

**ПОЛТАВСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ АГРАРНИЙ УНІВЕРСИТЕТ**

**Факультет інженерно-технологічний**

**Кафедра будівництва та професійної освіти**

**Пояснювальна записка**

до кваліфікаційної роботи на здобуття ступеня вищої освіти

« магістр »

на тему: « Дослідження процесу гідроабразивного різку сталевих заготовок »

КРМ.133ГМмд\_21.06.000 ПЗ

Виконав: здобувач вищої освіти за освітньо-  
професійною програмою

Машини і засоби механізації  
сільськогосподарського виробництва

спеціальності 133 Галузеве

машинобудування

ступеня вищої освіти «магістр»

групи 133ГМмд\_21

Глушак Сергій Олександрович

Керівник: к.т.н. Брикун О.М.

**Полтава – 2023 року**

## РЕФЕРАТ

**Пояснювальна записка:** 61 с., 27 рис., 3 табл., 43 літературних джерел.

**Об'єктом розробки** вибрано технологічний процес гідроабразивного різку сталевих заготовок..

**Предметом дослідження** є процес формування необхідної якості шорсткості поверхні різку під час гідроабразивного різку сталевих заготовок.

**Метою кваліфікаційної роботи магістра** є підвищення ефективності процесу гідроабразивного різку заготовок із товстолистової сталі на основі подачі абразиву в надзвуковий струмінь води.

**Практичне значення кваліфікаційної роботи магістра** – отримані результати досліджень можна використовувати для визначення оптимальних режимів різання, складання рекомендацій для інженерів технологів та наладчиків машинобудівних заводів..

У **першому розділі** проведено порівняння методів обробки. Описана сутність і технологічні можливості гідроабразивного різання.

У **другому розділі** отримано залежності для визначення розмірних характеристик виробу одержуваного методом гідроабразивного різання.

У **третьому розділі** приведена методика проведення експериментальних досліджень. Для виготовлення зразків використовували сталь 45.

У **четвертому розділі** викладено результати експериментальних досліджень та перевірки відповідності теоретичних залежностей отриманим даним.

У **п'ятому розділі** розглянуті питання екологічної безпеки та запропоновані заходи з охорони праці. Зроблений розрахунок оптимальних режимів різання, при яких забезпечуватиметься задана шорсткість при найменшій собівартості різання.

**Практичні результати роботи** – розроблено оригінальну конструкції дискретної подачі абразиву в надзвуковий струмінь, що забезпечує підвищення ефективності різання заготовок з металевих товстолистової сталі.

**Рекомендації щодо використання результатів роботи** – отримані

					КРМ.133ГМмд_21.06.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		2

залежності швидкості роздільного різання від частоти дискретної подачі свідчать про підвищення швидкості на 20-40% при різі сталі, що призводить до підвищення продуктивності і скорочення собівартості.

**Сфера застосування результатів роботи** – агропромислове і машинобудівне виробництво.

Ілюстраційна частина кваліфікаційної роботи – 8 аркушів.

Результат перевірки тексту пояснювальної записки на плагіат за допомогою сервісу Unicheck: унікальність тексту – 93,5%.

#### АНОТАЦІЯ

Кваліфікаційна робота магістра присвячена питанням підвищення ефективності процесу гідроабразивного різання за рахунок розробки моделей формування шорсткості сталевій поверхні на різних глибинах перерізу різу.

ГІДРОАБРАЗИВНЕ РІЗАННЯ, ШОРСТКІСТЬ, АБРАЗИВ, ДИСКРЕТНА ПОДАЧА, ТЕХНОЛОГІЧНІ ПАРАМЕТРИ, ЗАГОТОВКА, ДОСЛІДЖЕННЯ.

#### ANNOTATION

The master's qualification work is devoted to the issues of increasing the efficiency of the hydroabrasive cutting process due to the development of models of the formation of the roughness of the steel surface at different depths of the cut section.

HYDROABRASIVE CUTTING, ROUGHNESS, ABRASIVE, DISCRETE FEED, TECHNOLOGICAL PARAMETERS, WORKPIECE, RESEARCH.

					КРМ.133ГМмд_21.06.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		3

## ЗМІСТ

1	АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ ДОСЛІДЖЕНЬ.....	9
1.1	Аналіз методу обробки деталей струменем води із абразивом.....	9
1.2	Аналіз гідроабразивного розкрою заготовок та шляхи його вдосконалення	12
1.3	Особливості гідроабразивного розкрою сталевих заготовок.....	17
2	МЕТОДИКА Й ОСНОВНІ МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ .....	20
2.1	Взаємодія гідроабразивного струменя з поверхнею заготовки в процесі її різу	20
2.2	Визначення якості поверхні заготовок.....	22
2.3	Дослідження основних параметрів процесу різку та якості оброблених поверхонь заготовок .....	25
	Висновки до розділу .....	28
3	МЕТОДИКА ПРОВЕДЕННЯ ДОСЛІДЖЕННЯ.....	29
3.1	Експериментальна установка для проведення досліджень.....	29
3.2	Зразки експериментальних досліджень розкрою заготовок .....	32
3.3	Засоби вимірювання основних параметрів процесу гідрорізу .....	33
3.4	Методика визначення точності профілю заготовок .....	34
4	РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТІВ.....	36
4.1	Вплив параметрів подачі абразиву на якість оброблених поверхонь заготовок .....	36
4.2	Вплив параметрів подачі абразиву на ширину різку при розкрої сталевих заготовок .....	37
4.3	Вплив параметрів подачі абразиву на точність профілів заготівель .....	42
4.4	Вплив параметрів подачі абразиву на шорсткість та хвилястість різання оброблених поверхонь заготовок .....	44
5	РЕКОМЕНДАЦІЇ ЩОДО ПРАКТИЧНОЇ РЕАЛІЗАЦІЇ ДОСЛІДЖЕНЬ.....	48
5.1	Екологічна експертиза .....	48
5.2	Охорона праці .....	51
5.3	Техніко-економічне обґрунтування досліджень .....	54
	ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ .....	56
	Список використаних джерел .....	57

					КРМ.133ГМмд_21.06.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		4

## ВСТУП

**Актуальність теми.** Особливістю сучасного 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 десятиліття гідроабразивний метод обробки матеріалів завоював досить широкий ринок через властиві йому переваги, до яких належать:

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 відрізний інструмент недоцільно в одиничному і дрібносерійному виробництві через великі витрати на його виготовлення, що згодом вплине на вартість операції.

Сучасне машинобудування застосовує гідроабразивне 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 заготовку 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.

Незважаючи на спроби використовувати гідроабразивну обробку як поверхневу (точіння, фрезерування, гравіювання та ін.), у вітчизняних виробничих системах верстата цієї групи найчастіше застосовуються для розкрою листового матеріалу.

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

Кваліфікаційна робота присвячена дослідженню гідроабразивного різання заготовок із товстолистового сталевого прокату з метою підвищення ефективності розкрою. Це спричинить подальший розвиток можливостей цього

					КРМ.133ГМмд_21.06.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докum.	Підпис	Дата		7

розповсюдженого процесу та розширення сфери застосування. Найважливішим елементом різання із застосуванням абразиву є система його подачі, що впливає на продуктивність та якість розкрою деталей.

**Мета дослідження** – є підвищення ефективності процесу гідроабразивного різання заготовок із товстолистової сталі на основі подачі абразиву в надзвуковий струмінь води.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

- провести аналіз методів обробки різанням заготовок із сталевих товстолистових металів;
- розробити теоретичну модель процесу різання заготовок із сталевих товстолистових металів гідроабразивним струменем;
- провести експериментальні дослідження дискретної подачі абразиву в надзвуковий струмінь води та опрацювати результати досліджень;
- розробити практичні рекомендації щодо підвищення продуктивності гідроабразивного розкрою заготовок із товстолистової сталі за рахунок застосування дискретної подачі абразиву.

**Об'єктом дослідження** є технологічний процес гідроабразивного різання сталевих заготовок.

**Предметом дослідження** є процес формування необхідної якості шорсткості поверхні різання під час гідроабразивного різання сталевих заготовок.

**Наукова новизна** роботи полягає у виявленні зв'язків між частотою подачі абразиву в гідроструменем та параметрами гідроабразивного різання сталевих заготовок (швидкість подачі соплової головки, час наскрізного проколу металу, шорсткість); математичної моделі, яка пов'язує частоту дискретної подачі абразиву в струмінь води та швидкість різання сталевих заготовок, що пов'язують частоту подачі абразивного піску до надзвукового струменя робочої рідини та параметри кромки.

**Практична значущість** роботи полягає: розроблено оригінальну конструкцію дискретної подачі абразиву в надзвуковий струмінь, що забезпечує підвищення ефективності різання сталевих заготовок.

					КРМ.133ГМмд_21.06.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		8

# 1 АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

## 1.1 Аналіз методу обробки деталей струменем води із абразивом

Гідроабразивне різання металу не є інноваційною технологією, використовувати її почали ще в 1960-х роках і застосовувалася спочатку лише для очищення 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, 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 (рис. 1.1). 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 гідроабразивної головки щодо заготовки, кількості абразивних частинок у струмені [2].

Струмінь рідини за своїми технічними можливостями наближається до ідеального точкового інструменту, що дозволяє обробляти складний контур з будь-яким радіусом закруглення. Оскільки ширина різку становить 0,76-2 мм, відхід матеріалу в стружку менше, ніж при традиційних методах обробки, різ можна починати в будь-якій точці заготовки, при цьому не потрібно попередньо виконувати отвір. Лінія розрізу може бути будь-якої кривизни, мати гострі кути і круті повороти. Невеликі сила (1-100 Н) і температура (+60 ... +90°C) в зоні різання виключають деформацію заготовки, оплавлення і пригорання матеріалу в прилеглий зоні. Струмінь не змінює фізико-механічні властивості оброблюваного

					КРМ.133ГМмд_21.06.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докum.	Підпис	Дата		9

матеріалу. А це дозволяє, в свою чергу, економити на додатковій обробці крайок матеріалу, необхідної після впливів високих температур, чим не може похвалитися жодна інша технологія.

Дуже цікавим є застосування гідроструменя як гравірування поверхонь (рисунок 1.2), а також для очищення від окалини, корозії та забруднень [3].

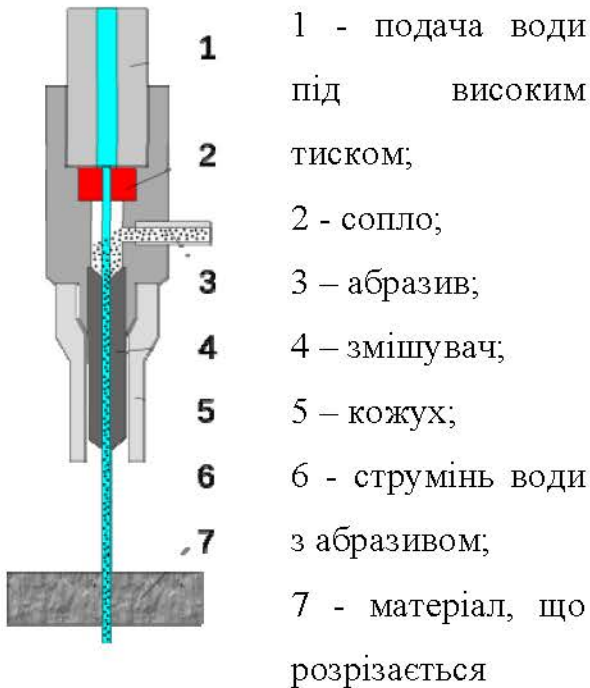


Рисунок 1.1 – Схема гідроабразивного різання



Рисунок 1.2 – Візерунки, отримані гідроабразивним струменем

При гідроабразивному різанні відсутня відповідна реакція на ріжучий інструмент, так як між виробом і інструментом немає прямого контакту. Низьке тангенціальне зусилля на деталь дозволяє в ряді випадків відмовитися від затиску цієї деталі. Плюс до всього, ріжучий інструмент не потребує заточування.

Важливим аспектом є високий ступінь екологічної безпеки процесу. Гідроабразивна обробка не створює будь-якого пилу або крихти, стружки або хімічних забруднювачів повітря, відсутність термічного впливу на матеріал виключає стікання шлаку або амальгамування, а також забруднення такими елементами, як шкідливі випаровування і гази, притаманні іншим видам різання при обробці пластмас, композиційних матеріалів і т. і., немає запиленості.

Використовуючи технологію різання водою, стає можливим обробити з високою точністю і продуктивністю найтвердіші матеріали, а також самі різні їх комбінації. Висока точність різу не поступається технології лазерної різки.

Важлива перевага методу гідроабразивного різання полягає в тому, що він універсальний. Як правило, всі способи обробки мають обмежене застосування. Наприклад, застосовуючи технологію лазерного різання, можна різати вуглецеву сталь, але лазерний промінь «в'язне» в мідному листі і проходить наскрізь скло.

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 M. Zohoor, I. Zohourkari було запропоновано модель гідро абразивного точення [8], яка з достатньою достовірністю описує остаточну геометрію заготовок після обробки. У роботі [9] представлений механізм видалення матеріалу при гідро абразивному точінні, причому емпіричними константами уточнено модель ерозії матеріалів M. Hashish, яку він запропонував у своїй роботі [10-11].

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.

Гідроструменеве 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.

					КРМ.133ГМмд_21.06.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докum.	Підпис	Дата		11

## 1.2 Аналіз гідроабразивного розкрою заготовок та шляхи його вдосконалення

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. Гуенко, Г.В. Барсуков, В.А. Шманьов, А.А. Барзов, С.П. Козирєв, І.В. Петко, M. Ramulu, , GL Chahine, J. Chao, P. Berce, G. Fowler, та ін. [12-22].

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

Величезний внесок у дослідження процесу гідроабразивного руйнування матеріалів зробили вітчизняні та зарубіжні вчені [12-22].

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, фокуруюча 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

					КРМ.133ГМмд_21.06.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докum.	Підпис	Дата		12

обробку.

Заява провідними фірмами, що випускають обладнання для гідроструминної обробки (Flow, KMT, 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 фокусуєчої трубки, які є витратними матеріалами при обробці та інтенсивно зношуються в процесі формування інструменту за рахунок постійного контакту з водою та абразивними частинками.

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.

Автор у своїй роботі [23] 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

					КРМ.133ГМмд_21.06.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		13

енергоємність розрізання листових неметалевих матеріалів – на 50%, що забезпечує зростання ресурсу гідрорізального обладнання.

У дослідженнях [24] 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.

З метою збільшення ріжучої здатності струменя [25] запропоновано закручувати струмінь за рахунок нарізування спіралеподібної канавки у фокусуючій трубці гідроабразивної головки. Автор показує, що «свердильний» 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 розкрої 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 [26]. 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 [27]. Полягає пропонуваній 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

					КРМ.133ГМмд_21.06.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		14

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 [14-16].

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 [29-29] 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.



Рисунок 1.3 – Система рециркуляції абразивного піску [30]

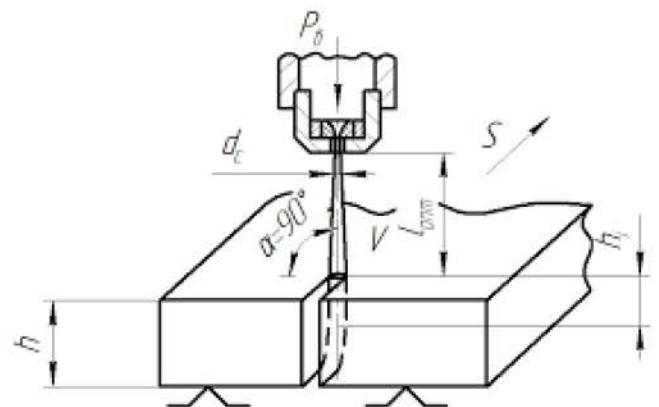


Рисунок 1.4 – Схема обробки листових товстостінних матеріалів [31]

При обробці листових матеріалів товщиною понад 40 мм у руйнуванні матеріалу бере участь лише передній твір, що утворює (на рис. 1.4, 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

					КРМ.133ГМмд_21.06.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		15

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 [32]. Звідси можна зробити висновок, що менше швидкість переміщення струменя вздовж матеріалу.

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 [33].

З точки зору найбільш ефективного використання абразивних частинок у процесі гідроструминної 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 гідроабразивного різання, можна зробити висновок, що зменшення витрати абразиву при збереженні якості одержуваних поверхонь є актуальним завданням.

					КРМ.133ГМмд_21.06.000 ПЗ	Арк.
						16
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

### 1.3 Особливості гідроабразивного розкрою сталевих заготовок

Гідроабразивне різання в силу її специфічності притаманні деякі особливості, які виразніше виявляються при розкрої сталевих заготовок. 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 (рис. 1.5).

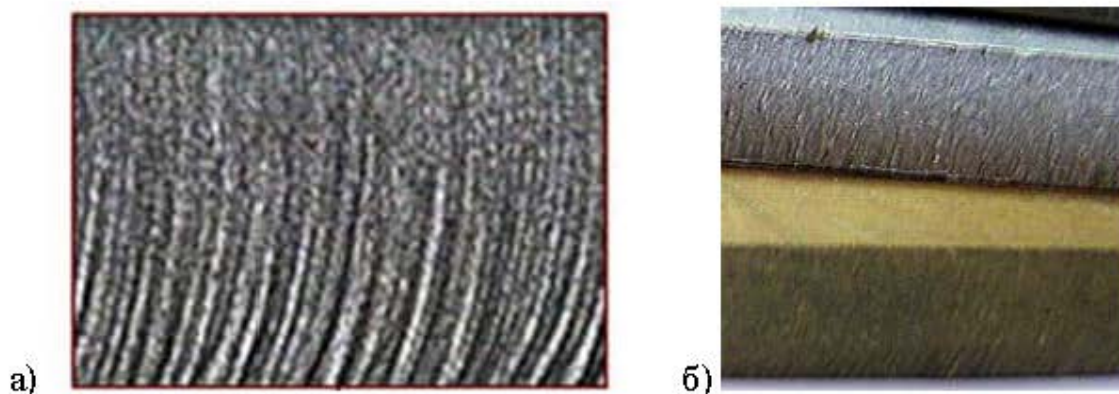


Рисунок 1.5 – Дефекти поверхні обробки: а) запізнення струменя; б) задирки на зовнішній поверхні

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 40-50 мм (титан, нержавіючі сталі, надтверді сплави та ін.) [34]. 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 .

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 [35].

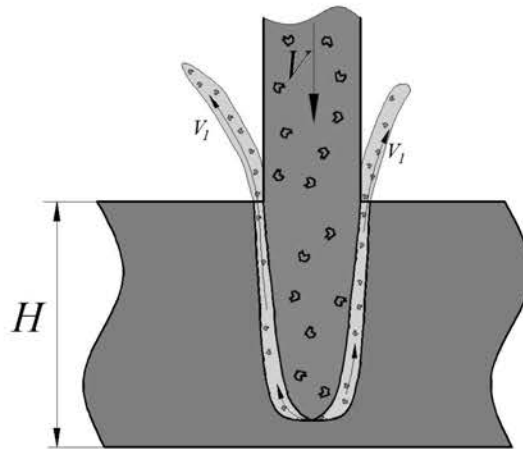


Рисунок 1.6 – Схема наскрізного проколу матеріалу гідроабразивним струменем

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 гідроабразивного різання, в даний час методу притаманна висока собівартість та низька продуктивність, що особливо

					КРМ.133ГМмд_21.06.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		18

проявляється при розкрій деталей з товстолистових матеріалів.

Мета дисертаційної роботи полягає у підвищенні ефективності гідроабразивного різання сталевих заготовок 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 [36]. Бажаним результатом, метою технологічного процесу є отримання деталі із заданими параметрами якості та у встановленій програмою кількості при найменшій собівартості обробки [37]. 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.

					КРМ.133ГМмд_21.06.000 ПЗ	Арк.
						19
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

## 2 МЕТОДИКА Й ОСНОВНІ МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ

### 2.1 Взаємодія гідроабразивного струменя з поверхнею заготовки в процесі її різання

Процес взаємодії надзвукового струменя води з абразивом і оброблюваним матеріалом вивчений досить поверхово, немає всеосяжної моделі руйнування, та й природа руйнування матеріалу складна і потребує досліджень. Існують припущення щодо руйнування матеріалу гідроабразивним струменем, але вони не завжди відповідають експериментальним даним.

Гідроструменеве різання матеріалів є складним маловивченим процесом, що не має до теперішнього часу стрункої теоретичної основи.

На рис. 2.1 зображено схему обробки листових матеріалів.

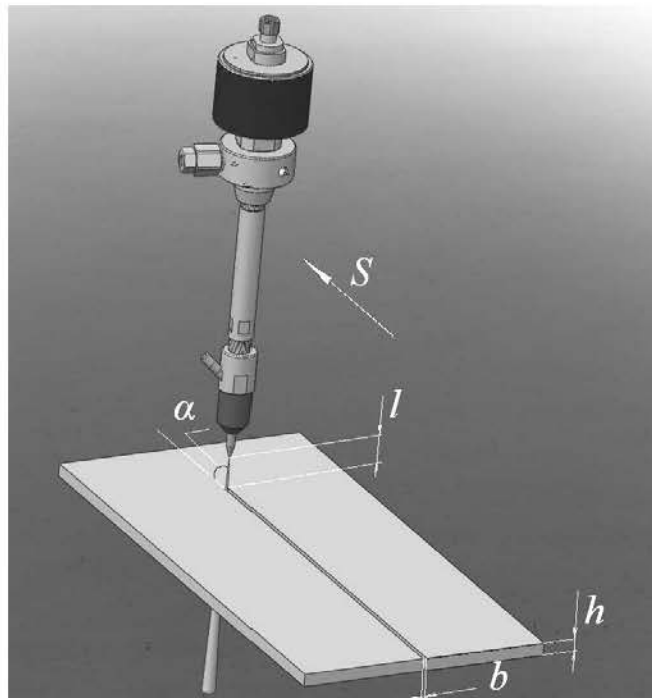


Рисунок 2.1 – Схема обробки листових матеріалів гідроабразивним струменем

Продуктивність різання є функцією чотирьох груп змінних величин: параметрів струменя (щільність  $\rho$  рідини, тиск закінчення  $P$ , діаметр  $d_c$  і геометрія сопла, відстань  $l$  між соплом і заготовкою, що розрізається); фізико-механічних властивостей оброблюваного матеріалу (межа міцності  $\sigma_b$ , твердість

					КРМ.133ГМмд_21.06.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		20

НВ, ударна в'язкість КС, щільність  $\rho$  та ін); обсягу матеріалу, що розрізається в одиницю часу (швидкості подачі  $s$ , товщини  $h$  і ширини  $b$  різку); характеру впливу струменя (кута зустрічі струменя з матеріалом, кількості проходів  $n$ , концентрації та властивостей добавок, у тому числі абразивних частинок, плавності подачі та ін.).

У процесі струминного різання потужність робочої рідини, що нагнітається перетворювачем тиску, переходить у кінетичну енергію, і справедливе співвідношення:

$$PQ = \frac{mV^2}{2}, \quad (2.1)$$

де  $P$  - тиск на вході в сопло, Па;

$Q$  - подача робочої рідини, м<sup>3</sup>/с;

$m$  - секундна маса робочої рідини, Н с/м;

$V$  - швидкість витікання струменя із сопла, м/с.

Враховуючи що

$$m = \rho Q, \quad (2.2)$$

де  $\rho=1000$  Нс<sup>2</sup>/м<sup>4</sup>, отримуємо:

$$V = 44,72\sqrt{P}, \quad (2.3)$$

де  $P$  – тиск, МПа.

Зусилля гідродинамічного впливу струменя на перешкоду

$$F = \rho QV. \quad (2.4)$$

При діаметрі струменя в момент зустрічі з виробом, що розрізається, рівному  $d_{стр}$ , в місці контакту виникає тиск:

$$P_k = \frac{4F}{\pi d_{стр}^2} = \frac{1,27 \rho QV}{d_{стр}^2}. \quad (2.5)$$

Для того, щоб струмінь різав метал, величина  $P_k$  повинна перевищувати межу його міцності. Підставляючи вихідні дані в рівняння (2.5) при тиску  $P=200$  МПа, діаметр сопла  $d_c=0,2$  мм, максимальне значення величини  $P_k$  досягає 20 МПа, тобто, спираючись на запропоновану модель процесу, матеріал, межа міцності якого перевищує 20 МПа, руйнуватися не повинен. Однак практика

					КРМ.133ГМмд_21.06.000 ПЗ	Арк.
						21
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

показує, що при запропонованих вище параметрах процес руйнування спостерігається навіть на матеріалах з межею міцності до 500 МПа та вище.

## 2.2 Визначення якості поверхні заготовок

Незважаючи на те, що на всі показники якості при гідроабразивній 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 гідроабразивної 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 розкрій 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 (2.6) для стаціонарного способу подачі, і (2.7) для дискретного:

$$Y = k \cdot H^x \cdot Q^y, \quad (2.6)$$

$$Y = k \cdot H^x \cdot n^y \cdot t_o^z, \quad (2.7)$$

					КРМ.133ГМмд_21.06.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		22

де  $Y$  - досліджуваний параметр.

Визначення якості оброблених гідроабразивним струменем поверхонь проводилося на плоских, оброблених гідроструменем поверхнях сталі 40, 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. 2.2. Зі збільшенням швидкості подачі гідроабразивної 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.



Рисунок 2.2 – Поверхня кромки різі

Через неоднорідність якості поверхонь, отриманих різанням гідро абразивним струменем, умовно виділяється 4-5 груп, що характеризують параметри різі. На рис. 2.3 зображені поверхні різів сталі із різною якістю.

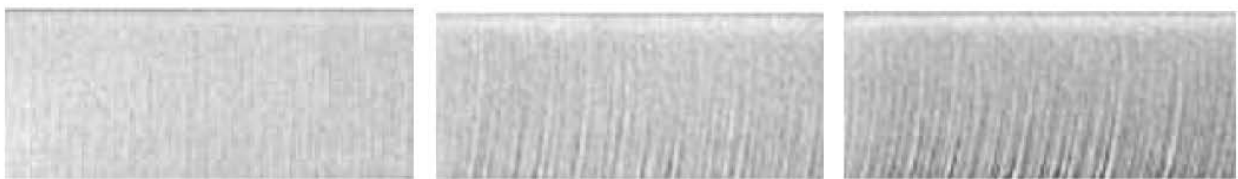


Рисунок 2.3 – Поверхня кромки різі: а), б), в) – якість сталі обробленим гідроабразивним струменем

Для поверхні, зображеної рис. 2.3 а, характерна найвища точність форми

					КРМ.133ГМмд_21.06.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		23

заготовки 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. 2.3 б, якій, однак, властиві висока точність форми та незначна шорсткість. Звичайний технологічний різ, що забезпечує хорошу якість при економічній швидкості подачі, показано на рис. 2.3 в. На поверхні різ такої якості починають чітко виднітися борозенки. Грубий різ з виразним, але регулярним малюнком борозен, що досягається за рахунок 70-80% швидкості подачі від максимальної. 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 (2.8). 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.

$$K_{пов} = \frac{Ra_{вих}}{Ra_{вх}} \quad (2.8)$$

Очевидно, що у разі оцінки поверхонь, отриманих гідроструменем, 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 різ на відстань 10% від товщини зразка.

					КРМ.133ГМмд_21.06.000 ПЗ	Арк.
						24
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Лінія вимірювання шорсткості показана рис. 2.4.

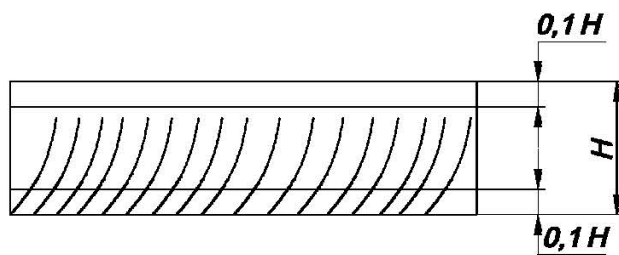


Рисунок 2.4 – Схема вимірювання обробленої поверхні

Хвилястість визначатимемо на відстані 10% від нижньої кромки різь, як показано на рис. 2.4. Шорсткість виражатимемо висотою мікронерівностей, а хвилястість - побудовою профілограм та їх вимірюванням. Після вимірювання шорсткості та хвилястості необхідних поверхонь будемо визначати коефіцієнт  $K_{пов}$  і оцінюватимемо рівномірність якості поверхні.

### 2.3 Дослідження основних параметрів процесу різь 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 фокусуєчої трубки (і їх знос у процесі обробки), тиск перед соплом, відстань між зрізом фокусуєчої 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

					КРМ.133ГМмд_21.06.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		25

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 постійною.

Відомо, що на швидкість закінчення струменя основний вплив чинить тиск. Через особливості роботи та конструкції мультишлікаторного 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). У зв'язку з вищевикладеним приймаємо робочий тиск постійним і рівним 350 МПа як найпоширеніший на

					КРМ.133ГМмд_21.06.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докum.	Підпис	Дата		26

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 розкרוю 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 [25], представлені рис. 2.5.

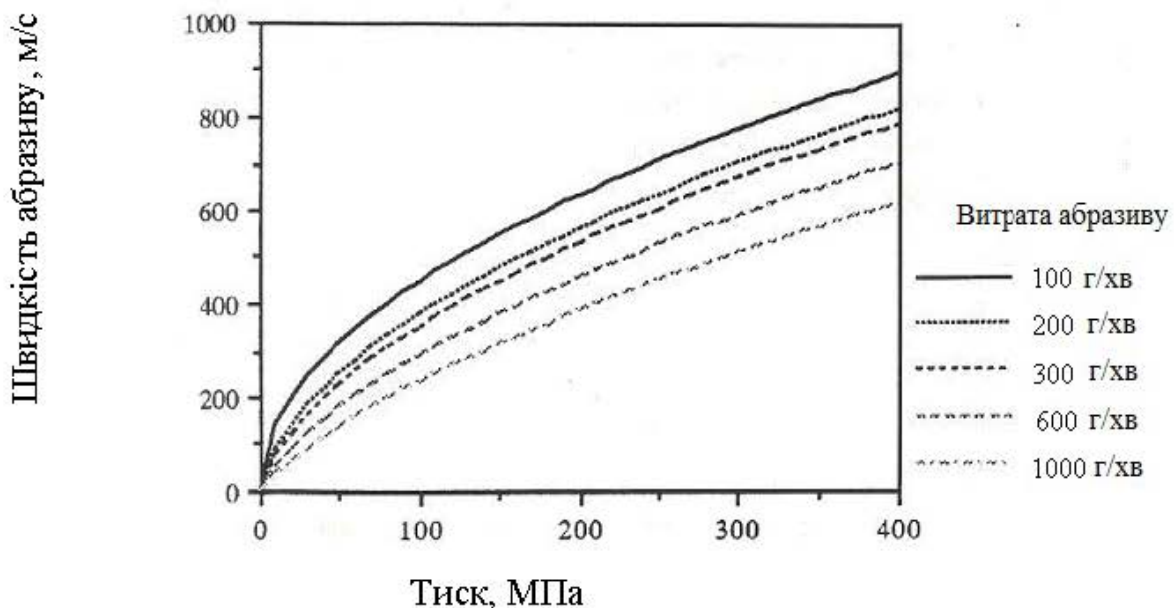


Рисунок 2.5 – Залежність швидкості частинок від тиску та витрати абразиву

## Висновки до розділу

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 фокусуючої трубки незначний, абразивні частинки мають однаковий розмір та властивості.

					КРМ.133ГМмд_21.06.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		28

### 3 МЕТОДИКА ПРОВЕДЕННЯ ДОСЛІДЖЕННЯ

#### 3.1 Експериментальна установка для проведення досліджень

Для проведення експериментальних досліджень використовувалася виробнича п'ятикоординатна установка гідроабразивного різання КГА 2-Р-2500, що застосовується для розкрою матеріалів (рис. 3.1). Система складається з насоса мультиплікаторної дії (на схемі не показаний), ріжучої головки (ALLFI) 3, промислового маніпулятора 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. 3.2.

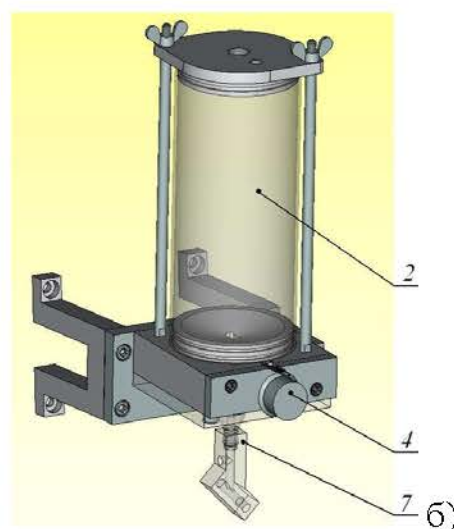
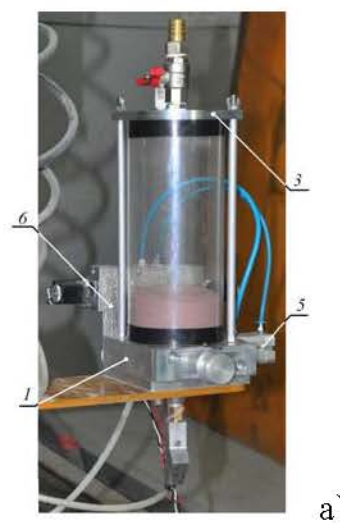


Рис. 3.1 – Установка для гідроабразивної обробки

Рисунок 3.2 – Система подачі абразиву: а) фото; б) модель

Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

Увімкнення /вимкнення подачі піску здійснюється за рахунок відкриття/закриття клапана, який являє собою пластину зі щільною, що переміщається вздовж корпусу за допомогою пневмо циліндра. Для різних тимчасових затримок за управління пневмо циліндром відповідає заздалегідь запрограмований логічний контролер. Конструкція гідроабразивної голівки та схема роботи системи подачі абразиву представлена на рис. 3.3.



Рисунок 3.3 – Конструкція гідроабразивної голівки та схема системи подачі абразиву

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

					КРМ.133ГМмд_21.06.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		30

крайне положення, і порожнину колби 2 з'єднається з фітінгом 7, що спричинить подачу абразивного матеріалу в головку.

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.

Переміщення шибера 9 уперек руху затвора 8 (рисунок 3.2) 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. 3.1.

Таблиця 3.1 – Технічні параметри установки

Параметр, конструктивний елемент	Одиниця вимірювання	Значення
1 Робочий тиск	МПа	350
2 Відстань між матеріалом та зрізом 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

### 3.2 Вразки 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 45. Остання застосовується в машинобудуванні, 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 3.2.

Таблиця 3.2 – 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	Сталь 45	7,8	180	500	350	30-60

Як заготовки запропоновано розглянути типові заготовки, представлені на

					КРМ.133ГМмд_21.06.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		32

рис. 3.4 , а основні їх параметри показані в табл. 3.3.

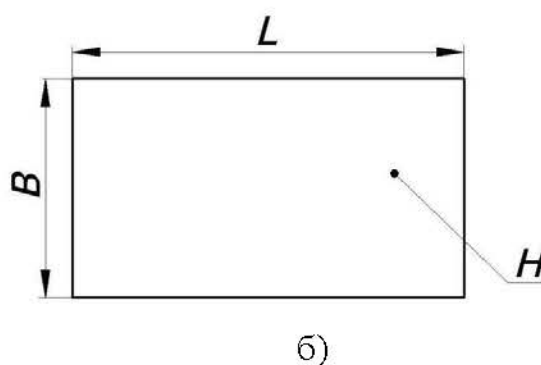


Рис. 3.4 – Ескізи типових заготовок: а) «Плита»; б) «Фланець»; в) «Вал»

Таблиця 3.3 – 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	

### 3.3 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).

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. Точність секундоміра 0,05 с. Для зважування піску застосовувалися електронні ваги фірми Saracity, зображені рис. 3.5, 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. 3.6, точність якого становить 8 мкм. Хвилястість оброблених поверхонь вимірювалася на контурографі Mahr MarSurf PCV.



Рисунок 3.5 – Електронні ваги фірми Saracity

Рисунок 3.6 – Контактний профілограф ПМ-210

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

### 3.4 Методика визначення точності профілю заготовок

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

					КРМ.133ГМмд_21.06.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		34

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.

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 в розділі 4, 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 вимірювальну базу для визначення параметрів системи (витрата, частота), параметрів якості оброблених поверхонь (шорсткість, хвилястість).

					КРМ.133ГМмд_21.06.000 ПЗ	Арк.
						35
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

## 4 РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТІВ

### 4.1 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 оброблюваних 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. 4.1 приведені оброблені гідро струменем поверхні сталі 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.

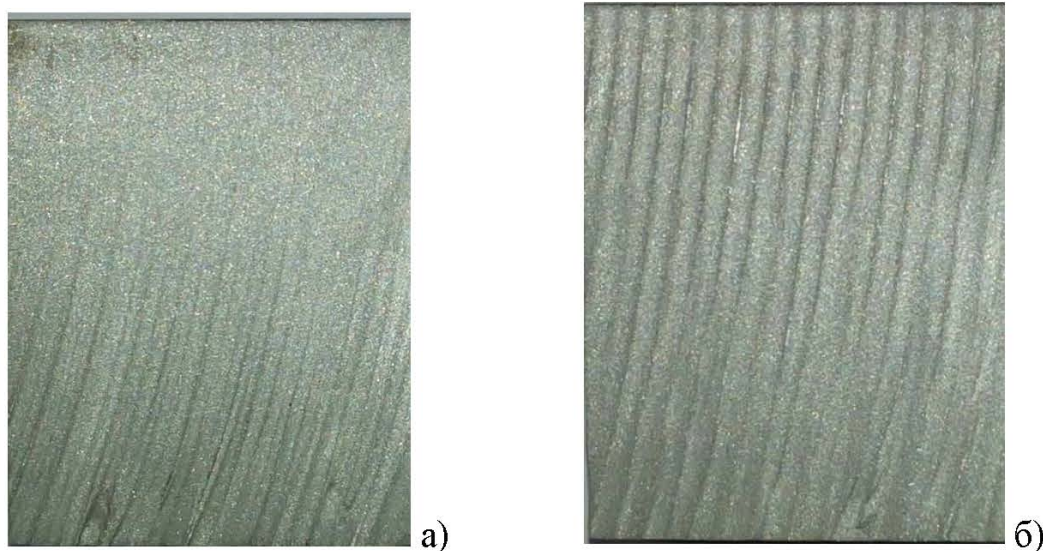


Рисунок 4.1 – Поверхні, оброблені гідроструменем із застосуванням різних систем подачі абразиву: а – стаціонарна; б – дискретна

З представлених рисунків видно, що при обробці зі стаціонарною подачею абразиву (рис. 4.1а) 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. 4.1 б хвилястість обробленої поверхні

					КРМ.133ГМмд_21.06.000 ПЗ	Арк.
						36
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

практично однакова становить приблизно (0,3-0,4 мм).

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.

#### **4.2 Вплив параметрів подачі абразиву на ширину різку при розкροї сталевих заготовок**

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 розкροю. 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 щільних врізань з використанням стаціонарної та дискретної системи подачі абразиву та їх вимірювання згідно зі схемою (рис. 4.2).

Загальний вигляд одержаних зразків показано на рис. 4.3, фотографії збільшених пропилів показано на рис. 4.4.

					КРМ.133ГМмд_21.06.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докum.	Підпис	Дата		37

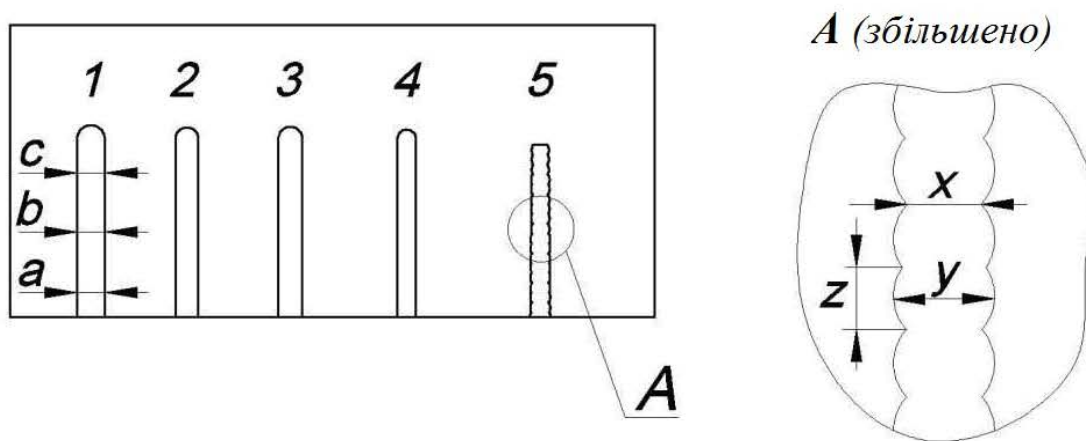


Рисунок 4.2 – Схема вимірювання ширини різку

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.

Рисунок 4.3 – Зразки для вимірювання ширини різку сталі

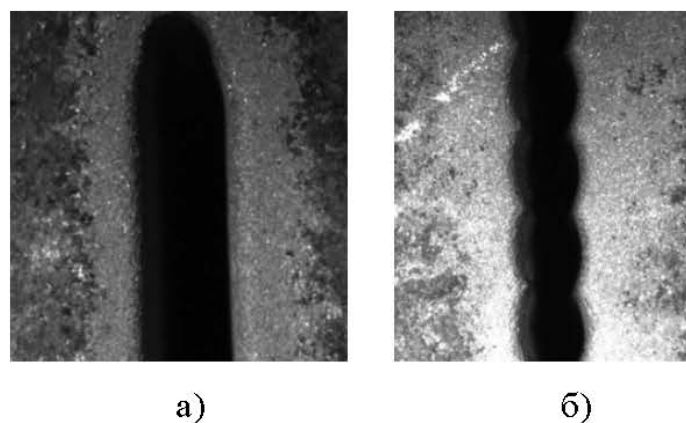


Рисунок 4.4 – Збільшені фотографії наскрізного різку: а) прямий різ сталі; б) хвилястий різ сталі

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. 4.1. 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. 4.2.

Таблиця 4.1 – Результати вимірів геометричних розмірів наскрізних різів

Матеріал	Режим різання	a, мм	b, мм	c, мм	x, мм	y, мм	z, мм
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

Можна зробити висновок, що при розкрії сталі 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 розкрії сталі 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 розкрії сталі дозволяє дещо скоротити ширину різку, а при різі сталі максимальне скорочення ширини різку спостерігається при частоті 1 Гц.

На рис. 4.5 показана залежність ширини різку сталі  $h$  від частоти дискретної

подачі  $n$ . Графік практично лінійний, ширина різку коливається близько 1,3 мм і від частоти подачі не залежить. Однак, незважаючи на незалежність ширини різку від частоти подачі, дискретний спосіб все ж таки дозволяє домогтися скорочення ширини різку, в порівнянні зі стаціонарною подачею абразиву.

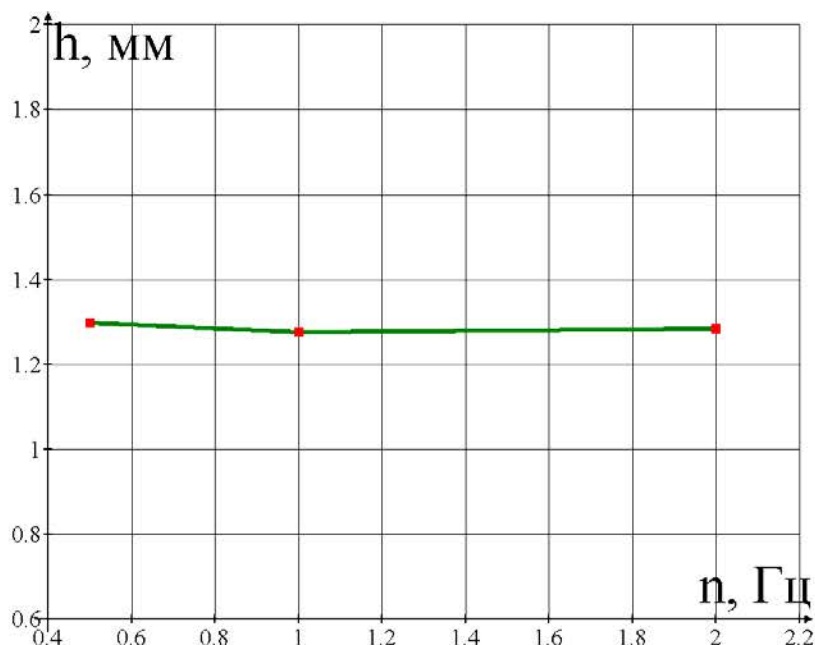


Рисунок 4.5 – Залежність ширини різку сталі товщиною 40 мм від частоти дискретної подачі

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

На рис. 4.6 зображено залежність кроку хвилі при різку сталі 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 (4.1), отримане під час обробки експериментальних даних, пов'язує крок хвилі  $z$  із частотою подачі абразиву  $n$ :

$$z = -1,599 \ln(n) + 0,91, \text{ мм} \quad (4.1)$$

— експериментальна крива — априксимація

Рисунок 4.6 – Залежність кроку хвилі різку сталевих листів товщиною 40 мм від частоти приводу дискретної подачі

Графік на рис. 4.7 ілюструє залежність висоти хвилястості на верхній кромці різку, отриманої на сталевій 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.

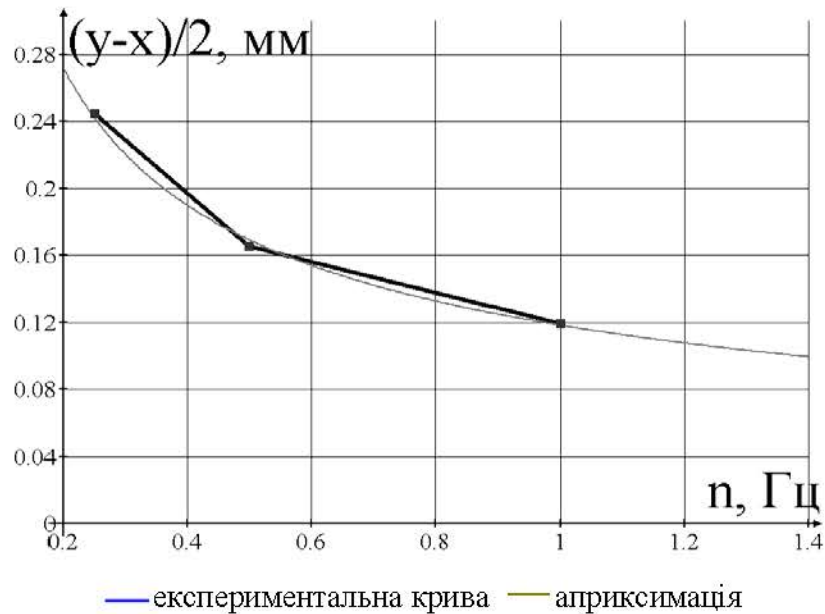


Рисунок 4.7 – Залежність висоти хвилястості різку сталевих листів товщиною 40 мм від частоти приводу дискретної подачі

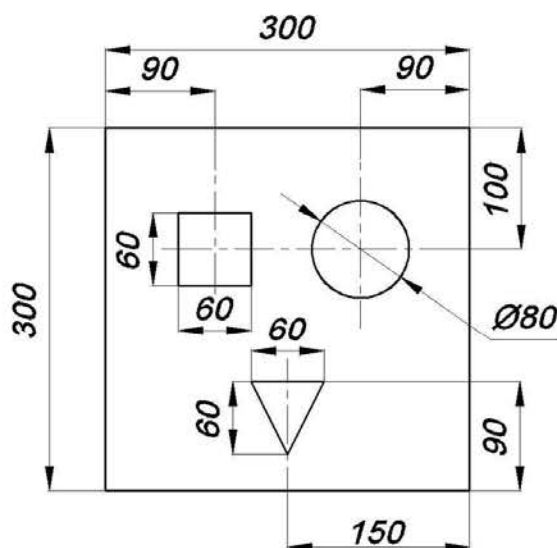
Це відбувається через зменшення шляху, пройденого без абразиву, крім того, експерименти показують, що висота хвилі, отримана при частоті подачі 1 Гц, у 2 рази менше, ніж при частоті 0,25 Гц. Залежність величини хвилястості від частоти подачі абразиву представлена рівнянням регресії (4.2), отримане шляхом априксимації експериментальних даних:

$$\frac{y-x}{2} = l_g = 0,1183n^{-0,52}, \text{ мм} \quad (4.2)$$

Графік на рис. 4.7 ілюструє можливість скорочення висоти хвилястості, отриманої із застосуванням дискретного способу подачі абразиву шляхом збільшення частоти приводу подачі

### 4.3 Вплив параметрів подачі абразиву на точність профілів заготовівель

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. 4.8 а, а сама отримана деталь рис. 4.8 б.



а)

б)

Рисунок 4.8 – Деталь для визначення точності: а) креслення б) вирізаний зразок із сталі

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. 4.2.

Відхилення розмірів, виміряні на зразках, представлені у табл. 4.2.

Таблиця 4.2 – Основні розміри тестових зразків

					КРМ.133ГМмд_21.06.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		42

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

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.

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

Для визначення якості отриманих гідроабразивним струменем поверхонь було проведено кілька серій експериментів із застосуванням різних матеріалів. Метою експериментів є встановлення впливу параметрів подачі абразиву на мікронерівності поверхні.

На рис. 4.9 зображені отримані у процесі експериментів зразки.

Результати вимірювань шорсткості поверхонь занесені до табл. 4.3.

Таблиця 4.3 – Результати вимірів зразків сталь товщиною 30 мм

Подача абразиву		Ra, мкм	Rz, мкм	Rmax, мкм
Стационарна	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



Рисунок 4.9 – Зразки, отримані в процесі експериментів: поверхні різання сталі

На рис. 4.10 представлені графіки залежності шорсткості поверхні сталі від частоти подачі абразиву.

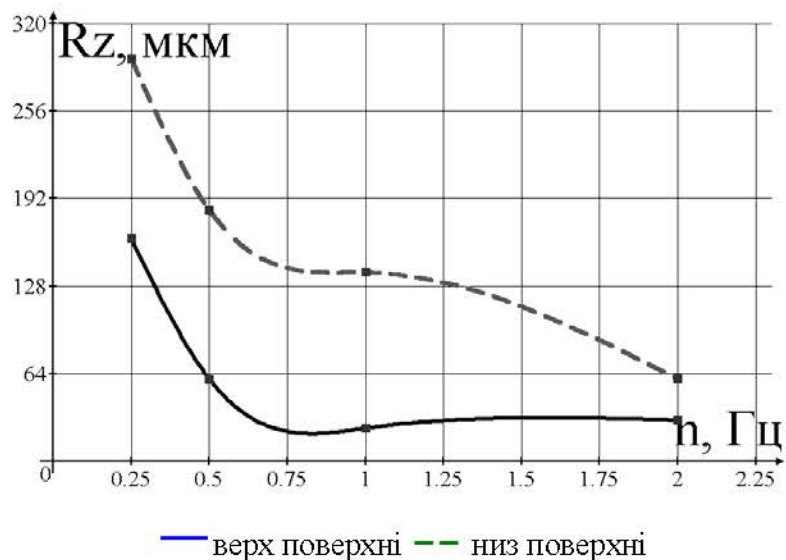


Рисунок 4.10 – Залежність шорсткості поверхні сталі від частоти подачі абразиву ( $V=1$  мм/с,  $P=350$  МПа,  $Q=250$  гр/хв)

Залежність коефіцієнта нерівномірності поверхні  $K_{\text{пов}}$  від частоти подачі абразиву показано рис. 4.11.

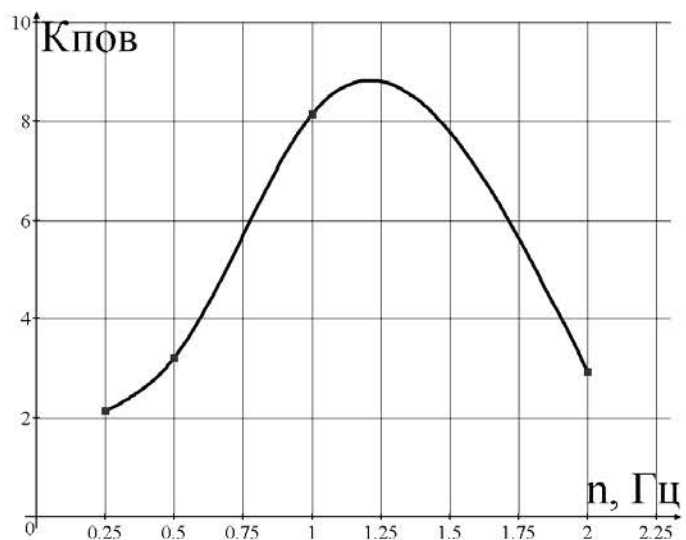


Рисунок 4.11 – Залежність коефіцієнта нерівномірності  $K_{\text{пов}}$  від частоти подачі при розкрії сталі

Графік рис. 4.11 показує, що максимальне відношення висот мікронерівностей на поверхні сталі виходить при частоті включення абразиву 1 Гц. Слід зазначити, що при стаціонарній подачі піску при розкрії сталі 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. 4.12 показана профілограма верхньої кромки поверхні різку сталі, 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.

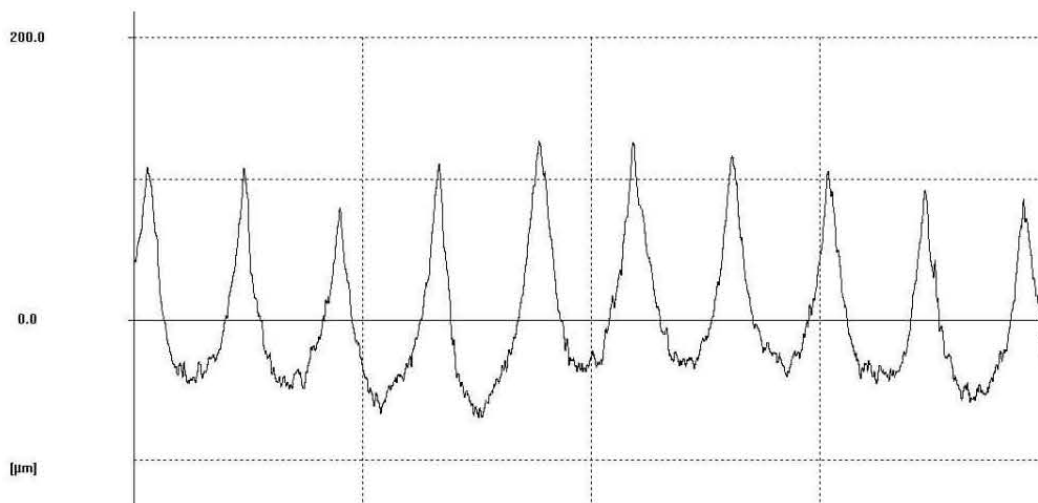


Рисунок 4.12 – Профілограма верхньої кромки поверхні різку сталі (0,25 Гц)

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 сталі. 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 сталі 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.

### Висновки розділу

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

					КРМ.133ГМмд_21.06.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		46

Встановлено, що зі збільшенням частоти подачі абразивного піску крок хвилі пропилю сталі скорочується не менше ніж у 3 рази, а висота хвилястості скорочується вдвічі; максимальна висота мікронерівностей при розкрої сталі 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.

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

					КРМ.133ГМмд_21.06.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		47

## 5 РЕКОМЕНДАЦІЇ ЩОДО ПРАКТИЧНОЇ РЕАЛІЗАЦІЇ ДОСЛІДЖЕНЬ

### 5.1 Екологічна експертиза

Виробнича діяльність людини супроводжується утворенням великої кількості відходів, що викидаються в біосферу Землі у вигляді газів, рідин і твердих залишків. Значна частина цих відходів є шкідливою не тільки для людини, а й для всього живого. Природне середовище не встигає засвоювати, переробляти та нейтралізувати величезну масу цих речовин, що надходять у біосферу в зростаючому обсязі. Отже, відбувається їх нагромадження в повітрі, воді, рослинах, тваринах. Це явище називають хімічним забрудненням біосфери.

Людство має інформацію про небезпеку, яка загрожує навколишньому середовищу, але до останнього часу багато з нас вважає її неприємним, але неминучим породженням цивілізації й гадає, що ми ще встигнемо впоратися з усіма труднощами, що виникли. Проте останні десятиріччя переконливо показали, що потрібно діяти вже нині, що час вимагає створення економічно чистих технологій і машин, розроблення методів інженерно-екологічної профілактики, випереджального планування природоохоронних заходів.

У Законі про підприємства в Україні закріплено положення про те, що всі підприємства зобов'язані своєчасно виконувати природоохоронні заходи.

Підприємства несуть відповідальність за додержання вимог і норм з охорони природи, раціонального використання та відновлення природних ресурсів.

Нарешті, Закон України про екологічну експертизу визначає головні принципи охорони довкілля [39]:

- пріоритетність вимог екологічної безпеки, обов'язковість дотримання екологічних стандартів, нормативів і лімітів використання природних ресурсів;
- гарантування екологічно безпечного середовища для життя і здоров'я людини;
- екологізація матеріального виробництва на засадах комплексного вирішення питань охорони навколишнього середовища.

Гарантією екологічних прав громадян поряд з іншими заходами є

					КРМ.133ГМмд_21.06.000 ПЗ	Арк.
						48
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

екологічна експертиза. В Україні передбачена державна, громадська та деякі інші види екологічних експертиз, які неодмінно мають здійснюватися в процесі законотворчої, інвестиційної, керівної та господарської діяльності, яка може впливати на навколишнє природне середовище. Об'єктами екологічної експертизи є:

- проекти схем розвитку й розміщення галузей господарства;
- техніко-економічні обґрунтування й розрахунки, проекти будівництва;
- документація для створення нової техніки;
- матеріали і продукція, реалізація яких може призвести до порушень

екологічної безпеки.

Екологічній експертизі можуть також підлягати екологічно небезпечні об'єкти й комплекси.

Метою екологічної експертизи є: визначення екологічної небезпеки господарської та іншої діяльності, що може в майбутньому безпосередньо вплинути на стан природного середовища; з'ясування відповідності проектів вимогам законодавства; оцінка повноти й обґрунтованості передбачених заходів щодо охорони природи.

Позитивні висновки екологічної експертизи є підставою для відкриття фінансування проекту розвитку об'єкта. Без цього здійснювати програми й проекти забороняється.

Використовувана у дослідженнях установка для гідро абразивного різку не є винятком, і тому також повинна підлягати екологічній експертизі. Необхідно з'ясувати вплив, який може спричинити установка екологічній безпеці. Тож давайте розглянемо дане питання і визначимо можливий вплив на навколишнє середовище [40].

Гідроабразивний струмінь як різучий 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

					КРМ.133ГМмд_21.06.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докum.	Підпис	Дата		49

допомогою використання дискретної подачі, доцільно застосовувати при розкрої 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

					КРМ.133ГМмд_21.06.000 ПЗ	Арк.
						50
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

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).

Основною складовою негативного впливу даної технології може бути забруднення навколишнього середовища стічними водами. Аналізуючи результати досліджень поверхневих та ґрунтових вод поблизу виробництва, виявляється неприємна картина – вміст хімічних елементів значно перевищує допустимі концентрації.

## 5.2 Охорона праці

Гідроабразивне різання здійснюється потоком абразивних частинок, що швидко летять, швидкість яких при атаці оброблюваної поверхні перевищує 500 м/с. Тому робітники металу працюють в спеціальних захисних скафандрах на певній захисній відстані [40].

Враховуючи несприятливі умови роботи, сопла повинні бути оснащені пристроями дистанційного керування, що дозволяють операторові перервати потік абразиву. Рукоятка управління потоком легко-абразивної суміші повинна бути розміщена поряд з соплом і оператор повинен уміти нею користуватися. Експлуатація апаратів без пристроїв дистанційного керування недопустима, оскільки це може привести до серйозних травм оператора і інших людей.

Крім безпеки, пристрої дистанційного керування забезпечують істотну економію стислого повітря і абразивних частинок. Якщо операторові доводиться чекати, поки хто-небудь не включить апарат, стисле повітря і абразив витратимуться даремно. Також відмова від залучення додаткового робочого дозволить заощадити на трудовитратах, оскільки одна людина може завантажувати абразив в декілька апаратів або виконувати іншу роботу між наповненням резервуарів.

Існує два принципи роботи пристроїв дистанційного керування. Популярна система скидання тиску дозволяє розгерметизувати гідроабразивний апарат всякий раз при відпуску рукоятки дистанційного керування. Система утримання

					КРМ.133ГМмд_21.06.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докum.	Підпис	Дата		51

тиску дозволяє відключити подачу повітря і абразиву в сопло без розгерметизації апарату. Кожна з них має свої переваги і недоліки для конкретних випадків застосування.

Прості системи скидання тиску стислого повітря широко використовуються в апаратах, розрахованих на одне робоче місце. При натисненні на рукоятку дистанційного керування в апараті піднімається тиск і можна починати роботу. При відпуску рукоятки подача стислого повітря в апарат припиняється, що приводить його до розгерметизації. Абразивний матеріал при цьому з увігнутої верхньої частини апарату або з розташованого зверху бункера-накопичувача автоматично пересипається в порожнину апарату [41].

Системи утримання тиску підтримують тиск стислого повітря в корпусі апарату, навіть коли струменеві роботи зупиняються. Таким чином, апарат, розрахований на декілька робочих місць, дозволяє одному операторові зупинити очищення поверхні і не впливати на роботу інших операторів. Наявність пристрою утримання тиску в двокамерному апараті забезпечує переміщення абразиву з верхньої камери в нижню без переривання процесу різання.

Пристрої утримання тиску можна встановлювати і на гідроабразивні апарати з одним соплом, якщо є великі втрати часу на герметизацію або розгерметизацію зважаючи на часте включення апарату.

Системи утримання тиску в корпусі апарату в базовій комплектації не забезпечують автоматичного поповнення абразивним матеріалом. Для цього апарат необхідно уручну розгерметизувати. Проте існує приладдя, яке дозволяє автоматизувати процес поповнення. Це можуть бути прості ручні перемикачі або електричні таймери і покажчики рівня.

Не дивлячись на різні принципи роботи, системи скидання і утримання тиску мають деякі загальні елементи, включаючи рукоятки управління і подвійний планг. Як система скидання, так і система утримання тиску можуть бути оснащені пневматичною або електричною рукояткою управління.

Більшість дистанційно керованих клапанів, керівників подачею стислого повітря, мають пневматичний привід, але серед способів активації можна вибрати

					КРМ.133ГМмд_21.06.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		52

електричний і пневматичний. Пневматичні системи підходять для більшості випадків застосування і зазвичай стоять дешевше електричних. Пневматичні рукоятки дистанційного керування добре працюють на відстані до 30м. Електричні рукоятки рекомендуються при роботі на відстані 45м і більше. Коли важіль відпущений, запобіжному фіксатору запобігає закінчення легко-абразивної суміші з сопла. Пневматичний пристрій дистанційного керування за нормальних умов реагує протягом 5 с. Електричні рукоятки управління працюють аналогічно пневматичним, за винятком того, що пневматичні деталі замінюються на герметизований мікроперемикач, а подвійний рукав – на електричний шнур. В цілях безпеки електрична рукоятка управління повинна працювати на напрузі електричного струму 12 В [41].

У системі скидання тиску використовуються два клапани: для початку роботи і для зупинки. Клапан на вході контролює потік стислого повітря, яке поступає в корпус апарату, а клапан на виході контролює відпрацьоване повітря.

Клапан на вході стислого повітря утримується в закритому стані за допомогою пружини. Клапан на виході стислого повітря нормально відкритий. Стисле повітря, що поступає від рукоятки управління створює над поршнями в камерах клапанів впускання і випуску повітря, що перевищують зусилля пружин, що утримують їх у нормальному стані. Це веде до відкриття впускного клапана і закриття випускного клапана, внаслідок чого відбувається герметизація корпусу апарату і починається робота.

У системах утримання тиску впускний і випускний клапани у нормальному стані є нормально закритими і підтримують тиск в корпусі апарату. При натисненні на рукоятку, що управляє, обидва клапани практично одночасно відкриваються і потік легко-абразивної суміші поступає до сопла.

Завдяки функції відсікання абразиву, оператор може закривати дозуючий клапан управління на соплі. Функція відсікання абразиву дозволяє операторові обдувати оброблені поверхні стислим повітрям, видаляючи металевий пил, що при цьому пристав, і осколки відпрацьованих абразивних зерен.

Абразивні зерна на високій швидкості можуть серйозно травмувати

					КРМ.133ГМмд_21.06.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		53

людину. Тому необхідно строго дотримувати правила експлуатації систем дистанційного керування [40]:

- забороняється змінювати, видаляти або замінювати будь-які оригінальні деталі виробника;
- забороняється закріплювати важіль дистанційного керування на рукоятці і перешкоджати його вільному переміщенню;
- щозміни оглядати і чистити фітинги на рукавах дистанційного керування; пил і грязь у фітингах перешкоджає вільному проходу стислого повітря в системі і приводить до появи подряпин на циліндрових стінках клапанів управління, що істотно погіршує надійність їх роботи;
- щозміни стежити за станом поверхонь рукавів подачі сигналів, що управляють, від рукоятки до клапанів подави стислого повітря;
- щозміни перевіряти працездатність системи дистанційного керування шляхом пробних включень і виключень.

По санітарних нормах кратність обміну повітря в очисному відділенні модуля  $n_{\text{доп}}=200$ . Враховуючи, що розрахункове значення  $n$  менше допустимого, тобто  $n \leq n_{\text{доп}}$ , можна вважати, що належний захист навколишнього середовища від шкідливого впливу абразиву буде забезпечений.

### 5.3 Техніко-економічне обґрунтування досліджень

Під економічною ефективністю розумітимемо різницю фінансових витрат на отримання заготовок при використанні стаціонарної та дискретної систем подач 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 [42-43]. 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.

					КРМ.133ГМмд_21.06.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		54

Технологічні витрати на гідро абразивний розкрій представлені у табл. 5.1.

Таблиця 5.1 – 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 гідроабразивне різання, представлених у табл. 5.1, 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

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 підрозробивним 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 розкрої заготовок сталі 45.

Аналіз отриманих математичних моделей дозволив запропонувати практичні рекомендації щодо вибору параметрів дискретної подачі абразиву у струмінь при розкрої 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 сталі 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 сталі, 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% при обробці сталі. Отримані залежності швидкості роздільного різання від частоти дискретної подачі свідчать про підвищення швидкості на 20-40% при різі сталі, що призводить до підвищення продуктивності і скорочення собівартості.

					КРМ.133ГМмд_21.06.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		56

## Список використаних джерел

1. Матеріалознавство та технологія конструкційних матеріалів : підручник для студентів вищих навчальних закладів, які навчаються за напрямом підготовки "Процеси, машини та обладнання агропромислового виробництва" / А. С. Опальчук [та ін.] ; За ред. А. С. Опальчука, О. Є. Семеновського. Ніжин : ГП Лисенко М.М., 2013. 752 с.

2. Вернадский В.Н. Гидроабразивная разделительная резка. Сварщик. 2000. № 3. С. 23 - 26.

3. Дальский А.М. Механическая обработка металлов. Москва: Машиностроение, 1981. 264 с.

4. Димов Ю.В. Управление качеством поверхностного слоя детали при обработке абразивными гранулами: Дис. д-ра техн.наук:05.02.08. Иркутск, 1987. 543 с.

5. Дунин-Барковский И.В. Карташова А.Н. Измерения и анализ шероховатости, волнистости и некруглости поверхности. Москва : Машиностроение, 1978. - 232 с.

6. Кошелев А.А., Эйзиер Л.А. Технология и оборудование для автоматизированной гидроабразивной обработки деталей. Автоматизация технологических процессов в области машиностроения для животноводства и кормопроизводства. НИИТМ, 1981. С. 37-47.

7. Горик О.В. Визначення оптимальних технологічних режимів дробеструменевого очищення металевих поверхонь. Полтава: ПДАА, 2012. 100 с.

8. Мартынов А.Н. Основы метода обработки деталей свободным абразивом, уплотненным инерционными силами. Саратов: Изд-во Саратов. ун-та, 1981. 212 с.

9. Петухов Е.Н. Получение отверстий в нержавеющей сталях импульсными абразивно-жидкостными струями. *Актуальные проблемы машиностроения на современном уровне* : тр. Всерос. науч.-техн. конф., Владимр. гос. ун-т. Владимир, 1995. С. 65 - 66.

					КРМ.133ГМмд_21.06.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		57

10. Петухов Е.Н. Разработка технологии резки труднообрабатываемых материалов сверхзвуковыми абразивно-жидкостными струями. *Производственные технологии*. 1999. Вып. 2. С. 53 -54.

11. Барсуков Г.В. Исследование погрешности формы при резании листовых материалов гидроабразивной струей. Сб. тр. Междунар. науч.- техн. конф. «Фундаментальные и прикладные проблемы технологии машиностроения» «Технология -2003», 2003 г. С. 449-455.

12. Степанов Ю.С. Формирование качества поверхностного слоя деталей при резании сверхзвуковой струей жидкости. СТИН. - 2003. - №10. С. 15 -17.

13. Тамаркин М.А. Теоретические основы оптимизации процессов обработки деталей свободными абразивами. Дис. докт. техн. наук. Ростов-на-Дону, 1995 г.

14. Тамаркин М.А., Шевцов С.Н., Клименко А.А. Моделирование процесса единичного взаимодействия гранулы свободного абразива и обрабатываемой детали. *Автоматизация и современные технологии*. 2005. №5. С. 56-62

15. Терегулов Н.Г. Лазерные технологии на машиностроительном заводе. Уфа: КумАПП, 1993.252 с.

16. Тихомиров Р.А. Гидрорезание неметаллических материалов. Киев : Техніка, 1984. 150 с.

17. Тихомиров Р.А. Резание струями жидкости высокого давления. Механическая обработка пластмасс. Ленинград : Машиностроение, 1975. 120 с.

18. Arola D. Abrasive waterjet machining of titanium alloy / D. Arola, M. Ramulu Proc. 8th Amer. Water Jet Conf., Water Jet Techn. Ass., St. Louis.-P. 389-408.

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

20. Arola D. Abrasive waterjet machining of titanium alloy [Text] / D. Arola, M. Ramulu // Proc. 8th Amer. Water Jet Conf., Water Jet Techn. Ass., St. Louis. P. 389-408.

					КРМ.133ГМмд_21.06.000 ПЗ	Арк.
						58
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

21. Горик А.В. Механизм разрушения поверхностного слоя металлических изделий при дробеструйной очистке / А.В. Горик, А.Н. Чернявский, А.А. Ландарь, Г.А. Шулянский // Сб. докладов 6-й междуна-род. науч. конф. «Механика разрушения бетона, железобетона и других строительных материалов». Санкт-Петербург: СПбГАСУ, 2012. С. 17-22.

22. Chung Y. Prediction of geometry of the kerf created in the course of abrasive waterjet machining of materials / Y. Chung, E.S. Geskin, P. Singht // Jet Cutting Technol. 1992. P. 527 - 541.

23. Джонсон К. Механика контактного взаимодействия / Под ред. Р. В. Гольдштейна: Пер. с англ. Москва : Мир, 1989. 510 с.

24. Zeng J. The Machinability of Porous Materials by a High Pressure Abrasive Waterjet [Text] / J. Zeng // Proc. of the Winter Annual Meeting. 1989. P. 37-42.

25. Шапиро И. И. Установка для контурного разрезания неметаллических материалов с помощью высоконапорной струи воды. Станки и инструмент. 1992. - № 9. С. 20-22.

26. Шпилев В.В. Повышение эффективности процесса гидроабразивной резки листовых деталей путем оптимизации режимов обработки и параметров струи рабочей жидкости: . дис. канд. техн. наук: 05.02.08/ Шпилев Василий Владимирович. 2012. 147 с.

27. Системы автоматизированного проектирования технологических процессов, приспособлений и режущих инструментов. Под общ. ред. С.Н. Корчака. Минск : Машиностроение, 1988. 352с.

28. Смазочно-охлаждающие технологические средства и их применение при обработке резанием. Минск :Машиностроение, 2006. 544 с.

29. Справочник по электрохимическим и электрофизическим методам обработки [Текст] / Г. Л. Амитан, И. А. Байсупов, Ю. М. Барон; под общ. ред. В. А. Волосатова. Ленингр. отд., 1988. 719 с.

30. Пляскин И.И. Оптимизация технических решений в машиностроении. Минск : Машиностроение, 1982. 176 с.

31. Полянский С.Н. Технология и оборудование гидроабразивной резки.

					КРМ.133ГМмд_21.06.000 ПЗ	Арк.
						59
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Вестник машиностроения. 2004. №5. С. 43-46.

32. Маслов Е.Н. Постникова Н.В. Основные направления в развитии теории резания абразивным, алмазным и эльборовым инструментом. Москва : Машиностроение, 1975. 48с.

33. Морозенко В.Н. Гидроабразивная очистка поверхности листов перед нанесением покрытий. Чер. металлургия : Бюл. науч.-техн. информ. 1980. Вып. 15. С. 49-50.

34. Кулаков Ю. М. Отделочно-зачистная обработка деталей / Ю. М. Кулаков, В. А. Хрульков. Минск : Машиностроение, 1979. 216 с.

35. Андилахай А. А. Абразивная обработка деталей затопленными струями / Андилахай А. А.. Мариуполь: ПГТУ, 2006. 190 с.

36. Лазерная очистка в машиностроении и приборостроении / В.П. Вейко, В.Н. Смирнов, А.М. Чирков, Е.А. Шахно. СПб: НИУ ИТМО, 2013. 103 с.

37. Горик А.В. Временные параметры контакта атакующей дробинки с обрабатываемой поверхностью / А.В. Горик, Г.А. Шулянский, А.Н. Чернявский // Бетон и железобетон в Украине. Полтава, 2013. 4 (74). С.24-30.

38. Шманев В. А. Струйно-абразивная обработка деталей ГТД/ В. А. Шманев, А. П. Шулепов, А. В. Мещеряков. Москва : Машиностроение. 1995. 143с.

39. Закон України « Про економічну експертизу » відомості Верховної Ради України (ВВР), 1995, №8, ст. 54.

40. Головка В.О. Сільськогосподарська екологія: навчальний посібник для студентів вузів. Харків : Ескада, 2009. 617 с.

41. Охорона праці в галузі – Збірник схем, термінів, довідкових даних, розрахунків та тестів. Полтава: ПДАА, 2005. 118 с.

42. ДСТУ 4397:2005 «Сільськогосподарська техніка. Методи економічного оцінювання техніки на етапі випробовування».

43. Кулішов В. В. Економіка підприємства: теорія і практика: навч. посіб. Київ : Ніка-Центр, 2002. 216 с.

					КРМ.133ГМмд_21.06.000 ПЗ	Арк.
						60
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		