi_{\max} - \lg \xi_{\min}} + 1 \right] - 0,013 \left[\frac{2(\lg \delta - \lg \delta_{\max})}{\lg \delta_{\max} - \lg \delta_{\min}} + 1 \right]. \quad (6.23)
 \end{aligned}$$

У результаті розрахунку й наступного потенціювання визначено висоту мікронерівностей у вигляді степеневі функції:

$$\begin{aligned}
 \lg y_{R_{\max}} = & 0,87 + 0,27 \lg V_a + 0,083 \lg D + 0,028 \lg m_d + 0,277 \lg \Sigma + \\
 & + 0,136 \lg W_{\text{рід}} + 0,09 \lg d_c + 0,04 \lg n_c + 0,273 \lg D_{\text{розм}} + 0,143 \lg \xi - 0,054 \lg \delta. \quad (6.24)
 \end{aligned}$$

або

$$R_{\max} = 7,4 \frac{V_a^{0,27} D^{0,083} m_d^{0,028} \Sigma^{0,277} W_{\text{рід}}^{0,136} d_c^{0,09} n_c^{0,04} D_{\text{розм}}^{0,273} \xi^{0,143}}{\delta^{0,054}}. \quad (6.25)$$

Таким чином визначено параметр шорсткості поверхні R_{\max} .

6.3.2. Перевірка відтворюваності дослідів

Відтворюваність дослідів у ході визначення параметрів процесу обробки перевірена за допомогою критерію Кохрена:

$$G = \frac{S_{u \max}^2}{\sum S_u^2} \leq G(0,05; f_n; f_u), \quad (6.26)$$

де $S_u^2 = \sum_{p=1}^m (Y_{up} - \bar{Y})^2$ – дисперсія результатів дослідів при u -й комбінації

рівнів факторів (значення зведені в табл. 6.2 і табл. 6.3);

$p = 1, 2$, – порядковий номер паралельного дослідів;

$m = 2$ – кількість паралельних дослідів;

$S_{u\max}^2 = 0,07$ – найбільша з дисперсій;

$G(0,05; f_n; f_u) = 0,6798$ – табличне значення критерію Кохрена при 5-відсотковому рівні значущості;

$f_n = n = 8$ – кількість незалежних оцінок дисперсії;

n – число дослідів згідно з матрицею планування експерименту;

$f_u = m - 1$ – кількість ступенів свободи кожної оцінки.

При $m = 2$ маємо $f_u = 1$. Після підстановки значення $S_{u\max}^2$ и суми S_u^2 з табл. 6.3 в залежність (6.26), отримано:

$$G = \frac{0,07}{0,04 + 0,05 + \dots + 0,03 + 0,02} = 0,109.$$

Наведені розрахунки показали, що процес відтворюваний, оскільки $G = 0,109 < G(0,05; 8; 1) = 0,6798$.

6.3.3. Перевірка адекватності моделі

Адекватність отриманої моделі перевірено за допомогою критерію Фішера. Гіпотеза про адекватність моделі приймається, якщо виконується нерівність [6]:

$$F = \frac{S_{ад}^2}{S_y^2} \leq F(0,05; f_{ад}; f_y), \quad (6.27)$$

$$\text{де } S_{ад}^2 = \frac{\sum_{u=1}^n (\bar{y}_u - y_u)^2}{n - k - 1};$$

y_u – розрахункове значення відкликання в u -му досліді;

$F(0,05; f_{ад}; f_y)$ – критерій Фішера при 5-відсотковому рівні значущості;

$f_{ад} = n - k - 1$ – кількість ступенів свободи дисперсії адекватності;
 n – число дослідів згідно з матрицею планування експерименту;
 k – число факторів, які досліджуються;
 f_y – кількість ступенів свободи дисперсії відтворюваності.

Із отриманого рівняння визначено розрахункові значення y_u (див. табл. 6.3). Оскільки отримано абсолютний збіг значень y_u і y , дисперсія адекватності буде дорівнювати нулю. Відповідно до цього будь-яке значення критерію Фішера буде задовольняти умову адекватності. Звідси випливає, що отримана модель адекватно описує досліджуваний процес.

6.3.4. Оцінювання значущості коефіцієнтів

Оцінювання виконане за допомогою t -критерію Стьюдента. Коефіцієнт вважається значущим, якщо виконується рівняння:

$$|b_i| = \Delta b_i = t(0,05; f_y) \frac{S_y}{\sqrt{n}}, \quad (6.28)$$

де $t(0,05; f_y)$ – 5-відсоткова точка розподілу Стьюдента з $f_y = 1$ ступенем свободи;

n – кількість дослідів згідно з матрицею планування експерименту.

Приймаючи табличне значення критерію Стьюдента при 1-му ступені свободи $t(0,05; f_y) = 12,71$; $S_y = \sqrt{0,04}$; $n = 8$, отримано:

$$\Delta b_i = 12,71 \frac{\sqrt{0,04}}{\sqrt{8}} = 0,898.$$

Усі отримані з розрахунку коефіцієнти регресії значущі.

Аналіз отриманої математичної моделі вказує на незначний внесок в одержуваний результат таких параметрів, як одинична маса деталей m_d і кут ξ осі сопла відносно горизонтальної площини в заданих інтервалах варіювання. Це пояснюється тим, що в процесі проведення експериментів поряд з одиничною масою m_d варіювалася й сумарна маса оброблюваних деталей Σ , у зв'язку із чим легкі деталі із заданою сумарною

масою можуть відносно повільно переміщуватися робочою камерою, забезпечуючи тим самим максимальну різницю швидкостей відносно абразивних зерен. Із цього випливає, що не потрібно призначати спеціальні режими обробки для деталей з різною одиничною масою, однак важливо забезпечити максимально допустиму сумарну масу одночасно оброблюваних деталей. Зміна кута нахилу осі сопла до горизонту в заданому інтервалі варіювання також не вплинула на помітну зміну продуктивності обробки, що дозволяє зробити висновок про можливість призначення великого допуску на величину кута нахилу осі сопла до горизонту в процесі проектування й виготовлення устаткування. Слід зазначити, що в математичній моделі, вираженій емпіричною залежністю, величина металознімання обернено пропорційна до кута між віссю сопла й дотичною до кола на дні робочої камери; коло, на якому розміщені повітряні сопла. Цей факт вказує на необхідність спрямовувати осі сопел по дотичній до кола, тобто забезпечити переміщення деталей від сопла до сопла, а не на периферію дна робочої камери.

Найбільш значущими факторами, відповідно до отриманих емпіричних залежностей, є об'єм абразиву, що завантажується в робочу камеру, сумарна маса деталей і розташування сопел на дні робочої камери.

Нижче наведено графіки продуктивності обробки за металозніманням M (рис. 6.13 і 6.14) і максимальної висоти мікронерівностей поверхні під час абразивної обробки затопленими струменями (рис. 6.15 і 6.16). На графіках показано експериментальні й розрахункові криві, наведені за даними експериментів і відповідними емпіричними залежностями.

Наведені графіки залежностей продуктивності струминно-абразивної обробки й шорсткості поверхонь оброблених деталей відображають математичні моделі, отримані на основі експериментів, тобто є емпіричними залежностями.

Порівнюючи степеневі функції, які описують залежність продуктивності обробки M (величини металознімання) й висоти мікронерівностей обробленої поверхні R_{\max} , можна відзначити пряму залежність тих самих параметрів, тобто об'єму V_a й зернистості D абразиву; одиничної m_d й сумарної Σ маси оброблюваних деталей; об'єму рідини $W_{\text{рід}}$; діаметра d_c й кількості n_c сопел; діаметра кола розміщення сопел $D_{\text{розм}}$; кута між віссю сопла й горизонтом ξ і оберненою залежністю кута між віссю сопла й дотичною до кола δ , на якому вони розміщені.

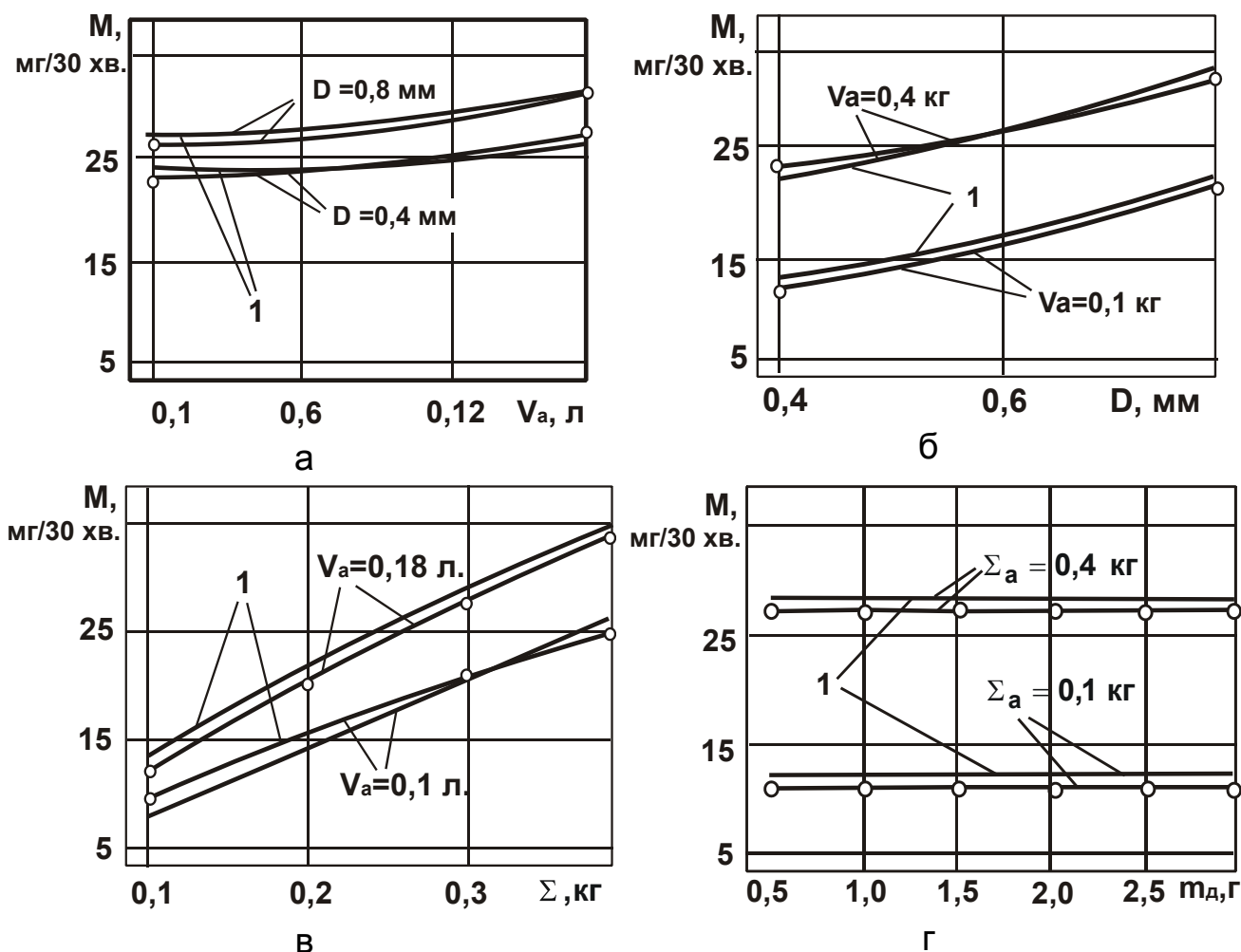


Рис. 6.13. Залежності M від V_a (а), D (б), Σ (в) і m_d (г)

Умови обробки: 1 – розрахункові криві.

Зазначені співвідношення пояснюються наступним чином.

Збільшення продуктивності обробки M (див. рис. 6.13а) і висоти мікронерівностей поверхні R_{\max} (див. рис. 6.15а) при збільшенні кількості абразивного матеріалу в робочій камері обумовлено тим, що сопла безупинно виявляються під шаром рухомого абразивного порошку й оброблюваних деталей. У зв'язку із цим струмені стисненого повітря інjektують абразивний матеріал вже на початковій ділянці струменя, де прискорення абразивних зерен максимальні. Деталі ж в силу їх більшої маси розганяються повільніше, завдяки чому досягається максимальна різниця їх швидкостей і, як наслідок, більш глибоке проникнення абразивних зерен в оброблюваний метал і видалення більших його часток, що підвищує продуктивність обробки. У зв'язку із цим кількість абразивного матеріалу повинна бути максимальною, але при цьому не повинні утворюватися застійні зони у робочій камері.

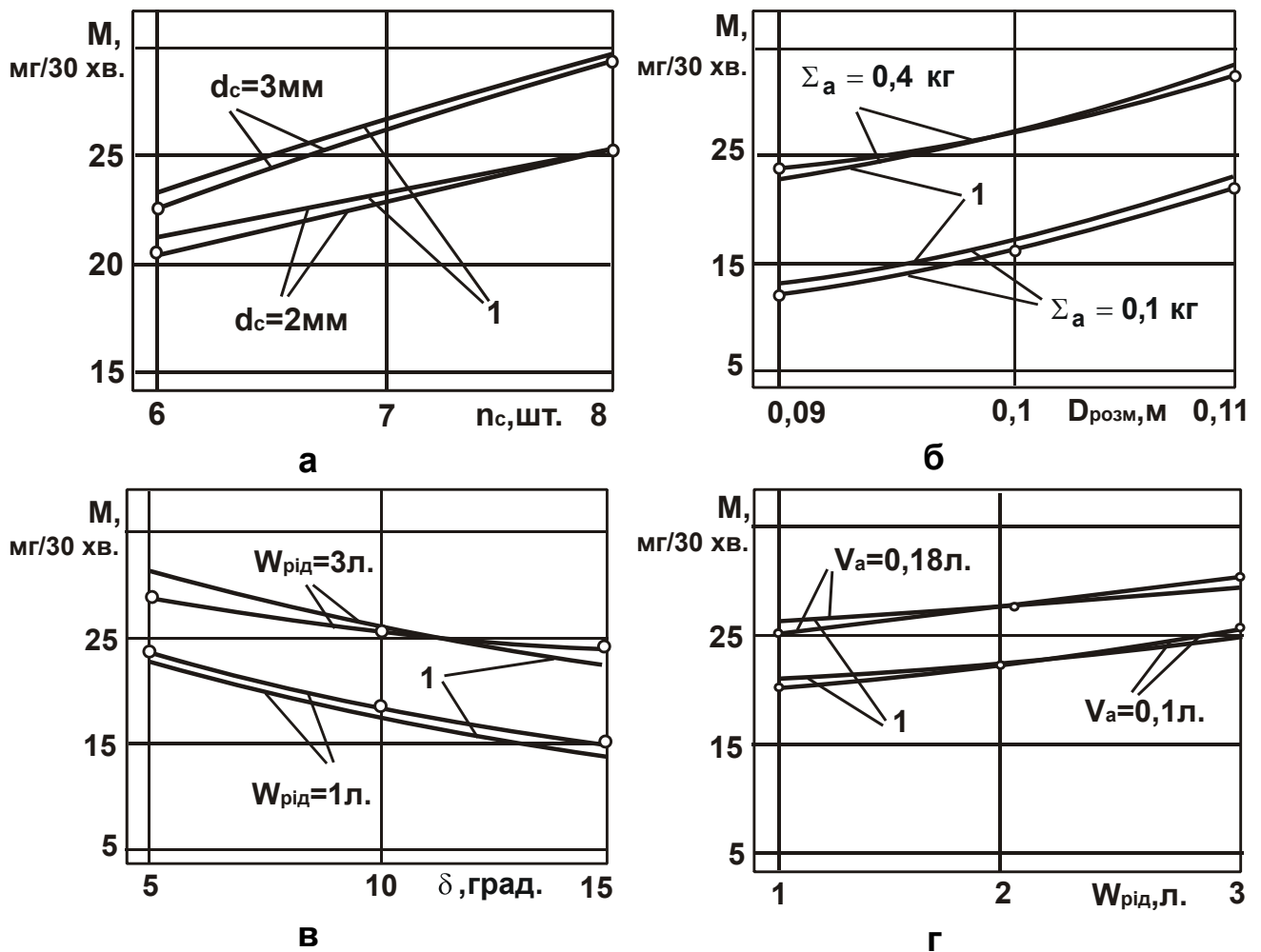


Рис. 6.14. Залежності M від n_c (а), $D_{розм}$ (б), δ (в) і $W_{рід}$ (г)

Умовні позначення: 1 – розрахункові криві.

Відносно менший вплив зернистості (розміру абразивного зерна) на продуктивність обробки M (див. рис. 6.13б) і висоту мікронерівностей поверхні R_{max} (див. рис. 6.15г) обумовлений тим, що робота деформації, виконана абразивним зерном, відповідно до загальновідомої формули кінетичної енергії $W = m \cdot V^2 / 2$ (де m – маса зерна, кг; V – швидкість руху зерна, м/с), виявляється фактично однаковою, тому що маса й швидкість великих і дрібних абразивних зерен компенсують один одного. Це обумовлено тим, що абразивне зерно з великою масою, перебуваючи в районі зрізу сопла, повільніше розганяється зі стану відносного спокою, ніж дрібне абразивне зерно. Однак меншу швидкість компенсує більша маса, тоді як зерно з малою масою набуває більшої швидкості і, таким чином, запас кінетичної енергії абразивних зерен виявляється приблизно однаковим. Проте, відповідно до математичної моделі й графіка, наведеного на рис. 6.15г, великозернистий абразивний матеріал хоч і не-

значною мірою забезпечує утворення на оброблюваній поверхні більш глибоких слідів й більшу продуктивність обробки М (див. рис. 6.13б). Отже, для обробки слід вибирати абразивний матеріал залежно від пріоритетної вимоги в робочому кресленні: для обробки з високою продуктивністю – максимальну зернистість № 80; для мінімальної шорсткості – мінімальну зернистість № 20.

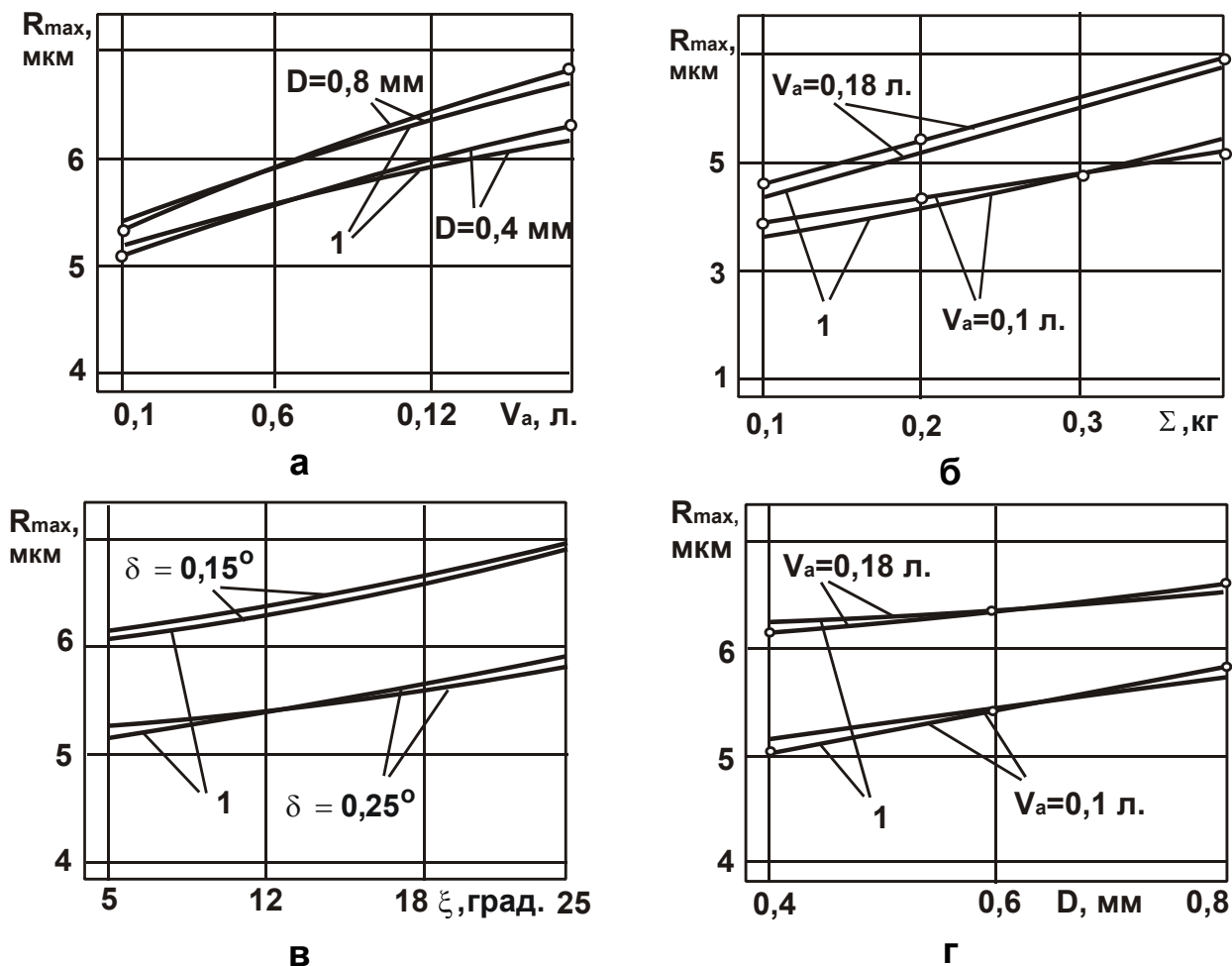


Рис. 6.15. Залежності R_{\max} від V_a (а), Σ (б), ξ (в) і D (г)

Умовні позначення: 1 – розрахункові криві.

Зміна одиничної маси оброблюваних деталей у розглянутому інтервалі значень від 0,5 до 3,0 г фактично не впливає на продуктивність обробки М (див. рис. 6.13г) і несуттєво впливає на висоту мікронерівностей поверхні R_{\max} (див. рис. 6.16в). Це свідчить про малий інтервал варіювання маси деталей. Оскільки діапазон зміни маси деталей установлений метою дослідження, не має необхідності створення спеціальних умов обробки залежно від одиничної маси деталей.

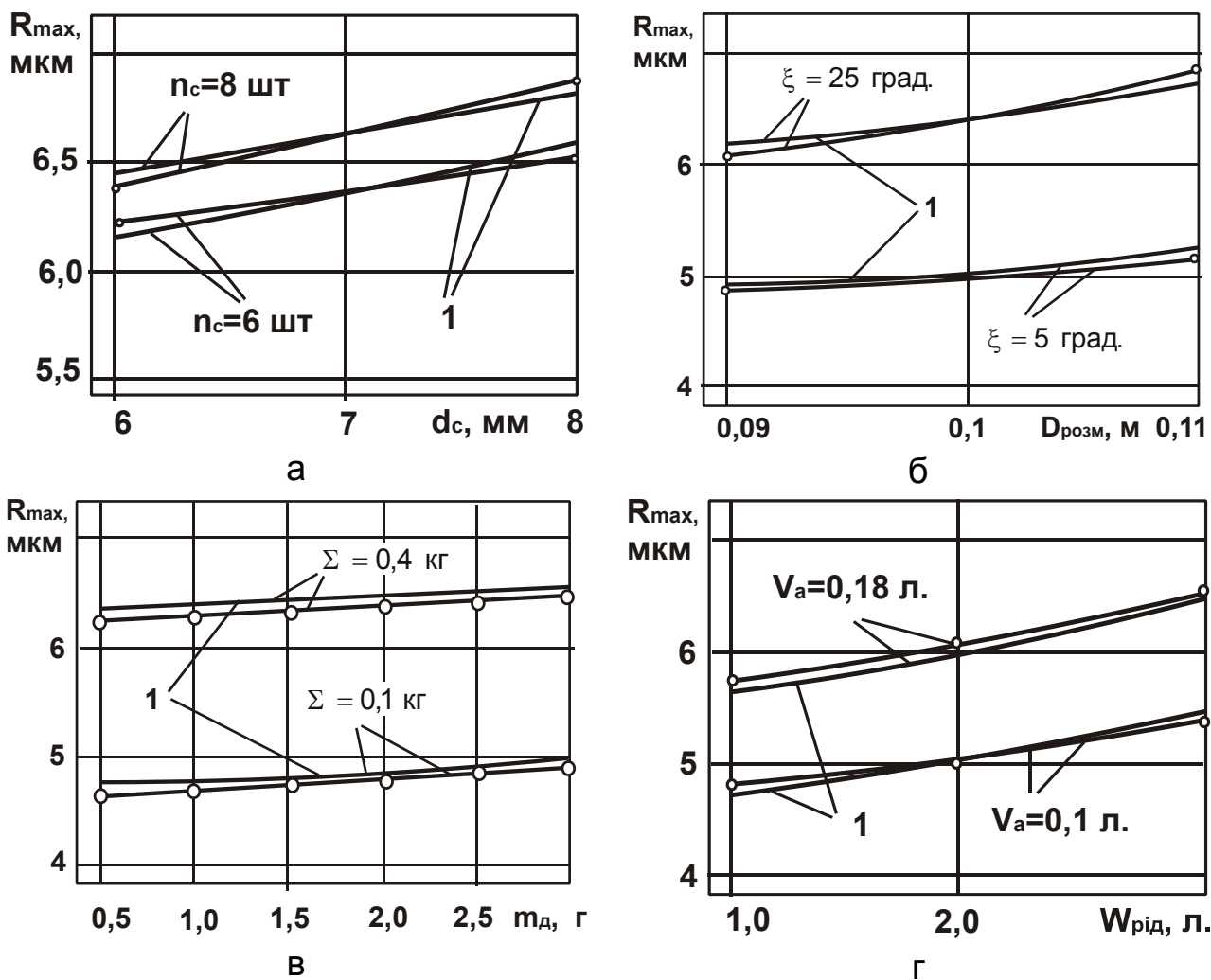


Рис. 6.16. Залежності R_{\max} від d_c (а), $D_{\text{розм}}$ (б), m_d (в) і $W_{\text{рід}}$ (г)

Умовні позначення: 1 – розрахункові криві.

Найбільше впливає на продуктивність обробки кількість деталей, які завантажуються в робочу камеру, або баласту. Позитивний ефект тут досягається завдяки виникненню сприятливої максимальної різниці швидкостей абразивних зерен і повільно переміщуваних через велику сумарну масу оброблюваних деталей. Результівна (відносна) швидкість у цьому випадку максимальна, чим і пояснюється максимальна продуктивність обробки M (див. рис. 6.13в) і найбільша глибина слідів абразивних зерен (див. рис. 6.15б). Досягнення найкращого результату обробки пов'язане з конфігурацією деталей і питомою вагою матеріалу, з якого вони виготовлені. У процесі обробки невеликої кількості деталей у робочу камеру слід довантажувати до необхідної сумарної маси баластові деталі, наприклад, круглу висічку від штампування листового матеріалу. При цьому маса одноразового завантаження деталей повинна становити

0,4 – 0,5 кг. Тоді продуктивність обробки деталей масою 1 г складе 800 – 1 000 деталей за годину, а трудомісткість виготовлення однієї деталі – 4,5 – 3,6 с.

Зі збільшенням кількості рідини (водяного розчину нетоксичного інгібітору корозії, наприклад, 0,5 – 1,0-відсоткового розчину кальцинованої соди Na_2CO_3) продуктивність обробки М підвищується в межах 5 мг (див. рис. 6.14г), а висота мікронерівностей поверхні – на 3,4 мкм (див. рис. 6.16г). Це обумовлено тим, що в разі зменшення кількості рідини швидкість обертання всієї маси завантаження робочої камери зростає, оскільки зростають питомі витрати енергії струменів за меншої кількості вмісту робочої камери. Це призводить до зменшення відносної швидкості абразивних зерен і деталей й, відповідно, до зменшення продуктивності обробки та глибини слідів абразивних зерен на поверхнях деталей. Слід зазначити, що головне призначення рідини в процесі абразивної обробки затопленими струменями – це зв'язування абразивного матеріалу в суспензію для виключення пилоутворення. У зв'язку із цим обирається максимальна кількість рідини 3 – 4 л.

Збільшення діаметра сопел, так само, як і їхньої кількості, сприяє підвищенню продуктивності обробки М (рис. 6.14а), що пов'язано зі зростанням витрат енергії струменів стисненого повітря на обробку. Аналогічно виглядає графік залежності висоти мікронерівностей поверхні R_{max} (див. рис. 6.16а). Невелика величина зміни продуктивності обробки М й шорсткості обробки пояснюється тим, що в разі варіювання кількості й діаметра сопел витрата стисненого повітря залишається постійною за рахунок зміни його тиску. З урахуванням обмежень у витраті стисненого повітря кількість сопел та їхній діаметр повинні бути максимальними, тобто слід прийняти 8 сопел діаметром до 3 мм.

Інші конструктивні параметри, які визначають кути осей сопел у порожнині робочої камери (відносно горизонтальної поверхні дна робочої камери й дотичної до кола, на якому вони розміщені, а також діаметра самого кола) дозволяють обґрунтовано ухвалювати технічне рішення в процесі проектування установки. Так, у разі збільшення кута осі сопла до горизонтальної площини, яка проходить через дно робочої камери (див. рис. 6.15в), збільшується кількість абразивного матеріалу в перетині струменя. Однак, оскільки струмені повинні не тільки обробляти, але й транспортувати вміст робочої камери, то вихід кута за межі варіювання

призводить до ризику припинення руху вмісту робочої камери, тобто до порушення процесу обробки. Таким чином, оптимальним кутом нахилу осей сопел слід вважати кут 25° .

Кут між віссю сопла й дотичною до кола, на якому він розташований, є єдиним параметром, що перебуває в оберненій залежності з продуктивністю обробки M (див. рис. 6.14в) і висотою мікронерівностей поверхні R_{\max} (див. рис. 6.15в). Цей параметр варіювали, виходячи із умови, що струминний потік повинен перетинати траєкторію кругового руху оброблюваних деталей. Однак у разі збільшення кута деталі під дією радіальної складової струменя, що виникає, обертаються по колу за межами сопел, не потрапляючи в місця, де прискорення абразивних зерен максимальне, тобто в місця зрізів сопел.

Таким чином з'ясовано, що осі сопел повинні мати мінімальний і, більше того, від'ємний кут відносно дотичної, тобто осі сопел повинні утворювати багатокутник із кількістю вершин, що дорівнює кількості сопел, вписаних у коло, на якому розміщені сопла. У цьому випадку забезпечуються умови транспортування абразивного матеріалу й деталей від сопла до сопла.

Залежність продуктивності обробки M від діаметра кола розташування сопел (див. рис. 6.14б) і висоти мікронерівностей поверхні (див. рис. 6.16б) вказує на те, що діаметр кола повинен бути максимальним з урахуванням конструктивних обмежень. Діаметр кола, на якому розміщені сопла, визначається вписаним багатокутником з кількістю вершин, що відповідають кількості сопел, і довжиною ребер, яка визначається ефективною довжиною дії струменів, що дорівнює 60 мм (див. рис. 6.4г).

6.4. Вибір раціональних параметрів обробки

Отримані емпіричні залежності (6.17) і (6.25) для визначення продуктивності обробки й шорсткості поверхні дозволяють науково обґрунтовано підійти до вибору раціональних параметрів обробки. Як впливає із залежності (6.17), найбільше впливає на продуктивність обробки сумарна маса деталей, що завантажуються в робочу камеру, і меншою мірою – кількість сопел при постійній витраті стисненого повітря, об'єм абразивного порошку, який завантажується в робочу камеру, і об'єм рідини, яка заливається в робочу камеру. Тому досягти збільшення продуктив-

ності обробки можна, насамперед, за рахунок збільшення цих параметрів, вважаючи їх значення максимально можливими. Збільшити продуктивність обробки можна, установлюючи максимально можливими значення й інших параметрів, які входять у залежність (6.17), за винятком кута δ між віссю сопла й дотичною до кола (на якому розташовано повітряні сопла), який необхідно приймати мінімально можливим.

Із залежності (6.17) впливає незначний вплив зернистості абразиву на продуктивність абразивної обробки затопленими струменями, тоді як у ході струминно-абразивної обробки зернистість абразиву є визначальним параметром процесу. Це пов'язано зі зменшенням швидкості руху абразивних зерен у зв'язку зі збільшенням їхньої зернистості (див. рис. 6.5а). Виходячи з залежності (6.25), фактично однаковою мірою впливають на максимальну висоту мікронерівностей обробленої поверхні сумарна маса деталей та об'єм абразивного порошку, що завантажуються в робочу камеру, а також діаметр кола, на якому розташовані повітряні сопла. Тому зменшити максимальну висоту мікронерівностей обробленої поверхні можна в першу чергу за рахунок зменшення цих параметрів до мінімально можливого значення.

З наведених експериментальних даних також впливає, що висота мікронерівностей перебуває в безпосередньому зв'язку із продуктивністю обробки, представленою металозніманням, і стабілізується на величині $R_{\max} = 6,8$ мкм. Це узгоджується з результатами теоретичних досліджень, наведених у розділі 2 роботи.

Необхідно зауважити, що, на відміну від технологічних параметрів, конструктивні параметри установок для здійснення абразивної обробки затопленими струменями меншою мірою впливають на продуктивність обробки й шорсткість поверхні, які визначаються залежностями (6.17) і (6.25). Отже, забезпечити високі показники обробки можна, насамперед, за рахунок правильного вибору технологічних параметрів обробки. Разом із тим у процесі проектування установок необхідно правильно вибирати їхні конструктивні параметри відповідно до залежностей (6.17) і (6.25), що є важливим резервом підвищення ефективності методу абразивної обробки деталей затопленими струменями.

На основі отриманих результатів установлено, що досягти найбільшої продуктивності обробки для заданої шорсткості $R_{\max} = 6,8$ мкм можна через реалізацію таких умов обробки, як: об'єм абразиву, що заван-

тажується, $V_a = 0,18$ л; зернистість абразиву – № 40; сумарна маса оброблюваних деталей $\Sigma = 0,4$ кг; об'єм рідини, що заливається, $W_{\text{рід}}$ – 3,0 л; діаметр сопел $d_c = 2$ мм; кількість сопел $n_c = 8$; діаметр розміщення сопел $D_{\text{розм}} = 110$ мм; кут нахилу осі сопла до горизонту $\xi = 25^\circ$; кут між віссю сопла й дотичною до кола в точці її розміщення $\delta = 5^\circ$.

Отримані результати експериментальних досліджень дозволяють уточнити теоретичні рішення, наведені в п. 3.4 роботи. Так, відповідно до залежності (3.120), продуктивність обробки зі збільшенням зернистості абразивних зерен пропорційно збільшується, тоді як експериментально встановлено, що зернистість абразивних зерен мало впливає на продуктивність обробки. Поясненням такої розбіжності в теоретичних і експериментальних даних є те, що зі збільшенням зернистості абразивних зерен зменшується швидкість руху абразивних зерен V_0 , яка входить у залежність (3.120) для визначення продуктивності обробки з найбільшим ступенем. Тому навіть невелике її зменшення веде до істотного зменшення продуктивності обробки й відповідно нівелює збільшення продуктивності у зв'язку зі зростанням зернистості абразивних зерен. Підтвердженням цього є аналітична залежність (3.135), отримана з урахуванням зміни швидкості руху зерен у зв'язку зі зміною зернистості абразивного порошку. Як видно, зі збільшенням зернистості абразивного порошку продуктивність обробки зменшується, що пов'язано з інтенсивним зменшенням швидкості руху абразивних зерен залежно від зернистості абразивного порошку. У реальних умовах обробки, виходячи з експериментально отриманих графіків (див. рис. 6.13б), зі збільшенням зернистості абразивного порошку продуктивність обробки незначно збільшується, тобто швидкість руху абразивних зерен зменшується, однак не настільки істотно, як це встановлено аналітично в залежності (3.135). Спостережувана розбіжність теоретичних і експериментальних результатів вказує на те, що процес абразивної обробки деталей затопленими струменями досить складний за фізичною природою, де переважає масштабний фактор. Тому судити про його технологічні можливості можна головним чином на основі результатів експериментальних досліджень. Разом із тим зіставлення експериментальних і теоретичних результатів дозволяє цілеспрямовано виявляти причини, які обмежують використання потенційних можливостей процесу, установлених на основі теоретичних рішень.

Висновки до розділу 6

1. Експериментально визначено значення швидкості руху абразивних часток, які приєднуються до струменя стисненого повітря, у міру віддалення від зрізу сопла. Доведено наявність екстремуму (максимуму) даної залежності для різних конструкцій сопел (включаючи надзвукове сопло Лаваля, звужувані та розширювані конічні сопла й циліндричне сопло). При цьому найбільші екстремальні значення швидкості руху абразивних часток і відстані від зрізу сопла досягаються у випадку використання сопла Лаваля, яке забезпечує надзвукову швидкість витікання стисненого повітря й вказує на ефективність його застосування.

2. Експериментально встановлено неоднозначний характер зміни швидкості руху абразивних часток від довжини каналу сопла для різних конструкцій сопел. Так, у процесі використання звужуваних та розширюваних конічних сопел зі збільшенням довжини каналу сопла швидкість руху абразивних часток збільшується, а в разі використання циліндричного сопла, навпаки, зменшується. У процесі використання надзвукового сопла Лаваля має місце екстремум (максимум) швидкості руху часток від довжини надзвукової частини каналу сопла. Установлено, що найбільша швидкість руху досягається при його довжині, що дорівнює 6 мм.

3. Експериментально встановлено, що зі збільшенням зернистості абразиву швидкість руху абразивних зерен безупинно зменшується. Це пов'язано з особливостями передачі кінетичної енергії від струменя стисненого повітря до абразивного зерна. Встановлено, що в умовах абразивної обробки деталей затопленими струменями швидкість руху абразивних зерен менша, ніж під час звичайної струминно-абразивної обробки. Отже, пошук шляхів збільшення швидкості руху абразивних зерен у процесі абразивної обробки деталей затопленими струменями є основним напрямом інтенсифікації цього прогресивного методу обробки.

4. Встановлена найбільш ефективна конфігурація сопла за критерієм забезпечення максимальної кількості абразивних зерен, які інjektуються у струмінь, що витікає в абразивну суспензію, на основі визначення кількості слідів зерен на оброблених полірованих латунних пластинах-екранах. Дослідження профілограм, знятих з поверхонь оброблених екранів, показало, що в разі використання надзвукового сопла Лаваля має місце найбільш щільне розташування слідів абразивних зе-

рен, які також характеризуються найбільшою глибиною. Порівняно з обробкою із використанням циліндричного сопла знімання металу за 30 хвилин збільшилося на 39 %. Цим доведено, що застосування надзвукового сопла Лаваля забезпечує досягнення подвійного ефекту від обробки: збільшення швидкості потоку, а отже, і збільшення запасу кінетичної енергії абразивного зерна, а також збільшення кількості абразивних зерен, які інжектуються у затоплений струмінь стисненого повітря.

5. Експериментально встановлено, що щільність покриття слідами абразивних зерен оброблюваної поверхні плоскої деталі збільшується від середини до її кромки. Отже, найбільша інтенсивність знімання матеріалу в процесі абразивної обробки затопленими струменями досягається на торцевих поверхнях оброблюваних дрібних деталей. Це узгоджується з теоретичними результатами, наведеними в розділі 2 роботи.

6. Експериментально встановлено, що найбільше впливає на продуктивність обробки сумарна маса деталей, що завантажуються в робочу камеру, і меншою мірою – кількість сопел при постійній витраті стисненого повітря, об'єм абразиву, що завантажується, і об'єм рідини, яка заливається в робочу камеру. Установлено також незначний вплив зернистості абразиву на продуктивність абразивної обробки затопленими струменями, тоді як у разі відомих методів струминно-абразивної обробки зернистість абразиву є визначальним параметром процесу.

7. Розроблено узагальнюючі емпіричні математичні моделі параметрів процесу абразивної обробки деталей затопленими струменями, які в сукупності з отриманими результатами аналітичних досліджень дають досить повне уявлення про технологічні можливості процесу й дозволяють за критеріями найбільшої продуктивності й найменшої шорсткості поверхні визначити раціональні параметри обробки.

8. На основі розроблених математичних моделей параметрів процесу абразивної обробки деталей затопленими струменями встановлено, що досягти найбільшої продуктивності обробки для заданої шорсткості поверхні $R_{\max} = 6,8$ мкм можна через реалізацію таких умов обробки, як: 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 сопла 110 мм; кут нахилу осі сопла до горизонту – 25° ; кут між віссю сопла й дотичною до кола в точці її розміщення $0 \dots 5^{\circ}$.

Розділ 7. Розробка та впровадження ефективних технологій абразивної обробки деталей затопленими струменями

7.1. Розробка прогресивного устаткування для реалізації методу абразивної обробки деталей затопленими струменями

Отримані в роботі результати теоретичних і експериментальних досліджень із визначення оптимальних конструктивних і технологічних параметрів обробки дозволяють обґрунтовано призначати кількість і розміри конструктивних елементів установок, а також визначати раціональні режими обробки, які забезпечують максимальну продуктивність при заданій шорсткості поверхні. Це відкриває нові можливості для розробки прогресивних конструкцій установок для здійснення абразивної обробки деталей затопленими струменями. У зв'язку із цим у роботі розроблено гама нових установок для здійснення абразивної обробки деталей затопленими струменями, захищених авторськими посвідченнями на винаходи й патентами України. Далі описано ці установки й принципи їх роботи, а також обґрунтовано сфери ефективного їх застосування й досягнуті результати. На рис. 7.1 показана структурна схема технічних рішень, реалізованих у нових конструкціях установок, які дозволяють підвищити продуктивність і якість обробки, поліпшити ергономічні показники.

Головним стратегічним напрямом удосконалення устаткування відповідно до встановлених у розділах 2 і 3 закономірностей є забезпечення максимальної швидкості руху абразивних зерен відносно оброблюваних деталей з одночасною локалізацією процесу мікрорізання: на плоских поверхнях, на кромках деталей або в разі всебічної обробки деталей – у цілому. Це дозволило реалізувати теоретичні рішення, пов'язані з обробкою з постійною, зі збільшеною та зі зменшеною товщиною мікрорізу, а також з особливостями обробки деталей із пластичних і крихких матеріалів. Необхідний ефект (локалізація обробки на певних частинах деталей) у цих установках досягається за рахунок напрямку, що задається осям сопел у робочій камері, а також комбінацією розміщення сопел, тобто знизу вгору, горизонтально або зверху вниз (рис. 7.2).

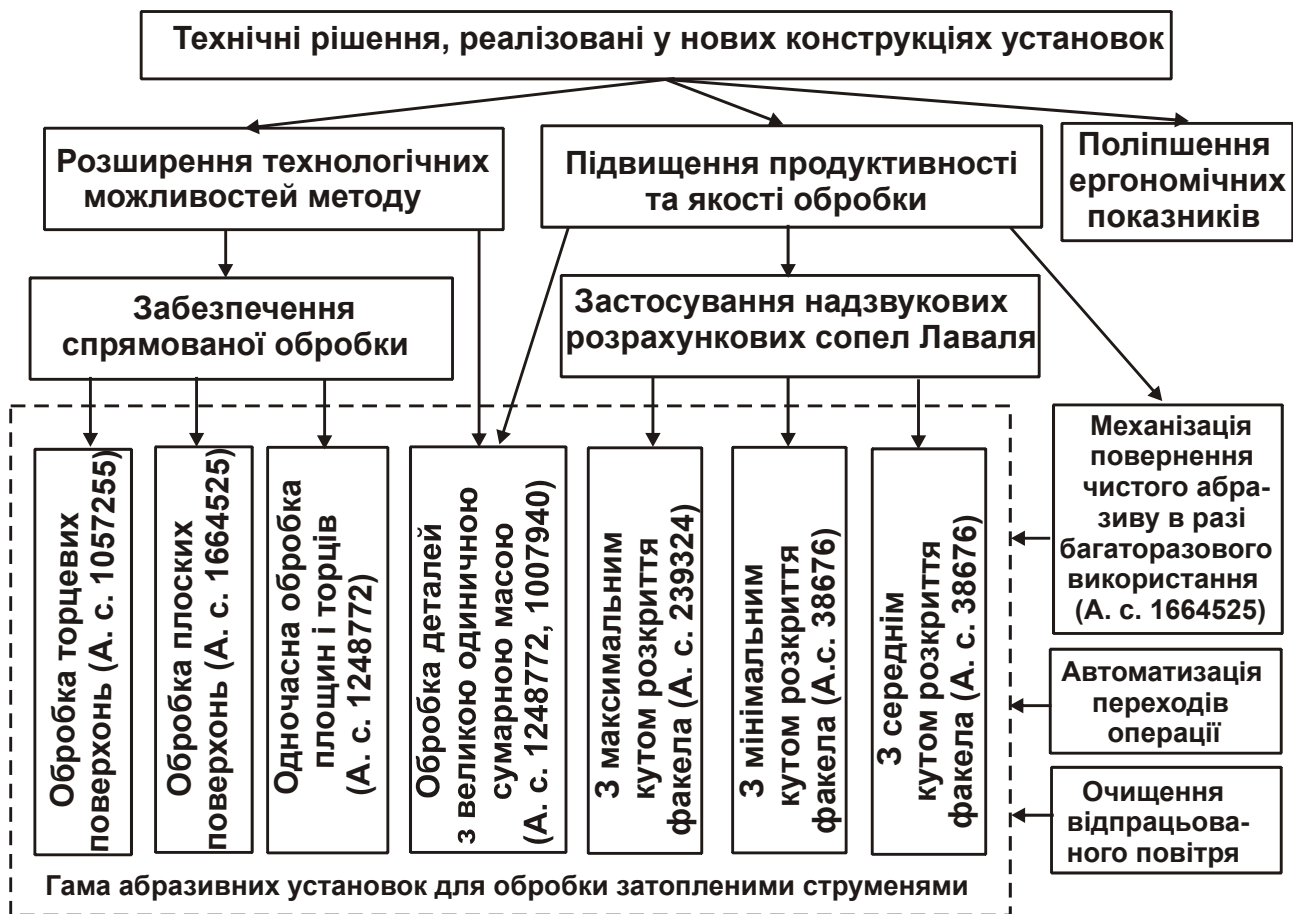


Рис. 7.1. Структурна схема технічних рішень, реалізованих у нових конструкціях установок для здійснення абразивної обробки деталей затопленими струменями

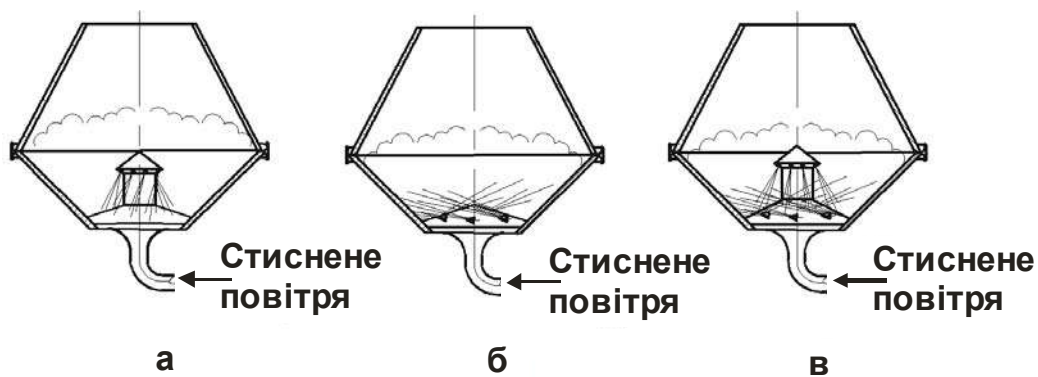


Рис. 7.2. Схеми струминно-абразивних установок з локалізацією обробки: а – на площинах; б – на торцях; в – обробка на площинах і на торцях

Одним із варіантів декоративної й зачисної обробки дрібних деталей затопленими струменями є обробка в спіралеподібному барабані

[28]. У цьому випадку забезпечується підвищення якості обробки деталей затопленими струменями в абразивній суспензії і збільшення продуктивності за рахунок створення коливань тиску в робочому середовищі, завдяки чому виникають пульсації струменів стисненого повітря. На рис. 7.3 наведено схему дослідної установки, яка забезпечує обробку по площинах [28].

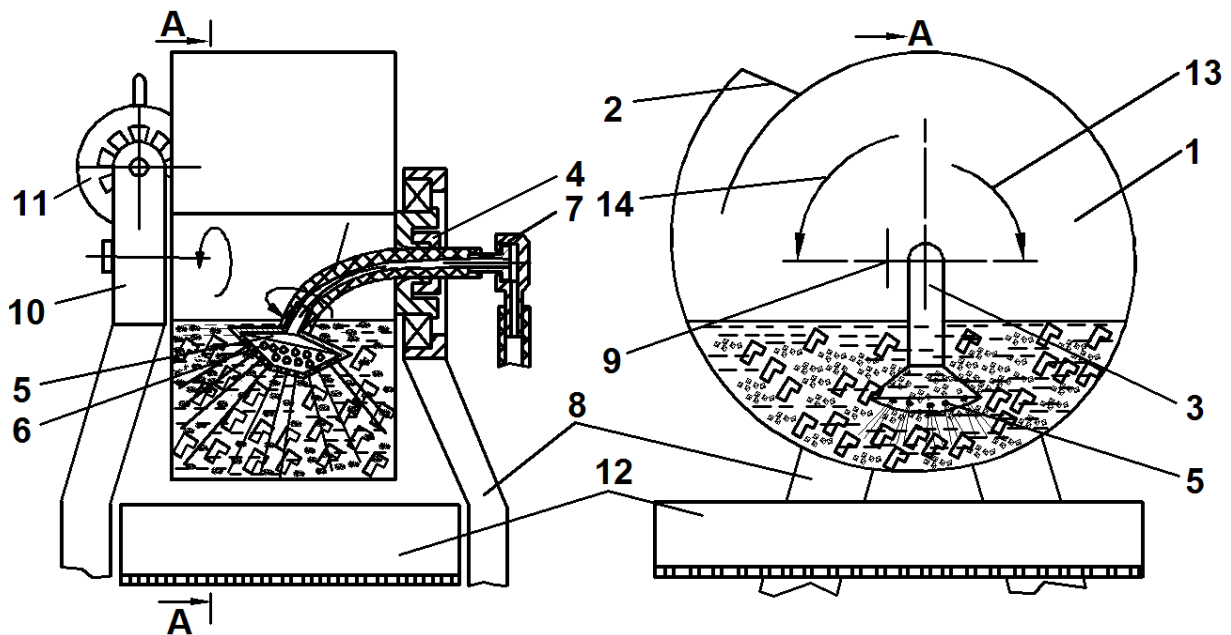


Рис. 7.3. Принципова схема абразивної установки для обробки затопленими струменями зі спіралеподібною робочою камерою

Установка складається з обертового барабана 1 із завантажувально-розвантажувальним вікном 2, гнучкого повітропроводу 3, закріпленого нерухомо й герметично до торцевого фланця барабана цанговим затискачем 4 у точці, рівновіддаленій від периферії барабана, з можливістю регулювання його довжини. Усередині барабана на гнучкому повітропроводі 3 змонтована насадка 5 із сопловими отворами 6. При цьому вісь обертання соплової насадки під дією власної ваги відхилена від осі обертання барабана на кут, рівний або близький до 90° , завдяки чому сопла спрямовані на оброблювані деталі. Зовнішній кінець повітропроводу 3 з'єднаний з муфтою 7 для подачі стисненого повітря від джерела до кінця повітропроводу, який обертається разом із барабаном 3. Барабан установлений з можливістю обертання в опорах 8 навколо осі 9, яка є центром спіральної обичайки, і з'єднаний з редуктором 10, який приво-

диться в обертання приводом 11. Під барабаном розміщене розподільне решето 12. Наведені в розділі 3 теоретичні рішення дозволяють зробити висновок про те, що основними резервами підвищення продуктивності обробки є збільшення швидкості руху абразивних зерен і забезпечення умов мікрорізання зі зменшеною товщиною зрізу. Крім того, спрямована дія струменів під гострим кутом або по нормалі до поверхонь деталей, як виявилось, також може бути реалізована в рамках розглянутого методу обробки. У зв'язку із цим проведено експериментальні дослідження обробки плоских поверхонь штампованих листових деталей.

Для забезпечення оптимальної відстані між сопловою насадкою й поверхнею, утвореною оброблюваними деталями, передбачено можливість регулювання довжини й герметичного закріплення гнучкого повітропроводу 3 (див. рис. 7.3) за допомогою цангового затискача 4, у результаті чого змінюється глибина занурення соплової насадки 5 в абразивну суспензію. Це дозволяє регулювати відстань між зрізами сопел 6 і оброблюваними деталями.

Експериментально встановлено взаємозв'язок між продуктивністю обробки й висотою соплового апарата над деталями. Критерієм оцінювання продуктивності обробки прийнято знімання металу за 30 хвилин

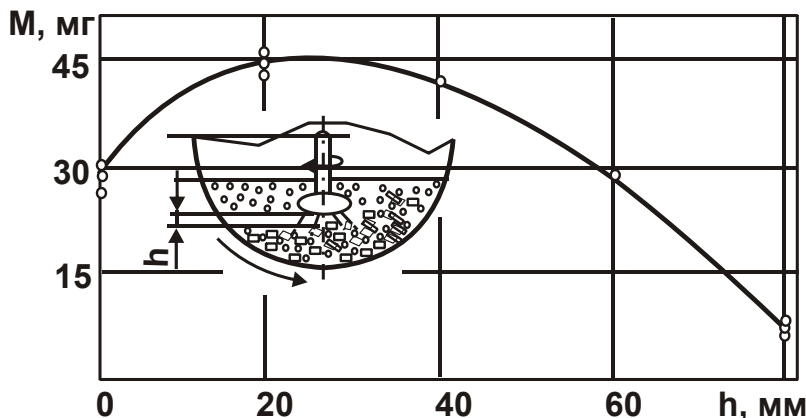


Рис. 7.4. Залежність знімання металу M від висоти h соплового апарата над деталями

Умови обробки: шліфзерно 63С (карбід кремнію зелений); зернистість абразиву 63П (630 мкм); тиск стисненого повітря 0,5 МПа.

ного значення, а потім зменшується у зв'язку зі втратою швидкості руху зерен. Умова максимуму знімання металу M обумовлена максимальною

обробки (рис. 7.4). З рисунка видно, що при мінімальній висоті h соплового апарата над деталями спостерігається невелике знімання металу. Це пояснюється обмеженим підведенням абразивних зерен до сопел, тому що сопловий апарат перекриває своїм корпусом шлях суспензії.

Зі збільшенням висоти h знімання металу M збільшується до певного значення, а потім зменшується у зв'язку зі втратою швидкості руху зерен.

швидкістю руху зерен і досягається при висоті соплового апарата над деталями, що дорівнює $h = 20 \dots 30$ мм. Дане технічне рішення забезпечує одночасне поліпшення ряду показників, тобто досягнення комплексного позитивного ефекту, у який увійшли:

1) підвищення продуктивності обробки за рахунок одночасної обробки великої кількості деталей, тому що перемішування, на відміну від базової установки, забезпечується обертанням робочої камери;

2) розширення технологічних можливостей методу абразивної обробки затопленими струменями за рахунок забезпечення можливості обробки деталей масою до 50 г, а також через примусове перемішування;

3) інтенсивна обробка плоских поверхонь деталей затопленими абразивними струменями;

4) збільшення інтенсивності обробки й терміну служби внутрішнього облицювання робочої камери завдяки періодичному притисканню деталей до спіральної обичайки за рахунок вертикального прискорення. Ця властивість важлива з двох причин. По-перше, дрібні деталі не розлітаються в сторони від струменя, залишаючись у зоні обробки; по-друге, перебуваючи під абразивними струменями, деталі екранують обичайку робочої камери, оберігаючи її від абразивного зношування;

5) додатковий засіб впливу на деталі, який виявився у зв'язку з виникненням гідродинамічної кавітації й динамічного впливу кавітаційних пухирців (у моменти їх схлопування) на абразивні зерна, які у свою чергу бомбардують деталі.

До перерахованих позитивних якостей установки слід віднести простоту й зручність вивантаження вмісту робочої камери після обробки. Для вивантаження оброблених деталей і абразивної суспензії перемикають напрямок обертання робочої камери, у результаті чого вивантаження здійснюється за один оберт робочої камери. Таким чином, розроблена технологія й конструкція установки для її реалізації практично за всіма експлуатаційними показниками перевершує базову установку. До них належать: продуктивність обробки, технологічні можливості, довговічність, простота конструкції і, як наслідок, простота експлуатації.

Запропоноване технічне рішення [50] спрямоване на подальше вдосконалення технологічного процесу абразивної обробки деталей затопленими струменями за рахунок поліпшення якості багаторазово використаного абразивного матеріалу (рис. 7.5).

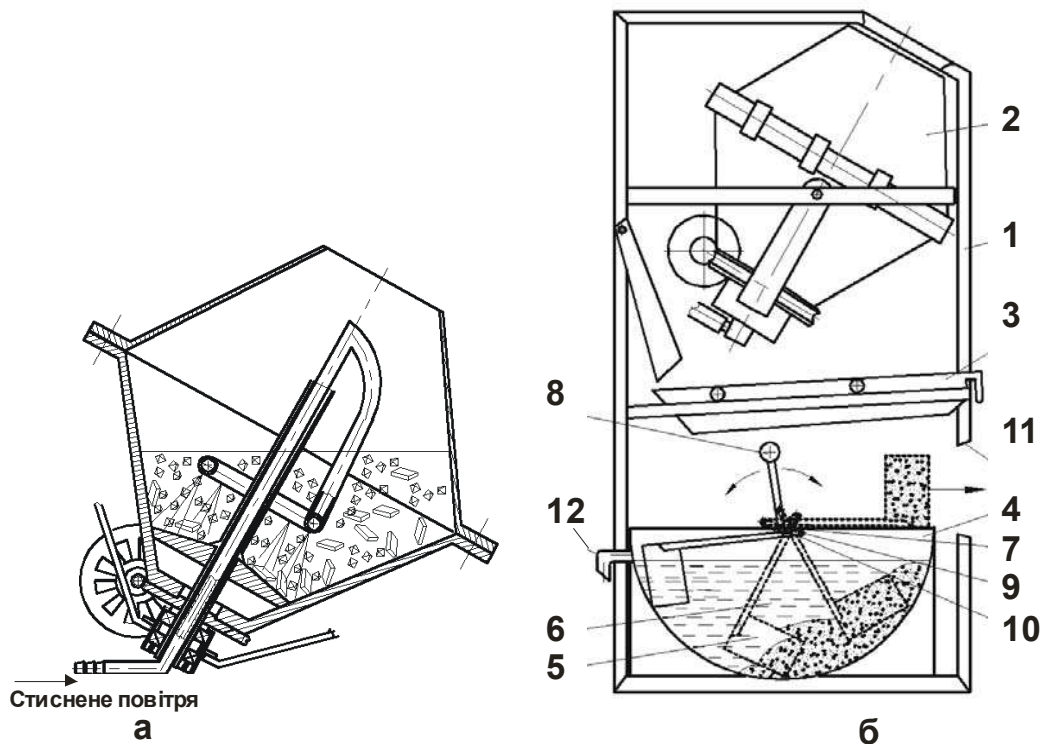


Рис. 7.5. Компоновочна схема пристрою для абразивної обробки затопленими струменями [50]

Умовні позначення: а – схема робочої камери; б – струминно-абразивна установка.

Порівняно з базовою установкою дана установка має ряд переваг, до числа яких належать розширення технологічних можливостей і підвищення продуктивності обробки. Ефект отримано завдяки обертанню робочої камери з нахилом осі симетрії. Продуктивність обробки підвищена за рахунок завантаження для одночасної обробки великої кількості оброблюваних деталей, які перекочуються в результаті обертання робочої камери, піддаючись всебічній обробці абразивними зернами, якщо приєднуються до струменів стисненого повітря. Розширення технологічних можливостей полягає в можливості обробляти не тільки дрібні деталі масою до 3 – 5 г, але й більші деталі масою до 10 – 15 г.

Особливістю даного технічного рішення є можливість механізованого вивантаження абразивного матеріалу з бака-відстійника з мінімумом відходів, що залишилися після попередньої технологічної операції. Принцип роботи пристрою показаний на рис. 7.6. Він полягає у використанні ефекту "гідралічної крупності", відповідно до якого різні частки, у тому числі абразивні зерна і дрібні відходи процесу обробки, осідають на дно бака-відстійника з різною швидкістю. Причому більш крупні зерна

осідають у першу чергу, а відходи виявляються на поверхні осілого абразиву. Цей абразив зачерпується із дна за допомогою системи важелів і використовується для обробки наступної партії деталей. Таким чином, розроблена технологія й устаткування одержали додаткову до попередніх рішень позитивну якість – можливість багаторазового використання зернистого абразиву, очищеного від відходів попередньої операції.

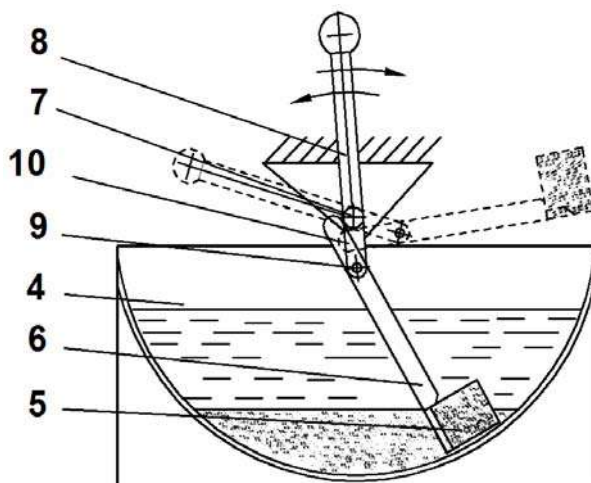


Рис. 7.6. Бак-відстійник із пристроєм відбору дози абразивного зерна

Установка, показана на рис. 7.7, створена в розвиток технічного рішення [28]. У цій установці збережені позитивні властивості установок, описаних раніше, які характеризуються підвищеною продуктивністю й розширеними технологічними можливостями методу абразивної обробки затопленими струменями порівняно з базовою установкою. В установці замість підвішеного соплового апарата, що обмежує обсяг деталей, які завантажуються, передбачені сопла, розміщені на периферії робочої камери. Завдяки цьому стала можливою обробка великої кількості більших деталей, перемішування яких здійснюється за допомогою перекочування усередині тороїдальної поверхні (в якості робочої камери використана автомобільна шина).

Особливістю установки з горизонтальною віссю обертання робочої камери є те, що більша частина повітряних сопел перебуває поза зоною їхнього затоплення, а отже, й поза зоною обробки. У зв'язку із цим у даному пристрої передбачена подача стисненого повітря до сопел у період часу, коли вони періодично занурюються в абразивну суспензію. Для цього в пристрої передбачений золотниковий механізм (див. рис. 7.7а),

що припиняє подачу стисненого повітря у верхні сопла. При цьому витрата стисненого повітря, який подається до затоплених сопел, відповідає рівню максимально допустимого – до $1 \text{ м}^3/\text{хв}$.

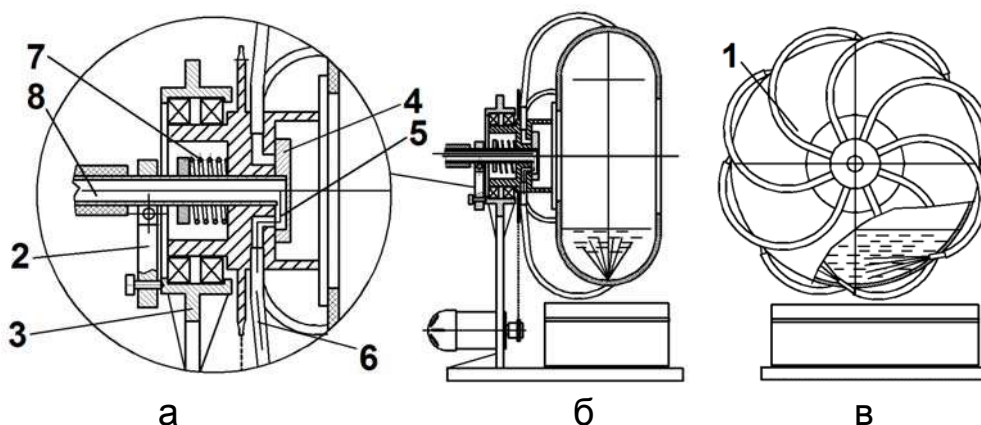


Рис. 7.7. Струминно-абразивна установка з горизонтальною віссю обертання робочої камери: а – золотниковий пристрій, що забезпечує подачу стисненого повітря до затоплених сопел; б – робоча камера в розрізі; в – вигляд ліворуч (стійку із золотниковим пристроєм умовно не показано)

За результатами випробувань і експлуатації установки виявлено збільшення продуктивності обробки порівняно не тільки з базовою, але й з установкою з підвішеним сопловим апаратом. При цьому відпала необхідність у регулюванні висоти соплового апарата над деталями (див. рис. 7.4) у зв'язку з обробкою меншої або більшої кількості деталей.

Слід особливо зупинитися на викидах суспензії, а також віднесенні рідкої складової суспензії за межі робочої камери. Ця особливість процесу обробки затопленими струменями характерна для всіх моделей установок абразивної обробки затопленими струменями. Відпрацьоване стиснене повітря необхідно випускати, а рідину зберегти. У зв'язку із цим запропоновано пристрій (рис. 7.8) для очищення стисненого повітря від складових абразивної суспензії.

Пристрій складається з встановленої на горловині робочої камери 1 кришки 2, на якій змонтовано кожух з вихідним отвором 3 (на периферії кожуха). До кожуха приєднано привід, який є пневматичною турбінкою або електродвигуном, на осі якого встановлено подвійний ротор з радіальними отворами й розточенням, який з'єднує зазначені радіальні отвори. Ротори відділені один від одного кришкою з ущільненням або з

мінімальним зазором між отвором кришки й шийкою ротора. Ротор з отворами, розташований усередині робочої камери, має діаметри радіальних отворів і радіус відносно осі обертання привода менший, ніж ротор, розташований за межами робочої камери. У процесі обертання малого ротора, важкі частки (наприклад, частки води, які перебувають у відпрацьованому стисненому повітрі у вигляді туману й великих крапель) розкидаються периферійною частиною малого ротора на стінки робочої камери й стікають донизу. А відпрацьоване стиснене повітря, яке має меншу питому вагу, відносно легко переборює відцентрову силу малого ротора й під дією могутнішого потоку великого ротора, через розточення у втулці між роторами, надходить у великий ротор і далі – за межі робочої камери в очищеному вигляді.

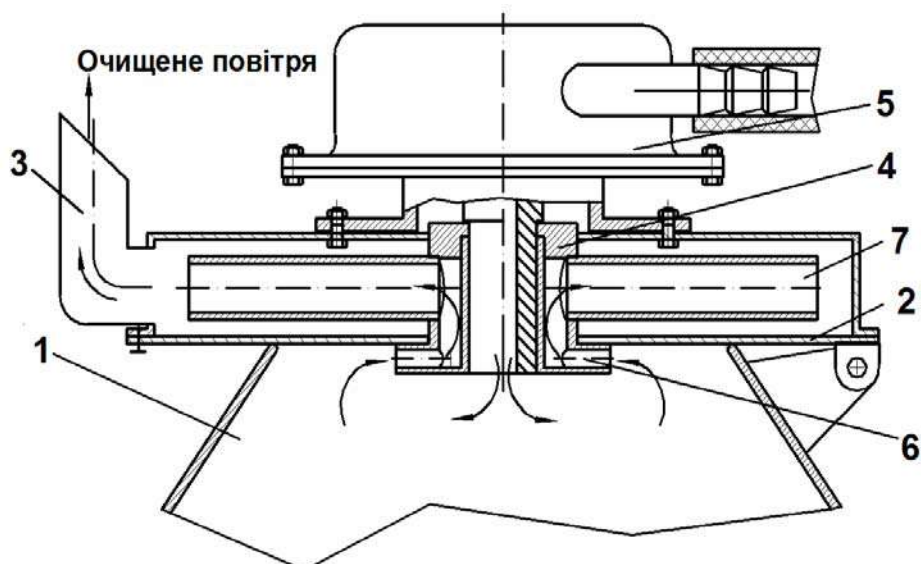


Рис. 7.8. Схема пристрою для відділення стисненого повітря від рідини в процесі абразивної обробки деталей затопленими струменями

Таким чином, у результаті застосування очисника відпрацьованого стисненого повітря отримано наступні результати. По-перше, підвищено стабільність процесу абразивної обробки затопленими струменями за рахунок виключення віднесення рідини у вигляді крапель і водяного туману з робочої камери. По-друге, отримано комфортний мікроклімат у зоні роботи оператора, який обслуговує установку. По-третє, підвищено ефективність роботи струменів стисненого повітря за рахунок зниження опору (розрядження) середовища, у яке вони подаються.

Наступне технічне рішення спрямоване на вдосконалювання допоміжного переходу – вивантаження вмісту робочої камери й відділення деталей від абразивної суспензії. Суть проблеми полягає в тому, що під час зливання вмісту робочої камери на решето, деталі й абразив екранують його перфороване дно, затримуючи зливання води й змивання абразивного порошку в бак-відстійник. При цьому практично половина абразивного порошку залишається на решеті разом із деталями. У результаті аналізу цього технологічного переходу знайдено просте рішення – розроблена схема вивантаження (рис. 7.9), відповідно до якої витрати часу на перехід мінімізовані.

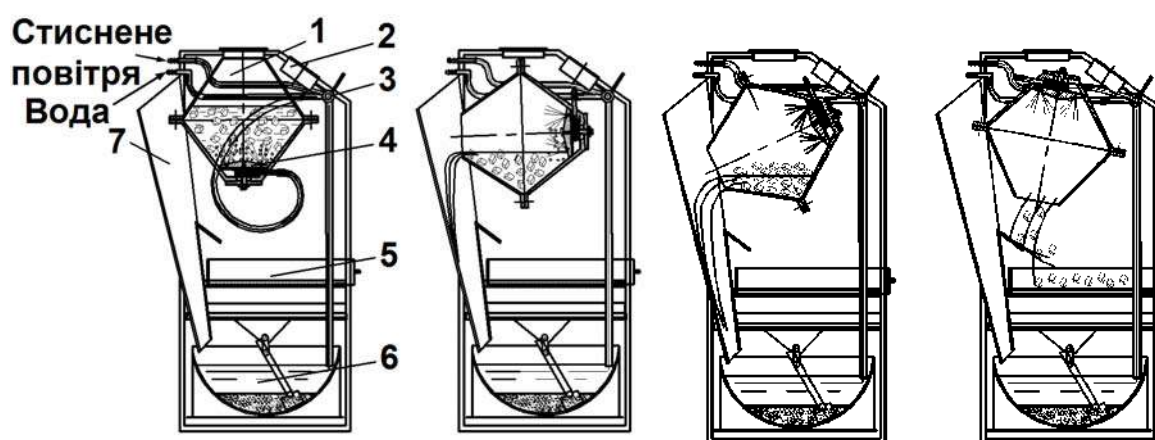


Рис. 7.9. Схема вивантаження вмісту робочої камери з відділенням деталей від суспензії

Згідно з даною схемою, у разі нахилу робочої камери на кут, близький до 90° , здійснюється вільне зливання суспензії по жолобу в бак-відстійник. Поворот на 180° забезпечує вивантаження деталей на решето. При цьому в робочу камеру подається вода для промивання, завдяки чому змиваються залишки абразиву з робочої камери й промиваються деталі на решеті. Завдяки використанню розглянутої схеми зменшено час допоміжного переходу, а отже, й час виконання операції в цілому. Крім того, підвищено естетику праці оператора. Якщо до використання згаданої схеми необхідно було відбирати деталі із залишків змоченого абразивного порошку й додатково промивати деталі, то тепер операторіві достатньо висунути решето 5 (див. рис. 7.9) і зсипати оброблені деталі в бункер для відправлення на наступну операцію.

Гама установок для абразивної обробки деталей затопленими струменями, об'єднаних загальною структурою виконання технологічної

операції, які відрізняються кількістю й діаметром сопел, показана на рис. 7.9 – 7.11.

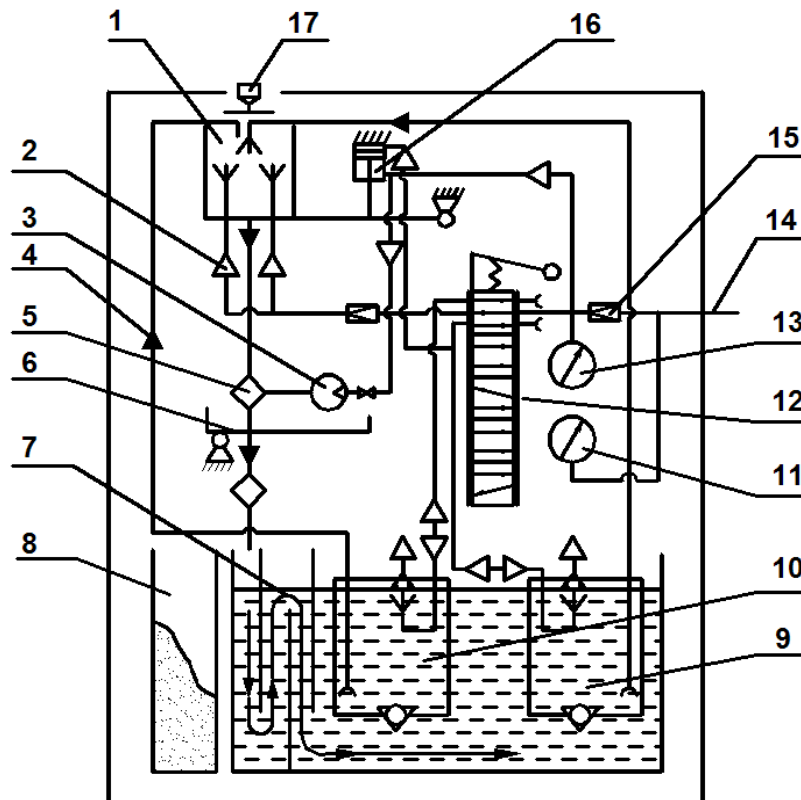


Рис. 7.10. Принципова схема струминно-абразивного напівавтомата моделі 2ГРМ

Умовні позначення: 1 – робоча камера; 2 – подача стисненого повітря; 3 – пневмовібратор сепаратора-транспортера деталей; 4 – подача робочої рідини; 5 – сепаратор-транспортер деталей; 6 – сепаратор абразиву; 7 – бак-відстійник; 8 – бункер для абразиву; 9 – бак для промивання; 10 – бак для дозування; 11 – манометр тиску в пневмережі; 12 – кран розподільний п'ятипозиційний; 13 – манометр для контролю тиску на всіх переходах; 14 – підведення стисненого повітря; 15 – стабілізатор тиску стисненого повітря; 16 – об'ємний пневмоциліндр; 17 – завантажувальне вікно [27].

Принципова схема п'ятипозиційного золотникового перемикача (рис. 7.10, поз. 12) з описом розподілу подачі стисненого повітря до виконавчих механізмів показана рис. 7.11, а порядок роботи – в табл. 7.1.

Максимальна швидкість стисненого повітря, яка забезпечує найбільшу швидкість руху абразивним зернам, досягалася у випадку використання надзвукового сопла Лавалю.

На рис. 7.12 видно, що вихідним параметром для проектування надзвукового сопла Лавалю є критичний (найменший) радіус каналу.

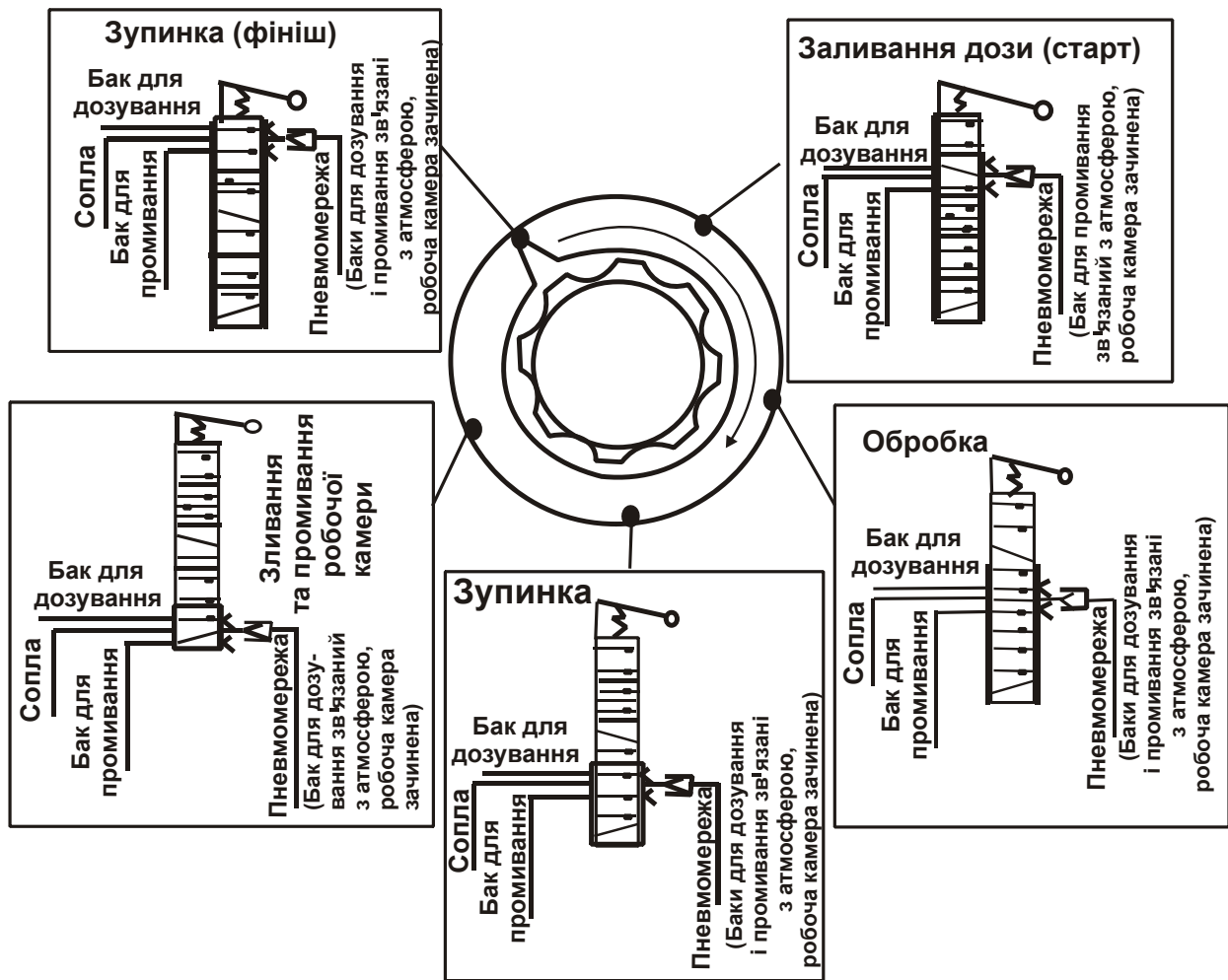


Рис. 7.11. Схема роботи п'ятипозиційного пневматичного перемикача подання стисненого повітря, який забезпечує послідовне виконання технологічної операції

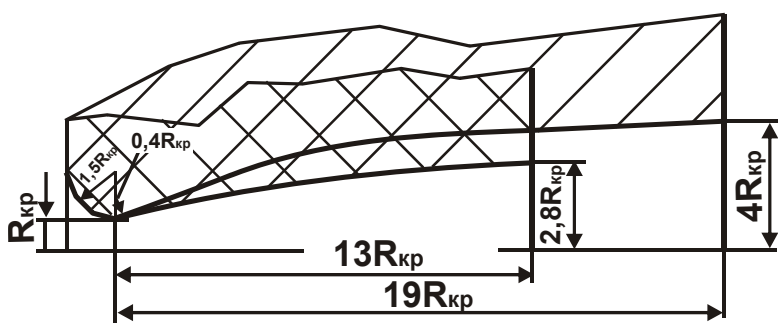


Рис. 7.12. Сопло Лаваля

У цьому найбільш вузькому місці каналу сопла потік повітря набирає звукової швидкості. Далі, завдяки розширенню каналу опір стінок сопла зменшується, потік прискорюється без збільшення витрати стисненого повітря.

При цьому в центрі повітряного надзвукового потоку не утворюється ядро струменя, яке виключає інжекцію зерен у струмінь, що є ще одним найважливішим фактором на користь вибору надзвукового сопла для абразивної обробки деталей затопленими струменями.

Порядок роботи п'ятипозиційного золотникового пневматичного перемикача подання стисненого повітря

№	Положення рукоятки перемикача	Зміст переходу	Примітка
1	"Заливання дози (старт) "	Заливається доза рідини з бака "Доза". Оператор завантажує абразивний матеріал (шліфзерно) і оброблювані деталі	Стиснене повітря подається в бак "Доза", у штокову порожнину пневмоциліндра, слабким напором у сопла. При цьому бак "Промивання" зв'язаний з атмосферою
2	"Обробка"	Здійснюється абразивна обробка деталей затопленими струменями	Стиснене повітря подається через сопла в робочу камеру у вигляді струменів, у штокову порожнину пневмоциліндра. Баки "Доза" і "Промивання" зв'язані з атмосферою
3	"Зупинка"	Проміжне положення	Стиснене повітря подається через сопла в робочу камеру слабким напором. Баки "Доза" і "Промивання" зв'язані з атмосферою
4	"Зливання і промивання робочої камери"	Вивантаження вмісту робочої камери й промивання робочої камери і деталей на решеті	Стиснене повітря подається в бак "Промивання" слабким напором у сопла. При цьому бак "Доза" зв'язаний з атмосферою
5	"Зупинка (фініш)"	Закінчення поточної операції, передстартове положення для наступної операції	Стиснене повітря подається в безштокову порожнину пневмоциліндра. Баки "Доза" і "Промивання" зв'язані з атмосферою

7.2. Експериментальне оцінювання ефективності використання розроблених установок для здійснення абразивної обробки деталей затопленими струменями

Дослідження проводилися на розробленій установці [27; 50], яка реалізує оптимальні конструктивні й технологічні параметри обробки, установлені на основі емпіричних залежностей для визначення продук-

тивності процесу (6.17) і шорсткості поверхні (6.25). На рис. 7.13 наведено гістограми зміни знімання металу M для різних проміжків часу τ за умови використання базової установки, на основі якої були отримані емпіричні залежності (6.17), (6.25), і розробленої установки.

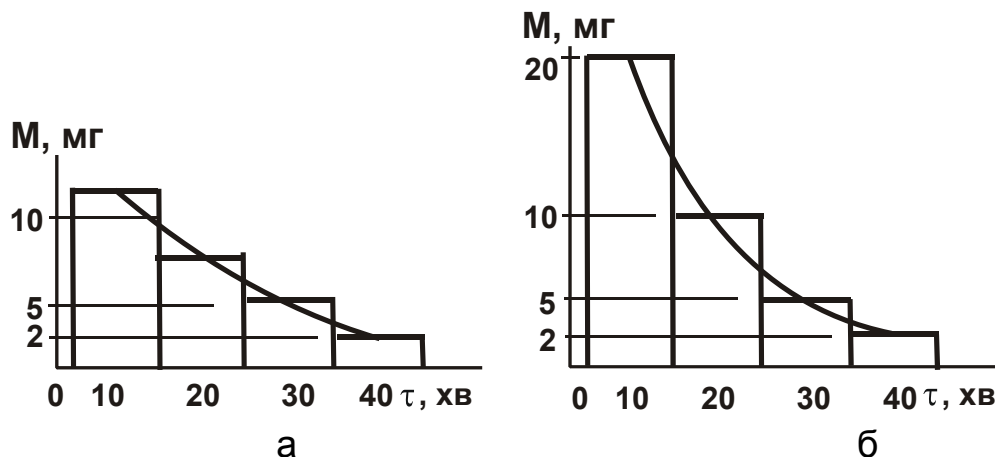


Рис. 7.13. Залежності знімання металу M для різних проміжків часу обробки τ за умови використання базової установки (а) і розробленої установки (б)

Умови обробки: шліфзерно 63С (карбід кремнію зелений); зернистість абразиву 63П (630 мкм); тиск стисненого повітря 0,5 МПа; кут нахилу осей сопел до горизонту 10° ; сопловий апарат базової установки оснащений циліндричними соплами діаметром 2 мм, а нової розробленої установки – соплами Лаваля із критичним перерізом 2 мм.

Як видно, із часом обробки τ знімання металу M безупинно зменшується. Це пов'язано зі зменшенням висоти мікронерівностей поверхні (вихідна шорсткість $R_{\max} = 6,3$ мкм) і відповідно зменшенням одиничних мікрорізів. Причому дана закономірність справджується для двох варіантів (базового варіанта й варіанта з поліпшеними параметрами) використовуваної установки.

На рис. 7.14 наведено графіки зміни висоти мікронерівностей обробленої поверхні R_{\max} у міру збільшення часу обробки τ для різних значень вихідної шорсткості. Як видно, параметр R_{\max} на початку обробки зазнає змін (зменшення або збільшення залежно від вихідної шорсткості поверхні), а потім стабілізується в часі, набуваючи значень $R_{\max} = 5,6 \dots 5,8$ мкм. Для зразків з більшою вихідною висотою мікронерівностей має місце зменшення висоти мікронерівностей з часом обробки, а із меншою вихідною висотою мікронерівностей має місце збільшення висоти мікронерівностей.

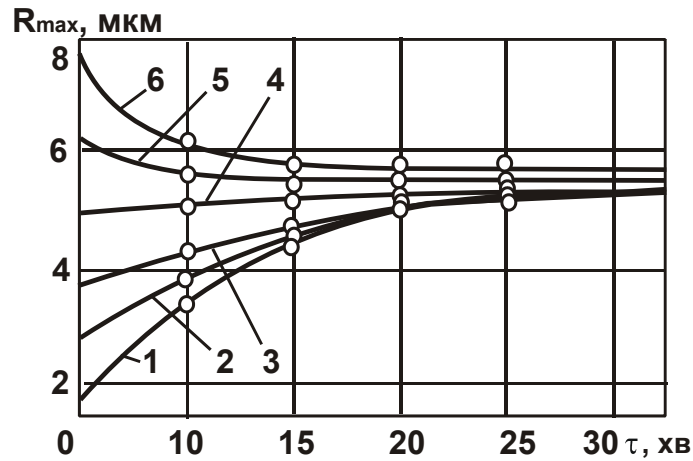


Рис. 7.14. Залежність висоти мікронерівностей поверхні R_{\max} від часу обробки τ

Умовні позначення: 1; 2; 3; 4; 5; 6 – вихідна шорсткість поверхні $R_{\max} = 1,6; 3,0; 3,6; 5,0; 6,4; 8$ мкм.

Умови обробки: шліфзерно 63С; зернистість абразиву 63П (630 мкм); кут нахилу осей сопел до горизонту 15° ; тиск стисненого повітря 0,5 МПа.

Для перевірки правомірності теоретичних висновків з метою виявлення закономірностей формування мікрорельєфу, отриманого в результаті абразивної обробки затопленими струменями, виконано експериментальні дослідження зі встановлення впливу зернистості абразиву на знімання металу й шорсткість поверхні (рис. 7.15).

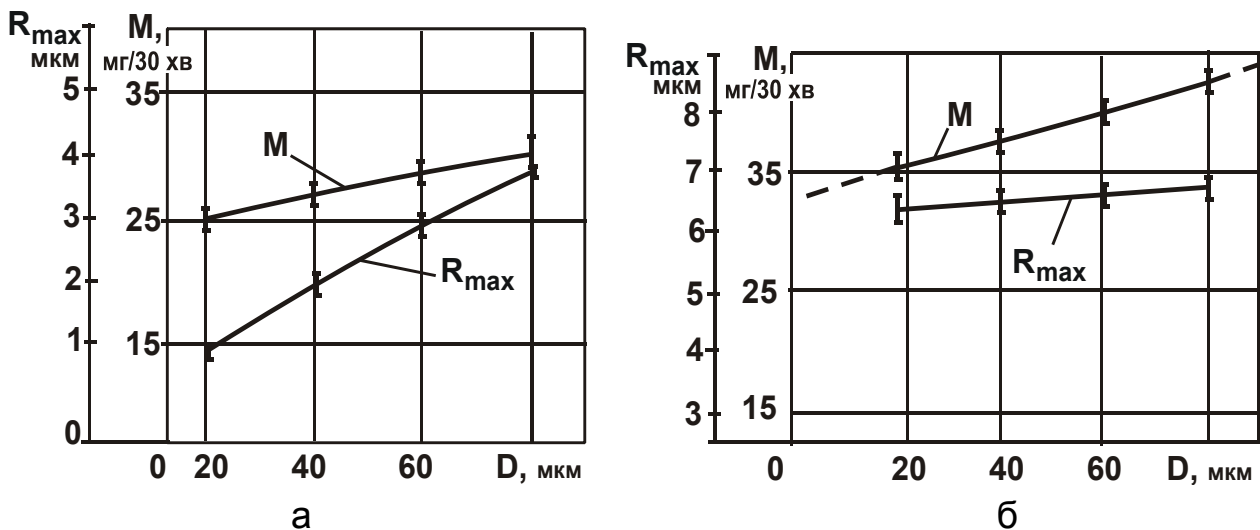


Рис. 7.15. Залежність шорсткості поверхні R_{\max} і знімання металу M від зернистості абразиву 63С (карбід кремнію зелений) за вихідної шорсткості $R_{\max} = 0,8$ мкм (глянсова поверхня) (а) і $R_{\max} = 6,3$ мкм (б)

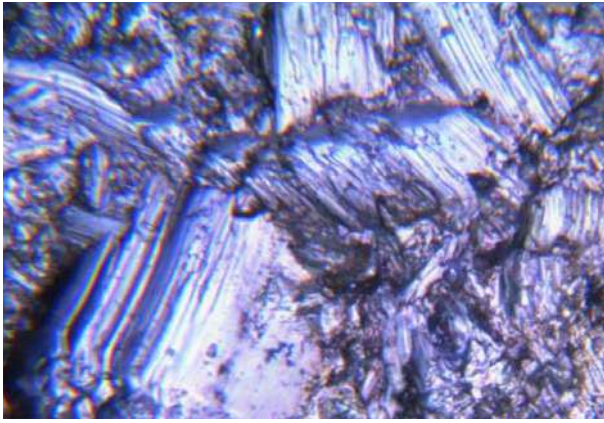


Рис. 7.16. Мікрорізи на поверхні зразка із латуні ЛС59.1

Умови обробки: сопловий апарат із соплами Лаваля.

Як видно з наведених рисунків, має місце незначний вплив зернистості абразиву на знімання металу й шорсткість поверхні. Разом з тим абсолютна величина знімання металу збільшилася в середньому на 24 %. Це обумовлено тим, що зі збільшенням зернистості абразиву збільшується кількість повних мікрорізів, які, як видно на фотографії (рис. 7.16), становлять неглибокі сліди, які покривають більшу частину площі оброблюваної поверхні.

Отримані результати експериментальних досліджень узгоджуються з теоретичними рішеннями, наведеними в розділі 3 роботи, що свідчить про вірогідність розробленої математичної моделі динаміки взаємодії абразивних зерен з оброблюваним матеріалом. Зокрема підтверджено висновок про результативність впровадження абразивного зерна під гострим кутом до оброблюваної поверхні деталі в процесі абразивної обробки затопленими струменями.

7.3. Промислові випробування розроблених установок і оцінювання якості оброблених поверхонь деталей

Розроблені й описані в п. 7.1 установки пройшли виробничі випробування під час абразивної обробки затопленими струменями типових дрібних деталей, які використовуються в сучасному машинобудуванні України (див. рис. 1.1). Випробування проводилися як в умовах діючих виробництв на підприємствах, так і в лабораторних умовах. У процесі випробувань установок оцінювалися продуктивність і основний час обробки, якість оброблених поверхонь деталей і ергономічні показники процесу обробки. У результаті проведених випробувань установлено, що продуктивність обробки дрібних деталей на розроблених установках порівняно з їх традиційною ручною немеханізованою обробкою може бути збільшена до 100 разів. Усе залежить від кількості оброблюваних деталей: з їх збільшенням продуктивність різко збільшується. Це дозволяє

виключити технологічні операції на підприємстві, пов'язані з ручною оздоблювальною (зачисною) обробкою даних деталей і зменшити кількість робітників на цих операціях. Наприклад, деталь "Сідло", яка призначена для гідронасоса, відповідно до діючого технологічного процесу, оброблюється точінням на токарно-револьверному верстаті 1П326 і далі передається на фрезерну операцію для фрезерування пазів. Потім здійснюється слюсарна ручна обробка із видалення задирок і округлення гострих кромки. Остаточною операцією є доведення поверхонь деталей "Сідло" до одержання шорсткості поверхні $R_a = 1,25$ мкм. Недоліком діючої технології виготовлення деталі є висока трудомісткість операцій слюсарної обробки й доведення поверхонь деталі. Таким же недоліком характеризується й обробка деталей "Контакт", "Клема" і "Ламель", яка здійснюється вручну після штампування. У цьому випадку слюсарна операція полягає у видаленні задирок і округленні гострих кромки на деталях по контуру. При цьому здійснюється обробка кожної деталі окремо з високою трудомісткістю.

Експериментально встановлено, що застосування оздоблювальної обробки деталей "Сідло", "Контакт", "Клема" і "Ламель" за методом абразивної обробки затопленими струменями замість слюсарної ручної обробки дозволяє скоротити час на усунення задирок і округлення гострих кромки деталей. При цьому спостерігається поліпшення шорсткості на оброблюваних поверхнях, що приводить до зниження трудомісткості остаточної операції доведення деталей, яка виконується вручну. У цілому трудомісткість виготовлення деталей "Сідло", "Контакт", "Клема" і "Ламель" зменшується у 2 рази.

До впроваджуваних струминно-абразивних установок розроблені паспорт та інструкція для експлуатації. У паспорті вказано технічну характеристику. Інструкція для експлуатації струминно-абразивної установки призначена для ознайомлення обслуговчого персоналу із пристроєм установки, принципом дії окремих вузлів і механізмів для забезпечення правильної експлуатації, профілактичного огляду установки з метою безаварійного й ефективного використання у виробничих умовах у процесі виконання операцій із видалення задирок, округлення гострих кромки, надання товарного вигляду дрібним деталям.

На рис. 7.17 наведено фотографії найбільш типових дрібних деталей до й після абразивної обробки затопленими струменями.



а



б

1. Фрагмент диска дверного замка з латуні Л63

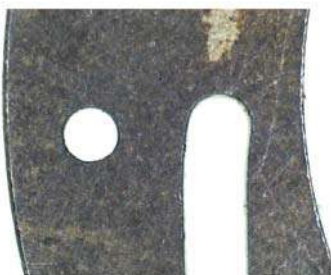


а

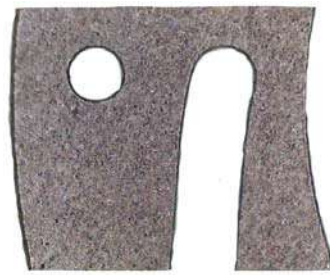


б

2. Фрагмент контактної пластини з латуні ЛС59.1



а



б

3. Фрагмент коронки затвора з латуні ЛС59.1



а



б

4. Серга з латуні Л63

Рис. 7.17. Фрагменти поверхонь деталей:

а – у стані постачання (до обробки); б – оброблених затопленими струменями протягом 20 хв у момент завантаження в робочу камеру "навалом" (позиції з 1 по 9 – листове штампування, позиція 10 – після токарної обробки)



а



б

5. Фрагмент обкладки конденсатора змінної ємності з латуні Л63



а



б

6. Засувка з латуні Л63

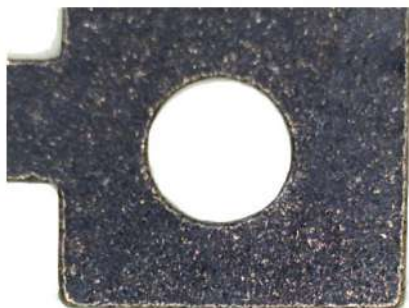


а



б

7. Фрагмент ламелі з латуні Л63



а



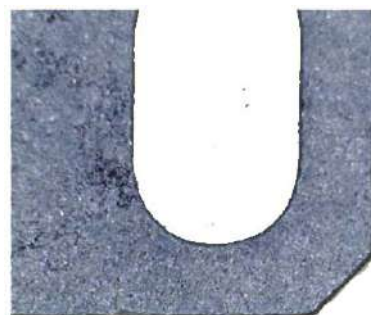
б

8. Перемичка з латуні Л63

Продовження рис. 7.17



а



б

9. Проставка з алюмінію



а



б

10. Коронка із дуралюміну Д16

Закінчення рис. 7.17.

Практично всі деталі до обробки мають гострі кромки й задирки, а також сліди корозії. Після обробки (фотографії праворуч) задирки вилучені, кромки деталі округлені, відсутні неоднорідності на оброблюваних поверхнях. Чиста матова поверхня надає деталям товарного вигляду.

У результаті дослідження стану поверхневого шару встановлено, що латунні зразки характеризуються наявністю наклепаного шару з позитивними (стискальними) напругами. Завдяки цій характеристиці, на додаток до поліпшеного зовнішнього вигляду, деталі одержали зміцнення і, як наслідок, ущільнений поверхневий шар, що сприяє більш високій корозійній стійкості матеріалу деталі. Деталі, показані на рис. 7.17 (позиції 1 – 9), отримані штампуванням з листового матеріалу із плоскими поверхнями після прокатки й призначені для різних областей використання. Наприклад, деталь 1 належить до точної механіки, деталі 2, 7, 8 належать до електротехніки, деталі 3 і 10 – до оптико-механічного виробництва, деталі 4 і 5 – до радіотехніки, деталі 9 і 6 – до приладобудування. Як видно, на всіх деталях вилучені задирки, поверхні очищені від

корозії, мають рівномірно очищену матову поверхню, тобто набули товарного вигляду. На рис. 7.18 показана структурна схема областей ефективного застосування розробленого методу абразивної обробки деталей затопленими струменями.

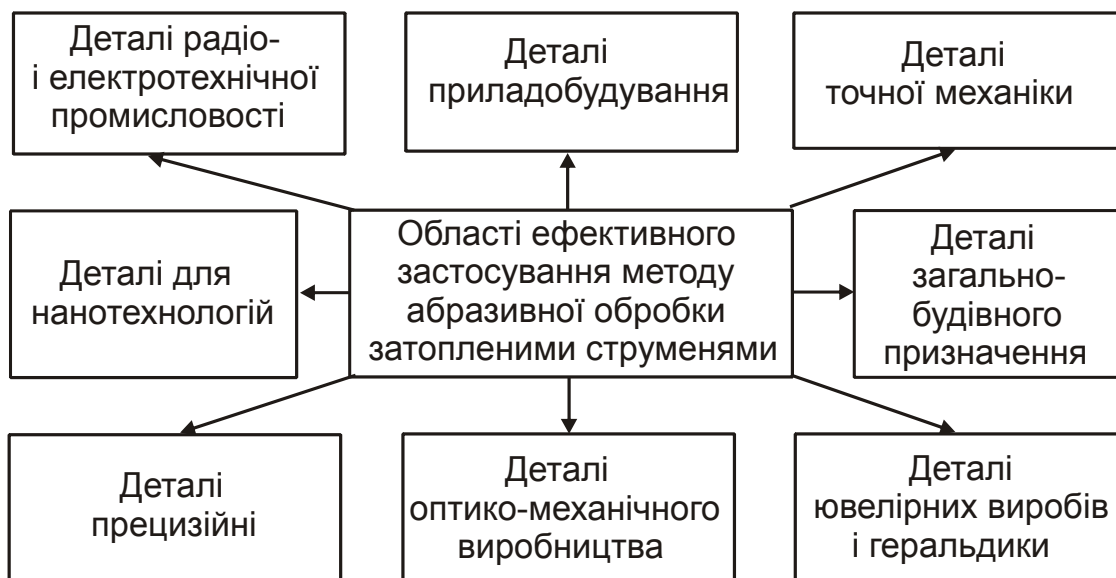


Рис. 7.18. Области ефективного застосування методу абразивної обробки затопленими струменями

Наступними операціями, відповідно до технічних вимог (технологічного процесу), можуть бути гальванічне або лакофарбове покриття. Завдяки рівномірному впливу абразивних зерен на всі поверхні деталі під час обробки виключаються похибки початкової геометричної форми, що дозволило скасувати трудомістку ручну операцію "Терморихтування". Операція полягала в затисканні кожної плоскої деталі між шайбами оправлення (рис. 7.19), які в зборі піддавалися термічній обробці в печі.

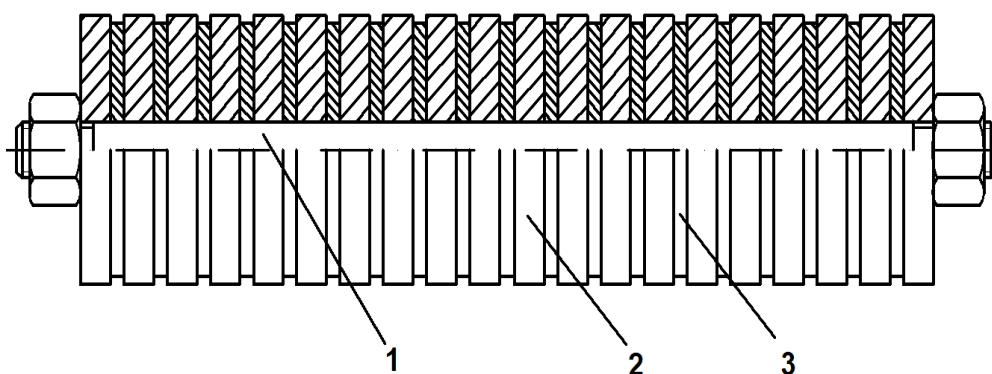


Рис. 7.19. Оправлення в зборі з деталями для терморихтування

Умовні позначення: 1 – шпилька; 2 – жорсткі шайби; 3 – деталі для терморихтування.

Після термічної обробки деталі прохолоджували, знімали з оправлення і вручну очищували зовнішні кромки від окислів, які утворилися в результаті термічної дії на незахищені поверхні деталей.

7.4. Перспективні розробки зі створення установок для абразивної обробки затопленими струменями

У процесі дослідження методу абразивної обробки затопленими струменями виявлена можливість збільшення як одиничної, так і сумарної маси оброблюваних деталей і відповідно продуктивності обробки за рахунок накладення вібрацій на робочу камеру, у якій здійснюється процес обробки. На основі цих досліджень була створена установка [25] (рис. 7.20) з одночасним видаленням задирок затопленими струменями, які пульсують із частотою, що дорівнює частоті власних коливань робочої камери. У результаті обробки на деталях утворюється матова поверхня, завдяки чому вони набувають товарного вигляду.

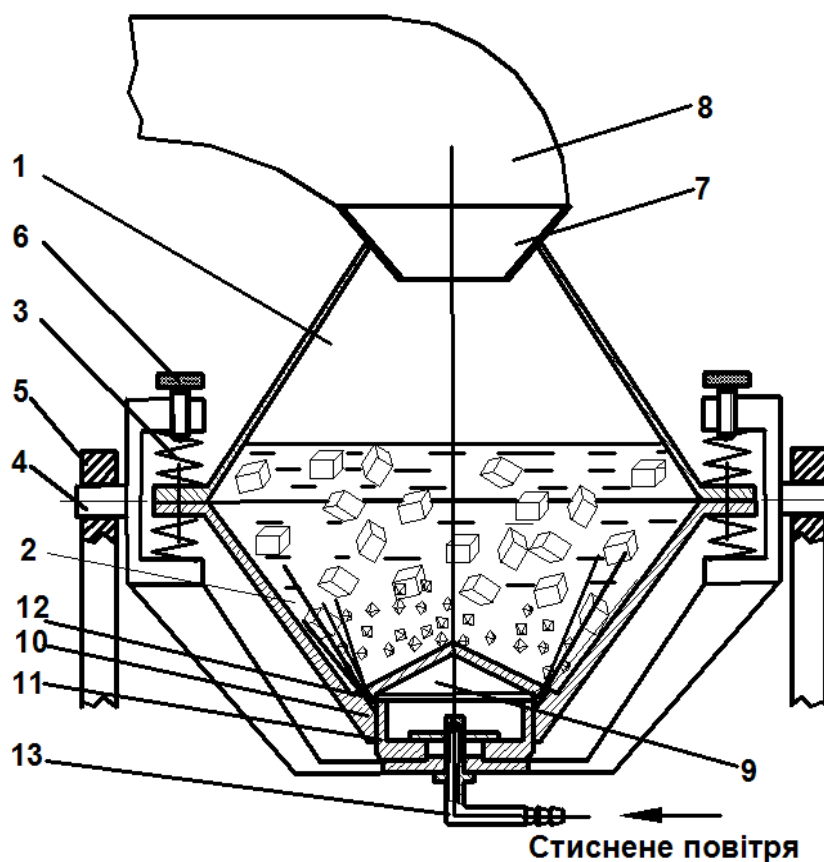


Рис. 7.20. Установка для абразивної обробки дрібних деталей затопленими струменями

Установка складається з робочої камери, складеної з двох зрізаних конусів 1 і 2, з'єднаних між собою великими основами. Кромки основ розміщені в цапфах і затиснуті пружинами 3, жорсткість яких регулюється гвинтами 6. У верхній частині робочої камери встановлено захисний конус 7 з рукавом 8 для відведення. Дно робочої камери закрито конусом 9 з юбкою 10 та з сопловими отворами 12. Нерухома частина робочої камери 11 виконана у вигляді поршня, який перекриває соплові отвори 12.

У процесі обробки на деталі діють три основні фактори, які забезпечують інтенсивне переміщення й знімання металу: вібраційна дія гідроабразивного середовища; струминна обробка затопленим пульсаційним струменем; кавітаційна дія, яка виникає в разі різких змін швидкості потоку, пов'язаних із пульсацією струменів стисненого повітря. Вплив пульсацій струменів на продуктивність процесу обумовлений наступним. Експериментально встановлено, що чим більше абразивних зерен приєднається до струменя стисненого повітря, тим більшою буде продуктивність обробки. Отже, пульсація струменів створює умови (паузи), необхідні для заповнення абразивними зернами об'єму перед соплом. Це забезпечує прискорення абразивним зернам з кожним наступним імпульсом подачі стисненого повітря й відповідно збільшення кінетичної енергії зерен та продуктивності обробки. Установка для абразивної обробки затопленими струменями [25] набула подальшого вдосконалення. Нове технічне рішення [26] до наявних корисних властивостей, спрямованих на підвищення продуктивності пристрою, додало ще одну властивість – надлишковий пульсаційний тиск у робочій камері, завдяки чому посилюється гідродинамічна кавітація, корисність якої уже відзначалася. Крім того, піднято рівень експлуатаційної технологічності установки за рахунок того, що пневматичний вібропривід віддалено від абразивної суспензії. На рис. 7.21 наведено схему установки для абразивної обробки затопленими струменями із пневматичним вібратором на виході.

Установка складається з робочої камери 1, у нижній частині якої змонтований вивантажувальний люк 2 з повітряними соплами 3 для подання стисненого повітря в робочу камеру 1. Зверху робоча камера закривається кришкою 4, у якій змонтований корпус пневматичного вібратора 5 з отворами 6. У корпусі 5 розміщено східчастий поршень 7 зі сполученими каналами 8 і 9. Поршень і корпус утворюють кільцеву порожнину 10 і кругову порожнину 11.

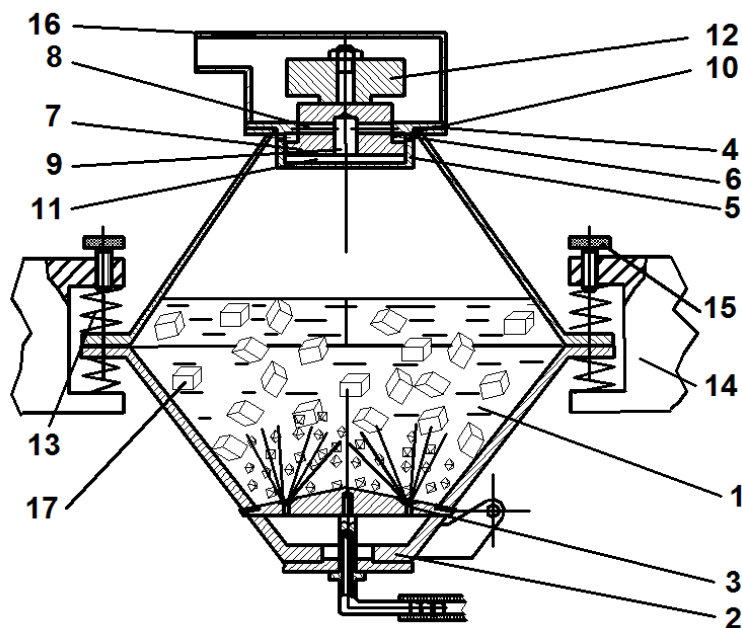


Рис. 7.21. Схема установки для абразивної обробки деталей затопленими струменями

Зовнішня частина поршня виготовлена з можливістю кріплення змінного вантажу 12 для регулювання амплітудно-частотної характеристики вібратора. Робоча камера 1 підвішена на пружних елементах 13 у нерухомих опорах 14 з гвинтами 15 для регулювання жорсткості пружних елементів. Зверху робоча камера 1 має кожух 16 для відведення відпрацьованого стисненого повітря. Таким чином, процес обробки деталей супроводжується вібрацією робочої камери, що сприяє обробці й перемішуванню деталей; дією струменів, які забезпечують всебічну обробку деталей; пульсацією струменів стисненого повітря, яка забезпечує багаторазову дію струменів на деталі; пульсуючим надлишковим тиском у робочій камері, що призводить до виникнення нового ефекту – гідродинамічної кавітації, яка руйнує задирки у важкодоступних місцях деталей. При цьому в установці виключається можливість влучення абразивних зерен і рідини на поверхні тертя пневматичного вібратора, чим досягається надійна робота установки. Крім того, звільнення нижньої частини робочої камери від пневматичного вібратора уможлиблює вивантаження вмісту через її нижню частину, наприклад, за допомогою люка 2. Зовнішній вигляд даної установки наведений на рис. 7.22 [26]. Рішення, спрямоване на вдосконалення технології абразивної обробки дрібних деталей затопленими струменями, привело до створення дослідно-промислового напівавтомата [27].

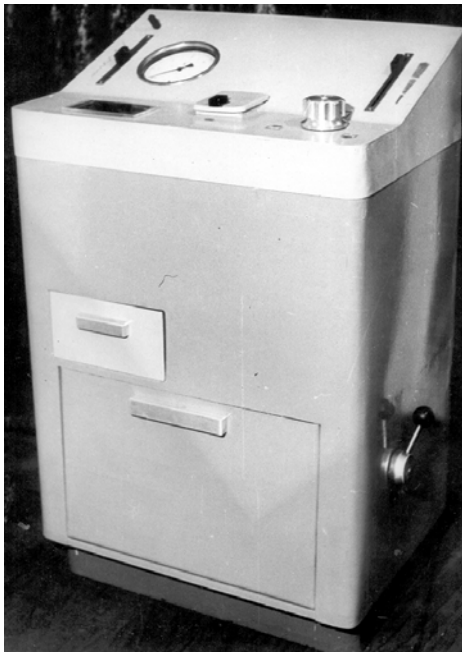


Рис. 7.22. Установка для абразивної обробки затопленими струменями із пневматичним вібратором

В установці для абразивної обробки затопленими струменями, описаній у роботі [26], позитивний ефект досягається за рахунок того, що на поверхні соплового апарата містяться трамплини, причому соплові отвори розташовані у вертикальних стінках цих трамплинів. Усередині соплового апарата розміщений лопасний пневматичний привід з екраном. Екран змонтований з можливістю почергового перекривання отворів.

На рис. 7.23а схематично зображено робочу камеру установки, яка складається з робочої камери 1, виконаної у вигляді двох з'єднаних чаш, у вертикальних виступах яких розташовані сопла 5, виконані за формою сопла Лаваля, осі яких приблизно паралельні поверхні трамплинів. Усередині ємності 3 розташований лопасний ротор 6, установлений на центральній осі 7 з можливістю обертання. На роторі жорстко закріплений екран 8, розташований під отворами 9, які зв'язані із соплами 5. На рівні розташування лопастей ротора в корпусі ємності 3 зроблено отвір 10 для подачі стисненого повітря. Під камерою 1 розташоване розділове сито 11 і бак-відстійник 12. Патрубок 13 слугує для відведення відпрацьованого стисненого повітря. Установка працює таким чином. Через кришку 2 у робочу камеру завантажуються "навалом" деталі, абразивний матеріал і рідина. Стиснене повітря подається через отвори 10 на лопасті ротора 6, приводячи його в обертання, і виривається через сопла 5 з надзвуковою швидкістю у вигляді струменів, які перериваються послідовно екраном 8 і спрямовані у робочу камеру 1. Струмені інжектують абразивний матеріал, який бомбардує деталі, одночасно переміщуючи їх за складною замкнутою траєкторією, що становить тороїдальну фігуру. При цьому важливим фактором є швидкість абразивних зерен відносно оброблюваних деталей.

Оскільки резерви збільшення швидкості абразивних зерен вичерпані, необхідно знижувати швидкість оброблюваних деталей за рахунок

регулювання їхньої кількості або баласту. Конструкція кришки 4 забезпечує повну витрату енергії струменів на обробку деталей. У результаті перекривання соплових отворів цілісність струменів, які несуть абразивні зерна, порушується, і вони досягають бічних стінок камери 1 у вигляді слабких квазіламінарних потоків, не спричиняючих їх руйнування. Відпрацьоване стиснене повітря виходить через патрубок 13. Після закінчення циклу обробки ємність 3 із кришкою 4 опускається, і вміст робочої камери 1 потрапляє на жолоб, розділове сито 11 і в бак-відстійник 12.

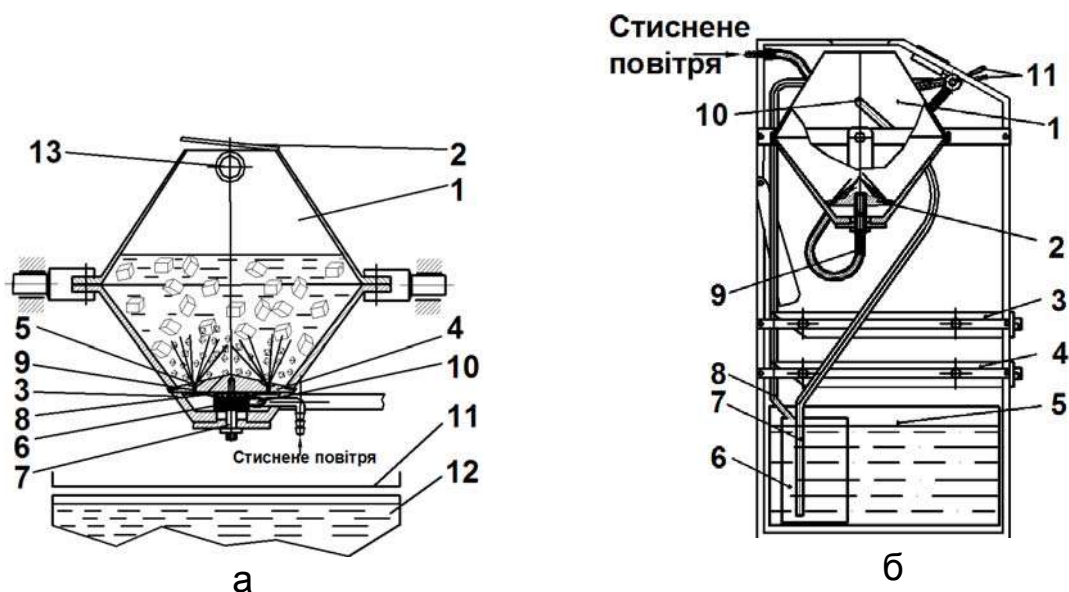


Рис. 7.23. Схема робочої камери (а) та установки (б) моделі 2ГРМ

На рис. 7.23б показано принципову схему експериментальної установки для абразивної обробки дрібних деталей затопленими струменями стисненого повітря [27]. Вона складається з робочої камери 1, манометра 2, вентиля подачі стисненого повітря 3, соплового апарату 4, решета для відділення деталей від абразивної суспензії 5, бака для суспензії 6 і жолоба для зливання суспензії з робочої камери 7.

На базі технічного рішення [27] виготовлено дослідну установку (рис. 7.24), яка за технічними показниками є напівавтоматом. Нижче наведено науково обґрунтовані конструктивні й технологічні параметри до проектування й експлуатації цього напівавтомата. Відповідно до математичних моделей продуктивності обробки й шорсткості поверхні слід прийняти наступні конструктивні параметри. Діаметр сопел – в діапазоні від 2,0 до 2,5 мм (коли діаметр сопла 2 мм – кількість сопел 8, а коли діаметр 2,5 мм – кількість сопел 5, проміжні значення наведені на рис. 7.25).

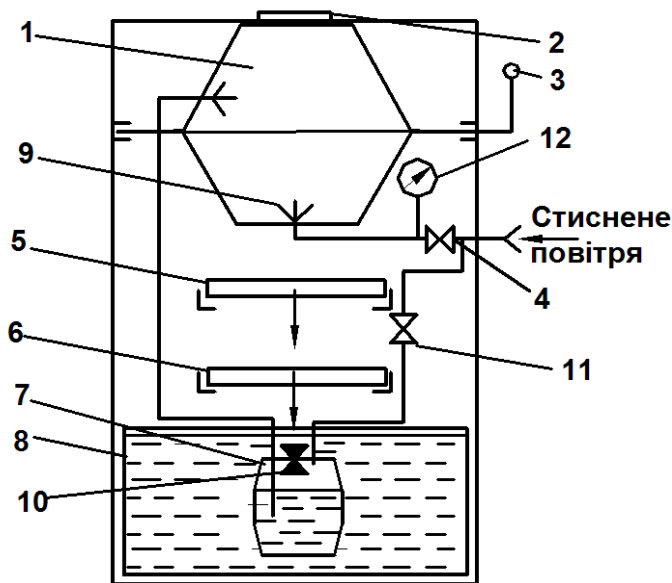


Рис. 7.24. Принципова схема гідро-ротаційна установки

Напрямок осей сопел у горизонтальній площині повинен відповідати напрямку сторін багатокутника, у вершинах якого розміщені сопла. Довжина сторони багатокутника дорівнює 50 мм (ефективна довжина струменя). У вертикальній площині напрямок осей сопел повинен дорівнювати 25° до горизонту, а діаметр кола розміщення сопел – відповідати колу, описаному навколо багатокутника, утвореного соплами. Необхідно прийняти наступні

параметри: об'єм шліфзерна – 180 мл; зернистість абразиву – від F90 (~ 0,2 мм) до F36 (~ 0,8 мм); сумарна маса одночасно оброблюваних деталей – 0,4 кг; об'єм рідини – 3 л.

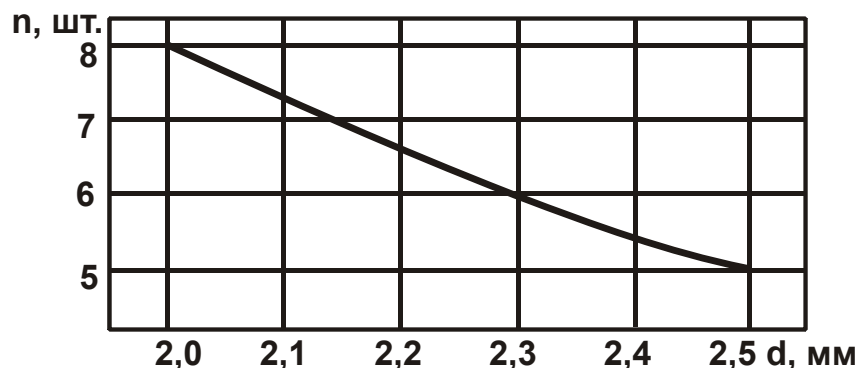


Рис. 7.25. Залежність кількості n сопел соплового апарата від їх діаметра d

На рис. 7.26 зображено гістограму, яка показує внесок різних факторів у підвищення продуктивності обробки порівняно з базовою установкою, продуктивність якої прийнята за 100 %. Практично, всі фактори (технічні рішення) захищені авторськими свідоцтвами й патентами. Процентне співвідношення в гістограмі встановлено відповідно до збільшення знімання металу з кожним новим технічним рішенням. Так, з гістограми видно, що завдяки створенню додаткового джерела перемішування

оброблюваних деталей продуктивність обробки підвищилася на 10 %. Позитивний ефект досягнутий за рахунок збільшення кількості одночасно оброблюваних деталей.

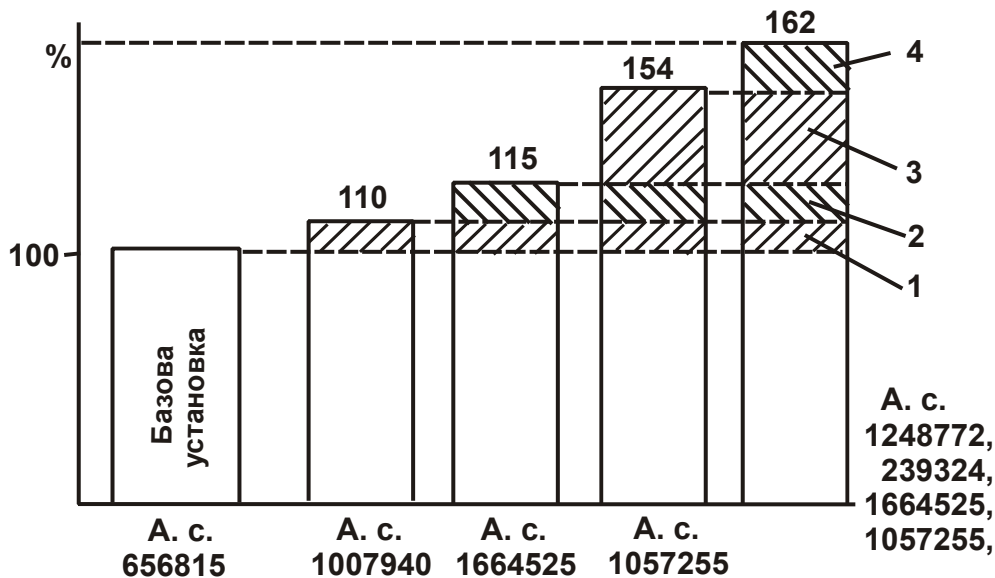


Рис. 7.26. Гістограма зміни продуктивності обробки в міру використання авторських свідоцтв і патенту

Умовні позначення: 1 – збільшення об'єму завантаження деталей для одночасної обробки; 2 – оптимізація конструктивних параметрів установок; 3 – використання надзвукового сопла Лавалю; 4 – скорочення допоміжного часу.

Завдяки поліпшенню якості абразивного матеріалу за рахунок очищення від відходів, а також використання чистої води, збільшено продуктивність обробки в середньому на 5 %.

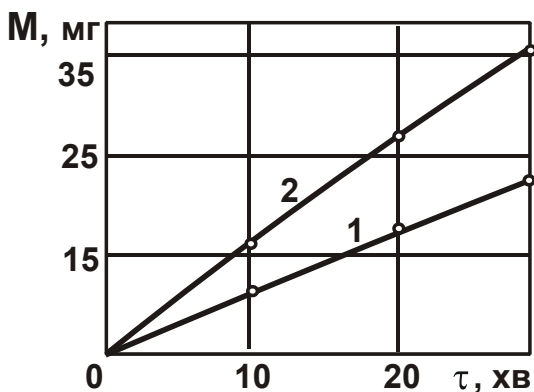


Рис. 7.27. Залежність M від τ
Умовні позначення: 1 – обробка на базовій установці із циліндричними соплами; 2 – обробка на установці, оснащій надзвуковими соплами Лавалю [27; 24].

На рис. 7.27 наведено залежність металознімання M від часу обробки τ . Значний приріст продуктивності обробки (знімання металу, порівняно з базовою установкою, зросло на 39 %) отриманий у результаті заміни сопел із циліндричним каналом на профільовані надзвукові сопла Лавалю. Як було показано в розділі 6 роботи, у цьому випадку досягається подвійний ефект від обробки – збільшення швидкості потоку, а отже, збільшення запасу кі-

нетичної енергії абразивного зерна, а також збільшення кількості абразивних зерен, які інжектуються в затоплений струмінь стисненого повітря. Слід зазначити, що застосування сопла Лаваля стало можливим завдяки застосуванню принципово нової схеми струминно-абразивної обробки, яка виключає зношування каналів сопел потоком абразивних зерен. Це привело до підвищення продуктивності обробки на 62 %. Сукупний позитивний ефект отриманий в установках, які поєднують технічні рішення [23; 27; 28; 50].

7.5. Практичні рекомендації щодо ефективного використання абразивної обробки деталей затопленими струменями

Установлено, що розроблені технології й устаткування абразивної обробки затопленими струменями найбільш ефективно можуть застосовуватися в разі необхідності оздоблювальної й зачисної обробки деталей малої жорсткості, невеликих габаритних розмірів і складної конфігурації в умовах серійного й масового виробництва. Обробка партії деталей у таких умовах, у перерахуванні на одну деталь, характеризується невеликою трудомісткістю – 0,001 ... 0,002 год. Це є підтвердженням того, що розроблено високопродуктивну технологію обробки.

Крім того, обробка малих партій деталей замість трудомістких ручних операцій виправдана вже тим, що поряд із видаленням задирок і округленням гострих кромek деталей набувають товарного вигляду. Для здійснення обробки невеликої кількості деталей, аж до однієї, не потрібне переналагодження установки. Обробка малої кількості деталей може здійснюватися з додаванням баластових деталей з одиничною масою й габаритними розмірами, що не більші від одиничної маси, і габаритних розмірів оброблюваних деталей, але не менше 70 – 80 % від їхньої маси й габаритних розмірів. Таким чином, застосування абразивних установок для оздоблювальної обробки деталей затопленими струменями можна рекомендувати для всіх типів виробництва – від одиничного до масового.

Розроблену технологію одержання декоративної поверхні слід визнати перспективною, оскільки за останні десятиліття відзначається помітний перехід від полірованих поверхонь із блискучими покриттями, наприклад хромуванням і / або нікелюванням, до матових поверхонь із

такими ж покриттями. Така перевага пояснюється тим, що трудомісткість одержання рівномірної матової поверхні значно (у десятки разів) нижча від трудомісткості одержання блискучої поверхні. Крім того, матова поверхня приховує відхилення від правильної геометричної форми елементів деталей, а процес матування виправляє дрібні поверхневі дефекти зачеканюванням. Поліровані поверхні в результаті утворення відблисків підкреслюють відхилення від правильної геометричної форми й виявляють дрібні поверхневі дефекти. Тому виведення локальних дефектів є причиною великої трудомісткості одержання полірованих поверхонь.

Для всіх оброблюваних деталей, незважаючи на їхню розмаїтість, може бути використаний однаковий режим обробки: тиск стисненого повітря до 0,5 МПа; абразивний матеріал – шліфзерно 63С, зернистість – № 40 ... 63 (400 ... 630 мкм), об'єм абразивного матеріалу – 0,18 л; суспензія – 0,3-відсотковий водяний розчин кальцинованої соди об'ємом 3 л; оброблювані деталі – 0,4 кг на одне завантаження або менша кількість деталей з довантаженням баластовими деталями до сумарної маси, що дорівнює 0,4 кг. За відсутності баластових деталей продуктивність обробки знижується, якість обробки зберігається.

Промислові випробування розроблених установок показали, що за рахунок збереження каналів сопел забезпечується їх надійна й безперебійна робота. 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 цеху оператор може одночасно обслуговувати три таких установки з послідовним запуском їх у роботу. У робочій зоні оператора установки завдяки застосуванню очисника відпрацьованого стисненого повітря, що встановлюється на виході з робочої камери, забезпечується сприятливий мікроклімат.

Встановлено, що порівняно із традиційною ручною обробкою дрібних деталей застосування розроблених технологій абразивної обробки затопленими струменями дозволяє в окремих випадках зменшити трудомісткість до 66 разів. Ефективною областю застосування даних технологій є обробка дрібних деталей радіо- й електротехнічної промисловості, приладобудування, точної механіки, оптико-механічного виробництва, прецизійних деталей, використовуваних для нанотехнологій, машинобудівного призначення й деталей ювелірних виробів і геральдики.

Висновки до розділу 7

1. На основі проведених теоретичних і експериментальних досліджень розроблене ефективне устаткування, представлене гамою установок (захищених авторськими свідоцтвами й патентами), для абразивної оздоблювальної обробки дрібних деталей затопленими струменями, що дозволяє ліквідувати трудомісткі ручні зачисні операції, підвищити продуктивність і якість обробки за рахунок поліпшення товарного вигляду оброблених деталей у процесі одночасної обробки великої кількості деталей із завантаженням у робочу камеру "навалом".

2. Розроблені установки забезпечують високоефективну спрямовану обробку торцевих поверхонь, плоских поверхонь і одночасно торцевих і плоских поверхонь деталей відповідно до отриманих у роботі теоретичних рішень, а також забезпечують поліпшення ергономічних показників обробки за рахунок її автоматизації й механізації. Підвищення продуктивності та якості обробки досягається головним чином за рахунок застосування надзвукових профільованих сопел Лаваля, розрахованих за запропонованими в роботі методиками.

3. Визначено оптимальні конструктивні й технологічні параметри установок, які дозволяють обґрунтовано вибирати кількість і геометричні розміри конструктивних елементів, а також установлювати раціональні режими обробки, що забезпечують максимально можливу продуктивність за заданою шорсткістю обробки. Уперше визначено оптимальну конструкцію дна робочої камери (завихрювача), конфігурацію, кількість і діаметр сопел, їхню орієнтацію в порожнині робочої камери, а також конфігурацію корпусу робочої камери, що стало основою для розробки установки-напівавтомата для абразивної обробки деталей затопленими струменями стисненого повітря.

4. Проведені дослідження на установці-напівавтоматі показали можливість збільшення продуктивності обробки у випадку забезпечення необхідної якості оброблених поверхонь порівняно з використовуваними базовими установками. Установлено, що в процесі обробки забезпечується округлення кромek деталей, усуваються задирки, сліди корозії й різні неоднорідності на оброблюваних поверхнях, утворюється однорідна матова поверхня із шорсткістю в межах $R_a = 0,8 \dots 1,25$ мкм зі зміцнювальним наклепом (стискальними напруженнями глибиною 5 – 6 мкм).

Висновки

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 напрямі майже вичерпані. Перспективним напрямом 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 розроблено наукові основи ефективної абразивної обробки дрібних деталей затопленими струменями, які полягають у 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 в процесі абразивної обробки затопленими струменями, який базується на положеннях теорії різання матеріалів і вперше встановлених умовах переходу від процесу пластичного деформування матеріалу до процесу різання абразивними зернами. Це 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 та продуктивності абразивної обробки затопленими струменями з урахуванням різних форм мікрозрізів: з постійною товщи-

ною і зі збільшеною та зменшеною в часі товщиною зрізу. Доведено, що найменша енергоємність досягається в процесі мікрорізання зі зменшеною в часі товщиною зрізу. Зроблено висновок про те, що найбільш ефективною сферою 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 під час абразивної обробки 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 та продуктивність абразивної обробки затопленими струменями деталей, виготовлених із крихких матеріалів, можна, коли кут входження абразивного зерна в оброблюваний матеріал дорівнює або близький до 90° , а під час обробки деталей, виготовлених із пластичних матеріалів – коли кут входження дорівнює $10 - 30^\circ$. Це узгоджується з відомими експериментальними даними, отриманими в процесі дослідження 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. Це 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 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 поверхонь зі 1 600 кратним збільшенням 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 під час використання різних за конструктивним виконанням сопел. Установлено, що найбільша швидкість руху абразивних зерен і відповідно продуктивність обробки досягається у випадку використання сопла Лаваля, яке забезпечує надзвукову швидкість витікання стисненого повітря. Показано, що найбільш щільне розташування слідів абразивних зерен, які характеризують шорсткість поверхні, забезпечується також у процесі використання надзвукового сопла Лаваля. Установлено, що застосування сопла Лаваля стало можливим лише завдяки використанню принципово нової схеми струминно-абразивної обробки – абразивної обробки деталей затопленими струменями, що виключає зношування каналів сопел потоком абразивних зерен.

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 та розмірів конструктивних елементів установок у процесі їх проектування.

9. Експериментально встановлено, що досягти найбільшої продуктивності обробки для заданої шорсткості поверхні $R_{\max} = 6,8$ мкм можна через реалізацію таких умов обробки як: 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 нахилу осі сопла до горизонту – 25° ; кут між віссю сопла й дотичною до кола в точці її розміщення – $0 \dots 5^\circ$.

10. На основі проведених експериментів встановлено, що найбільша інтенсивність знімання матеріалу в процесі абразивної обробки 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 де-

талі виникають стискальні 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 (за Віккерсом) 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 і 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 в процесі обробки, його втрапи потребують періодичного поповнення. Це пов'язано з тим, що в процесі обробки, хоч і несуттєво (до 0,7 %), спостерігається дроблення абразивних зерен. Установлено, що в разі зміни тиску стисненого повітря до значення 0,57 МПа знімання металу пропорційно збільшується, а дроблення зерен дещо інтенсифікується. Після перевищення цього значення тиску стисненого повітря вміст робочої камери піднімається над зоною роботи струменів і процес обробки стає фактично нездійсненим. Отже, умовою стабільного перебігу процесу обробки є встановлення тиску стисненого повітря не вище 0,57 МПа.

13. Виконано експериментальне оцінювання стабільності основних параметрів процесу обробки. Установлено відсутність відхилень, пов'язаних зі зниженням знімання металу і 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 залежно 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 подання 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 зміцнювальним наклепом (стискальними напруженнями на глибину 5 – 6 мкм). Показано, що порівняно із традиційною ручною обробкою дрібних деталей застосування розроблених установок і технологій абразивної обробки затопленими струменями зменшує в окремих випадках трудомісткість до 66 разів.

16. Розроблено практичні рекомендації щодо ефективного застосування абразивної обробки деталей затопленими струменями. Вони полягають у тому, що розроблені технології й устаткування найбільш ефективно можуть застосовуватися в разі необхідності оздоблювальної й зачисної обробки деталей малої жорсткості, невеликих габаритних розмірів і складної конфігурації в умовах серійного й масового виробництва. Обробка партії деталей у таких умовах у перерахуванні на одну деталь, характеризується малою трудомісткістю 0,001 ... 0,002 год. Для здійснення обробки невеликої кількості деталей не потрібно переналагоджувати установку. Обробка малої кількості деталей може здійснюватися з додаванням баластових деталей з одиничною масою й габаритними розмірами не більше одиничної маси й габаритних розмірів оброблюваних деталей, але й не менше 70 – 80 % їхньої маси й габаритних розмірів.

Використана література

1. Абрамович Г. Н. Прикладная газовая динамика / Г. Н. Абрамович. – М. : Наука, 1969. – 824 с.
2. Абрамов Ю. И. Газоабразивное изнашивание энергетического оборудования / Ю. И. Абрамов // Энергомашиностроение. – 1985. – № 7. – С. 15–19.
3. Абрамов Ю. И. Фрикционное изнашивание материалов скользящими частицами пыли / Ю. И. Абрамов // Трение и износ. – 1995. – Т. 16, № 2. – С. 331–339.
4. Агранат Б. А. Исследование процесса формирования фронта кристаллизации в звуковом поле / Б. А. Агранат // Применение ультразвука в металлургических процессах. – М. : Металлургия, 1972. – Вып. 67. – С. 111.
5. Агранат Б. А. Ультразвуковая технология / Б. А. Агранат. – М. : Машиностроение, 1974. – 154 с.
6. Адлер Ю. П. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий / Ю. П. Адлер, Е. В. Маркова, Ю. В. Грановский. – М. : Наука, 1976. – 279 с.
7. Андилахай А. А. Абразивная обработка деталей затопленными струями / А. А. Андилахай. – Мариуполь : ПГТУ, 2006. – 190 с.
8. Андилахай А. А. Анализ струйно-абразивных методов обработки поверхностей / А. А. Андилахай // Вісник НТУ "ХПІ" : зб. наук. праць. Темат. вип.: Технології в машинобудуванні – Х. : НТУ "ХПІ", 2010. – № 53. – С. 4–10.
9. Андилахай А. А. Динамика процесса струйно-абразивной обработки / А. А. Андилахай // Захист металургійних машин від поломок : міжвуз. темат. зб. наук. праць. – Маріуполь : ПДТУ, 2009. – Вип. 11. – С. 251–255.
10. 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. праць. – Маріуполь : ПДТУ, 2003. – Вип. 13. – С. 159–162.
11. Андилахай А. А. Методы очистки металлических поверхностей от окалина, коррозии / А. А. Андилахай // Вісник Харківського національ-

ного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка. – Х. : ХНТУСГ, 2010. – Вип. 101. – С. 241–245.

12. Андилахай А. А. Методы, перспективы защиты каналов сопел струйно-абразивных установок от износа / А. А. Андилахай // Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка. – Х. : ХНТУСГ, 2011. – Вип. 118. – С. 37–44.

13. Андилахай А. А. Определение областей эффективного применения абразивной обработки затопленными струями / А. А. Андилахай // Захист металургійних машин від поломок : міжвуз. темат. зб. наук. праць. – Маріуполь : ПДТУ, 2012. – Вип. 14. – С. 217–223.

14. Андилахай А. А. Особенности определения технологической эффективности упрочняющей обработки деталей затопленными струями / А. А. Андилахай // Захист металургійних машин від поломок : міжвуз. темат. зб. наук. праць. – Маріуполь : ПДТУ, 2002. – Вип. 6. – С. 238–242.

15. Андилахай А. А. Оценка энергетического баланса абразивной обработки деталей затопленными струями / А. А. Андилахай // Качество, стандартизация, контроль : теория, практика : материалы 11-й Междунар. науч.-практ. конф. : тез. докл. – Киев – Ялта: АТМ Украины, 2011. – С. 9–12.

16. 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. праць. Серія : Технічні науки. – Маріуполь : ПДТУ, 2010. – Вип. 20. – С. 206–212.

17. 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 : міжвуз. темат. зб. наук. праць. – Маріуполь : ПДТУ, 2010. – Вип. 12. – С. 50–55.

18. Андилахай А. А. Технологические возможности абразивной обработки деталей затопленными струями / А. А. Андилахай // Вісник НТУ "ХПІ" : зб. наук. праць. Темат. вип.: Технології в машинобудуванні. – Х. : НТУ "ХПІ", 2010. – № 49. – С. 140–143.

19. Андилахай А. А. Условия повышения производительности абразивной обработки / А. А. Андилахай // Вісник НТУ "ХПІ": зб. наук. праць. Темат. вип.: Технології в машинобудуванні. – Х. : НТУ "ХПІ", 2012. – № 53. – С. 42–47.

20. Андилахай А. А. Энергетика процесса струйно-абразивной обработки затопленными струями / А. А. Андилахай // Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка. – Х. : ХНТУСГ, 2010. – Вип. 106. – С. 204–210.

21. Анділахай О. О. Математична модель визначення енергоємності абразивної обробки та умов її зменшення / О. О. Анділахай, І. В. Гершиков // Вісник НТУ "ХПІ": зб. наук. праць. Темат. вип.: Технології в машинобудуванні. – Х. : НТУ "ХПІ", 2012. – № 54. – С. 3–13.

22. А. с. 207768 СССР, МКИ В 24 В 31/08. Способ гидроабразивной обработки / В. К. Агафонов (СССР). – № 1064466/25-8 ; заявл. 28.03.66 ; опубл. 22.12.67, Бюл. № 1. – 5 с. : ил.

23. А. с. 239324 Československa Socialistická Republika (CSR), МКИ⁴ В 24 В 31/104. Dekončovací zařízení na brusne opracování součástí / А. Р. Sergiev, А. А. Andilachaj, А. М. Stesel, А. А. Šilov (SU). – № PV 6216-81/25-08 ; заявл. 18.08.81 ; опубл. 15.11.86, Бюл. № 4.– 7 с. : ил.

24. А. с. 38676 Болгария, МКИ⁴ В 24 В 31/04. Устройство за фина абразивна обработка детали / А. П. Сергиев, А. А. Андилахай, А. М. Стесель, А. А. Шилов (СССР) ; заявитель Жданов. металлург. ин-т. – № 53313 ; заявл. 17.08.81 ; опубл. 14.02.86, Бюл. № 2. – 6 с. : ил.

25. А. с. 656815 СССР, МКИ³ В 24 В 31/08. Установка для отделочной обработки деталей / А. П. Сергиев, Ю. А. Ларин, А. А. Андилахай (СССР). – № 2351976/08 ; заявл. 26.04.76 ; опубл. 15.04.79, Бюл. № 14. – 7 с. : ил.

26. А. с. 1007940 СССР МКИ³ В 24 В 31/08. Установка для отделочной обработки деталей / А. П. Сергиев, А. А. Андилахай, А. М. Стесель, А. А. Шилов (СССР) ; заявитель и патентообладатель Жданов. металлург. ин-т. – №3357456/25–08; заявл. 25.11.81 ; опубл. 30.03.83, Бюл. № 12. – 6 с. : ил.

27. А. с. 1057255 СССР МКИ³ В 24 В 31/08. Отделочная установка для абразивной обработки деталей / А. П. Сергиев, А. А. Андилахай, А. М. Стесель, А. А. Шилов (СССР) ; заявитель и патентообладатель Жданов. металлург. ин-т. – № 2845388/25–08 ; заявл. 30.11.79 ; опубл. 30.11.83, Бюл. № 44. – 7 с. : ил.

28. А. с. 1248772 СССР МКИ⁴ В 24 В 31/00. Устройство для поверхностной обработки деталей / А. А. Андилахай, А. П. Сергиев (СССР) ; заявитель и патентообладатель Ждановский металлург. ин-т. –

№ 3825140/25–08; заявл. 17.12.84 ; опубл. 07.08.84, Бюл. № 29. – 4 с. : ил.

29. А. с. 1364452 СССР, МКИ⁴ В 24 С 3/04. Устройство для струйно-абразивной обработки / Л. А. Эйзнер, М. А. Мозжухин (СССР) ; заявитель и патентообладатель Гомельский конструкторско-технологический и экспериментальный институт по техническому перевооружению и подготовке производства предприятий Всесоюзного производственного объединения "Союзкорммаш". – № 3969267/25–08 ; заявл. 11.09.85 ; опубл. 07.01.88, Бюл. № 1. – 5 с. : ил.

30. А. с. 1388268 СССР, МКИ⁴ В 24 С 7/00. Установка для струйно-абразивной обработки / Я. С. Матушенко, П. Н. Мирчевский (СССР) ; заявитель и патентообладатель Научно-производственное объединение по выпуску механического сварочного оборудования "ВИСП". – № 4026274/25–08 ; заявл. 20.12.85 ; опубл. 15.04.88, Бюл. № 14. – 7 с. : ил.

31. А. с. 1390001 СССР, МКИ⁴ В 24 В 31/00, 31/10, 31/104. Устройство для обработки деталей свободным абразивом / А. А. Андилахай, А. П. Сергиев (СССР) ; заявитель и патентообладатель Жданов. металлург. ин-т. – № 4016857/31–08 ; заявл. 05.02.86 ; опубл. 23.04.88, Бюл. № 15. – 5 с. : ил.

32. А. с. 1399102 СССР, МКИ⁴ В 24 С 5/00. Струйный аппарат / А. Е. Проволоцкий, Н. А. Яковлев, В. Н. Статива, А. М. Евзеров, А. К. Лиходей, А. М. Гуржий, В. Н. Казеев (СССР) ; заявитель и патентообладатель Днепропетровский металлург. ин-т. – № 4098385/31–08 ; заявл. 25.07.86 ; опубл. 30.05.88, Бюл. № 20. – 5 с. : ил.

33. А. с. 1450989 СССР, МКИ⁴ В 24 С 1/00. Способ струйной обработки / Н. А. Шульман, Н. А. Покрывайло, В. В. Кулебякин, В. В. Товчигречко, А. В. Карпченко (СССР) ; заявитель и патентообладатель Ин-т тепло- и массообмена им. А. В. Лыкова. – № 4195910/31–08 ; заявл. 16.02.87 ; опубл. 15.01.89, Бюл. № 2. – 6 с. : ил.

34. А. с. 1450990 СССР, МКИ⁴ В 24 С 5/04. Струйный аппарат для гидроабразивной обработки / В. А. Федоров, И. М. Нестеренко, В. Н. Морозенко, А. Е. Проволоцкий, В. А. Максименко, Л. И. Бондаренко, А. А. Жолнерчик, В. Я. Сударенко (СССР). – № 4135254/25–08 ; заявл. 15.10.86 ; опубл. 15.01.89, Бюл. № 2. – 6 с. : ил.

35. А. с. 1511092 СССР, МКИ⁴ В 24 С 1/00. Абразивно-жидкостная обработка металлов / Ю. Н. Головин, В. А. Дрозд, О. Н. Лесько, В. С. Ро-

манов (СССР). – № 4362838/25–08 ; заявл. 12.01.88 ; опубл. 30.09.89, Бюл. № 36. – 7 с. : ил.

36. А. с. 1530167 СССР, МКИ⁴ В 24 С 3/22. Устройство для струйной абразивной обработки / И. М. Долгошев, В. В. Пирогов (СССР). – № 4176425/40–08 ; заявл. 07.01.87 ; опубл. 23.12.89, Бюл. № 47. – 5 с. : ил.

37. А. с. 1537683 СССР, МКИ⁵ С 09 G 1/02. Состав для гидроабразивной обработки, полирования прецизионных деталей / А. Н. Тарасов, М. И. Шаламов, В. Л. Гончаренко, В. А. Панфилов (СССР). – № 4372093/23–05 ; заявл. 27.01.88 ; опубл. 23.01.90, Бюл. № 3. – 4 с.

38. А. с. 1569208 СССР, МКИ⁵ В 24 С 1/08, В 24 В 31/116, 31/10. Устройство для гидроабразивной обработки внутренней поверхности труб / В. Б. Дементьев, А. Д. Засыпкин, А. В. Трухачев (СССР). – № 4295382/31–08 ; заявл. 10.08.87 ; опубл. 07.06.90, Бюл. № 21. – 6 с. : ил.

39. А. с. 1569209 СССР, МКИ⁵ В 24 С 3/12. Аппарат для абразивоструйной обработки деталей / Ю. С. Жаворонков, Ф. А. Бронин, В. М. Цесарский, В. П. Зайцев (СССР). – № 4367993/40–08 ; заявл. 04.02.88 ; опубл. 07.06.90, Бюл. № 21. – 5 с. : ил.

40. А. с. 1570889 СССР, МКИ⁵ В 24 С 5/04. Устройство для струйной обработки изделий / Е. С. Первушин, В. В. Бурмистров, М. Е. Первушин, В. А. Дьячков (СССР). – № 4351643/25–08 ; заявл. 28.12.87 ; опубл. 15.06.90, Бюл. № 22. – 4 с. : ил.

41. А. с. 1579749 СССР, МКИ⁵ В 24 С 5/04. Сопло для абразивоструйной обработки деталей / Р. В. Попов, Н. А. Бондаренко, Л. Н. Коверниченко, В. Е. Даниленко, Г. Я. Френкель, С. В. Леенсон, А. С. Большев (СССР). – № 4401922/31–08 ; заявл. 01.04.88 ; опубл. 23.07.90, Бюл. № 27. – 7 с. : ил.

42. А. с. 1585583 СССР МКИ³ F 16 Н 19/00. Механизм прерывистого вращения / А. С. Савченко, А. А. Андилахай (СССР). – № 4251821/25–28 ; заявл. 29.05.87 ; опубл. 15.08.90, Бюл. № 30. – 6 с. : ил.

43. А. с. 1595945 СССР, МКИ⁵ С 23 G 3/00. Агрегат для струйной обработки изделий / В. Г. Гапоненко (СССР). – № 4623790/27–02 ; заявл. 21.12.88 ; опубл. 30.09.90, Бюл. № 36. – 5 с. : ил.

44. А. с. 1632757 СССР, МКИ⁵ В 24 С 5/04. Струйно-абразивное сопло / В. И. Юрченко, В. В. Бескоровайный (СССР). – № 4668420 ; заявл. 18.01.89 ; опубл. 07.03.91, Бюл. № 9. – 7 с. : ил.

45. А. с. 1634464 СССР, МКИ⁵ В 24 С 5/04. Сопло для абразивной обработки деталей / В. Б. Бородин, В. П. Кошкин (СССР). – № 4600897/08 ; заявл. 23.08.88 ; опубл. 15.03.91, Бюл. № 10. – 7 с. : ил.

46. А. с. 1636199 СССР, МКИ⁵ В 24 С 3/12. Устройство для струйной обработки изделий / Е. Г. Бондаренко, В. П. Зализный (СССР). – № 4488450/08 ; заявл. 30.09.88 ; опубл. 23.03.91, Бюл. № 11. – 5 с. : ил.

47. А. с. 1657229 СССР, МКИ⁵ В 05 В 1/02. Жидкоструйное сопловое устройство / С. М. Ермолаев, Б. П. Ефимчук, А. В. Кислица, М. Н. Хвостов, В. М. Шаронюк (СССР). – № 4703998/05 ; заявл. 03.04.89 ; опубл. 23.06.91, Бюл. № 23. – 6 с. : ил.

48. А. с. 1662713 СССР, МКИ⁵ В 08 В 3/02. Устройство для струйной очистки изделий / Ф. А. Бронин, Е. И. Кириллов, А. С. Денисов, В. И. Виноградов, В. М. Цесарский, А. С. Хачатурян, М. В. Крылов (СССР). – № 4690130/12 ; заявл. 11.05.89 ; опубл. 15.07.91, Бюл. № 26. – 7 с. : ил.

49. А. с. 1662819 СССР, МКИ⁵ В 24 С 1/00. Способ защиты поверхностей в струйно-абразивном эжекционном аппарате / Б. Е. Гутман, А. М. Кадырметов, А. Ф. Мальцев, Д. И. Станчев, В. М. Шиповский (СССР). – № 4657829/08 ; заявл. 03.03.89 ; опубл. 15.07.91, Бюл. № 26. – 5 с. : ил.

50. А. с. 1664525 СССР МКИ⁵ В 24 В 31/00. Устройство для гидроабразивной обработки / А. А. Андилахай (СССР). – № 4400450/08; заявл. 01.04.88 ; опубл. 23.07.91, Бюл. № 27. – 4 с. : ил.

51. А. с. 1665195 СССР, МКИ⁵ F 24 F 9/00. Установка для струйной обработки поверхности изделия / В. А. Сипайлов, Г. В. Чирков (СССР). – № 4731532/29 ; заявл. 22.08.89 ; опубл. 23.07.91, Бюл. № 27. – 5 с. : ил.

52. Белецкий Д. Г. Основные параметры безэжекционной гидроабразивной обработки / Д. Г. Белецкий, В. Н. Жемчугов // Вестник машиностроения. – 1967. – № 5. – С. 53–56.

53. Билик Ш. М. Абразивно-жидкостная обработка металлов / Ш. М. Билик. – М. : Машгиз, 1960. – 199 с.

54. Бобров В. Ф. Основы теории резания металлов / В. Ф. Бобров. – М. : Машиностроение, 1975. – 343 с.

55. Бронштейн И. Н. Справочник по математике для инженеров, учащихся втузов / И. Н. Бронштейн, К. А. Семендяев. – М. : Наука, Глав. ред. физ-мат. лит., 1986. – 584 с.

56. Бузник Х. Н. Гидроабразивная обработка деталей сложной конфигурации / Х. Н. Бузник // Новые процессы обработки резанием. – М. : Машиностроение, 1968. – С. 300–312.

57. Васильев А. С. Гидродинамика, массообмен при истечении газовых струй в жидкость : автореф. дис. ... канд. техн. наук : спец. 05.02.08 "Технология машиностроения" / А. С. Васильев. – М., 1969. – 22 с.

58. Влияние режимов гидроабразивной обработки жаропрочных, титановых сплавов на производительность, шероховатость / Е. Л. Второв, А. В. Мещеряков, Л. С. Попов и др. // Прогрессивные методы проектирования технологических процессов, производства двигателей летательных аппаратов – Куйбышев : КуАИ, 1983. – С. 44–48.

59. Второв Е. Л. Влияние режимов, схем гидроабразивной обработки образцов лопаток ГТД на титановых, жаропрочных сплином на производительность, качество поверхности / Е. Л. Второв, А. В. Мещеряков, В. Г. Никифоров // Прогрессивные методы в технологии производства авиадвигателей. – Куйбышев : КуАИ, 1984. – С. 23–26.

60. Глубинное шлифование деталей из труднообрабатываемых материалов / С. С. Силин, В. А. Хрульков, А. В. Лобанов и др. – М. : Машиностроение, 1984. – 62 с.

61. Грановский Г. И. Резание металлов : учебник / Г. И. Грановский, В. Г. Грановский. – М. : Высшая школа, 1985. – 304 с.

62. Демкин Н. Б. Качество поверхности и контакт деталей машин / Н. Б. Демкин, Э. В. Рыжов. – М. : Машиностроение, 1981. – 244 с.

63. Демкин Н. Б. Контактное шлифование шероховатых поверхностей / Н. Б. Демкин. – М. : Наука, 1963. – 226 с.

64. Довнар А. С. О формировании и механизме воздействия на металл гидроабразивной струи / А. С. Довнар, П. А. Чепан // Докл. АН БССР. – Минск, 1964. – Т. 8, № 17. – С. 468–470.

65. Евсеев Д. Г. Физические основы процесса шлифования / Д. Г. Евсеев, А. И. Сальников. – Саратов : Изд-во Саратов. ун-та, 1978. – 128 с.

66. Зверев Е. А. Влияние режимов струйно-абразивной обработки на шероховатость поверхности деталей под плазменное напыление покрытий / Е. А. Зверев // Материаловедение : сб. науч. тр. – Новосибирск : Новосибир. гос. техн. ун-т, 2008. – № 2 (52). – С. 109–114.

67. Зорев Н. Н. Вопросы механики процесса резания металлов / Н. Н. Зорев. – М. : Машгиз, 1956. – 368 с.
68. Зубарь В. П. Замена шлифования точением / В. П. Зубарь, А. Г. Тимчук, М. В. Чопенко // Інформаційні технології : наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я : тези доп. Міжнар. наук.-практ. конф. – Х. : Курсор, 2006. – С. 73–74.
69. Израилович М. Я. Оптимизация процессов механической обработки алмазным, твердосплавным инструментом / М. Я. Израилович. – М. : ВНИИТЭМР, 1985. – 44 с.
70. Исследование обработки поверхностей деталей инерционно-абразивным методом : отчет о НИР / рук. Ромашов Б. В. – Владимир : Владимирский политехн. ин-т, 1978. – 70 с.
71. Исупов М. Г. К теории струйно-абразивной обработки / М. Г. Исупов // Вестник машиностроения. – 2005. – № 3. – С. 58–62.
72. Исупов М. Г. Повышение эксплуатационных свойств прецизионных пар трения струйно-абразивной обработкой / М. Г. Исупов, Л. Т. Крекнин // Вестник машиностроения. – М. : Машиностроение, 2001. – № 7. – С. 68–69.
73. Исупов М. Г. Прогнозирование съема металла при струйно-абразивной обработке / М. Г. Исупов // Известия вузов. Машиностроение. – М. : Машиностроение, 2004. – № 6. – С. 37–46.
74. Исупов М. Г. Разработка и исследование технологии струйно-абразивной финишной обработки : дис. ... докт. техн. наук : спец. 05.02.08 "Технология машиностроения" / Исупов Максим Георгиевич. – М. : РГБ, 2007. – 432 с.
75. Исупов М. Г. Расчет съема металла при струйно-абразивной обработке / М. Г. Исупов // Вестник Донского государственного технического университета. – Ростов-на-Дону : ДГТУ, 2005. – Т. 5, № 1 (23). – С. 84–88.
76. Исупов М. Г. Расчетная модель процесса струйно-абразивной обработки прецизионных деталей трения / М. Г. Исупов // Физика и химия обработки материалов. – М. : Наука, 2005. – № 2. – С. 82–85.
77. Исупов М. Г. Струйно-абразивный способ формирования регулярного микрорельефа / М. Г. Исупов // Научно-технические технологии. – М. : Машиностроение, 2004. – № 6. – С. 15–17.

78. Исупов М. Г. Струйно-абразивная финишная обработка металлов / М. Г. Исупов // Технология машиностроения. – М. : Машиностроение, 2003. – № 2. – С. 36–37.

79. Исупов М. Г. Управление шагом смазочных микрокарманов регулируемой закруткой воздушно-абразивной струи / М. Г. Исупов // Известия вузов. Машиностроение. – М. : Машиностроение, 2003. – № 4. – С. 70–73.

80. Качество поверхности при алмазно-абразивной обработке / Э. В. Рыжов, А. А. Сагарда, В. Б. Ильицкий и др. – К. : Наукова думка, 1979. – 244 с.

81. Кленов О. С. Технологическое обеспечение бездефектной обработки деталей гидроаппаратуры на финишных операциях : дис. ... канд. техн. наук : спец. 05.02.08 "Технология машиностроения" / Кленов Олег Станиславович. – Одесса : ОНПУ, 2011. – 228 с.

82. Кнэпп Р. Кавитация : пер. с англ. / Р. Кнэпп, Дж. Дейли, Ф. Хеммит. – М. : Наука, 1974. – 216 с.

83. Козырев С. П. О закономерностях гидроабразивного изнашивания / С. П. Козырев // Машиноведение. – М. : Машиностроение, 1969. – № 2. – С. 89–94.

84. Крагельский И. В. Основы расчетов на трение и износ / И. В. Крагельский, М. Н. Добыгин, В. С. Комбалов. – М. : Машиностроение, 1977. – 526 с.

85. Кремень З. И. Турбоабразивная обработка деталей сложного профиля : метод. рекомендации / З. И. Кремень, М. Л. Миссарский, В. З. Гузэль. – М.: НИИмаш, 1987. – 53 с.

86. Лоладзе Т. Н. Прочность и износостойкость режущего инструмента / Т. Н. Лоладзе. – М. : Машиностроение, 1982. – 320 с.

87. Малыхин В. В. Повышение эффективности шлифования вольфрамсодержащих твердых сплавов совместно со сталью алмазными кругами : дис. ... канд. техн. наук : спец. 05.03.01 "Процессы механической обработки, станки и инструменты" / Малыхин Виталий Викторович. – Х. : ХПИ, 1985. – 266 с.

88. Маслов Е. Н. Теория шлифования металлов / Е. Н. Маслов. – М. : Машиностроение, 1974. – 319 с.

89. Мороз И. И. Электрохимическая обработка металлов / И. И. Мороз. – М. : Машиностроение, 1961. – 201 с.

90. Нестеренко И. М. Оптимальная конструкция струйного устройства для гидроабразивной обработки / И. М. Нестеренко // Химическое и нефтяное машиностроение. – 1990. – № 4. – С. 33–34.

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

92. Новиков Ф. В. Механика взаимодействия режущего зерна с материалом при струйно-абразивной обработке / Ф. В. Новиков, А. А. Андилахай // Физические и компьютерные технологии : тез. докл. 15-й Междунар. науч.-техн. конф. – Х. : ХНПК "ФЭД", 2009. – С. 20–32.

93. Новиков Ф. В. Теоретический анализ параметров силовой напряженности струйно-абразивной обработки / Ф. В. Новиков, А. А. Андилахай // Наукові праці Донецького нац. техн. ун-ту. Серія: Машинобудування і машинознавство. – Донецьк : ДонНТУ, 2010. – Вип. 7 (166). – С. 46–53.

94. Новиков Ф. В. Технологические возможности абразивной обработки деталей затопленными струями / Ф. В. Новиков, А. А. Андилахай // Современные инструментальные системы, информационные технологии, инновации : материалы IX Междунар. науч.-техн. конф. – Курск : Юго-Зап. гос. ун-т, 2012. – С. 268–271.

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

96. Новиков Ф. В. Физические и кинематические основы высокопроизводительного алмазного шлифования : автореф. дис. ... докт. техн. наук : спец. 05.03.01 "Процессы механической обработки, станки и инструменты" / Ф. В. Новиков. – Одесса : ОГПУ, 1995. – 36 с.

97. Основы прикладной теории колебаний и удара / Я. Г. Пановко. – 4-е изд., перераб., доп. – Ленинград : Политехника, 1990. – 272 с.

98. Пазюк Е. И. Современные установки и технология гидроабразивной обработки / Е. И. Пазюк. – Ленинград : Лениздат, 1953. – 175 с.

99. Патент 58135 Україна, МПК⁷ В 24 В 31/00. Спосіб обробки деталей і пристрій для його здійснення / О. О. Анділахай, Р. В. Граборов, С. В. Савенко ; заявитель и патентообладатель Приазов. держ. техн. ун-т. – № а2002108004 ; заявл. 08.10.2002 ; опубл. 15.07.03, Бюл. № 7. – 6 с. : ил.

100. Патент 96362 Україна, МПК В24В 31/108, В 24 В 31/033, В 24 В 31/02. Пристрій для поверхневої обробки деталей / С. В. Кіпчарський, В. П. Кіпчарський, О. О. Анділахай ; заявитель и патентообладатель Приазов. держ. техн. ун-т. – № а20104444 ; заявл. 16.04.2010 ; опубл. 25.10.11, Бюл. № 20. – 5 с. : ил.

101. Патент 271076 ГДР, МКИ⁴ В 24 С 5/04. Сопло для абразивно-пневматической обдувки / Е. Хаманн. – № WР В 24 С /3142272 ; заявл. 31.03.88 ; опубл. 23.08.89. – 6 с. : ил.

102. Патент 272247 ГДР, МКИ⁴ В 24 С 7/00. Система управления абразивно-струйной установкой / Е. Хаин. – № WР В 24 С /3158585 ; заявл. 18.05.88 ; опубл. 04.10.89. – 7 с. : ил.

103. Патент 4815241 США, МКИ⁴ В 24 С 5/04. Сопло установки гидроабразивной обработки поверхностей / Д. Вудзен. – № WР В 24 С /933803 ; заявл. 24.11.86 ; опубл. 28.03.89. – 4 с. : ил.

104. Патент 4843770 США, МКИ⁴ В 24 С 5/04. Сопло для пескоструйной очистки / Н. Крен. – № WР В 24 С /86405 ; заявл. 17.08.87 ; опубл. 04.07.89. – 7 с. : ил.

105. Подураев В. Н. Технология физико-химических методов обработки / В. Н. Подураев. – М. : Машиностроение, 1985. – 264 с.

106. Посохин В. С. Конструкции установок для гидроабразивной обработки / В. С. Посохин. – М. : ЦБТИ Мосгорсовнархоза, 1958. – 120 с.

107. Проволоцкий А. Е. Акустический контроль технологических параметров струйно-абразивной обработки / А. Е. Проволоцкий, В. С. Гришин // Прогрессивные технологические процессы в машиностроении, стимулирование их внедрения в производство : тез. докл. обл. науч.-практ. конф. – Х. : ХПИ, 1990. – С. 126.

108. Проволоцкий А. Е. Гидроабразивное разрушение металлических поверхностей // Механическая обработка деталей машин и приборов. – К. : Общество "Знание" УССР, 1976. – С. 27.

109. Проволоцкий А. Е. Исследование процесса гидроабразивной обработки сложнопрофильных поверхностей : автореф. дис. ... канд.

техн. наук : спец. 05.02.08 "Технология машиностроения" / А. Е. Проволоцкий. – Одесса : ОПУ, 1974. – 20 с.

110. Проволоцкий А. Е. Механизация отделки деталей с использованием струйно-абразивной обработки / А. Е. Проволоцкий // Механизация и автоматизация производства. – 1990. – № 5. – С. 7–10.

111. Проволоцкий А. Е. Новые направления в финишных отделочных операциях машиностроения / А. Е. Проволоцкий, В. Е. Кузнецов // Теория и практика металлургии. – М. : Металлургия, 2009. – № 1/2. – С. 145–150.

112. Проволоцкий А. Е. Применение гидроабразивной обработки с целью увеличения эксплуатационных свойств поверхностного слоя / А. Е. Проволоцкий // Износ материалов при ударном воздействии твердых частиц. – М. : Машиностроение, 1976. – С. 55–56.

113. Проволоцкий А. Е. Разработка оборудования для гидроабразивной обработки изделий / А. Е. Проволоцкий, А. Л. Суляев // Вестник машиностроения. – М. : Машиностроение, 1976. – № 8. – С. 72–73.

114. Проволоцкий А. Е. Струйно-абразивная обработка деталей машин / А. Е. Проволоцкий. – К. : Техника, 1989. – 177 с.

115. Робочі процеси високих технологій в машинобудуванні : навч. посіб. / за ред. А. І. Грабченко. – Х. : ХДПУ, 1999. – 436 с.

116. Саверин М. М. Дробеструйный наклеп / М. М. Саверин. – М. : Машгиз, 1955. – 312 с.

117. Семко М. Ф. Взаимосвязь условного напряжения резания, прочности микрокромки алмазных зерен с их работоспособностью / М. Ф. Семко, М. Д. Узунян, Ю. А. Сизый // Синтетические алмазы. – К. : ИСМ, 1975. – Вып. 2. – С. 16–19.

118. Сергиев А. П. Струйно-абразивная обработка мелких деталей во вращающемся потоке / А. П. Сергиев, А. А. Андилахай // Станки и инструмент. – М. : Машиностроение, 1981. – № 11. – С. 18–20.

119. Силин С. С. Метод подобия при резании материалов / С. С. Силин. – М. : Машиностроение, 1979. – 152 с.

120. Синтетические алмазы в машиностроении / под ред. В. Н. Бакуля. – К. : Наукова думка, 1976. – 351 с.

121. Синтетические сверхтвердые материалы : в 3-х т. Т. 3. Применение синтетических сверхтвердых материалов. – К. : Наукова думка, 1986. – 280 с.

122. Сирота А. А. Эффективность отделочно-зачистной обработки ударным гидроабразивным воздействием свободной рабочей среды / А. А. Сирота, В. Я. Мицык // Автоматизация виробничих процесів у машинобудуванні та приладобудуванні : зб. наук. праць. – Луганськ : Вид-во СНУ ім. В. Даля. –2011. – Вип. 45. – С. 353–358.

123. Справочник технолога-машиностроителя : в 2-х т. Т. 1 / под ред. А. Г. Косиловой, Р. К. Мещерякова. – 4-е изд., перераб. и доп. – М. : Машиностроение, 1985. – 656 с.

124. Теоретические основы резания, шлифования материалов: учеб. пособие / А. В. Якимов, Ф. В. Новиков, Г. В. Новиков и др. – Одесса : ОГПУ, 1999. – 450 с.

125. Физико-математическая теория процессов обработки материалов и технологии машиностроения / под общ. ред. Ф. В. Новикова, А. В. Якимова : в 10-ти т. Т. 1. Механика резания материалов. – Одесса : ОНПУ, 2002. – 580 с.

126. Физико-математическая теория процессов обработки материалов и технологии машиностроения / под общ. ред. Ф. В. Новикова, А. В. Якимова : в 10-ти т. Т. 3. Резание материалов лезвийными инструментами. – Одесса : ОНПУ, 2003. – 546 с.

127. Физико-математическая теория процессов обработки материалов и технологии машиностроения / под общ. ред. Ф. В. Новикова, А. В. Якимова : в 10-ти т. Т. 4. Теория абразивной, алмазно-абразивной обработки материалов. – Одесса : ОНПУ, 2002. – 802 с.

128. Цыгановский А. Б. Влияние спутного потока на интенсивность гидроабразивной обработки затопленными струями / А. Б. Цыгановский // Вісник Східноукраїнського нац. ун-ту імені Володимира Даля. – Луганськ : Вид-во СНУ ім. В. Даля, 2007. – № 7(113). – С. 146–152.

129. Цыгановский А. Б. О влиянии геометрических характеристик струйных аппаратов на производительность гидроабразивной обработки затопленными струями / А. Б. Цыгановский // Вопросы вибрационной технологии. – Ростов-на-Дону : ДГТУ. – 2003. – С. 109–112.

130. Цыгановский А. Б. Производительность гидроабразивной обработки затопленными струями / А. Б. Цыгановский // Проблеми електронної промисловості у перехідний період : Матеріали Міжнар. наук.-практ. конф. – Луганськ : Вид-во СНУ ім. В. Даля, 1998. – С. 48–51.

131. Цыгановский А. Б. Технологические возможности гидроабразивной обработки затопленными струями / А. Б. Цыгановский // Вибрации в технике и технологиях. – Ростов-на-Дону : ДГТУ, 2010. – № 2(58). – С. 205–215.
132. Цыгановский А. Б. Экспериментальное определение скорости абразивных частиц в затопленной гидроабразивной струе / А. Б. Цыгановский // Ресурсозберігаючі технології виробництва та обробки тиском матеріалів у машинобудуванні : зб. наук. пр. – Луганськ : Вид-во СНУ ім. В. Даля, 2008. – С. 92–97.
133. Шманев В. А. Струйно-абразивная обработка деталей ГТД / В. А. Шманев, А. П. Шулепов, А. В. Мещеряков. – М. : Машиностроение, 1995. – 143 с.
134. Якимов А. В. Оптимизация процесса шлифования / А. В. Якимов. – М. : Машиностроение, 1975. – 175 с.
135. Якимов А. В. Теория абразивной, алмазно-абразивной обработки материалов / А. В. Якимов. – Одесса : ОНПУ, 2002. – 802 с.
136. Canby J. Microabrasive blasting 101. Canby // Manuf. Eng. (USA). – 2003. – Vol. 131, № 5. – P. 79–82; 84–86; 88; 90.
137. Rex S. New in the surface preparation by abrasive blasting blast plating / S. Rex // S. Prdt. Coat. and Linings. – 1990. – Vol. 7, № 10. – P. 50–58.
138. Rusterholtz R. Terpetschning Entwicklung der Strahlen von Oberflächen / R. Rusterholtz, W. Terpetschning // Schweiz. Maschinenmarkt. – 1990. – Vol. 90, № 50. – S. 100–103.
139. Spencer L. F. Abrasive blasting / L. F. Spencer // Metal Finish. Gvideb. Direct., Hackensack. – 1975. – № 7. – P. 67–68; 70–75.

Зміст

Вступ	3
Розділ 1. Найбільш істотні проблеми оздоблювальної обробки дрібних деталей і шляхи їх вирішення	5
1.1. Аналіз технологічних можливостей методів оздоблювальної обробки деталей	5
1.2. Основні закономірності струминно-абразивної обробки ...	17
1.3. Аналіз струминних методів і конструкцій установок для оздоблювальної обробки деталей невеликих розмірів, низької жорсткості й складної просторової форми.	33
1.4. Методи й перспективи захисту каналів сопел струминно-абразивних установок від зношування	40
1.5. Наукові передумови розробки теоретичних основ абразивної обробки деталей затопленими струменями ...	49
Висновки до розділу 1	59
Розділ 2. Теоретичне обґрунтування технологічних можливостей підвищення якості та продуктивності абразивної обробки деталей затопленими струменями	61
2.1. Загальний підхід до визначення умов підвищення якості та продуктивності абразивної обробки деталей затопленими струменями	61
2.2. Теоретичне визначення й аналіз умов зменшення енергоємності обробки як основного фактора підвищення якості та продуктивності абразивної обробки деталей затопленими струменями	64
2.2.1. Визначення енергоємності обробки в процесі різання зі збільшеною товщиною зрізу	66
2.2.2. Порівняння енергоємності обробки в процесі різання зі збільшеною товщиною зрізу й постійною товщиною зрізу	76
2.2.3. Визначення енергоємності обробки з урахуванням змінності переднього кута різального зерна	82
2.2.4. Уточнений розрахунок енергоємності обробки в процесі різання зі збільшеною товщиною зрізу	96
2.2.5. Визначення енергоємності обробки в процесі різання зі зменшеною товщиною зрізу	102

2.3. Особливості обробки кромки заготовок	108
2.4. Аналіз умов зменшення мікронерівностей поверхні в процесі абразивної обробки деталей затопленими струменями	115
2.5. Закономірності знімання матеріалу в процесі струминно-абразивної обробки з кутом атаки, що дорівнює 90°	117
Висновки до розділу 2	124
Розділ 3. Розробка математичної моделі визначення шорсткості поверхні та продуктивності абразивної обробки деталей затопленими струменями	127
3.1. Спрощена математична модель визначення шорсткості поверхні в процесі абразивної обробки деталей затопленими струменями	127
3.2. Уточнена математична модель визначення шорсткості поверхні в процесі абразивної обробки деталей затопленими струменями	136
3.2.1. Визначення траєкторії руху абразивного зерна з нульовим кутом його входження в оброблюваний матеріал	136
3.2.2. Розрахунок складових сили різання з урахуванням нелінійного зв'язку товщини й ширини одиничного зрізу ..	148
3.2.3. Визначення траєкторії руху абразивного зерна і шорсткості поверхні з ненульовим кутом його входження в оброблюваний матеріал	151
3.3. Експериментальне оцінювання отриманих теоретичних рішень	164
3.4. Визначення умов підвищення продуктивності абразивної обробки деталей затопленими струменями	167
3.4.1. Спрощений підхід до визначення продуктивності обробки	167
3.4.2. Уточнений підхід до визначення продуктивності обробки	170
3.5. Дослідження закономірностей руху абразивних зерен у струменях стисненого повітря	175
Висновки до розділу 3	186

Розділ 4. Методики проведення експериментальних досліджень абразивної обробки деталей затопленими струменями ...	190
4.1. Загальна методика проведення експериментальних досліджень	190
4.2. Методика визначення швидкості руху абразивних зерен ..	192
4.3. Методика вибору конфігурації сопла для абразивної обробки затопленими струменями	196
4.4. Методика визначення ділянки струменя з максимальною швидкістю руху абразивних зерен	200
4.5. Методика визначення продуктивності абразивної обробки затопленими струменями	202
4.6. Методика дослідження топографії поверхні деталі після струминно-абразивної обробки	204
4.7. Створення лабораторної установки й умови проведення експериментальних досліджень	207
4.8. Методика вибору форми і розмірів робочої камери	210
Висновки до розділу 4	212
Розділ 5. Експериментальні дослідження закономірностей знімання матеріалу й формування параметрів якості в процесі абразивної обробки затопленими струменями ..	215
5.1. Експериментальні дослідження закономірностей утворення мікрорізів на поверхнях деталей у процесі абразивної обробки затопленими струменями	215
5.2. Експериментальні дослідження закономірностей формування поверхонь деталей у процесі абразивної обробки затопленими струменями	219
5.3. Аналіз закономірностей знімання металу й формування продуктивності обробки	225
5.4. Визначення кількості абразивних зерен, які беруть участь у зніманні металу з оброблюваної поверхні	229
5.5. Експериментальні дослідження шорсткості обробленої поверхні	235
5.6. Експериментальні дослідження напруженого стану поверхневого шару деталі	238
5.7. Особливості утворення мікрорізів і знімання металу на кромках оброблюваної деталі	244

5.8. Узагальнення результатів експериментальних досліджень продуктивності та якості обробки	248
Висновки до розділу 5	250
Розділ 6. Експериментальні дослідження технологічних параметрів абразивної обробки деталей затопленими струменями	253
6.1. Вибір конструкції сопла за критерієм передачі максимальної швидкості руху абразивним зернам, які перебувають за його межами	253
6.2. Експериментальні дослідження конфігурації сопел за критерієм кількості інжекттованих зерен	260
6.3. Експериментальні дослідження продуктивності обробки й шорсткості поверхні	264
6.3.1. Розробка математичних моделей визначення продуктивності й шорсткості поверхні в процесі абразивної обробки дрібних деталей затопленими струменями	264
6.3.2. Перевірка відтворюваності дослідів	279
6.3.3. Перевірка адекватності моделі	280
6.3.4. Оцінювання значущості коефіцієнтів	281
6.4. Вибір раціональних параметрів обробки	288
Висновки до розділу 6	291
Розділ 7. Розробка та впровадження ефективних технологій абразивної обробки деталей затопленими струменями ...	293
7.1. Розробка прогресивного устаткування для реалізації методу абразивної обробки деталей затопленими струменями ...	293
7.2. Експериментальне оцінювання ефективності використання розроблених установок для здійснення абразивної обробки деталей затопленими струменями	305
7.3. Промислові випробування розроблених установок і оцінювання якості оброблених поверхонь деталей	308
7.4. Перспективні розробки зі створення установок для абразивної обробки затопленими струменями	314
7.5. Практичні рекомендації щодо ефективного використання абразивної обробки деталей затопленими струменями ...	321
Висновки до розділу 7	323
Висновки	324
Використана література	329

НАУКОВЕ ВИДАННЯ

Новіков Федір Васильович
Анділахай Олександр Олександрович

ОСНОВИ СТРУМИННО-АБРАЗИВНОЇ ОБРОБКИ ДРІБНИХ ДЕТАЛЕЙ

Монографія

Відповідальний за випуск **Новіков Ф. В.**

Відповідальний редактор **Сєдова Л. М.**

Редактор **Новицька О. С.**

Коректор Бутенко В. О.

План 2014 р. Поз. № 54-Н

Підп. до друку 29.10.2014. Формат 60×90 1/16. Папір MultiCopy. Друк Riso.

Ум.-друк. арк. 21,75. Обл.-вид. арк. 27,19. Тираж 500 прим. Зам. № 284

Видавець і виготівник - видавництво ХНЕУ ім. С. Кузнеця, 61166, м. Харків, пр. Леніна, 9-А

Свідоцтво про внесення до Державного реєстру суб'єктів видавничої справи

Дк № 481 від 13.06.2001 р.