



## ВСТУП

**Актуальність теми.** Відмінною рисою сучасного як вітчизняного, і зарубіжного машинобудування є розширення номенклатури конструкційних металевих, неметалевих і композиційних матеріалів закладення необхідних властивостей деталі чи виробу. Це вимагає нових технологій їх обробки, однією з яких є гідроабразивне різання. За останні три десятиліття гідроабразивний метод обробки матеріалів завоював досить широкий ринок через властиві йому переваги, до яких належать:

Сучасне машинобудування характеризується випуском великої номенклатури виробів невеликими партіями, що пов'язані з підвищенням конкуренції ринку товарів. Тому у багатьох випадках універсальність устаткування має ключове значення під час виборів технології виробництва. Широка номенклатура деталей, що випускаються, вимагає великих тимчасових і фінансових витрат на підготовку виробництва, а саме, в заготівельній його частині. Наприклад, застосування штампу як відрізняючий інструмент недоцільно в одиничному і дрібносерійному виробництві через великі витрати на його виготовлення, що згодом вплине на вартість операції.

Найчастіше заводи-виробники застосовують гідроабразивну різання в початковій стадії виробництва для отримання, наприклад, круглих заготовок для подальшої токарної обробки, минаючи тим самим закупівлю прутків. На цьому ж листовому матеріалі можна отримати заготівлю і для фрезерного верстата, і для свердлильного та ін. Такий спосіб не завжди є ефективним, проте спрощує виробництво, скорочуючи складські приміщення заготівельного виробництва та сортамент сировини, що закуповується.

За всіх складнощів і проблем гідроабразивного різання універсальність цього методу дозволила їй досить широко впровадитися у виробництво. Незважаючи на спроби використовувати гідроабразивну обробку як поверхневу (точіння, фрезерування, гравіювання та ін.), у вітчизняних виробничих системах верстати цієї групи найчастіше застосовуються для розкрою листового матеріалу.

Вибір методу розкрою залежить від ряду факторів, до яких належать: можливість різання запропонованим способом, продуктивність, якість отриманих поверхонь деталей, точність обробки, необхідність подальшої обробки та ін.

Дана робота присвячена дослідженню гідро абразивного різання заготовок з товстолистового сталевих прокату з метою підвищення ефективності розкрою. Це спричинить подальший розвиток можливостей цього розповсюдженого процесу та розширення сфери застосування. Найважливішим елементом різання із застосуванням абразиву є система його подачі, що впливає на продуктивність та якість розкрою деталей. У дисертації розглядаються питання розробки та дослідження способу дозування абразиву з використанням дискретної подачі.

**Мета дослідження** підвищенні ефективності гідроабразивного різання заготовок із товстолистової сталі на основі дискретної подачі абразиву в надзвуковий струмінь води.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

- теоретично дослідити та провести аналіз запропонованих моделей процесу різання заготовок із сталевих товстолистових металів гідро абразивним струменем;
- підготувати експериментальний стенд із дослідження дискретної подачі абразиву в надзвуковий струмінь води, провести та опрацювати результати досліджень;
- встановити залежності між параметрами дискретної подачі абразиву та часом наскрізного різання, шириною різку, швидкістю розкрою заготовок із товстолистових металів;
- розробити практичні рекомендації щодо підвищення продуктивності гідро абразивного розкрою заготовок із товстолистової сталі за рахунок застосування дискретної подачі абразиву.

**Наукова новизна** роботи полягає у виявленні зв'язків між частотою подачі абразиву в гідро струменем та параметрами гідро абразивного різання заготовок з товстолистових сталевих металів (швидкість подачі соплової головки, час наскрізного проколу металу, шорсткість і хвилястість оброблених поверхонь);

математичних моделях, які пов'язують частоту дискретної подачі абразиву в струмінь води та швидкість різання заготовок із товстолистових сталевих металів; математичних моделях, що пов'язують частоту подачі абразивного піску до надзвукового струменя робочої рідини та параметри кромки різання (висота хвилястості, крок хвилі пропила);

**Практична значущість** роботи полягає: розроблено оригінальну конструкцію дискретної подачі абразиву в надзвуковий струмінь, що забезпечує підвищення ефективності різання заготовок з металевих товстолистової сталі;

розроблено методику вибору оптимальних режимів дискретної подачі абразиву гідро абразивного різання заготовок з товстолистових сталевих матеріалів.

# 1 СТАН ПИТАННЯ ТА ВИБІР НАПРЯМУ ДОСЛІДЖЕНЬ

## 1.1 Введення в метод обробки деталей надзвуковим струменем води з абразивом

У 50-х роках ХХ століття вперше було описано можливість використання струменя рідини під високим тиском як інструмент для обробки різних матеріалів. Застосування гідро абразивної обробки спочатку обмежувалося лише очищенням деталей від іржі та окалини. У міру розвитку обладнання та технології в цілому сфера застосування абразивної обробки розширювалася досить динамічно.

Дані про можливість застосування струменя надвисокого тиску як ріжучий інструмент з'явилися в СРСР в 1960 [1], однак перший патент був отриманий фірмою McCartney Manufacturing's [2], яка застосувала метод розкрою струменем на заводі Alton Box Board Co (США).

Сутність методу полягає в подачі розігнаної до надзвукової швидкості струменя води на оброблюваний матеріал, який руйнується внаслідок взаємодії з інструментом, що володіє високою руйнівною здатністю. Для інтенсифікації процесу в деяких випадках до струменя додають абразивний матеріал. Як абразивний матеріал можуть виступати корунд, карбід кремнію, синтетичні алмази та інші абразиви. Слід зазначити, що у цей час велике поширення має саме мінерал граната (альмандин). Потрапляючи на оброблювану поверхню, він викликає ерозійне руйнування поверхневого шару, а залежно від технологічних параметрів (швидкості закінчення води, подачі гідро абразивної головки щодо заготівлі, кількості абразивних частинок у струмені,

Незважаючи на широке застосування гідро абразивного струменя не тільки в сучасному машинобудуванні, але і в медицині, харчовій, текстильній, космічній та авіабудівній промисловості, цей метод обробки матеріалів впроваджується у нові і нові області. Цим інструментом виробляють не лише фігурний розкрій матеріалів, а й згинання та покрокове вигинання поверхонь (рисунок 1.1) [3].

Дуже цікавим є застосування гідро струменя як гравірування поверхонь (рисунок 1.2), а також для очищення від окалини, корозії та забруднень.

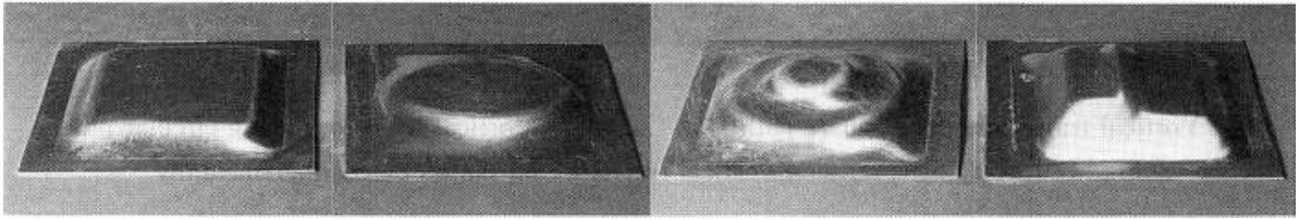


Рис. 1.1 – Оболонки зрізаного конуса та ступінчастого конуса, отриманих струменем води



Рис. 1.2 – Візерунки, отримані матуванням поверхні скла гідро абразивним струменем

Крім «класичного» застосування гідро струменя, а саме, фігурного розкрою різного роду матеріалів, в останнє десятиліття спостерігається науковий та практичний інтерес до використання гідро абразивної механо обробки – точіння та фрезерування [4-7]. Існують роботи, спрямовані на вивчення гідро абразивного точення та фрезерування, описано методи планування експериментів при даній обробці, отримано залежності глибини фрезерування від параметрів обробки. Іранськими вченими М. Zohoor, I. Zohourkari було запропоновано модель гідро абразивного точення [6], яка з достатньою достовірністю описує остаточну геометрію заготовок після обробки. У роботі [6] представлений механізм видалення матеріалу при гідро абразивному точінні, причому емпіричними константами уточнено модель ерозії матеріалів М. Hashish, яку він запропонував у своїй роботі [8].

Процес взаємодії надзвукового струменя води з абразивом і матеріалу вивчений поки недостатньо, немає всеосяжної моделі руйнування, та й сама

природа руйнування матеріалу досить складна і вимагає додаткових досліджень. Існують припущення та математичні моделі руйнування оброблюваного матеріалу гідро абразивним струменем, але вони не завжди відповідають експериментальним даним.

Гідро струмене різання матеріалів є складним маловивченим процесом, що не має до теперішнього часу стрункої теоретичної основи, тому точність і шорсткість оброблених поверхонь деталей є найчастіше «мистецтвом» оператора, а отримання необхідних результатів різання досягається методом проб і помилок.

## **1.2 Аналіз гідроабразивного розкрою заготовок та шляхи вдосконалення цього процесу**

Розвиток гідроструминного різання спрямоване не лише на розширення функціональних можливостей методу, але й на підвищення точності, продуктивності та ефективності процесу загалом. Існує низка основних напрямів, у якому ведуться роботи з удосконалення процесу гідроабразивної обробки матеріалів.

Величезний внесок у дослідження процесу гідроабразивного руйнування матеріалів зробили вітчизняні та зарубіжні вчені: Р.А. Тихомиров, І.І. Шапіро, Ю.С. Степанов, Г.В. Барсуков, В.С. Гуєнко, Г.В. Барсуков, В.А. Шманьов, А.А. Барзов, С.П. Козирєв, І.В. Петко, М. Ramulu, , GL Chahine, J. Chao, P. Verce, G. Fowler, та ін.

Одним з перших та найбільш очевидних методів удосконалення гідро абразивної обробки є підвищення робочого тиску насосів при різанні. Тиск перед соплом гідро абразивної головки впливає на витрату, отже, і швидкість закінчення струменя води. Збільшення швидкості закінчення призводить до підвищення кінетичної енергії струменя та його ріжучих здібностей.

Підвищення робочого тиску в системах гідроабразивного різання відбувалося таким чином: спочатку застосовувався тиск 200 МПа, з розвитком насосних агрегатів він піднявся до 400 МПа. У 2006 році фірма Flow представила насос із робочим тиском 600 МПа, який перемістив технологію гідроабразивного

різання на новий ступінь розвитку. А в 2012 році американська фірма КМТ заявила, що модернізувала свій насос, отримавши при цьому рівень робочого тиску 720 МПа, проте на ринку такий насос досі не з'явився.

Однак не завжди підвищення робочого тиску зумовлює вдосконалення процесу різання. Пов'язано це з підвищеним зношуванням основних витратних матеріалів, до яких відносяться: ущільнення високого тиску, клапани, сопло, фокусуюча трубка та ін. Час обробки матеріалу при підвищених тисках скорочується, що веде до підвищення продуктивності та зниження витрат на одиницю обробленого матеріалу. Але при цьому витрати на обслуговування обладнання зростають, тобто в результаті економічного ефекту підвищення робочого тиску може і не бути. Тому існує оптимальне значення робочого тиску, який забезпечує мінімальне значення сумарних витрат на гідроструминну обробку.

Заява провідними фірмами, що випускають обладнання для гідроструминної обробки (Flow, КМТ, BHDT, Omax, Bystronic, Uhde та ін.), Про пропозицію насосів з підвищеним робочим тиском понад 500-600МПа можна пояснити лише рекламним або маркетинговим ходом.

Вироблену насосом енергію рідини, що рухається, необхідно використовувати як інструмент для обробки. Для цього застосовується гідроабразивна головка, в якій безпосередньо і створюється інструмент для різання. Удосконалення цього вузла – це ще один із напрямів у подальшому розвитку методу обробки. У зв'язку з цим багато робіт присвячено визначенню оптимального профілю струменя формуючого сопла гідроабразивної головки для створення надзвукового струменя з мінімальними втратами. Дуже перспективним бачиться підвищення ресурсу основних вузлів гідроабразивної головки: сопла та фокусуючої трубки, які є витратними матеріалами при обробці та інтенсивно зношуються в процесі формування інструменту за рахунок постійного контакту з водою та абразивними частинками.

Третім важливим напрямом розвитку процесу гідроабразивного різання є вдосконалення програмно-математичного забезпечення, адаптованого до

специфіки процесу. Існує ряд специфічних особливостей, які притаманні традиційним методам обробки матеріалів. По-перше, це нежорсткість інструменту, що призводить до запізнювання струменя при виході з матеріалу, яке залежить головним чином від фізичних та геометричних параметрів матеріалу, а також швидкості подачі струменя відносно нього. По-друге, це зміна ріжучих властивостей струменя вздовж її осі, яке пов'язане з тим, що кінетична енергія струменя витрачається на процес руйнування матеріалу, на вимивання продуктів зносу, на нагрівання та відведення тепла, крім того, є і процес розширення струменя. По-третє, це зміна ріжучих властивостей інструменту в результаті зносу сопла та фокуруючої трубки. Причому ріжучі властивості можуть погіршуватися як задовго, так і миттєво.

Таким чином, створення всеосяжного програмно-математичного апарату, що дозволяє з достатньою адекватністю задавати режими різання, прогнозувати результат обробки, і є третій напрямок з удосконалення обробки.

Ще одним методом удосконалення гідроабразивного різання є примусова зміна властивостей та параметрів струменя, що впливають на силовий вплив на оброблюваний матеріал: збільшення початкової ділянки струменя, зміна характеру впливу струменя на матеріал та ін.

Бурнашов М.А у своїй роботі [9] запропонував підвищувати ефективність розрізання листових неметалевих матеріалів водолідними струменями високого тиску. Підвищення ефективності досягається за рахунок додавання до надзвукового струменя води рідкого азоту. Внаслідок чого відбувається заморожування окремих частинок води та утворення дрібних крижинок. В роботі експериментальним чином показано, що застосування водокризового струменя як ріжучого інструменту дозволяє знизити робочий тиск струменя в 2,6 рази, а енергоємність розрізання листових неметалевих матеріалів – на 50%, що забезпечує зростання ресурсу гідрорізального обладнання.

Відомим є той факт, що надзвуковий струмінь рідини має властивість розпадатися зі збільшенням відстані від сопла. Це відбувається через виникнення сил, які діють внаслідок різниці швидкостей струменя води з навколишнім

середовищем, яке перебуває у стані спокою. Внаслідок дії цих сил відбувається насичення поверхні струменя повітрям (аерація), після чого повітря потрапляє і на ядро струменя. Внаслідок цих взаємодій зі збільшенням відстані від зрізу сопла струмінь є сумішшю окремих частинок води і повітря. Ділянка струменя рідини, в межах якого зберігається суцільний потік, що не розпався, з постійними тиском, швидкістю і щільністю, називається початковим. Очевидно, що найбільш ефективно процес руйнування матеріалів відбувається при взаємодії саме на цій ділянці струменя. Таким чином, можливість ефективно різати матеріали гідроабразивним струменем обмежується довжиною початкової ділянки (при тиску 600 МПа вона досягає 250-300 мм). У дослідженнях Кузьмін Р.А. [10] показує, що довжину початкової ділянки струменя можна збільшити за допомогою додавання в робоче середовище водорозчинних полімерів, як яких використовував карбоксиметилцелюлозу, гліцерин, полівініловий спирт, поліоксиетиленгліколь, поліакриламід, поліоксиетилен. Автор показує, що полімерні добавки суттєво стабілізують струмінь, при цьому зменшується кут конусності зовнішніх меж струменя, збільшується довжина початкової ділянки в 1,4-1,7 рази в порівнянні зі струменем чистої води. Як один із доказів Кузьмін Р.А. показує, що сила впливу на матеріал струменя з 0,01% масою розчину поліоксиетилену збільшується в 1,6-1,17 раз.

З метою збільшення ріжучої здатності струменя Шпильовим В.В [11] запропоновано закручувати струмінь за рахунок нарізування спіралеподібної канавки у фокусуючій трубці гідроабразивної головки. Автор показує, що «свердлильний» ефект призводить до підвищення ріжучої здатності струменя, а також за рахунок роботи доцентрової сили відбувається концентрація абразивних частинок на її осі. Крім того, автор наводить результати експериментів, які ілюструють зменшення конусності закрученого струменя в порівнянні зі стаціонарним.

Одним із методів підвищення продуктивності процесу гідроабразивного різання матеріалів є використання пакетного різання. Суть методу полягає у розкрії листового матеріалу, зібраного певним чином. Застосовується такий

метод лише для розкрою листового матеріалу, який складають пакетом, тобто кладуть листи один на інший. Таким чином, при проходженні одного контуру можна отримати кількість деталей, що дорівнює кількості аркушів у пакеті. Докладно цим способом займався Міхєєв А.В. у своїй дисертаційній роботі [12]. Експериментальним чином підтверджено підвищення продуктивності у 1,5 раз. Крім того, автором запропоновано технологічні рекомендації вибору режимів різання та конструктивні параметри пакету матеріалів.

Іншим способом підвищення ефективності гідроабразивного різання матеріалів є застосування багатопрхідного різання. Такий спосіб у роботах [5, 13]. Полягає запропонований метод у тому, щоб прорізати матеріал не за один прохід, а за декілька, але зі швидкістю, що перевищує ту, яка необхідна для нарізного різання. Наприклад, можна різати сталь товщиною 16 мм зі швидкістю подачі 1мм/с за 1 прохід, а можна прорізати цю сталь за 2 проходи зі швидкістю подачі 2 мм/с або за 3 проходи зі швидкістю 3мм/с подачі і т.д. В цьому випадку час впливу на матеріал однаково, проте якість поверхні, що отримується, відрізняється. Для кожного матеріалу та кожної товщини є оптимум, який визначається експериментальним шляхом.

Використання як інструмент гідродинамічних струменів також є одним із способів підвищення ефективності обробки. Цій тематиці присвячено багато робіт [14-16], аналіз яких свідчить про підвищення ефективності обробки за деяких параметрів у 3 рази. Однак отримання таких струменів пов'язане з підвищеним зносом вузлів та деталей, що беруть участь у їх формуванні, що позначається на вартості та продуктивності обробки.

Як абразив при гідроструминному різанні найчастіше застосовують мінерал гранату альмандин, який складається з  $\text{SiO}_2$  (36%),  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  (33%),  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (23%), решта - домішки. У деяких джерелах [17-18] зустрічається інформація щодо можливості відновлення використаного абразиву. З цією метою використовують різні системи рециркуляції, наприклад, циклони (рисунок 1.3). З допомогою таких систем можна рециркулювати (повернути у виробничий процес) до 50% абразивного піску.

Передбачається, що частина абразивних частинок у струмені не бере участі в процесі різання, отже, вона не руйнується і придатна для подальшого використання. Наявність таких систем підтверджує, що не весь пісок у процесі різання руйнується, отже використовується неефективно. Очевидно, що із застосуванням систем рециркуляції скорочуються витрати на абразив.



Рис. 1.3 – Система рециркуляції абразивного піску [18]

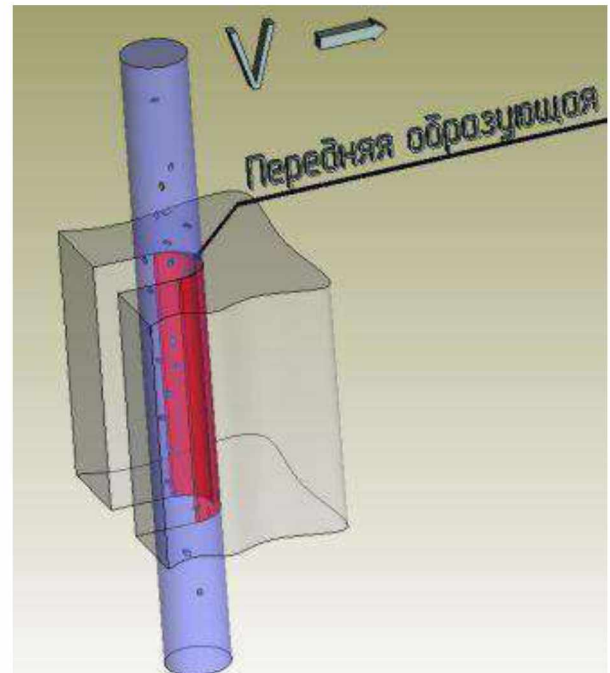


Рис. 1.4 – Схема обробки листових товстостінних матеріалів [18]

При обробці листових матеріалів товщиною понад 40мм у руйнуванні матеріалу бере участь лише передній твір, що утворює (на рис. 1.4 виділено червоним кольором), як показано на схемі. Пов'язано це з тим, що швидкість переміщення струменя вздовж матеріалу становить близько 0,01-0,1 мм/с, тобто різниця в часі проходження переднього і заднього струменя, що утворює, становить порядку 10-100 с. Найчастіше в момент проходження заднього утворює струмінь не зустрічає опору з боку матеріалу, так як проріз здійснив передня частина струменя. Отже, абразивні частинки, що знаходяться в задньому профілі струменя, у процесі різання не беруть участі, а внаслідок цього не руйнуються. Звідси можна зробити висновок, що менше швидкість переміщення струменя вздовж матеріалу.

З одного боку, чим менше швидкість подачі гідро абразивної головки щодо матеріалу, тим краще якість одержуваних поверхонь, але при цьому більша частина енергії струменя витрачається неефективно. Проходячи повз матеріал, струмінь безперешкодно потрапляє у ванну, вода в якій поглинає енергію інструменту (струмені).

З іншого боку, що вища швидкість головки, то гірша якість, але заодно більшість енергії струменя з абразивом витрачається на руйнація матеріалів. Взагалі ідеальним та недосяжним випадком для гідро абразивної обробки вважається, коли вся енергія струменя з абразивом витрачається на руйнування матеріалів та отримання заданої якості. Тобто, при виході з матеріалу швидкість, отже, кінетична енергія струменя дорівнювала б нулю.

З точки зору найбільш ефективного використання абразивних частинок у процесі гідро струминної обробки переважним виглядає «не наскрізна» (поверхнева) обробка, при якій вільного виходячи для струменя немає, всі абразивні частинки зустрічають опір з боку матеріалу, руйнуючи його.

Одним із основних недоліків гідро абразивної обробки є її висока собівартість, а також низька продуктивність. Проведемо аналіз вартості різання, зазначивши, що він носить оцінний характер, оскільки питома вартість запасних частин, наприклад, насоса, залежить від режимів, у яких даний насос експлуатувався. Аналіз показав, що вартість піску (при режимі: тиск 400 МПа, витрата абразиву 250 гр/хв) становить приблизно 36% від вартості різу без урахування ціни обладнання. Таким чином, можна зробити висновок про те, що скорочення витрати піску при збереженні якості отриманої поверхні призведе до зменшення вартості обробки, тобто підвищення її ефективності.

Враховуючи описані вище особливості застосування та обробки гідро абразивного різання, можна зробити висновок, що зменшення витрати абразиву при збереженні якості одержуваних поверхонь є актуальним завданням.

### 1.3 Особливості гідро абразивного розкрою заготовок з товстолистових металів

Гідро абразивного різку в силу її специфічності притаманні деякі особливості, які виразніше виявляються при розкрої заготовок з товстолистових матеріалів. Зважаючи на запізнення струменя на нижній площині матеріалу щодо верхньої, виникає необхідність зменшення швидкості подачі головки при проходженні кутів і контурів складної форми, щоб не виникали дефекти, які показані на рис. 1.5.

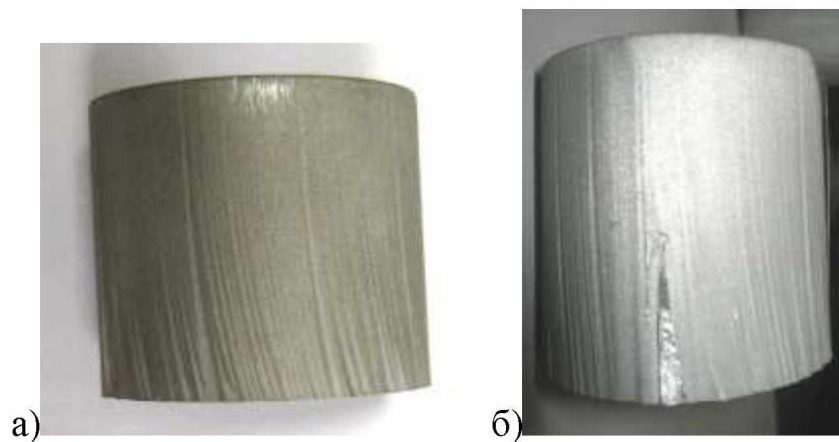


Рис. 1.5 – Дефекти поверхні обробки: а) запізнення струменя; б) задирки на зовнішній поверхні

Вагомий час під час обробки товстих листових матеріалів займає початковий наскрізний прокол (так званий «пірсинг»). Робиться прокол для того, щоб почати різати заданий контур і струмінь мав вихід з матеріалу, і здійснюється він шляхом витримки гідро абразивної головки в нерухомому стані протягом деякого часу. Для металів товщиною близько 100 мм і важкооброблюваних матеріалів завтовшки понад 40-50мм (титан, нержавіючі сталі, надтверді сплави та ін.) Час наскрізного проколу може досягати 40 хвилин і більше. Пов'язано це не тільки з важко оброблюваністю матеріалів і з тим, що енергія струменя зі збільшенням відстані від сопла падає, але й з тим, що сила впливу струменя зменшується через необхідність подолання протитечії відпрацьованого абразиву з водою, як показано на рис. 1.6 .

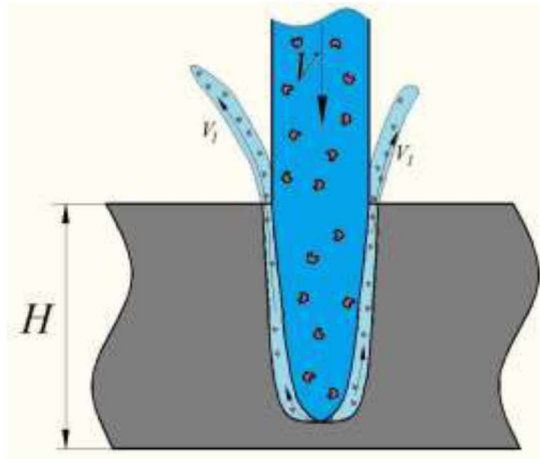


Рис. 1.6 – Схема наскрізного проколу матеріалу гідро абразивним струменем

Очевидно, що чим більша товщина матеріалу  $H$ , тим більшими втратами супроводжується процес наскрізного проколу. З метою зменшення часу пірсингу товстостінних матеріалів деякі установки мають можливість циркуляційної дії. Воно здійснюється шляхом кругового руху головки біля точки врізання. Зазвичай радіус обертання вбирається у 1 мм. За допомогою обертання скорочується опір основного струменя з абразивом, і експериментально встановлено, що час проколу при циркуляційному пірсингу може бути в 3 і більше разів менше, ніж при стаціонарному проколі. Однак такий спосіб проколу матеріалів вивчений поверхнево, практично немає експериментальних даних за рекомендованими режимами (кількість та частота оборотів) для матеріалів різної товщини.

### **Висновки до розділу**

Гідро абразивний струмінь є не тільки інструментом для фігурного розкрою деталей та заготовок, але за допомогою нього можна проводити гравірування, очищення від корозії та окалини, згинання.

Порівняно з альтернативними методами розкрою матеріалів, такими як електроерозійна, лазерна, плазмова, гідро абразивний спосіб вирізування деталей має ряд суттєвих особливостей: універсальність, відсутність нагріву в зоні різання, відсутність запиленості та загазованості робочого місця.

Незважаючи на наявність великої кількості робіт, в яких запропоновані способи підвищення ефективності процесу гідро абразивного різання, в даний час методу притаманна висока собівартість та низька продуктивність, що особливо проявляється при розкрій деталей з товстолистових матеріалів.

Мета дисертаційної роботи полягає у підвищенні ефективності гідро абразивного різання заготовок з товстолистових металів на основі дискретної подачі абразиву в струмінь. У випадку під ефективністю технологічного процесу приймається ступінь відмінності між фактичним його результатом і бажаним за показниками якості, продуктивності, собівартості [19]. Бажаним результатом, метою технологічного процесу є отримання деталі із заданими параметрами якості та у встановленій програмі кількості при найменшій собівартості обробки [20]. Так як розкрій товстостінних листових матеріалів найчастіше носить заготівельний характер і шорсткість одержуваних поверхонь не є необхідним показником, то за критерії ефективності приймаються продуктивність та собівартість.

## 2 МЕТОДИКА Й ОСНОВНІ МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ

### 2.1 Зміст експериментальних досліджень

Аналіз великої кількості експериментальних даних, літературних джерел дозволив визначити технологічні чинники, що впливають параметри гідро абразивної обробки. Дослідження дозволили сформуванати схему взаємозв'язків основних факторів та показників гідро абразивного розкрою, яка представлена на малюнку 2.1.

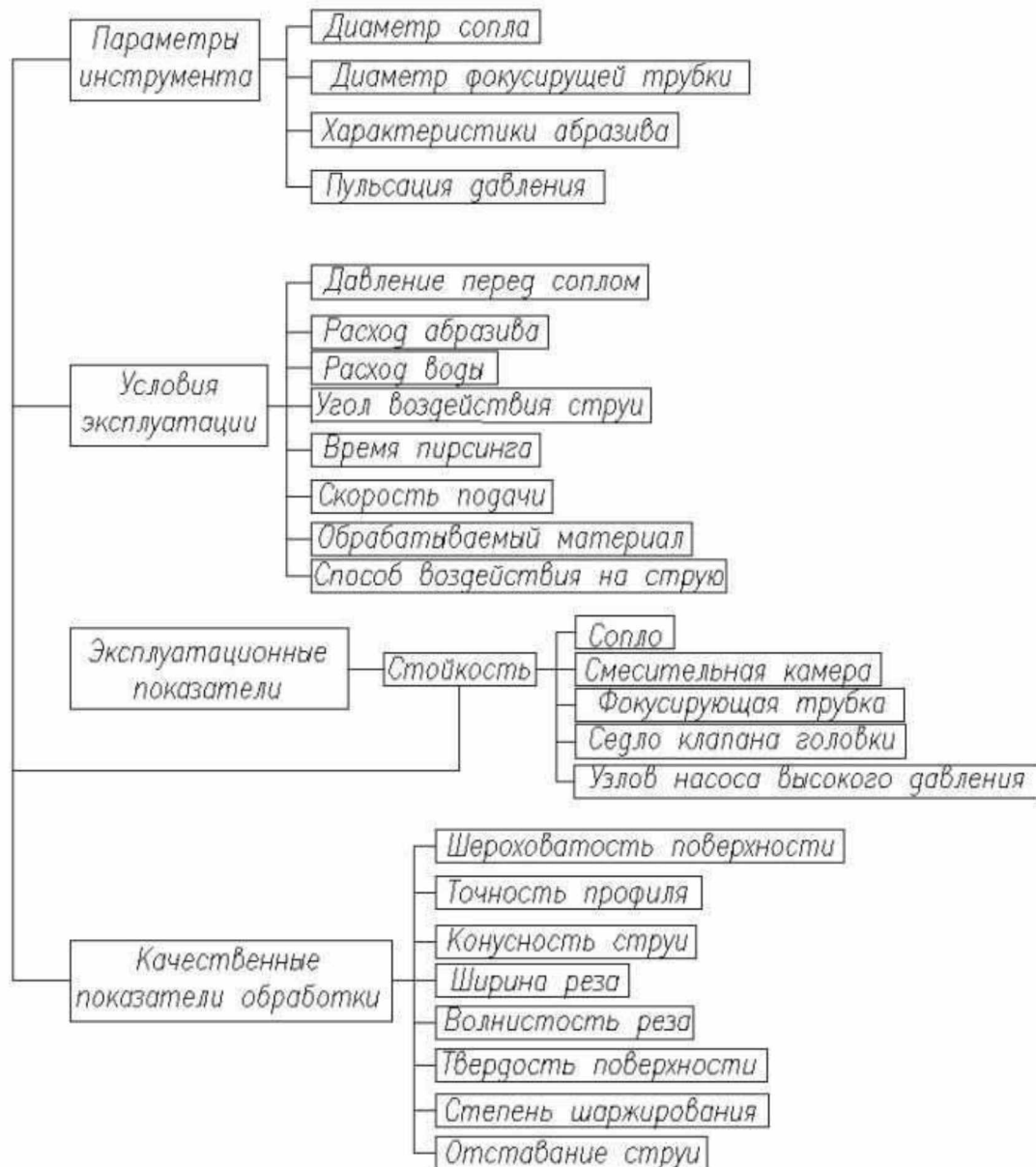


Рис. 2.1 – Схема взаємозв'язків основних факторів та показників гідро абразивного розкрою [15]

Огляд робіт показує, більшість функціональних зв'язків елементів схеми рис. 2.1 нині не досліджені. Таким чином, представлена схема дозволяє оцінити ступінь формалізації процесу гідро абразивного розкрою.

Схема, представлена на рисунку, дозволяє наочно визначити, які функціональні зв'язки між параметрами гідро абразивної обробки існують зараз, а які відсутні. Крім цього у процесі досліджень процесу схему можна доопрацьовувати, ускладнювати, додаючи до неї нові елементи.

Метою проведення експериментальних випробувань є перевірка та підтвердження результатів теоретичних досліджень, визначення оптимальних параметрів дискретної подачі абразиву у надзвуковий струмінь води при розкрої заготовок із товстолистових металевих матеріалів.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити деякі завдання. Рішення завдань передбачається здійснити у вигляді проведення експериментальних досліджень. Пропонується провести такі експерименти:

- визначити час наскрізного проколу товстостінних матеріалів при стаціонарному та дискретному способах подачі абразиву та порівняти їх;
- визначити технологічні параметри дискретної подачі абразиву при розкрої товстостінних листових металевих матеріалів;
- дослідити показники якості поверхонь, оброблених із застосуванням стаціонарної та дискретної системи подачі абразиву: шорсткість, хвилястість, точність кромки та ширину різку;
- встановити взаємозв'язок параметрів подачі абразиву з параметрами обробки, яких відноситься швидкість подачі головки, ширина різку, хвилястість і шорсткість;
- визначити швидкість подачі гідро абразивної головки вздовж матеріалу за різних способів подачі піску.

## **2.2 Експериментальна установка для проведення досліджень**

Для проведення експериментальних досліджень використовувалася виробнича п'ятикоординатна установка гідроабразивного різання, що

застосовується для розкрою матеріалів (рис. 3.1). Система складається з насоса мультиплікаторної дії (UHDE HPS 6045) (на схемі не показаний), ріжучої головки (ALLFI) 3, промислового маніпулятора (FANUC M 710i C) 1, системи подачі абразиву 5, ванни-уловлювача струменя 4, трубопроводів та арматури високого тиску 2 та ін. Спеціально для експериментальних досліджень було спроектовано та виготовлено систему подачі абразиву, зображену на рис. 2.3.

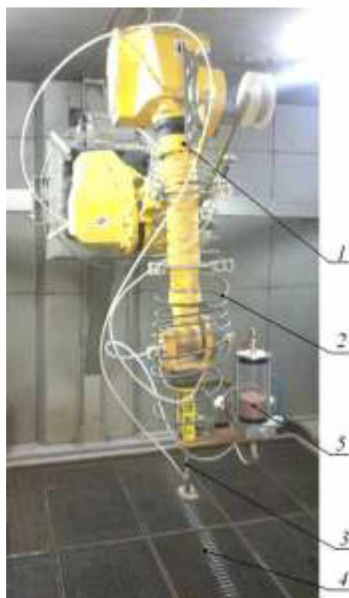


Рис. 2.2 – Установа для гідро абразивної обробки

Увімкнення /вимкнення подачі піску здійснюється за рахунок відкриття/закриття клапана, який являє собою пластину зі щілиною, що переміщається вздовж корпусу за допомогою пневмо циліндра. Для різних тимчасових затримок за управління пневмо циліндром відповідає заздалегідь запрограмований логічний контролер. Конструкція гідро абразивної голівки та схема роботи системи подачі абразиву представлена на рис. 2.4.

Система подачі являє собою механізм, що складається з наступних основних елементів: корпусу 1, колби 2, верхньої запірної кришки 3, керуючого вентиля 4, пневмо циліндра 5, розподільника 6, фітинга 7, затвора 8 і шибера 9. У накопичувальну колбу 2 через кран запірний кришки 3 засипається абразивний пісок. Положення регулюючого витрата абразиву шибера 9 визначається вентилям 4. Пневмо циліндр управляє положенням затвора 8, що з'єднує колбу 2 і фітинг 7, через який пісок потрапляє в гідроабразивну голівку. Таким чином, подаючи

сигнал на пневморозподільник 6, шток циліндра 5 пересуне затвор 8 крайнє положення, і порожнину колби 2 з'єднається з фітінгом 7, що спричинить подачу абразивного матеріалу в головку.

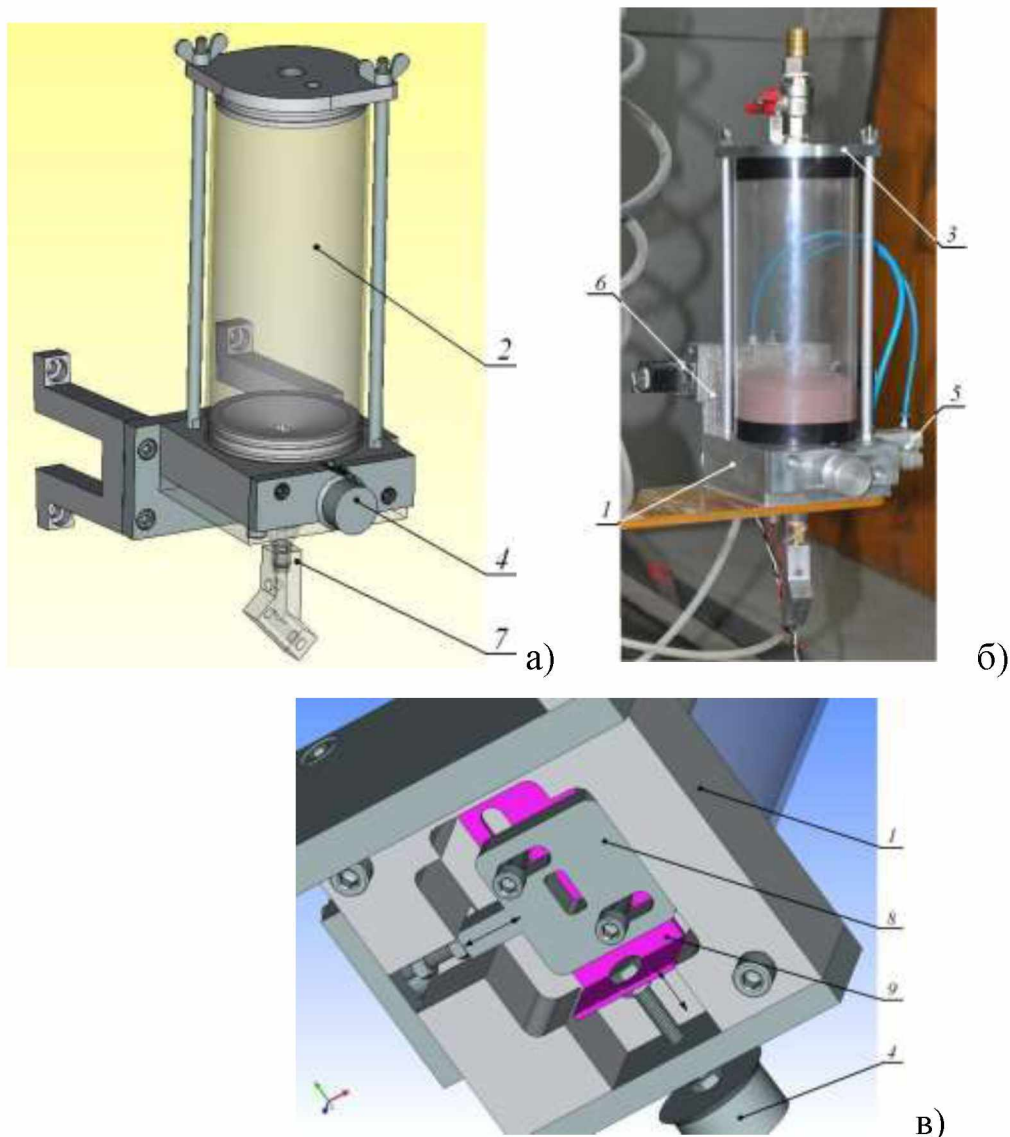


Рис. 2.3 – Система подачі абразиву: а) модель; б) виготовлена система; в) механізм затвора

Працює установка в такий спосіб. Насос-мультиплікатор створює потік рідини, що рухається, який зупиняється за допомогою пневмоклапану 1.

Після відкриття клапана головки 1 вода рухається до сопла 2 і, проходячи його, потрапляє в камеру змішування 3 з надзвуковою швидкістю. У соплі 2 відбувається перетворення потенційної енергії стисненого струменя води в кінетичну. У змішувальній камері до надзвукового струменя води підмішується

пісок, після чого вони змішуються у фокусуючій трубці 4. Таким чином формується ріжучий інструмент - надзвуковий струмінь рідини з абразивом. Тиск  $P$  заздалегідь задається оператором. Перемикання пневмо розподільника 6, який керує напрямком руху пневмо циліндра 5, забезпечує подачу абразиву змішувальну камеру. Через перемикання розподільника 6 можна забезпечити дискретну подачу абразиву в струмінь, а за рахунок різних тимчасових затримок включення можна домогтися різної частоти подачі піску.

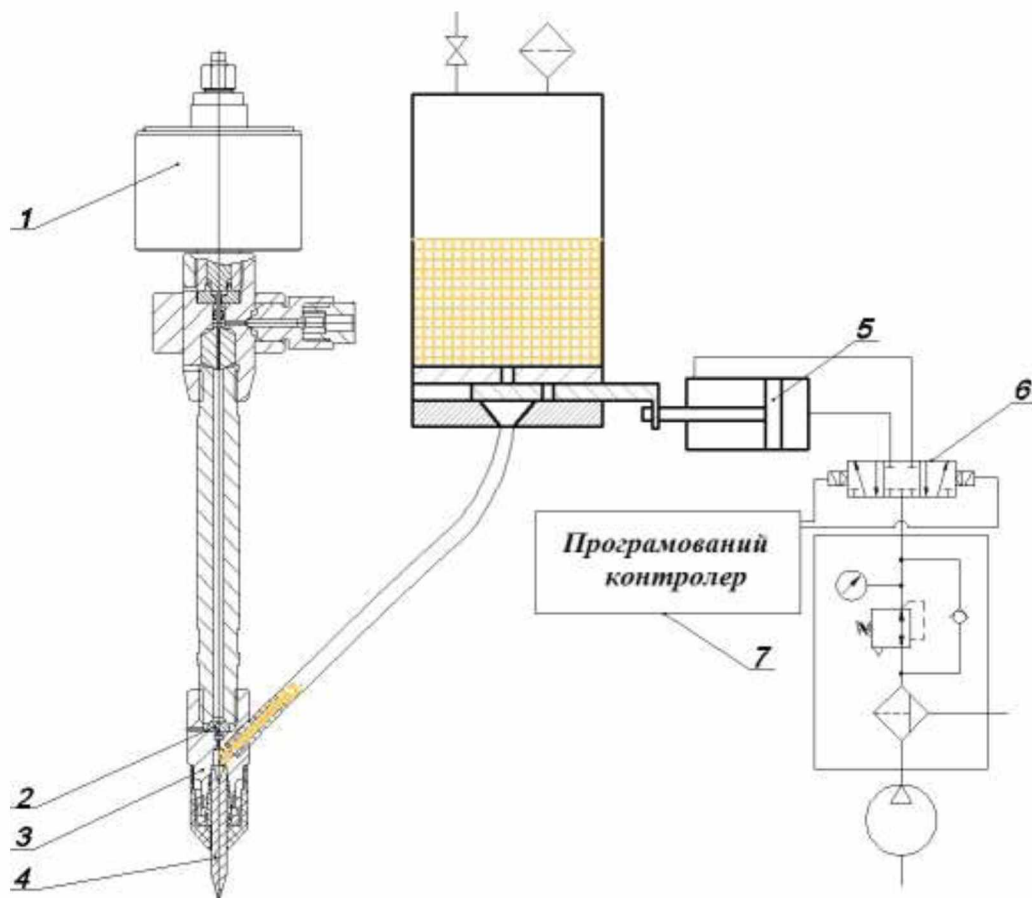


Рис. 2.4 – Конструкція гідро абразивної головки та схема системи подачі абразиву

Переміщення шибера 9 уперек руху затвора 8 (рисунок 2.3. в) забезпечує зміну витрати, що подається в струмінь абразиву. Програмований логічний контролер 7 видає сигнал на розподільник, що управляє, що дозволяє застосовувати різну частоту включення/вимикання подачі абразиву.

Технічні параметри основних деталей та вузлів, а також установки загалом представлені в табл. 2.1.

Таблиця 2.1 – Технічні параметри установки

Параметр, конструктивний елемент	Одиниця вимірювання	Значення
1 Робочий тиск	МПа	350
2 Відстань між матеріалом та зрізом фокусуючої трубки	мм	3
3 Діаметр сопла	мм	0,305
4 Діаметр фокусуючої трубки	мм	0,76
5 Фракція піску	Mesh мм	120 0,125
6 Витрата води	л/хв	2,5
7 Кут між фокусною трубкою та матеріалом	град	90

### 2.3 Зразки експериментальних досліджень розкрою заготовок

Аналіз застосування конструкційних матеріалів у машинобудуванні, суднобудуванні, метало листовому виробництві показав, що найбільша частка (порядку 70%) посідає металеві сплави на основі заліза (чавуни та сталі), мідь, алюміній. Крім вищеописаних матеріалів, останнім часом міцне місце у промисловості зайняли композиційні та неметалеві матеріали. Однак досвід розкрою композиційних (склопластик, вуглепластик, боропластик, текстоліт) і неметалевих матеріалів (гума, пластик) показує, що швидкість їх розкрою досить висока і досягає 100 мм/с.

Зважаючи на високу швидкість подачі соплової головки щодо матеріалу при різанні більшості композитних і неметалевих плит застосування дискретної подачі абразиву в струмінь недоцільно, тому що в цьому випадку буде непроріз.

Метою роботи є підвищення ефективності розкрою товстолистових металевих матеріалів, тому як об'єкт дослідження обрані матеріали, швидкість розкрою яких не перевищує 1 мм/с.

До таких відносяться метали, товщина яких перевищує 25 мм. Як приклад

було вирішено використовувати сталь, алюміній та мідь. Остання застосовується в машинобудуванні рідше сталі та алюмінію, проте досліджувати режими різання матеріалу, що має специфічні властивості, дуже цікаво. Мінімальна товщина матеріалу визначалася швидкістю прорізування, а максимальна – найпоширенішим застосуванням у промисловості. Номенклатура матеріалів і їх властивості, що використовуються в експериментах, наведені в таблиці 2.2.

Як заготовки запропоновано розглянути типові заготовки, представлені на рис. 2.5, а основні їх параметри показані в табл. 2.3.

Таблиця 2.2 – Властивості матеріалів, що використовувалися в експериментах

№	Матеріал	Щільність, г/см <sup>3</sup>	Твердість (за Брінеллем) НВ	Межа міцності при розтягу, МПа	Межа текучості, МПа	Товщина, мм
1	Алюміній Д16	2,7	25	350	250	40-80
2	Сталь45	7,8	180	500	350	30-60
3	Мідь М1	8,9	40	220	70	30-60

Таблиця 2.3 – Параметри одержуваних типових заготовок

№	Типова заготовка	Позначення розміру	Діапазон вимірювання, мм	Допуск
1	Плита	L	50-200	H14
		B	50-200	
		H	30-80	
2	Фланець	D	50-200	
		d	20-150	
		H	30-80	
3	Вал	D	50-200	
		H	30-80	

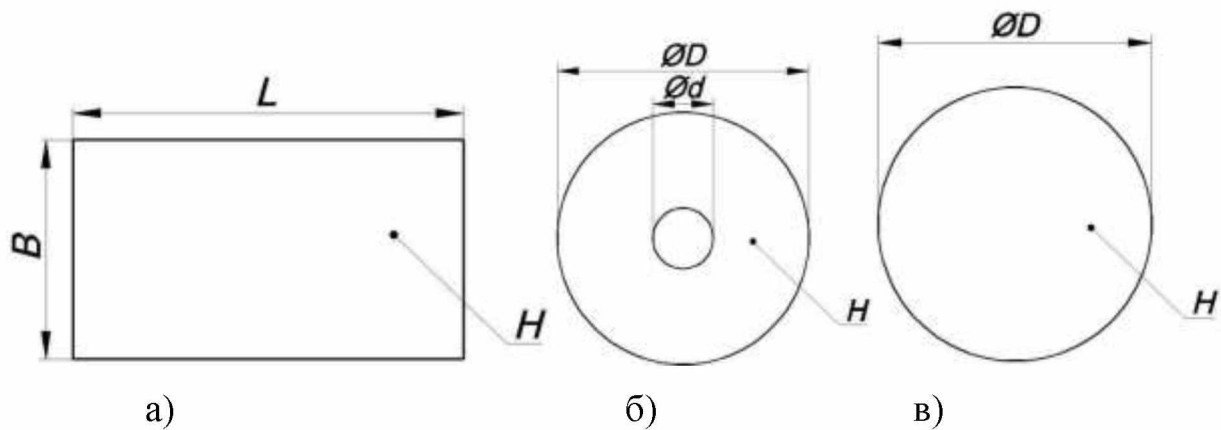


Рис. 2.5 – Ескізи типових заготовок: а) «Плита»; б) «Фланець»; в) «Вал»

## 2.4 Засоби вимірювання основних параметрів процесу гідрорізу

В експериментальних дослідженнях визначалися як параметри процесу (витрата абразиву, частота включення і вимикання піску), так і якість оброблених поверхонь (час наскрізного проколу матеріалу, шорсткість, хвилястість, точність розмірів одержуваних зразків).

Швидкість подачі соплової головки та тиск витікання води задавалися оператором на контролері FANUC та на насосі UNDE HPS 6045 відповідно.

Витрата абразиву визначався за допомогою секундоміру та ваг у процесі попередніх експериментів. Суть експерименту полягала в тому, що протягом деякого вимірюного часу в порожню ємність зсипався абразив. Потім пісок зважувався і визначалася витрата. Після серії експериментів було побудовано витратну характеристику виготовленої системи подачі абразиву, яка показана на рис. 2.6. Точність секундоміра 0,05 с. Для зважування піску застосовувалися електронні ваги фірми Saracity, зображені рис. 2.7, з похибкою виміру  $\pm 0,1$  грн.

Час наскрізного проколу (пірсингу) - допоміжної операції на початку кожного різу засікали за допомогою електронного секундоміра з точністю 0,05с.

Товщина металів, що розрізаються, була визначена листовим прокатом, проте перевірялася за допомогою штангенциркуля, точність якого становить 0,05 мм.

Шорсткість поверхні різу вимірювалася на контактному профілографі ПМ-210, зображеному на рис. 2.8, точність якого становить 8 мкм. Хвилястість

оброблених поверхонь вимірювалася на контурографі Mahr MarSurf PCV.

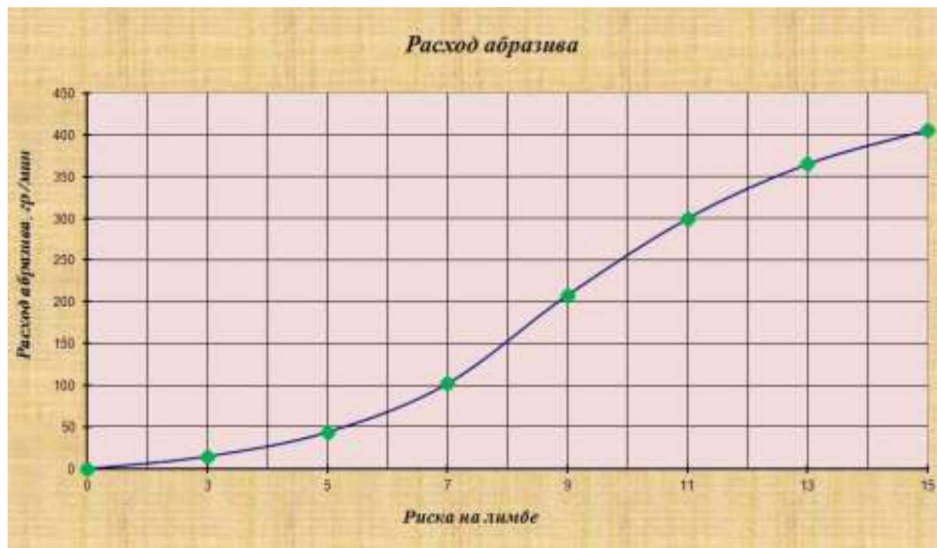


Рис. 2.6 – Витрата абразиву спроектованої системи подачі



Рис. 2.7 – Електронні ваги фірми Saracity



Рис. 2.8 – Контактний профілограф ПМ-210

Ширина різу вимірювалася на координатно-вимірювальній машині WERTH SCOPE CHECK, з похибкою вимірювань 2,5 мкм.

Точність одержаних з листового матеріалу контурів визначалася за допомогою координатно-вимірювальної машини DEA GLOBAL. Похибка вимірів цієї машини становить 2 мкм.

## **2.5 Методика дослідження основних параметрів процесу різку та якості оброблених поверхонь заготовок**

На кінцевий результат гідро абразивної обробки (продуктивність, точність, якість поверхні та інших.) впливає дуже багато чинників. Їх умовно можна розбити на чотири великі групи: параметри інструменту, фізико-механічні властивості матеріалу, що розрізається, обсяг оброблюваного матеріалу в одиницю часу, характер взаємодії. До параметрів інструменту у вигляді струменя можна віднести діаметр сопла та фокусуєної трубки (і їх знос у процесі обробки), тиск перед соплом, відстань між зрізом фокусуєної трубки та оброблюваним матеріалом, витрата абразивних частинок, а також щільність піску. Твердість, межа міцності при розтягуванні та стисканні, щільність, ударна в'язкість, межа пружності тощо. відносяться до фізико-механічних властивостей оброблюваного матеріалу. Під об'ємом матеріалу, що розрізається, в одиницю часу розуміються такі фактори: швидкість подачі соплової головки щодо оброблюваного матеріалу, товщина матеріалу. До характеру впливу струменя можна віднести кут впливу на матеріал (кут атаки), число проходів, розмір абразивних зерен, швидкість заглиблення абразивних частинок у матеріал, не стаціонарність струменя» (при динамічному різанні) та ін.

Усі вищеописані чинники впливають кінцевий результат обробки, а щоб виявити їх залежність, необхідно привласнити їм кілька значень (зазвичай 3-5). Таким чином, для повного дослідження, наприклад, шорсткості отриманої поверхні, необхідно провести близько мільйона різних комбінацій експериментів. Це потребує великих тимчасових, фінансових та розумових витрат. З метою скорочення часу та коштів, що витрачаються на проведення експериментів, було вирішено прийняти деякі фактори фіксованими та незмінними у процесі дослідження.

Висота зазору між оброблюваним матеріалом і трубкою, що фокусується, постійна і становить 3 мм. Ця величина визначена у процесі експериментальних досліджень, які входять у справжню роботу, як оптимальна, тому приймаємо її

постійної.

Відомо, що на швидкість закінчення струменя основний вплив чинить тиск. Через особливості роботи та конструкції мульти-плікаторного насоса тиск на різних тактах змінюється, тому часто застосовують ресивери – ємності для згладжування пульсацій. Безсумнівно, пульсації тиску за наявності ресивера згладжуються, проте вони присутні, отже, має місце пульсація швидкостей. Незважаючи на це, в процесі експериментальних досліджень приймаємо пульсацію тиску, що дорівнює нулю і тому швидкість закінчення струменя вважаємо постійною.

Можливості сучасних установок гідро абразивного розкрою, як говорилося вище, дозволяють досягти тисків до 600 МПа, проте найчастіше обробку на виробництві роблять на тиск 350-400 МПа, в окремих випадках 100-150 МПа. Знижений тиск обробки, що дорівнює 100-150 МПа, застосовується для різання (проколу) крихких матеріалів, таких як скло, кераміка, проте швидкість їх розкрою найчастіше вище 1 мм/с, що не дозволяє застосовувати запропонований метод для їх обробки. Тому дослідження роботи обмежуються різанням товстолистових металів (сталь, алюміній, мідь). У зв'язку з вищевикладеним приймаємо робочий тиск постійним і рівним 350МПа як найпоширеніший на промислових підприємствах.

Витрата абразиву впливає на швидкість струменя. За законом збереження імпульсу швидкість струменя падатиме, оскільки частина її енергії буде витрачатися на розгін абразивних частинок. Тобто чим більше частинок впроваджується в струмінь, тим більше енергії необхідно витратити для їхнього розгону.

Ріжуча здатність струменя більшою мірою належить абразивним часткам, що входять до її складу. Зі збільшенням кількості частинок у струмені відбувається зростання ріжучої здатності інструменту. Це призводить до можливості розкрою матеріалів або більшої товщини при аналогічній швидкості подачі сопла або зі збільшеною швидкістю подачі при обробці тих же товщин матеріалів.

Однак нарощування кількості абразиву в струмені не завжди позитивно позначається на ріжучих властивостях інструменту. Подальше збільшення концентрації абразивних частинок після деякого значення (назвемо його оптимумом) не призведе до підвищення продуктивності обробки, оскільки це призведе до гальмування струменя і, відповідно, втрати необхідної ерозійного руйнування енергії. На користь цієї теорії свідчать основні результати роботи [45], представлені рис. 2.9.

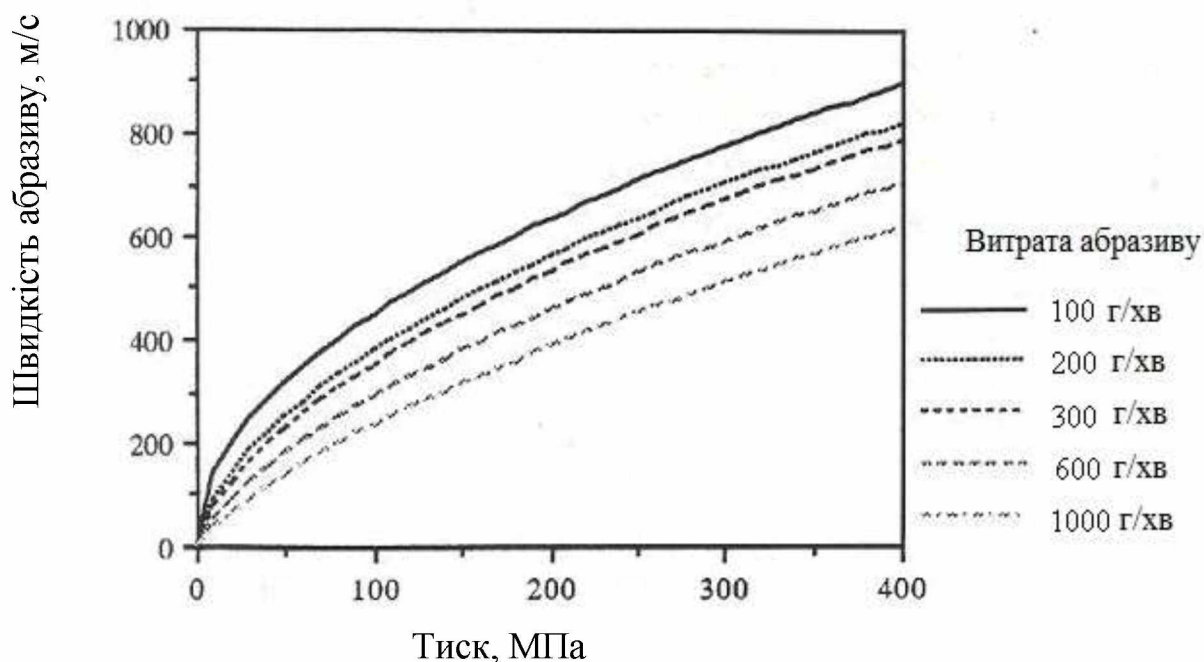


Рис. 2.9 – Залежність швидкості частинок від тиску та витрати абразиву

До кожного матеріалу дослідним шляхом визначено оптимальне значення витрати абразиву, що й використовуватиметься у процесі проведення експериментальних досліджень, як основне. Тобто дискретність (поперемінне включення та вимикання подачі абразиву) буде здійснюватись при налаштуванні шибера на оптимальну витрату абразиву.

Крім усього іншого, припускаємо, що ізотропний матеріал, що розрізається, а розподіл піску по перерізу струменя нормальний; знос сопла та фокусуєної трубки незначний, абразивні частинки мають однаковий розмір та властивості.

## **2.6 Методика визначення часу наскрізного різку товстолистових металевих матеріалів**

Експериментальне дослідження наскрізного проколу полягає у вимірі часу пірсингу. Пірсинг - це допоміжна операція у процесі гідро абразивного розкрою, яка полягає у наскрізному проколі матеріалу. Пірсинг необхідний для того, щоб струмінь мав вихід з матеріалу, несучи таким чином продукти різання, тепло. Отже, пірсинг необхідний у тому, щоб процес різання почався. При розкрої тонких листових матеріалів товщиною до 20 мм час проколу зазвичай становить близько 1 хвилини, проте при різанні товстих матеріалів воно може досягати 10-15 і більше хвилин, що в деяких випадках є більш суттєвою часткою по відношенню до загального часу обробки.

За фактори, що впливають на час наскрізного проколу, які враховувалися при експериментальних дослідженнях, приймаються властивості матеріалу (вид матеріалу), його товщина, витрата абразиву, спосіб подачі (частота включення/вимикання тощо).

## **2.7 Методика визначення якості поверхні заготовок**

Якість обробленої поверхні – це комплексний показник, що характеризується точністю, шорсткістю, хвилястістю, станом поверхневого шару тощо.

Незважаючи на те, що на всі показники якості при гідро абразивній обробці впливають тиск і швидкість подачі головки щодо матеріалу, в процесі експериментів варіювати ці параметри не будемо. Після проведення попередніх пошукових експериментів для кожного матеріалу було визначено оптимальну швидкість подачі головки, яка і використовувалася при проведенні основних досліджень.

Крім цього відзначимо, що в рамках цієї роботи не входили дослідження впливу основних параметрів гідро абразивної обробки на фізико-механічні, хімічні та технологічні властивості поверхневого шару, що отримується при

різанні. Пов'язано це з тим, що в переважній кількості випадків при розкрої товстолистових металів властивості поверхневого шару не важливі через подальшу обробку або відповідальність обробленої поверхні деталі.

Планування експериментів щодо визначення взаємозв'язків якості оброблених поверхонь при стаціонарному та дискретному способі подачі абразиву аналогічно до досліджень з визначення часу наскрізного проколу, які докладно описані нижче. Як потрібна функція буде шорсткість, хвилястість, кут конусності і точність, а фактори, що впливають на них, - товщина матеріалу, його властивості і витрата абразиву. У стаціонарному способі подачі піску витрата визначатиметься площею перерізу каналу, а при дискретній подачі - частотою та часом знаходження клапана подачі у відкритому стані. У загальному вигляді кореляцію параметрів якості поверхні від факторів, що впливають, можна виразити наступними залежностями (2.1) для стаціонарного способу подачі, і (2.2) для дискретного.

$$Y = k \cdot H^x \cdot Q^y, \quad (2.1)$$

$$Y = k \cdot H^x \cdot n^y \cdot t_o^z, \quad (2.2)$$

де  $Y$  - досліджуваний параметр.

Визначення якості оброблених гідро абразивним струменем поверхонь проводилося на плоских, оброблених гідро струєю поверхнях сталі 45 алюмінію Д16, міді М1, отриманих при різних режимах різання.

Якість обробленого гідро абразивного струменя поверхні, особливо при різі матеріалів товщиною понад 25-30 мм, неоднорідна. Неоднорідність проявляється у вигляді погіршення якості поверхні в міру віддалення від верхньої кромки матеріалу, що розрізається, і показана на рис. 2.10 . Зі збільшенням швидкості подачі гідро абразивної головки вздовж оброблюваної заготовки інтенсивно зростає відставання струменя, збільшується хвилястість на нижній кромці матеріалу. Інакше кажучи, зі збільшенням швидкості подачі нижні шари матеріалу не встигають «руйнуватися», і виходить таким чином або підвищена шорсткість, або в гіршому випадку непроріз.

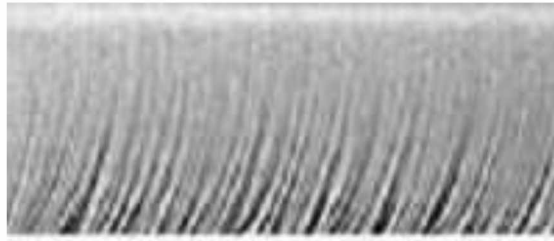


Рис. 2.10 – Поверхня кромки різку

Через неоднорідність якості поверхонь, отриманих різанням гідро абразивним струменем, умовно виділяється 4-5 груп, що характеризують параметри різку. На рис. 2.11 зображені поверхні різів сталі із різною якістю.

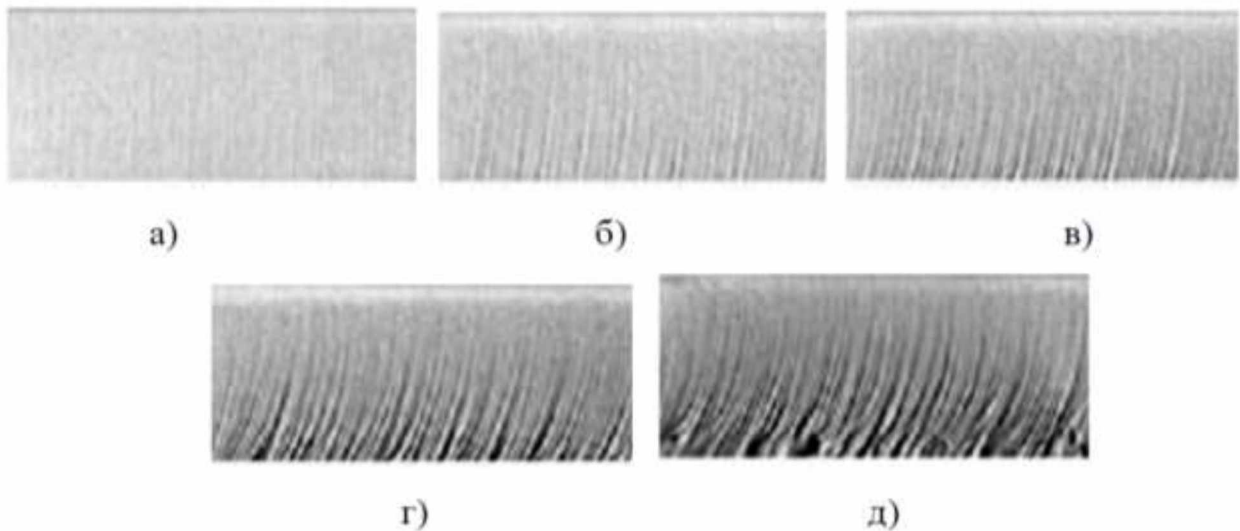


Рис. 2.11 – Поверхня кромки різку: а), б), в), г), д) – якість сталі обробленим гідро абразивним струменем

Для поверхні, зображеної рис. 2.11 а, характерна найвища точність форми заготовлі і найменша шорсткість поверхні, що досягається з допомогою дуже низької швидкості подачі головки. Борозни на поверхні в цьому випадку не видно на відміну від поверхні, зображеної на рис. 2.11 б, якій, однак, властиві висока точність форми та незначна шорсткість. Звичайний технологічний різ, що забезпечує хорошу якість при економічній швидкості подачі, показано на рис. 2.11 в. На поверхні різку такої якості починають чітко виднітися борозенки. Грубий різ з виразним, але регулярним малюнком борозен, що досягається за рахунок 70-80% швидкості подачі від максимальної, зображений на рис. 2.11 г.

Поверхня, характерна для різання роздільної, на якій спостерігаються виразні нерегулярні дефекти (грубі борозенки,

Таким чином, для порівняння якості поверхонь, отриманих гідроабразивним струменем на різних матеріалах різної товщини, запропоновано запровадити певну величину-коефіцієнт нерівномірності поверхні  $K_{пов}$ . Цей коефіцієнт показуватиме відношення висот мікронерівностей у різних місцях поверхні, як показано у формулі (2.3). Очевидно, що якщо коефіцієнт нерівномірності  $K_{пов}$  близький або дорівнює одиниці, то якість поверхні на вході та виході струменя стабільно або однаково. Чим більше одиниці число  $K_{пов}$ , тим більше різниця мікронерівностей у різних місцях обробленої поверхні.

$$K_{пов} = \frac{Ra_{вих}}{Ra_{вх}}. \quad (2.3)$$

Очевидно, що у разі оцінки поверхонь, отриманих гідроструєю, необхідно оцінювати якість поверхні за однакових умов. Якщо на вході струменя в матеріал можна говорити про шорсткість, то на виході найчастіше є хвилястість. Хвилястість є елементарним відхиленням поверхні будь-якої форми [26]. Під хвилястістю поверхні розуміють сукупність нерівностей, що періодично повторюються, у яких відстань між суміжними височинами або западинами перевищує базову довжину  $l$ . Хвилястість займає проміжне положення між відхиленнями форми та шорсткістю поверхні. Визначати шорсткість оброблених поверхонь товстолистових матеріалів прийнято на лінії, що віддаляється від верхньої кромки різку на відстань 10% від товщини зразка. Лінія вимірювання шорсткості показана рис. 2.12.

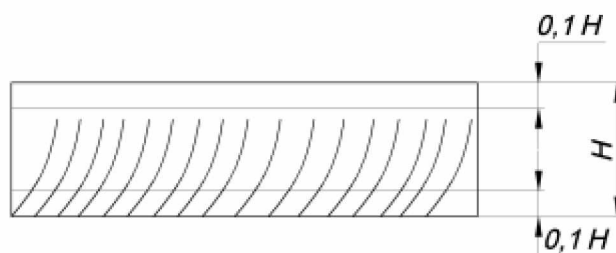


Рис. 2.12 – Схема вимірювання обробленої поверхні

Хвилястість визначатимемо на відстані 10% від нижньої кромки різку, як

показано на рис. 2.12. Шорсткість виражатимемо висотою мікронерівностей, а хвилястість - побудовою профілограм та їх вимірюванням. Після вимірювання шорсткості та хвилястості необхідних поверхонь будемо визначати коефіцієнт  $K_{\text{пов}}$  і оцінюватимемо рівномірність якості поверхні.

## 2.8 Методика визначення точності профілю заготовок

Точність гідро абразивного розкрою листових матеріалів визначається збігом заданих на кресленні розмірів із розмірами, отриманими на деталі після обробки.

Точність та повторюваність отримання деталей на 70% залежить від точності та повторюваності обладнання, на якому відбувається обробка. Інструмент гідро абразивної обробки нежорсткий, має місце відставання струменя на нижній кромці щодо верхньої кромки матеріалу, що особливо суттєво при великих швидкостях переміщення. Найчастіше отримання деталі з необхідною точністю супроводжується пробними різаними і підбором режимів для конкретних умов (тиску, властивостей матеріалу, властивостей абразиву, зазору між матеріалом і трубкою, що фокусує, зносом сопла). Причому застосування цих режимів на іншій машині не завжди призводить до ідентичного результату обробки.

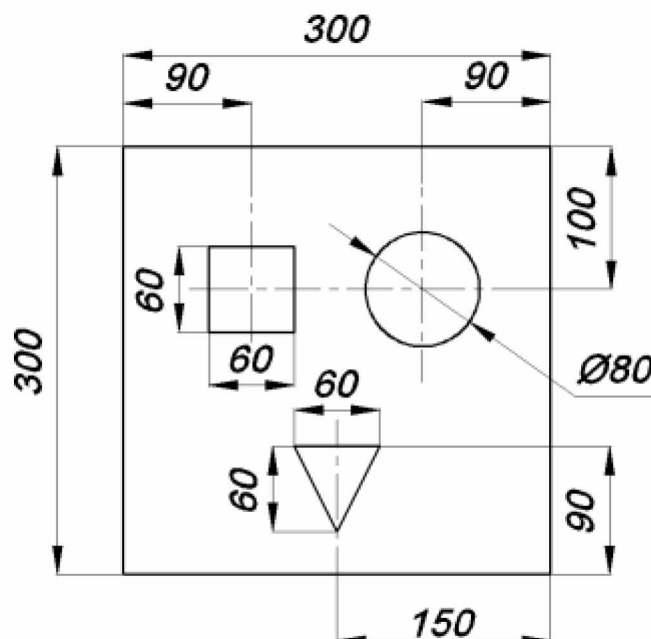


Рис. 2.13 – Тестова деталь

Однак необхідно дослідити, яким чином дискретна подача абразиву в струмінь води впливає на точність деталей, що отримуються, в нашому випадку на точність профілю деталі. Так як експерименти проводяться на одному обладнанні, точність одержуваного профілю будемо здійснювати порівнянням деталей, отриманих з використанням стаціонарної та дискретної подачі абразиву в струмінь. Як тестовий профіль будемо використовувати зразок, зображений на рис. 2.13 , який вирізаний з алюмінію товщиною 60 мм.

### **Висновки до розділу**

Запропонована схема установки дозволяє здійснити не тільки стаціонарну (постійну), а й дискретну подачу абразиву.

Вибране обладнання для проведення експериментів забезпечує необхідну вимірну базу для визначення параметрів системи (витрата, частота), параметрів якості оброблених поверхонь (шорсткість, хвилястість).

## 3 РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ

### 3.1 Вплив параметрів подачі абразиву на якість оброблених поверхонь заготовок

Попередні експериментальні дослідження показують, що при однакових витратах абразиву на різання листових матеріалів із застосуванням різних способів подачі абразиву якість оброблених поверхонь може значно відрізнятися. Таким чином, у подальших експериментах необхідно було визначити частоту включення приводу подачі абразиву для досягнення найкращої якості оброблених поверхонь.

На рис. 3.1 приведені оброблені гідро струменем поверхні алюмінію з використанням стаціонарної та дискретної подачі абразиву. В обох випадках витрати піску були однаковими, оскільки швидкість подачі соплової головки у разі застосування стаціонарної системи вдвічі вище, ніж при розкрій з дискретною подачею піску.

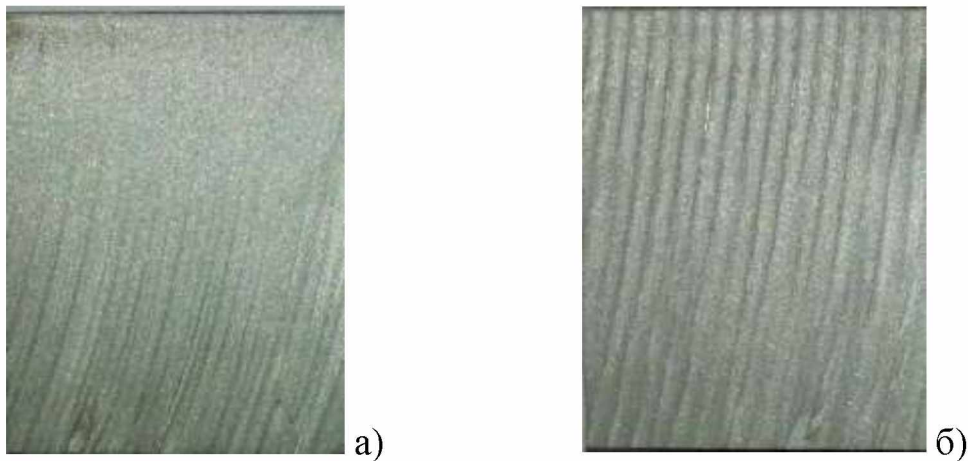


Рис. 3.1 – Поверхні, оброблені гідро струменем із застосуванням різних систем подачі абразиву: а – стаціонарна; б – дискретна

З представлених рисунків видно, що при обробці зі стаціонарною подачею абразиву (рис. 3.1а) шорсткість змінюється в осьовому напрямку руху інструменту від низького (порядку 0,01 мм) на початку різку до високого (порядку 0,4-0,6 мм) на виході струменя. На рис. 3.1 б хвилястість обробленої поверхні практично однакова становить приблизно (0,3-0,4 мм). На рис. 3.2 показані

профілограми поверхонь, оброблених із застосуванням різних способів подачі, отримані на контурографі ПМ-210. Синім кольором (крива 1) показана профілограма поверхні різку алюмінію (на виході з матеріалу) з використанням дискретної подачі, червоним (крива 2) - профілограма поверхні різку алюмінію (на виході з матеріалу) з використанням стаціонарної подачі.

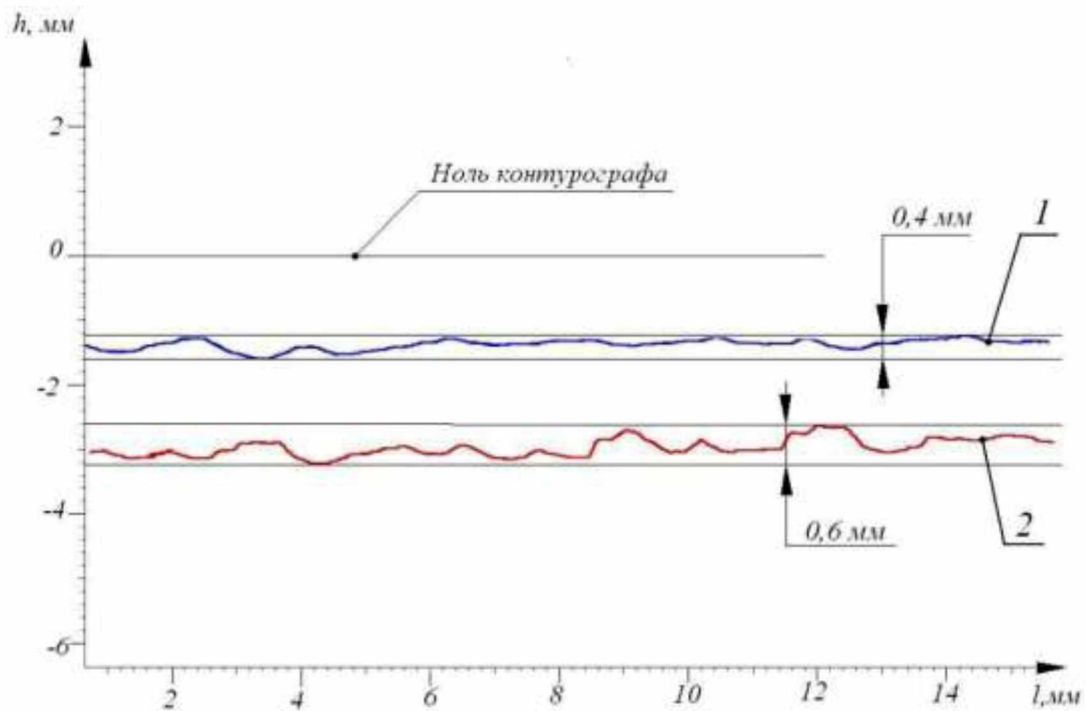


Рис. 3.2 – Профілограми нижньої частини кромки зразків, отриманих з використанням різних систем подачі

Профілограми показують, що при однакових витратах піску на розкрій алюмінію можна скоротити припуск на подальшу обробку на 50%, отримавши якість поверхні, рівномірну по всій площині різання.

Показане відмінність якості поверхонь при однаковій витраті піску поставило завдання вивчити, як параметри приводу дискретної подачі абразиву впливають ширину різку, точність, хвилястість, шорсткість та максимальну швидкість прорізання.

### **3.2 Вплив параметрів подачі абразиву на ширину різку при розкрій заготовок із товстолистових металів**

Додавання абразивних частинок у надзвуковий струмінь позитивно

позначається на його ріжучих здібностях, проте при цьому збільшується кут розпилу (конусності). Конусність визначає компактність струменя, отже, питомий тиск на одиницю площі матеріалу. Чим менша пляма контакту струменя з матеріалом, тим інтенсивніше відбуваються процеси руйнування матеріалів, що позначається на швидкості розкрою. Очевидно, що збільшення розпилу надзвукового гідро абразивного струменя призводить до збільшення ширини різку.

Крім наявності абразиву в струмені, на ширину різку великий вплив робить швидкість подачі соплової головки щодо матеріалу. Чим вища швидкість подачі, тим менша ширина різку, і навпаки. Зношування сопла і фокусуєної трубки також призводить до збільшення ширини різку, проте в процесі експериментальних досліджень це не враховувалося, так як час проведення експериментів мало в порівнянні з робочим ресурсом цих витратних матеріалів.

Для визначення ширини різку було проведено серію експериментів, суттю яких було одержання щілинних врізань з використанням стаціонарної та дискретної системи подачі абразиву та їх вимірювання згідно зі схемою (рис. 3.3).

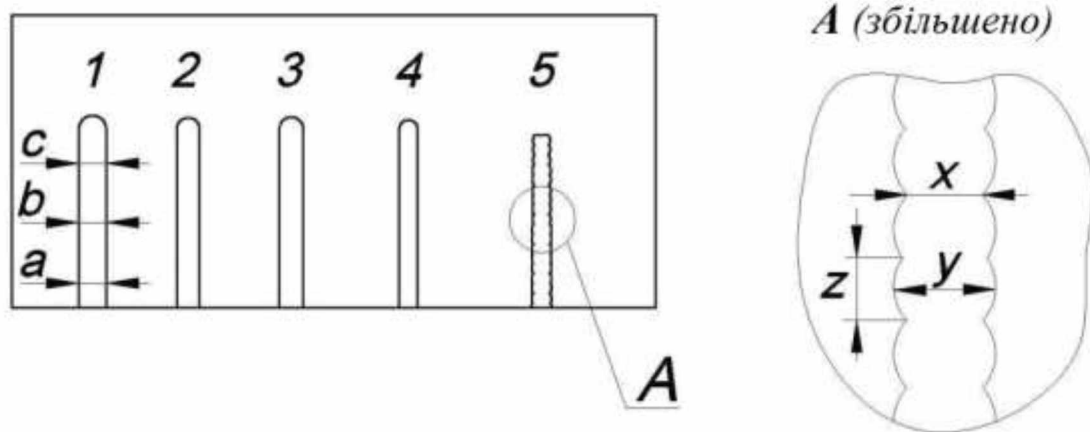


Рис. 3.3 – Схема вимірювання ширини різку

Загальний вигляд одержаних зразків показано на рис. 3.4, фотографії збільшених пропиливі показано на рис. 3.5.

Швидкість подачі соплової голівки щодо листової заготовки визначалася емпіричним шляхом і дорівнює швидкості розділового різання. Під швидкістю розділової різання розуміється максимальна швидкість подачі, яка забезпечує наскрізний проріз матеріалу. Якість поверхні різку в цьому випадку найгірша,

проте продуктивність розкрою висока.



Рис. 3.4 – Зразки для вимірювання ширини різку ( а – сталь, б – алюміній)

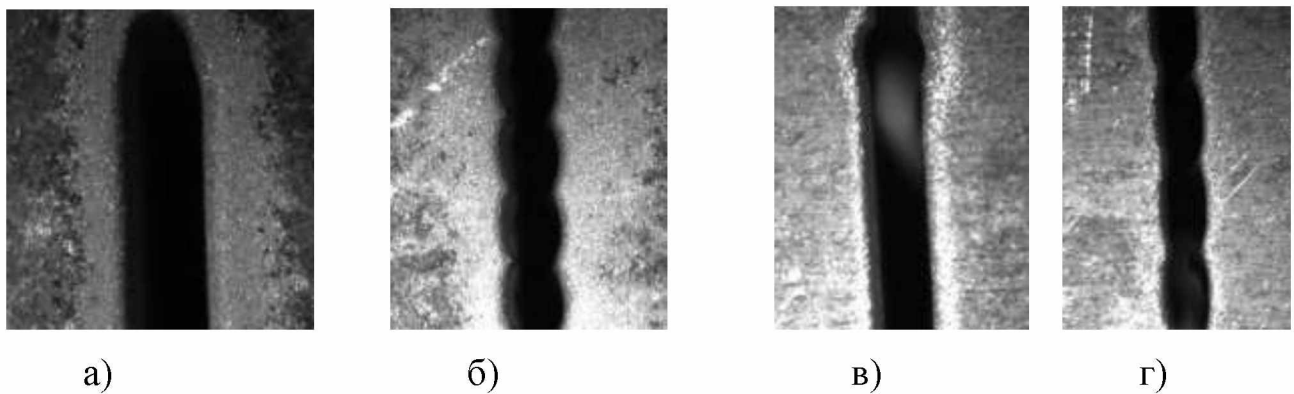


Рис. 3.5 – Збільшені фотографії наскрізного різку: а) прямий різ сталі; б) хвилястий різ сталі; в) прямий різ алюмінію; г) хвилястий різ алюмінію

Так як при наявності абразиву в струмені кут розпилу, а отже, і ширина різку вище, то при використанні дискретного способу подачі абразиву спостерігається хвилястість різку з деяким стабільним кроком. Причому чим вища швидкість подачі соплової головки або нижча частота включення абразиву, тим крок хвилі більший, і навпаки.

Геометричні параметри верхніх кромки різів представлені в табл. 3.1 . У разі різку зі стабільними прямими кромками проводилися вимірювання ширини в трьох місцях, а різ з хвилеподібним профілем вимірювався за трьома параметрами (найменша та найбільша ширина, крок) згідно зі схемою вимірювань за рис. 3.3.

Таблиця 3.1 – Результати вимірів геометричних розмірів наскрізних різів

Матеріал	Режим різання	a, мм	b, мм	c, мм	x, мм	y, мм	z, мм
	1 мм/с, стац.	1,1412	1,1362	1,1820			
	1 мм/с, 2 Гц	1,2388	1,1769	1,1815			

Алюміній	1 мм/с, 1 Гц				1,0105	1,3745	0,6766
	1 мм/с, 1 Гц				0,9553	1,1484	1,1087
	1 мм/с, 1 Гц				1,0283	1,1880	0,9689
	1 мм/с, 0,5 Гц				0,6609	1,1569	2,0998
	1 мм/с, 0,5 Гц				0,8803	1,1740	1,9567
	1 мм/с, 0,5 Гц				0,9502	1,1547	1,9217
Сталь	0,4 мм/с, стац.	1,4025	1,4089	1,3967			
	0,4 мм/с, 2 Гц	1,2560	1,2843	1,3124			
	0,4 мм/с, 1 Гц	1,2560	1,2781	1,2953			
	0,4 мм/с, 0,5 Гц	1,2775	1,3652	1,2545			
	0,4 мм/с, 0,25 Гц				1,0352	1,3095	1,5898
	0,4 мм/с, 0,25 Гц				1,0012	1,3491	1,6002
	0,4 мм/с, 0,25 Гц				1,0067	1,3220	1,5816

Після усереднення значень геометричних розмірів, описаних у таблиці 3.1, були отримані такі результати, подані у таблиці 3.2. Усереднені величини визначалися середнім арифметичним геометричними параметрами різь, наведеними в таблиці 3.1.

Таблиця 3.2 – Усереднені розміри різів

Матеріал	Режим різання	Ширина			
		Прямий різ	Хвилястий різ		
			h, мм	x, мм	y, мм
Алюміній	1 мм/с, стац.	1,1531			
	1 мм/с, 2 Гц	1,1991			
	1 мм/с, 1 Гц		0,9980	1,2369	0,9181
Сталь	0,4 мм/с, стац.	1,4027			
	0,4 мм/с, 2 Гц	1,2842			
	0,4 мм/с, 1 Гц	1,2765			
	0,4 мм/с, 0,5 Гц	1,2991			

	0,4 мм/с, 0,25 Гц		1,0144	1,3269	1,5905
--	-------------------	--	--------	--------	--------

Можна зробити висновок, що при розкрої алюмінію товщиною 40 мм лише при частоті 2 Гц спостерігається рівний різ зі стабільною шириною. Зі зниженням частоти утворюється хвилястість, причому крок хвилі збільшується. Якщо швидкість подачі соплової головки при розкрої алюмінію товщиною 40 мм становить 1 мм/с, то при частоті дискретної подачі, наприклад, 1 Гц, струмінь, що виходить із сопла, рухається без абразиву 0,5 мм, що і зумовлює появу «шийки» на різі.

Чим нижче частота дискретної подачі, тим більша відстань проходить струмінь без піску щодо матеріалу, що спричиняє збільшення кроку хвилі. Застосування дискретної подачі при розкрої алюмінію дозволяє дещо скоротити ширину різу, а при різі сталі максимальне скорочення ширини різу спостерігається при частоті 1 Гц.

На рис. 3.6 показана залежність ширини різу сталі  $h$  від частоти дискретної подачі  $n$ . Графік практично лінійний, ширина різу коливається близько 1.3 мм і від частоти подачі не залежить. Однак, незважаючи на незалежність ширини різу від частоти подачі, дискретний спосіб все ж таки дозволяє домогтися скорочення ширини різу, в порівнянні зі стаціонарною подачею абразиву.

На рис. 3.7 зображено залежність кроку хвилі при різі алюмінію 40 мм за швидкості 1 мм/с. Графік показує, що зі збільшенням частоти дискретної подачі крок зменшується. Крайньою ситуацією в цьому випадку буде мінімальний крок за максимальної частоти, тобто фактично прямолінійний різ при стаціонарній подачі абразиву, що і показує експеримент. Рівняння регресії (3.1), отримане під час обробки експериментальних даних, пов'язує крок хвилі  $z$  із частотою подачі абразиву  $n$ :

$$z = -1,599 \ln(n) + 0,91, \text{ мм} \quad (3.1)$$

Аналізуючи отриманий графік, можна відзначити, що можливе одержання обробленої поверхні без хвилястості.

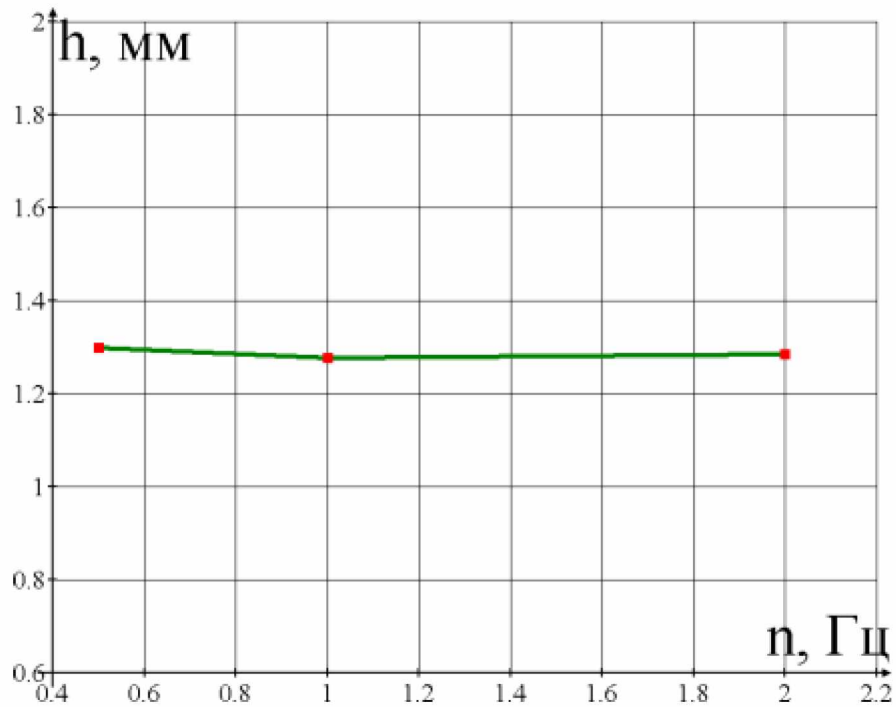


Рис. 3.6 – Залежність ширини різні сталі товщиною 40 мм від частоти дискретної подачі

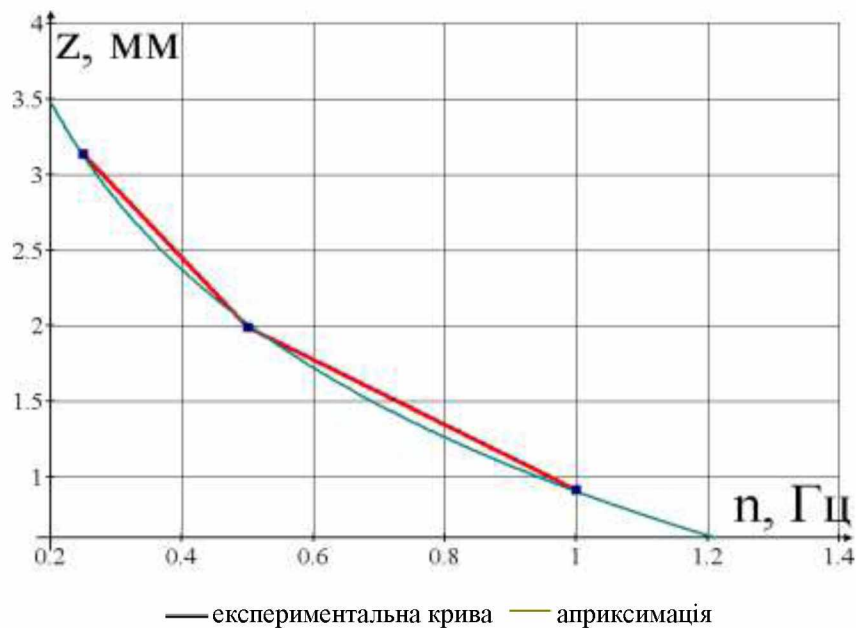


Рис. 3.7 – Залежність кроку хвилі різні алюмінієвого листа товщиною 40 мм від частоти приводу дискретної подачі

Графік на рис. 3.8 ілюструє залежність висоти хвилястості на верхній кромці різні, отриманої на алюмінієвій заготовці товщиною 40 мм, від частоти включення приводу подачі абразиву при дискретній подачі. Залежність показує, що чим вища частота дискретної подачі піску, тим висота хвилі нижча. Це

відбувається через зменшення шляху, пройденого без абразиву, крім того, експерименти показують, що висота хвилі, отримана при частоті подачі 1 Гц, у 2 рази менше, ніж при частоті 0,25 Гц. Залежність величини хвилястості від частоти подачі абразиву представлена рівнянням регресії (3.2), отримане шляхом апроксимації експериментальних даних:

$$\frac{y-x}{2} = l_e = 0,1183n^{-0,52}, \text{ мм} \quad (3.2)$$

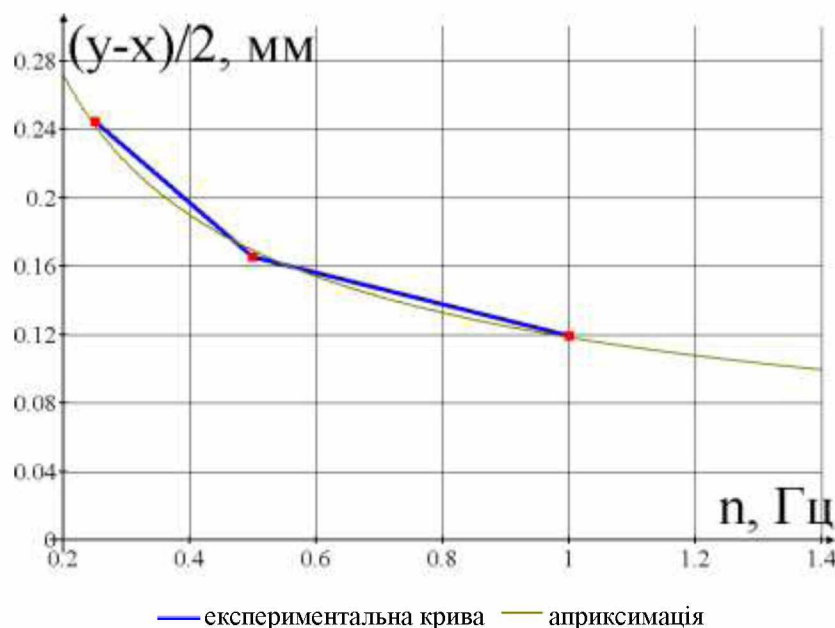


Рис. 3.8 – Залежність висоти хвилястості різання алюмінієвого листа завтовшки 40 мм від частоти приводу дискретної подачі

Графік на рис. 3.8 ілюструє можливість скорочення висоти хвилястості, отриманої із застосуванням дискретного способу подачі абразиву шляхом збільшення частоти приводу подачі

### 3.3 Вплив параметрів подачі абразиву на точність профілів заготівель

Точність обробки визначалася шляхом вимірювання геометричних розмірів заготовок тестових, отриманих із застосуванням різних способів подачі абразиву. З листового алюмінієвого матеріалу товщиною 60 мм вирізалася деталь, креслення якої зображено рис. 3.9 а, а сама отримана деталь рис. 3.9 б.

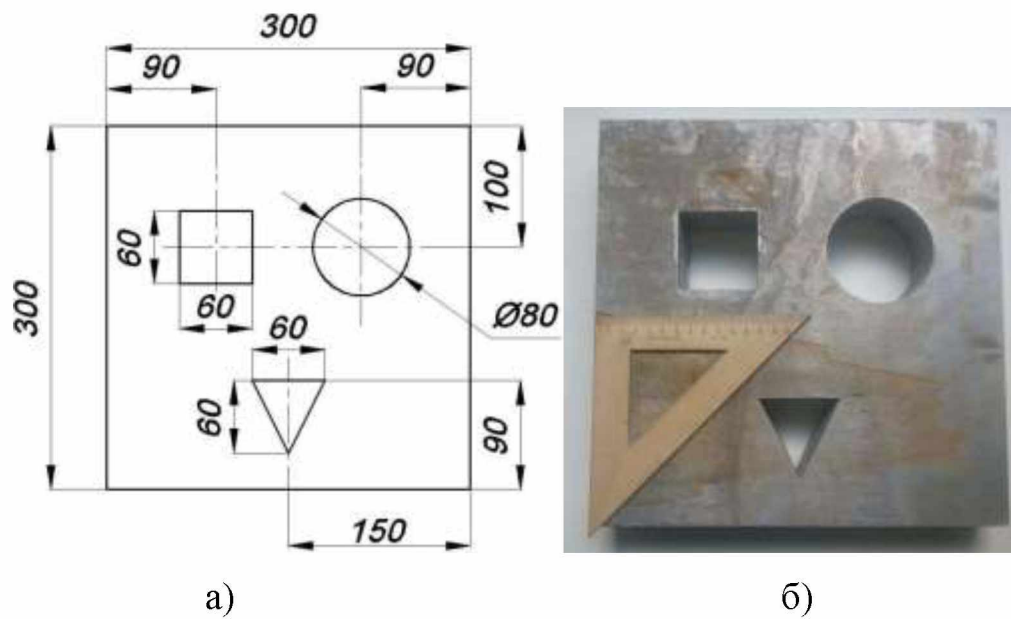


Рис. 3.9 – Деталь для визначення точності: а) креслення б) вирізаний зразок з алюмінію

Необхідність отримання точного профілю при гідро абразивному різанні висуває жорсткі вимоги, однією з яких є облік ширини різку. Основні фактори, що впливають на ширину різку, описані вище. Експериментальні дослідження щодо визначення точності отримання заданих форм проводилися з використанням однієї програми для контролера, що дозволило позбутися випадкових похибок верстата. При різанні деталі із застосуванням дискретної подачі абразиву частота становила 2 Гц. Зважаючи на те, що в цьому випадку ширина різку дещо менша, ніж при стаціонарній подачі, лінійні розміри внутрішніх контурів дещо зменшилися, а зовнішнього контуру - збільшилися. Це підтверджується вимірами, наведеними в табл. 3.3.

Таким чином, експериментальні дослідження щодо застосування дискретної подачі абразиву показують, що при деяких режимах точність одержуваних із застосуванням цього способу деталей практично збігається з точністю обробки зі стаціонарною подачею абразиву. Це свідчить, що з використанням дискретної подачі абразиву з певними параметрами існує можливість отримання деталей без втрати точності зі скороченням витрати абразиву, що, безумовно, позначиться зниження вартості обробки.

Відхилення розмірів, виміряні на зразках, представлені у табл. 3.3.

Таблиця 3.3 – Основні розміри тестових зразків

Вимірювальний елемент	Стаціонарна подача		Дискретна подача	
	Розмір, мм	Вимірювання, мм	Розмір, мм	Вимірювання, мм
Кругле вікно	Ø 80	78,85	Ø 80	78,85
Трикутне вікно (сторона)	60	58,38	60	58,36
Трикутне вікно (висота)	60	58,70	60	58,67
Квадратне вікно	60	59,11	60	59,08
Габаритний розмір	300	300,95	300	300,91
Верт. база квадрата	100	101,24	100	101,22
Гор. база квадрата	90	91,06	90	91,05
Верт. база круга	100	101,24	100	101,22
Гор. база круга	90	90,23	90	90,21
Гор. база трикутника	150	150,23	150	150,18
Верт. база трикутника	90	91,18	90	91,15

### 3.4 Вплив параметрів подачі абразиву на шорсткість та хвилястість різання оброблених поверхонь заготовок

Для визначення якості отриманих гідро абразивним струменем поверхонь було проведено кілька серій експериментів із застосуванням різних матеріалів. Метою експериментів є встановлення впливу параметрів подачі абразиву на мікронерівності поверхні. На рис. 3.10 зображені отримані у процесі експериментів зразки.



а)



б)

Рис. 3.10 – Зразки, отримані в процесі експериментів: а) поверхні різь алюмінію; б) поверхня міді

Результати вимірювань шорсткості поверхонь занесені до табл. 3.4.

Таблиця 3.4 – Результати вимірів зразків

Подача абразиву		Ra, мкм	Rz, мкм	Rmax, мкм
Алюміній 40 мм				
Стационарна	Верх	5,02	31,75	41,54
	Низ	37,42	174,42	249,23
2Гц	Верх	4,35	30,05	36,53
	Низ	12,76	60,29	95,31
0,5 Гц Верх	13,34	60,04		69,31
	Низ	42,9	183,47	299,58
Мідь 30 мм				
Стационарна Вір	Верх	4,46	30,43	37,27
	Низ	7,36	37,48	47,86
2Гц	Верх	7,21	44,87	49,31
	Низ	20,45	112,33	139,32
1Гц	Верх	5,43	58,14	158,92
	Низ	59,50	227,24	350,59
0,5 Гц	Верх	37,87	76,95	196,3
	Низ	66,44	261,69	394,13

На рис. 3.11 представлені графіки залежності шорсткості поверхні алюмінію від частоти подачі абразиву.

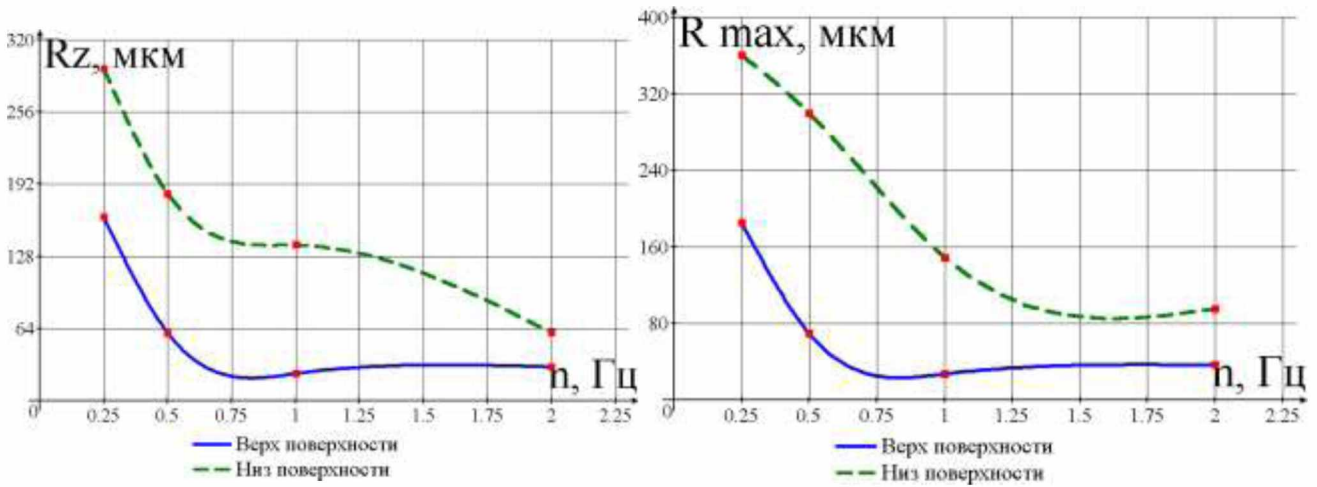


Рис. 3.11 – Залежність шорсткості поверхні алюмінію від частоти подачі абразиву (  $V=1$  мм/с,  $P=350$  МПа,  $Q=250$  гр/хв.)

Залежність коефіцієнта нерівномірності поверхні  $K_{пов}$  від частоти подачі абразиву показано рис. 3.12.

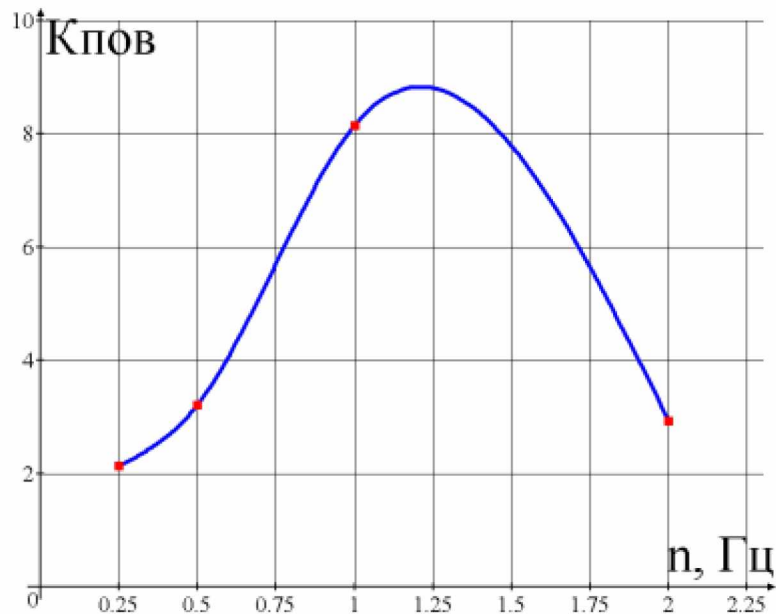


Рис. 3.12 – Залежність коефіцієнта нерівномірності  $K_{пов}$  від частоти подачі при розкріі алюмінію

Графік рис. 3.12 показує, що максимальне відношення висот мікронерівностей на поверхні алюмінію виходить при частоті включення абразиву 1 Гц. Слід зазначити, що при стаціонарній подачі піску при розкріі

алюмінію коефіцієнт  $K_{\text{пов}}=7,45$ . Це означає, що сталість висот мікронерівностей при частоті подачі абразиву 0,25 Гц і 2 Гц в 2-3 рази вище, ніж при стаціонарній подачі піску. На рис. 3.13 показана профілограма верхньої кромки поверхні різку алюмінію, отриманий при частоті подачі абразиву 0,25 Гц. На профілограмі чітко видно піки хвиль мікронерівностей, що свідчить про сталість кроку та висоти хвилястості отриманої поверхні.

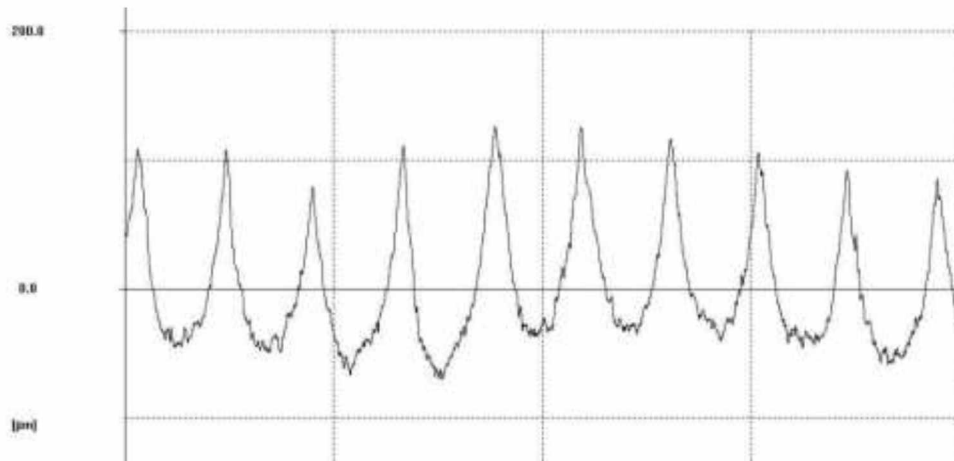


Рис. 3.13 – Профілограма верхньої кромки поверхні різку алюмінію (частота подачі 0,25 Гц)

Зі збільшенням частоти подачі піску крок хвилі зменшується, про що свідчить профілограма поверхні алюмінію, отримана із застосуванням дискретної подачі піску з частотою 0,5 Гц (рис. 3.14).

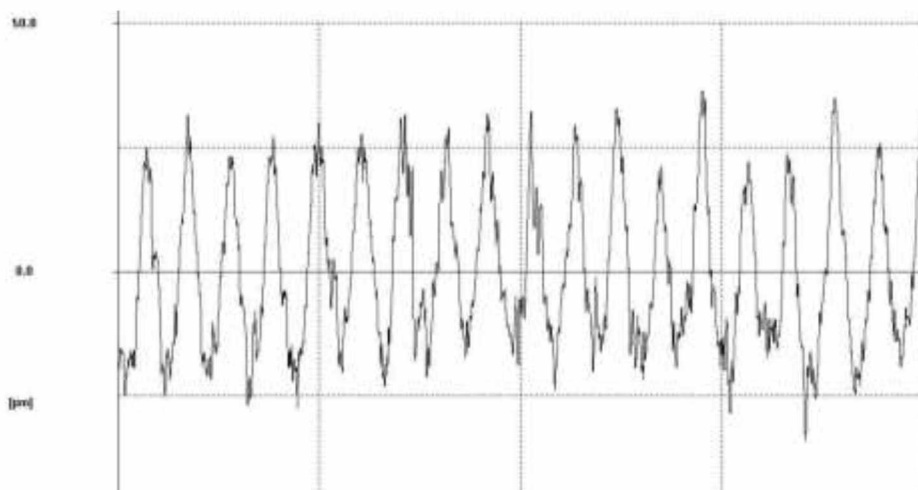


Рис. 3.14 – Профілограма верхньої кромки поверхні різку алюмінію (частота подачі 0,5 Гц)

На рис. 3.15 представлені графіки залежності шорсткості поверхні міді від

частоти подачі абразиву.

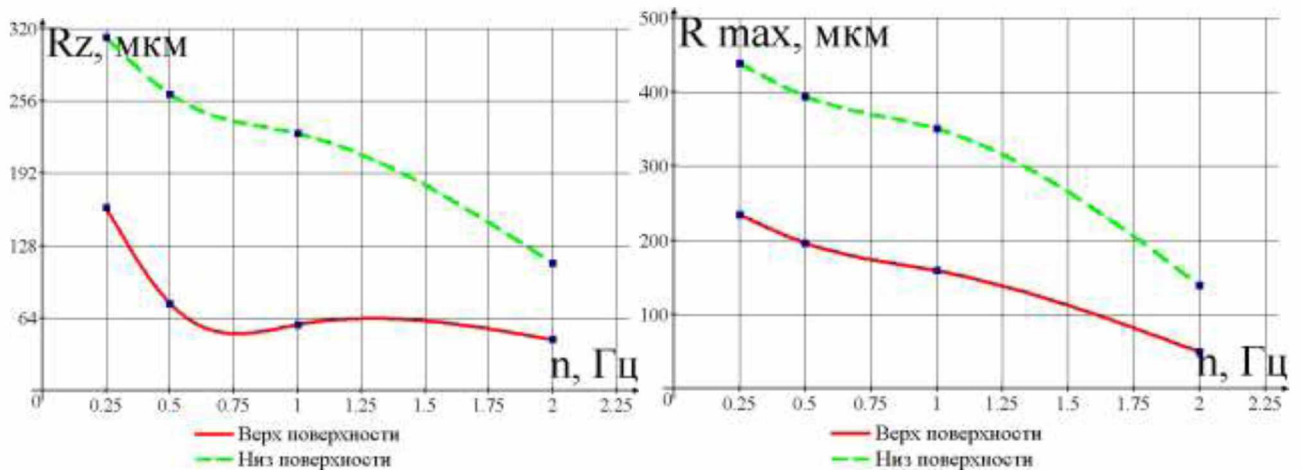


Рис. 3.15 – Залежність шорсткості поверхні міді від частоти подачі абразиву ( $V=0,5\text{мм/с}$ ,  $P=350\text{МПа}$ ,  $Q=250\text{гр/хв.}$ )

На рис. 3.16 представлена залежність коефіцієнта  $K_{\text{пов}}$  від частоти подачі абразиву при різанні міді товщиною 30 мм.

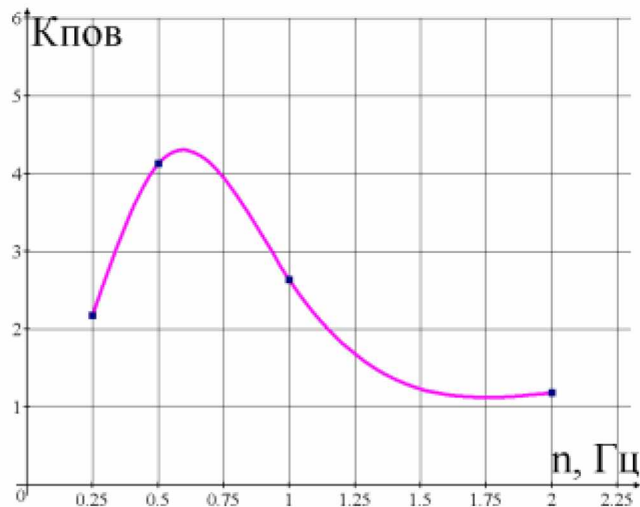


Рис. 3.16 – Залежність коефіцієнта нерівномірності  $K_{\text{пов}}$  від частоти подачі при розкріі міді

Аналіз залежностей коефіцієнта нерівномірності  $K_{\text{пов}}$  від частоти подачі  $n$  рис. 3.12 і рис. 3.16 показує, що з розкріі алюмінію і міді максимум коефіцієнта посідає частоту 1,25 і 0,75 Гц відповідно.

Таким чином, для отримання рівномірної висоти мікронерівності необхідно застосовувати частоти подачі абразиву від 0,25 до 0,75 Гц і від 1,75 до 2 Гц для алюмінію від 1,25 до 2 Гц для міді. Тобто при однакових витратах абразиву, але за

різних параметрів його доставки в струмінь можна отримувати всілякі за якістю поверхні. Висота мікронерівності на поверхні різку впливає на величину припуску на подальшу обробку, отже, на продуктивність отримання деталі. Експерименти показали, що припуск на обробку алюмінію можна скоротити на 60%, а на обробку міді величину припуску можна зберегти при частоті 2 Гц, витративши при цьому вдвічі менше абразиву. В інших випадках нерівномірність нерівностей поверхні за рівних витрат абразиву буде збільшуватися.

На рис. 3.17 показані профілограми поверхонь міді, отримані при різних параметрах дискретної подачі.

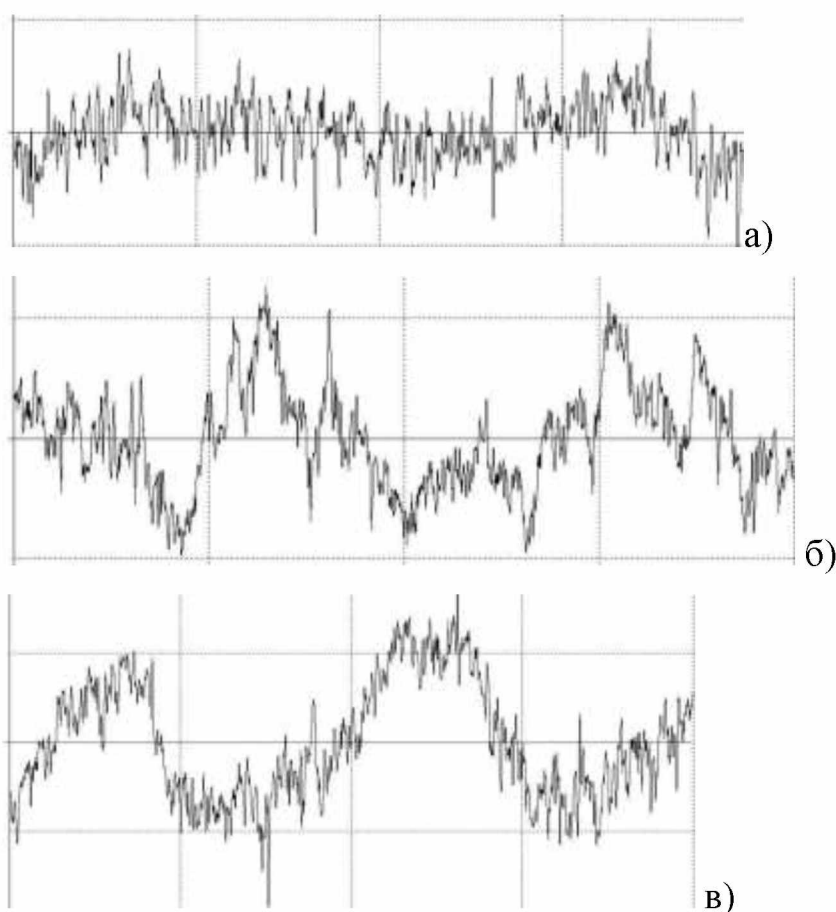


Рис. 3.17 – Профілограми поверхонь різання міді за різних параметрів подачі абразиву. а) верхня кромка при стаціонарній подачі; б) нижня кромка при стаціонарній подачі; в) верхня кромка при частоті 0,25 Гц

На філограмі рис. 3.17 а) видно стабільні мікронерівності, на відміну від філограми на рис. 3.17 б), на якій видно утворюються борозенки на виході струменя з матеріалу, що характерно для розкрою товстолистого матеріалу.

### 3.5 Вплив параметрів подачі абразиву на швидкість роздільного розкрою заготовок із товстолистових металів

При заготівельному розкрої листових товстостінних матеріалів найчастіше застосовується розділовий різ, під яким розуміється максимальна швидкість подачі і найгірша якість поверхні. У більшості випадків при розділовому різі поверхня або обробляється на наступних операціях, або її якість не має вирішального значення. З метою визначення впливу параметрів подачі на швидкість розкрою заготовок було проведено серію експериментів, основні результати яких представлені в табл. 3.5. Необхідно відзначити, що витрата абразиву при дискретному та стаціонарному способі подачі був однаковий.

Таблиця 3.5 – Швидкість роздільного розкрою

Матеріал	Товщина, мм	Параметр подачі	Швидкість, мм/с
Алюміній	40	Стаціонарна	0,68
		0,25 Гц	0,56
		0,5 Гц	0,7
		1 Гц	0,78
		2Гц0,9	
	60	Стаціонарна	0,32
		0,25 Гц	0,19
		0,5 Гц	0,3
		1 Гц	0,35
		2 Гц	0,41
Сталь	30	Стаціонарна	0,7
		0,25 Гц	0,6
		0,5 Гц	0,66
		1 Гц	0,72
		2 Гц	0,8
Сталь	60	Стаціонарна	0,28
		0,25 Гц	0,18

		0,5 Гц	0,23
		1 Гц	0,3
		2 Гц	0,34

На рис. 3.18 показано залежність швидкості розділового різання від частоти при дискретному способі подачі абразиву для алюмінію різної товщини.

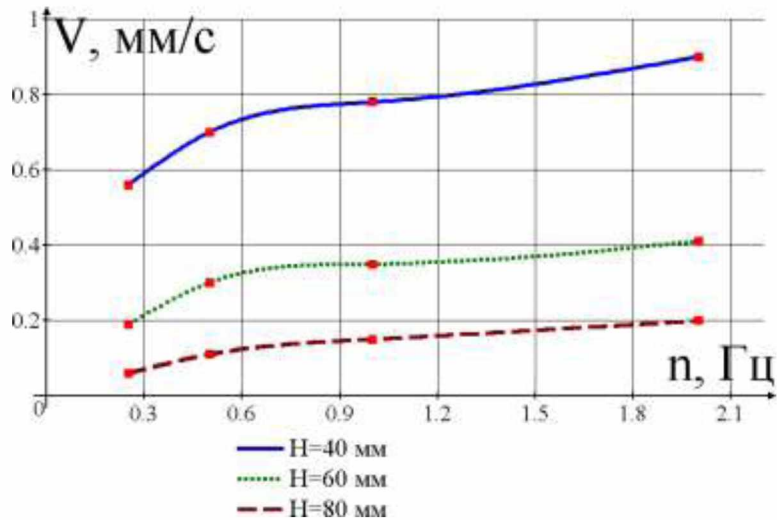


Рис. 3.18 – Залежність швидкості роздільного розкрою алюмінію різної товщини від частоти приводу подачі абразиву

На рис. 3.19 показаний аналогічний графік для різання сталевих заготовок з товстолистого прокату.

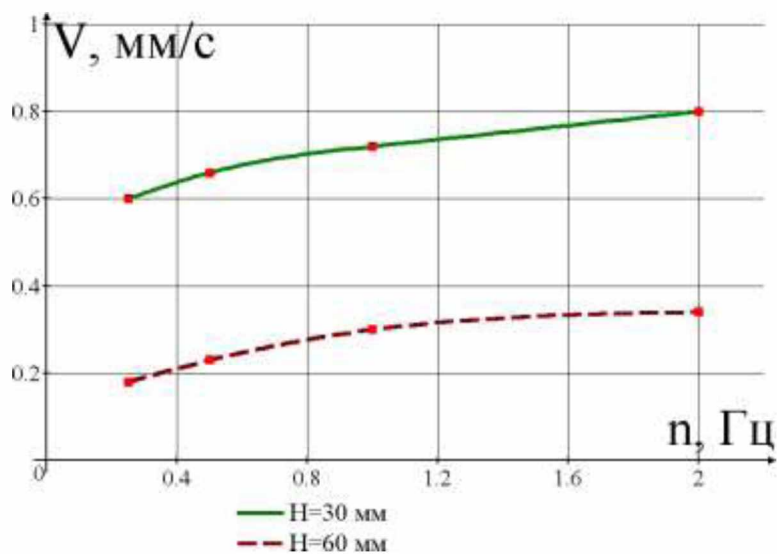


Рис. 3.19 – Залежність швидкості роздільного розкрою сталі різної товщини від частоти приводу подачі абразиву

Графіки на рис. 3.18 та рис. 3.19 показують, що зі збільшенням частоти подачі абразиву максимальна швидкість подачі головки вздовж матеріалу при розділовому розкрі зростає. На основі цих залежностей були побудовані графіки залежностей швидкості розділового різання від товщини листового матеріалу для різних способів подачі абразиву (див. рис. 3.20 та рис. 3.21).

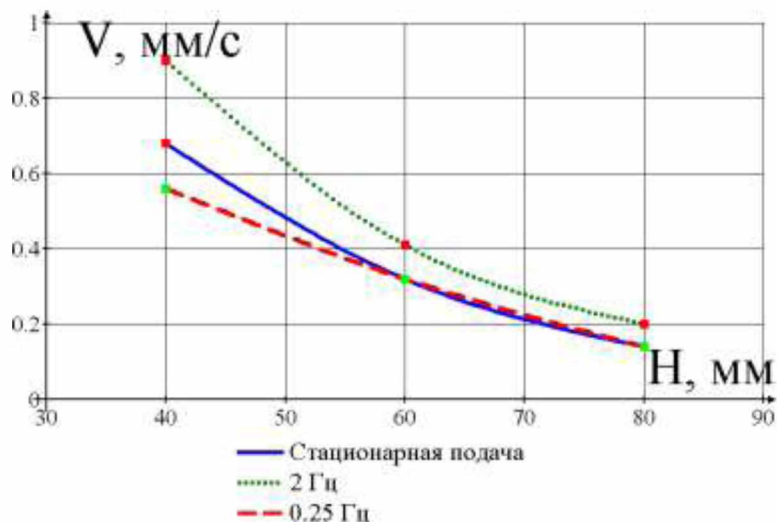


Рис. 3.20 – Залежність швидкості розділового розкрію алюмінію від товщини за різних параметрів приводу подачі абразиву

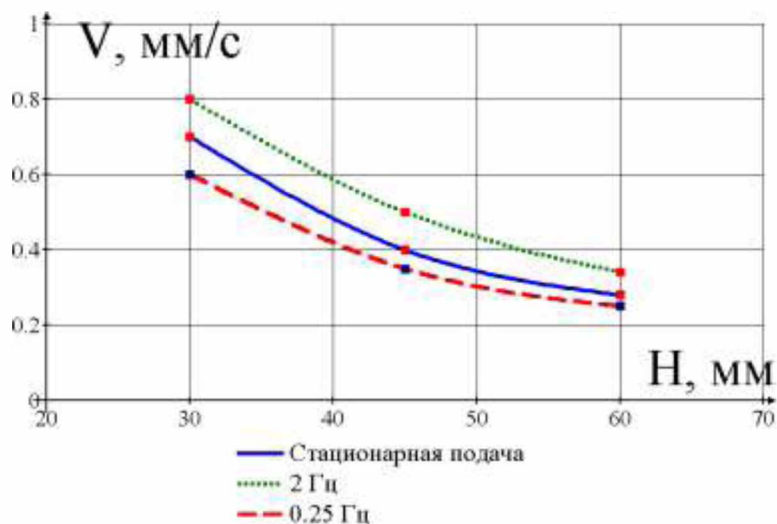


Рис. 3.21 – Залежність швидкості розділового розкрію сталі від товщини за різних параметрів приводу подачі абразиву

Ці залежності ілюструють, що максимальна швидкість розкрію скорочується падінням частоти включення абразиву. Максимальна частота подачі в 2 Гц свідчить про те, що швидкість різання порівняно із застосуванням стаціонарної подачі абразиву може бути збільшена на 20-40% при розкрі

алюмінію, і 10-20 % при різі стали. Разом з тим експерименти показали, що зниження частоти до 0,25 Гц призводить до скорочення швидкості подачі на 18% при розкрої алюмінію та на 15% при різі стали.

### **Висновки розділу**

Проведені експериментальні дослідження дозволили встановити розрахункові залежності часу наскрізного проколу алюмінію, міді та сталі від основних параметрів процесу для стаціонарного та дискретного способу подачі абразиву, крім того, отримати функціональні зв'язки скорочення витрат абразиву при проколі матеріалів у відсотковому співвідношенні.

Встановлено, що із застосуванням дискретної подачі ширина різі алюмінію практично не змінюється, а сталі – скорочується на 9% порівняно зі стаціонарною подачею абразиву, що свідчить про можливість скорочення припуску під час вирізки заготовок.

Встановлено, що зі збільшенням частоти подачі абразивного піску крок хвилі пропила алюмінію скорочується не менше ніж у 3 рази, а висота хвилястості скорочується вдвічі; максимальна висота мікронерівностей при розкрої алюмінію та міді при використанні дискретної подачі скорочується більш ніж у 2 рази та на 25% відповідно, що дозволяє скоротити величину припуску на подальшу обробку заготовок.

Виявлено, що висота мікронерівностей отриманих поверхонь скорочується зі зростанням частоти подачі абразиву при розкрої всіх зразків (алюміній, сталь та мідь).

Встановлено, що швидкість роздільного різі зі збільшенням частоти подачі абразиву збільшується, а в певних випадках перевищує швидкість різі із застосуванням стаціонарної системи подачі при однакових витратах абразивного піску, що дозволяє підвищити продуктивність отримання заготовок з товстолистого металевого прокату.

## **4 РЕКОМЕНДАЦІЇ ЩОДО ПРАКТИЧНОЇ РЕАЛІЗАЦІЇ ДОСЛІДЖЕНЬ**

### **4.1 Технологічні рекомендації щодо застосування дискретної подачі абразиву для гідро абразивної вирізки заготовок з товстолистових металів**

Гідро абразивний струмінь як ріжучий інструмент можна використовувати при обробці паперу, картону, гуми, деревини, полімерних та композитних матеріалів, металів, каменю, скла, кераміки. Незалежність методу обробки матеріалу і зумовила широке застосування верстатів даного типу. Однак пропонується спосіб, що дозволяє підвищити ефективність обробки за допомогою використання дискретної подачі, доцільно застосовувати при розкрій далеко не всієї гами товщин і типів матеріалів. При різанні матеріалів зі швидкістю понад 0,5 мм/с (матеріали товщиною до 10 мм) застосування дискретної подачі призведе до часткового не прорізу, оскільки в момент відсутності піску гідро абразивна головка переміститься на відстань, що перевищує діаметр струменя. Позбутися явища не прорізу при застосуванні дискретної подачі піску можна, підвищивши частоту приводу до 4 Гц та вище. Експериментальні дослідження, результати яких наведені в роботі, проводилися з максимальною частотою 2 Гц, що пов'язано зі схемою та конструкцією дискретного приводу.

Запропонована конструкція приводу дискретної подачі має ряд контактуючих між собою вузлів та деталей, а підвищення частоти приводу призводить до значного зниження робочого ресурсу системи та, як наслідок, збільшення вартості обслуговування. У результаті збільшення частоти приводу дискретної подачі може призвести до підвищення вартості різання. Тому за інших рівних умов рекомендується вибирати мінімальну частоту приводу з метою збільшення його робочого ресурсу.

Обробку твердих та крихких матеріалів, таких як камінь, кераміка, граніт та ін., необхідно проводити при підвищеній витраті абразиву (до 400 гр/хв). Відсутність піску в струмені при різанні крихких і твердих матеріалів найчастіше призводить до сколів, розтріскування та фарбування. Це пов'язано з тим, що при

різанні такого роду матеріалів руйнування відбувається внаслідок тендітної ерозії, що виникає в результаті контакту оброблюваного матеріалу та абразивної частки. Таким чином, відсутність піску в струмені не призведе до бажаного результату, і деталь буде зіпсована. З цього можна зробити висновок, що для гідро абразивного розкрою крихких і твердих матеріалів застосування дискретної подачі недоцільно.

Розмір фракцій абразивного порошку при різанні з використанням дискретної подачі відповідає розміру частинок при стаціонарній подачі. При розкрої товстостінних матеріалів розмір фракцій абразиву диктується завтовшки металу, а не способом подачі. Для розкрою товстих металів (товщина від 30 мм та вище) рекомендується використовувати абразивний пісок із фракцією 80-120 mesh (0,18-0,125 мм).

Важливим явищем при різанні гідро абразивними струменями є запізнення струменя. Воно пов'язане з падінням енергії струменя в осьовому напрямку. В результаті цього явища відбувається не проріз матеріалу, тому на швидкість подачі соплової головки вздовж матеріалу впливає не тільки тиск струменя, витрата абразиву, товщина і вид матеріалу, зазор між трубою змішувачем і листом, але і кривизна контуру. Якщо при різанні листового матеріалу товщиною до 5-8 мм запізнення струменя не перевищує 1мм, то при різанні товстих заготовок воно може досягати 10-15 мм, що призводить до появи шлюбу. Рекомендовані швидкості різання за залежностями та таблицями будуть запропоновані для прямолінійних різів і можуть бути занижені при розкрої криволінійних контурів з наступною умовою: чим вище кривизна контуру, що розкраюється, тим меншу подачу головки вздовж матеріалу потрібно вибирати. Оскільки практично важко встановити вплив кривизни контуру на швидкість подачі головки при розкрої з дискретною подачею абразиву, рекомендується робити пробні різі зі швидкостями меншими, ніж рекомендовані.

## 4.2 Техніко-економічне обґрунтування досліджень

Під економічною ефективністю розумітимемо різницю фінансових витрат на отримання заготовок при використанні стаціонарної та дискретної систем подачі абразиву в струмінь.

Вище зазначалося, що є оптимальне значення параметрів гідро абразивного розкрою, що забезпечує мінімальні сумарні фінансові витрати на обробку. Експериментальні дослідження з дисертаційної роботи проводилися за фіксованих заздалегідь визначених параметрів, тому вартість обробки визначимо для цих умов. Розрахунок буде мати оцінний характер, і результат може бути іншим при використанні різних типів та параметрів установок тощо. Це з конструкцією насоса, вартістю витратних частин, електроенергії, води тощо. Технологічні витрати на гідро абразивний розкрій представлені у табл. 4.1.

Таблиця 4.1 – Технологічні витрати на гідро абразивне різання

Стаття витрат		Вартість, грн/хв
Витратні матеріали для насоса високого тиску		13,44
Витратні матеріали для клапанів високого тиску		0,39
Витратні матеріали для абразивної головки		0,72
Інструмент, що зношується:	абразивний пісок	8,96
	фокусуюча трубка	5,01
	сопло	2,7
Інші запасні частини		0,84
Витрати електроенергію		4,8
Витрати на воду		0,03
Сумарні щохвилинні витрати		46,89

Аналіз витрат на гідро абразивне різання, представлених у табл. 4.1, показав, що 29% вартості різання припадають на витратні матеріали насоса високого тиску, 57% - на інструмент, що зношується, з яких 40% - витрати на

абразивний матеріал.

### **Висновки до розділу**

Запропоновані технологічні рекомендації вибору режимів розкрою товстолистових металів із застосуванням дискретної подачі абразиву дозволили підвищити продуктивність різання та знизити собівартість обробки.

Проведені результати оціночних розрахунків вартості розкрою матеріалів гідро абразивним струменем показали, що вартість абразивного піску становить 40% вартості обробки.

## ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У роботі виконано системний аналіз способів підвищення ефективності гідро абразивної обробки матеріалів надзвуковими струменями. На підставі проведених теоретичних та експериментальних досліджень запропоновано вирішення актуальної наукової задачі, пов'язаної з підвищенням ефективності гідро абразивної обробки, що має важливе наукове та практичне значення при розкрій товстолистових металевих (сталевих) матеріалів, як найбільш часто розкраюваних у дрібносерійному виробництві гідро абразивним методом.

Запропоновано та експериментально підтверджено схему дискретної подачі абразиву в надзвуковий струмінь, що забезпечує більш ефективне різання заготовок з товстих листових металевих (сталевих) матеріалів.

В результаті проведення експериментальних досліджень, виявлено функціональні зв'язки між параметрами дискретної подачі (частота та об'єм порцій) та параметрами обробки (швидкість подачі головки вздовж матеріалу, ширина різання, крок та висота хвилі) заготовок з товстолистових сталевих металів особливістю яких є облік ефекту шаржування обробленої гідро абразивним струменем поверхні при їх вирізанні. На підставі встановлених зв'язків побудована модель, що описує залежність швидкості подачі соплової головки вздовж матеріалу від товщини листа, частоти дискретної подачі при роздільному розкрій заготовок сталі 45 і алюмінію Д 16.

Аналіз отриманих математичних моделей дозволив запропонувати практичні рекомендації щодо вибору параметрів дискретної подачі абразиву у струмінь при розкрій заготовок із товстолистого металу; наведені переваги та недоліки використання різних значень параметрів при вирізанні, що дозволяє вибрати оптимальні в залежності від необхідних показників ефективності.

Встановлено, що ширина різку алюмінію практично не змінюється, а сталі – скорочується на 9% в порівнянні із стаціонарною подачею абразиву, проте величина частоти подачі абразивного піску у ріжучий струмінь на ширину різання металів, що розглядаються в даній роботі, не впливає, що дозволяє досягти

сталості припуску використання різних частот дозування порошку;

Встановлено, що із збільшенням частоти подачі абразивного піску крок хвилі різання алюмінію, як один із параметрів похибки форми скорочується з 3 мм до 1 мм, а висота хвилі скорочується вдвічі з 0,24 мм до 0,12 мм, що дозволяє скоротити величину припуску на подальший обробіток;

Також підтверджено, що при використанні дискретного способу подачі абразиву економія його може становити до 22% і до 27% при обробці сталі та алюмінію відповідно. Отримані залежності швидкості роздільного різання від частоти дискретної подачі свідчать про підвищення швидкості на 20-40% і 10-20% при різі алюмінію і сталі відповідно, що призводить до підвищення продуктивності і скорочення собівартості.