

Міністерство освіти і науки України
Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет
Кафедра

Комп'ютерної інженерії та управління
Комп'ютерних інтелектуальних технологій та систем

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА Пояснювальна записка

рівень вищої освіти

другий (магістерський)

Інтелектуальна модель гідроструминної порізки листового металу
(тема)

Виконав:

студент II курсу, групи КІТм-22-1
Владислав ПИРОГОВ
(власне ім'я, прізвище)

Спеціальність 123 Комп'ютерна інженерія
(код і повна назва спеціальності)

Тип програми освітньо-професійна
(освітньо-професійна або освітньо-наукова)

Освітня програма Комп'ютерні інтелектуальні технології
(повна назва освітньої програми)

Керівник доц. каф. КІТС Олег ІЛЮНІН
(посада, власне ім'я, прізвище)

Допускається до захисту

Зав. кафедри

Олег РУДЕНКО

(підпис)

(власне ім'я, прізвище)

2023 р.

Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет	Комп'ютерної інженерії та управління
Кафедра	Комп'ютерних інтелектуальних технологій та систем
Рівень вищої освіти	другий (магістерський)
Спеціальність	123 Комп'ютерна інженерія
Тип програми	освітньо-професійна
Освітня програма	Комп'ютерні інтелектуальні технології

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Зав. кафедри _____

(підпис)

«_____» _____ 2023р.

ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

студентові Пирогову Владиславу Олександровичу1. Тема роботи (проекту) Інтелектуальна модель гідрострумінної порізки листового металу

затверджена наказом університету від "03" листопада 2023 р. № 1290Ст

2. Термін подання учнем роботи до екзаменаційної комісії _____ 2024р.

3. Вихідні дані до роботи (проекту) _____

1) особливості процесу гідрострумінного різання;

2) існуючі моделі процесу гідрострумінного різання листового металу;

3) середовище моделювання - пакет MathLab

4. Перелік питань, що потрібно опрацювати в роботі:

Огляд стану проблеми та постановка задачіАналіз літератури за напрямком дослідженняАналіз проблеми гідрострумінної порізки;Розробка інтелектуальної моделі гідрострумінної порізки листового металуЕкспериментальні дослідженняПідготовка презентаційного матеріалу

5. Перелік графічного матеріалу із зазначенням креслеників, схем, плакатів, комп'ютерних ілюстрацій (п.5 включається до завдання за рішенням кафедри)

18 слайдів

6. Консультанти розділів роботи (п.6 включається до завдання за наявністю консультантів згідно до наказу, зазначеному у п.1)

Найменування розділу	Консультант (посада, прізвище, ім'я, по батькові)	Позначка консультанта про виконання розділу	
		підпис	дата

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Видача та узгодження теми проєкту	06.11.2023	Виконано
2	Огляд стану проблеми та постановка задачі	07.11-22.11.2023	Виконано
3	Постановка задачі дослідження	23.11- 27.11.2023	Виконано
4	Аналіз літератури за напрямком дослідження	28.11-03.12.2023	Виконано
5	Аналіз проблеми гідрострумінної порізки	04.12-10.12.2023	Виконано
6	Розробка інтелектуальної моделі гідрострумінної порізки листового металу	11.12-24.12.2023	Виконано
7	Експериментальні дослідження	25.12-29.12.2023	Виконано
8	Підготовка презентаційного матеріалу	30.12-24.01.2024	Виконано
9	Подання до ЕК	24.01.2024	Виконано
10	Захист проєкту		

Дата видачі завдання «06» листопада 2023 р.

Студент _____
(підпис)

Керівник роботи _____ доц. каф. КІТС Олег ІЛЮНІН
(підпис) (посада, власне ім'я, прізвище)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка кваліфікаційної роботи: 110 сторінок, 18 рисунків, 4 таблиці, 1 додатків, 33 джерел.

ГІДРОСТРУМІННА ПОРІЗКА МЕТАЛУ, ABRASIVE WATER JET PROCESSING, ІНТЕЛЕКТУАЛЬНА ІДЕНТИФІКАЦІЯ, RADIAL BASED NEURAL NETWORK

У даному дослідженні була розроблена інтелектуальна модель для оптимізації процесу гідроструминної порізки металу. Головною метою було підвищення ефективності порізки металу різної товщини при використанні суспензії абразивів із змінними характеристиками. Розглянуто інтелектуальну модель ідентифікації параметру швидкості при обмеженні/ завданні інших параметрів технологічного процесу гідроструминної порізки металу.

Досліджено процес гідроструминної порізки металу. Результати показують, що запропонований підхід застосування радіально-базисної мережі ідентифікації цільового параметру, в поєднанні з іншими заходами автоматизації агрегатів гідроабразивної обробки, дозволяє підтримувати оптимальні параметри функціонування агрегату та підвищити швидкість технологічного процесу.

Ця інтелектуальна модель може бути ефективно впроваджена як частина мікроконтролерної системи управління установкою гідроструминної або гідроабразивної обробки металів. При певній адаптації та налаштуванні моделі її можна використати при розробці додатків систем керування агрегатами гідроабразивної обробки інших матеріалів. Це рішення є доступним та перспективним для реалізації в індустріальних застосуваннях.

ABSTRACT

Explanatory note of the qualification work: 110 pages, 18 figures, 4 tables, 1 appendices, 33 sources.

WATER JET METAL CUTTING, ABRASIVE WATER JET PROCESSING, INTELLECTUAL IDENTIFICATION, RADIAL BASED NEURAL NETWORK

In this study, an intelligent model was developed to optimize the process of hydrojet metal cutting. The main goal was to increase the efficiency of cutting metal of different thickness when using a suspension of abrasives with variable characteristics. The intelligent model of the identification of the speed parameter when limiting/setting other parameters of the technological process of hydrojet cutting of metal is considered.

The process of hydrojet metal cutting was studied. The results show that the proposed approach of using a radial base network for target parameter identification, in combination with other measures of automation of hydroabrasive processing units, allows maintaining the optimal parameters of the unit's functioning and increasing the speed of the technological process.

This intelligent model can be effectively implemented as part of a microcontroller control system for a hydrojet or hydroabrasive metal processing plant. With certain adaptation and adjustment of the model, it can be used in the development of applications for the control systems of hydroabrasive processing units of other materials. This solution is available and promising for implementation in industrial applications.

АНОТАЦІЯ

Пирогов В.О. Інтелектуальна модель гідрострумінної порізки листового металу. – Магістерська кваліфікаційна робота.

Гідрострумінне різання - це інноваційний процес обробки матеріалів, що використовує струмені води під високим тиском для різання різноманітних матеріалів, від металів до скла. Цей метод забезпечує високу точність та дозволяє виконувати складні вирізання без значної термічної деформації. Він знайшов широке застосування у виробництві для створення різноманітних деталей та вирізання складних форм. Однією з передових технологій у цій сфері є Abrasive Water Jet (AWJ), що використовує додаткові домішки твердих часток абразиву в робочу суспензію, забезпечуючи більшу ефективність процесу.

У першому розділі було проаналізовано предметну область, а саме досліджено технологічний процес (ТП) гідроабразивної обробки (ГАО) у застосуванні до різання металу (ГАР). Визначено, що спосіб автоматизованої гідроабразивної обробки може застосовуватися для різноманітних завдань, включаючи формування отворів прецизійної точності, закруглення гострих кромки, полірування складних поверхонь, видалення задирок і зачищення зварних швів, підготовку до нанесення покриття, очищення корпусів морських суден, видалення забруднень і пофарбованих поверхонь самих різноманітних матеріалів: метал, скло, пластик, бетон, каміння. При цьому процес є екологічним, мінімізує кількість побічних відходів, що утворюються в ТП, що відповідає технічним вимогам Industry 4.0 щодо енергоефективності та мінімізації викидів у навколишнє середовище. Також було проаналізовано застосування сучасних моделей у ГАО, була поставлена мета дослідження.

У другому розділі проаналізовані існуючі інтелектуальні моделі ГАР металу. Визначено, що теоретичні та експериментальні дослідження зосереджені на генетичних, ройових та нечітких моделях ідентифікації та прогнозування: турбулентності потоку багатофазної абразивної суміші, глибини різку, кута похилу кромки різку та нечіткому характеристик процесу.

У третьому розділі була розроблена модель ГАР для з метою зменшення споживання сірчаної кислоти в автоматизованих лініях травлення. Розроблені дві ключові інтелектуальні моделі: перша – для управління обробкою поверхневих дефектів, а друга – для керування тиском розчину в струмені.

В четвертому розділі наведені результати експериментальних випробувань запропонованої моделі. Розроблене рішення в рамках зазначених меж технологічних параметрів дозволяє обирати оптимальні параметри ТП при налаштуванні ГАО агрегатів. Впровадження в систему керування ГАО агрегатів дає можливість підвищення швидкості ТП. Зазначена інтелектуальна модель може бути реалізована як програмний додаток – частина існуючих мікроконтролерних систем керування ГАО, враховуючи її компактність та ефективність. Прототип моделі при певній адаптації та налаштуванні можна використати при розробці додатків систем керування агрегатами гідроабразивної обробки інших матеріалів.

ГІДРОСТРУМІННА ПОРІЗКА МЕТАЛУ, ABRASIVE WATER JET PROCESSING, ІНТЕЛЕКТУАЛЬНА ІДЕНТИФІКАЦІЯ, RADIAL BASED NEURAL NETWORK

Публікації здобувача за темою роботи:

1. O. Ilyunin, M. Khodak, V. Pyrohov, O. Pasholoc, M. Tryhuba, S. Serdiuk. Intelligent models for control of jet hydro-processing of rolled steel defects. Інтегровані технології та енергозбереження. Системи управління та обробки

інформації, — Харків: НТУ «ХПІ», 2023. – №2,- с.45-56 ISSN 2078-5364 (print) ISSN 2708-0625 (online).

2. O. Ilyunin, V. Pyrohov, S. Serdiuk, M. Tryhuba. Features of using intelligent automation for Water Jet Technology. Materials of the XI International Scientific Conference «Information-Management Systems and Technologies» 21th – 23th September, 2023, Odessa. pp. 85-86.

ЗМІСТ

Перелік умовних позначень, скорочень і термінів.....	11
Вступ.....	12
1 Аналіз предметної області та постановка задачі дослідження.....	14
1.1 Особливості процесу гідрострумінного різання.....	15
1.2 Застосування технології ГАР.....	20
1.3 Застосування інтелектуальних моделей у технологіях ГАР.....	22
1.4 Постановка задачі дослідження.....	28
2 Аналіз моделі процесу гідрострумінної порізки листового металу...	30
2.1 Узагальнена регресійна модель ГАР.....	31
3 Розробка інтелектуальної моделі гідрострумінної порізки листового металу.....	38
3.1 Аналіз проблеми гідрострумінної порізки.....	38
3.2 Інтелектуальна модель гідрострумінної порізки листового металу.....	39
3.3 Конфігурація та налагодження моделі гідрострумінної порізки листового металу.....	46
4 Експериментальні дослідження моделі.....	51
4.1 Імітаційне моделювання.....	51
4.2 Модель економічної ефективності ГАР.....	53
Висновки.....	55
Перелік використаних джерел.....	54
Додаток. Графічний матеріал кваліфікаційної роботи.....	60

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ

ШІ – штучний інтелект

ТП – технологічний процес

GA – генетичний алгоритм

RBNN – radial based neural network

SA – simulated annealing (модельований відпал)

WJP (Water Jet Processing)

WJ – water jet.

ТП – технологічний процес

ГАО – гідроабразивна обробка

ГАР – гідроабразивне різання металу

ВСТУП

В умовах глобального ринку, де конкуренція постійно зростає, впровадження новітніх технологій, що покращують процеси виробництва, стає ключовим для збереження конкурентоспроможності. Мінімізація втрат матеріалу та оптимізація будь-якого технологічного процесу може призвести до зменшення відходів та негативного впливу на навколишнє середовище.

Гідрострумінне різання - це технологічний процес, де матеріал ріжеться за допомогою струменя води. Під час цього процесу, вода під високим тиском направляється на оброблюваний матеріал, створюючи потужний струмінь, який здатний розрізати навіть дуже тверді матеріали, такі як метал, скло чи камінь. Цей метод різання дозволяє отримати високу точність та виконувати складні геометрично форми без значного нагрівання або деформації матеріалу.

Однією з сучасних інновацій у цій галузі є Abrasive Water Jet (AWJ), технологія система, де до струменя води може додаватися абразивний матеріал для підвищення його ріжучої сили. Застосування координатної розкрійної плити та програмних інтерфейсів ЧПУ, рівень розвитку яких за останнє десятиріччя досяг їх розповсюдження навіть на ринок непрофесійного інструменту, сформував такий напрям станкобудування як ГАО-агрегати, в яких положення робочої головки автоматично регулюється для досягнення більшої точності та уникнення утворення скосів під час різання. Ця технологія є економічною в сенсі переробки відходів виробництва, дозволяє швидше та точніше виконувати вирізання, знижуючи витрати часу та ресурсів, .

Швидкий розвиток індустрії та технологій вимагає постійного вдосконалення процесів обробки матеріалів у відповідності до концепції сталого розвитку промисловості Industry 4.0 [1]. Пошук способів прискорення процесу різання та зменшення витрат часу та ресурсів є важливим для підвищення ефективності виробництва. Дослідження та впровадження

інтелектуальних моделей у галузі гідроструминного та гідроабразивного різання відкриває нові можливості для технічних інновацій та подальшого розвитку цієї технології. Інтелектуальні моделі, що останнім часом набули широкого застосування в автоматизації ГАО-агрегатів дозволяють оптимізувати та вдосконалювати процеси обробки різноманітних матеріалів, забезпечуючи виробництво більш точних та якісних деталей.

1 АНАЛІЗ ПРЕДМЕТНОЇ ОБЛАСТІ ТА ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕННЯ

Листовий метал - це широке поняття, яке охоплює різноманітні металеві листи різних розмірів, форм, товщин та матеріалів. Він може бути виготовлений з різних металів, таких як сталь, алюміній, мідь, титан, нікель та інші сплави.

Листовий метал широко використовується в різних сферах промисловості, будівництва, авіації, автомобільної промисловості та інших галузях. Його використовують для виготовлення каркасів, облицювання будівель, створення механічних частин, елементів машин, контейнерів та інших конструкцій.

Основні характеристики листового металу, на які зазвичай звертають увагу при виборі, це товщина, міцність матеріалу, його стійкість до корозії та інші фізичні властивості, які можуть бути важливими залежно від конкретного застосування. Також, листовий метал може мати різні види подальшої обробки, такі як штампування, фрезерування, свердління отворів, різання.

Для різання листового металу існують різні методи, і вибір методу зазвичай залежить від товщини, типу металу та точності, яку хочете отримати. Звичайні методи різання листового металу можуть бути ускладнені або прості, в залежності від потреби у точності, товщини металу та доступних ресурсів:

- ручний різ. Ножиці для металу використовуються для тонких або середніх листів металу. Пилки для металу використовуються для менших проектів або деталей. Ручний різ з використанням флексу використовується для тонких або середніх листів, можна використовувати різні типи дисків відповідно до типу металу;

- механічні методи. Для товстих листів використовується ножовка для металу. Гільйотина використовується для промислових застосувань та може

різати товсті металеві листи. Станок з ЧПУ (числовим керуванням) - це точний метод різання металу, використовується для складних форм і вимагає програмування;

- теплові методи. Плазмове різання використовує плазму високої температури для різання металу. Лазерне різання використовується для високої точності та складних форм;

- гідравлічні та електричні преси використовується для штампування та вирізання певних форм.

- ультразвукове різання. Використовується ультразвуковий ніж для м'яких металів та деяких спеціальних додатків, де точність важлива.

- гідрострумінне (гідроабразивне різання). Використовується для різання металу високошвидкісною струминною водою під високим тиском (з додаванням частки абразиву у струмінь) з високою точністю.

1.1 Особливості процесу гідрострумінного різання

Гідрострумінне (або водяне) різання є ефективним та універсальним методом різання різних матеріалів і користується популярністю через свою точність та мінімальний тепловий вплив на матеріал. Гідрострумінне різання використовується у промисловості для вирізання деталей, обрізки листового металу, виготовлення деталей для машинобудування та інших цілей.

Гідрострумінне різання - це процес різання матеріалів за допомогою струму води, що виходить під високим тиском через сопло. Основна ідея полягає в використанні струму води, що прискорюється до великої швидкості та спрямовується на матеріал для різання.

Особливістю гідрострумінного різання є його універсальність. Гідрострумінне різання може використовуватися для різних матеріалів, включаючи метали, скло, камінь, бетон, пластики тощо.

Також особливістю цього методу є мінімальний тепловий вплив. Оскільки процес використовує воду, тепловий вплив на матеріал є мінімальним, що дозволяє різати матеріали без деформацій або змін їх властивостей.

Здатність до високої точності, також є особливістю цього методу, що дозволяє виконувати складні різні та деталізовані вирізи.

Інструментом гідроструминної порізки матеріалів є певним чином сформований струмінь рідини, що виходить із спеціального сопла діаметром 0,08-2,5 мм з надзвуковою швидкістю (1000 і більше м/с) і забезпечує робочий тиск на заготівлю 400 МПа і більше. Рідина у вигляді струменя з тиском діє на матеріал за площею, стискає його за напрямом руху струменя, в результаті цього в матеріалі утворюється ядро ущільнення, що розширюється перпендикулярно до вектора швидкості струменя. Останнє може пошкодити матеріал. Оскільки відстань від зрізу сопла до поверхні матеріалу становить кілька міліметрів, тиск струменя перевищує межу міцності матеріалу - за рахунок цього здійснюється різання.

Струмінь рідини діє на матеріал аналогічно твердому інструменту, але є і суттєві відмінності: рідина розтікається по ньому, розмиває та забирає частини ядра ущільнення імпульсу. Твердий інструмент утримує ядро ущільнення від руйнування до кола обсягу матеріалу, що оточує ядро ущільнення. Розмивання і винесення ядра ущільнення призводить до того, що воно заглиблюється в матеріал, а робота, що їм виділяється, через перевантаження навколишнього матеріалу зменшується, тому відбійка як сколом, так і виолом стає неможливою. У матеріалі утворюється поглиблення, і якщо струмінь переміщати, то утворюється щілина певної глибини, яка залежить як від тиску в струмені, так і від твердості абразиву та міцності матеріалу. Енергія струменя зменшується при збільшенні її довжини через збільшення її перерізу, турбулентного руху, розпаду на частини тощо, тому прагнуть наблизити сопло до оброблюваного матеріалу.

Сьогодні існують два способи водоструминного різання матеріалів:

- різання водою, або гідрорізання - waterjet cutting;
- гідроабразивне різання (вода плюс абразив) - abrasive waterjet cutting.

Режими водоструминного різання, що здійснюється обома способами, можуть бути розширені за рахунок підведення до струминної головки холодоагенту, що сприяє утворенню в струмені крижинок, які надають їй абразивних властивостей. При водоструминному різанні враховується і кут атаки - кут між напрямком струменя та оброблюваної поверхнею. Максимальна ріжуча здатність та продуктивність процесу досягаються при куті атаки 90 градусів.

Загальний вигляд ГАО-агрегату (а) та схеми ріжучої головки (б) представлено на рис.1.1.

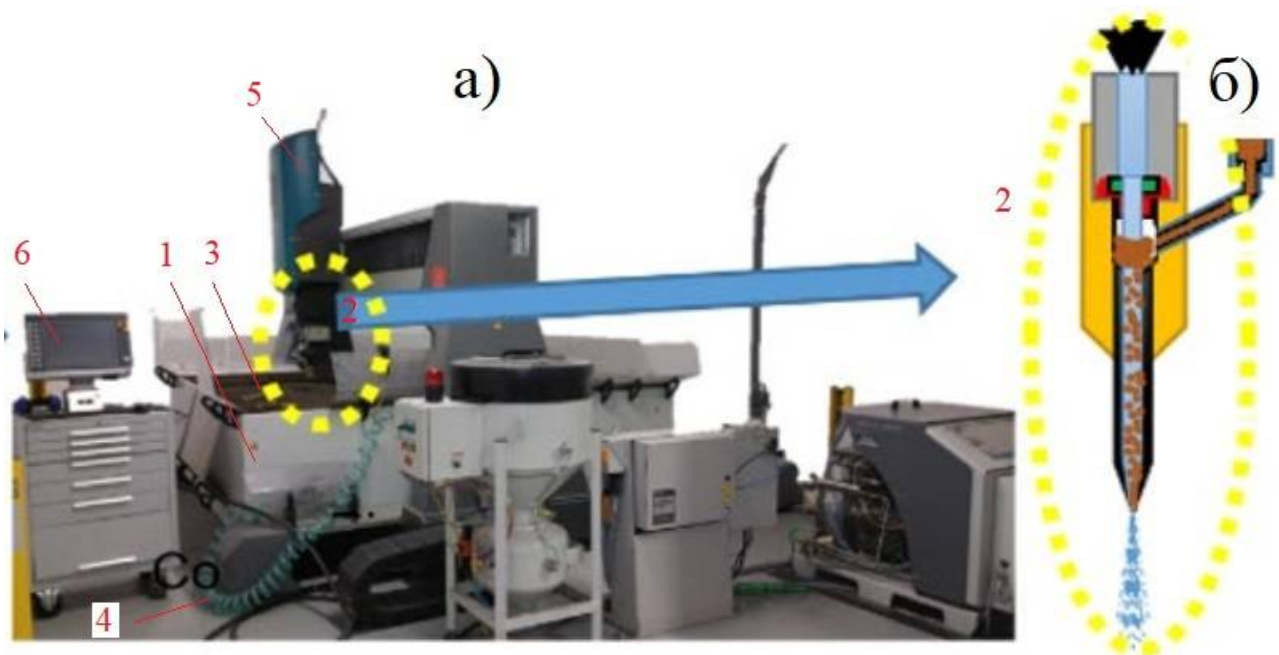


Рисунок 1.1 – Загальний вигляд ГАО-агрегату (а) та схема ріжучої головки (б)

У комплекс для ГАР обов'язково входять:

1 – насос високого тиску; 2 – ріжуча головка; 3 – координатний стіл та приводи переміщень ріжучої головки; 4 – гідравлічна система підведення рідин високого тиску; 5 – система подачі абразиву (для гідроабразивного різання); 6 – система числового програмного управління. Додатково комплекс може оснащуватися: пристроєм для запобігання зіткненням ріжучої головки із заготівлею; системою з кількох ріжучих головок; механічною системою попереднього надсвердлювання; пасткою струменя води, що гасить її енергію і служить також для збору відпрацьованого абразиву, та ряд інших.

Гідроструминне обладнання має різний ступінь універсальності та автоматизації, у тому числі виготовляється і у вигляді роботизованих комплексів.

Насос високого тиску (компресор) забезпечує створення надзвукового струменя рідини як ріжучого інструменту. Застосовується універсальна принципова гідравлічна схема, де як підсилювач тиску використовується спеціальний мультиплікатор двосторонньої або односторонньої дії (рис. 1.1).

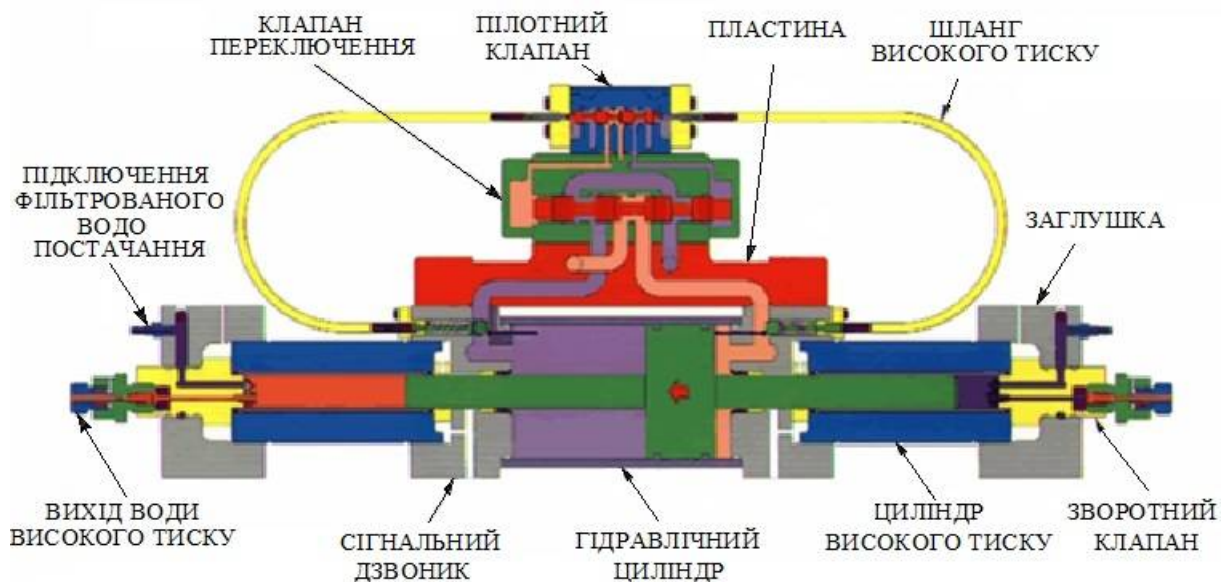


Рисунок 1.2 – Гідравлічна схема компресора фірми Flow

Вибір компонування залежить від конкретних умов обробки (наприклад, від допустимої величини перепаду тиску, необхідної витрати рідини), що дозволяє досягти заданих результатів як за продуктивністю, так і за якістю.

Крім того, використовуються стандартні регулюючі, розподільні, контрольні та допоміжні гідравлічні пристрої.

На рис. 1.2 показана компресорна установка фірми Flow – піонера у створенні установок гідрорізання. Для обробки великогабаритних або окремих виробів в умовах заводу, порту, полігону, для виконання робіт під водою насос високого тиску може монтуватися на будь-якому транспортному засобі - електрокарі, автомобілі, судні. У цьому випадку підведення рідинного струменя до виробу, розташованого, як правило, на деякій відстані від насоса високого тиску здійснюється за допомогою гнучкого шланга.

На рис.1.3 показано ріжучу головку моделі Paser 3 американської компанії Flow International Corporation.



Рисунок 1.3 – Загальний вигляд ріжучої головки Paser 3 Flow Inc.

Струменева (ріжуча) головка здійснює остаточне формування високонапірного тонкого струменя як ріжучого інструменту за своїми геометричними та енергетичними параметрами. Конструктивні особливості струминної головки (взаєморозташування деталей, характер їх з'єднання і герметизація), впливаючи на гідродинамічні характеристики і компактність струменя, що формується, визначають якість і надійність її роботи.

Вода під високим тиском подається від насоса високого тиску до ріжучої голівки системою нерухомих та рухомих труб. Для забезпечення щільності

з'єднань при русі порталу та робочої головки використовуються спеціальні шарніри високого тиску або спіральні трубки спеціальної форми.

Існує безліч конструкцій струминних головок для гідрорізання матеріалів, що об'єктивно свідчить про різноманіття експлуатаційних вимог, що пред'являються до них, і одночасно – про відсутність оптимальних конструкцій.

Група Flow International у 1971 році випустила першу у світі установку водоструминного різання, а у 1981-му розробила метод введення абразиву у водний струмінь, що розширило можливості різання. За оцінками фахівців, верстати компанії мають найкращу точність позиціонування порядку (0,07-0,08 мм), а отже, і точність обробки. Компанія розробила нову технологію гідрорізання, яка дозволяє збільшити швидкість різання практично на 300% порівняно з дискомеханічними методами. Система Dynamic Waterjet, що забезпечує активний контроль точності, створена на основі математичної моделі, що використовується для керування положенням "руки" з робочою головкою. Система автоматично виключає: утворення скосів при різанні та забезпечує необхідну точність деталі з урахуванням заданих допусків; необхідність додаткової обробки після водоструминного різання та дозволяє скоротити машинний час різання металів та композиційних матеріалів товщиною 1,25-480 мм. Крім того, завдяки підвищенню точності різання скорочуються втрати листового матеріалу при розкрої.

1.2 Застосування технології ГАР

Потенційних застосувань технології ГАР багато: метод ГАР ефективно розрізає майже всі конструкційні матеріали та товщину, такі як алюміній, титанові сплави [2], скло [3], латунь, попередньо загартована сталь, інструментальна сталь [4], нержавіюча сталь, м'яка сталь [5], мідь, пластик, кварц, кераміка [6], ламінати, композити [7], легкозаймисті матеріали, шкіра,

камінь [8], граніт, мармур [9], піна, інконель, риба, м'ясо тощо [10]. ГАР відіграє свою найважливішу роль у наступних секторах [11]:

- Аерокосмічна промисловість: компоненти двигуна; внутрішні деталі кабіни.
- Автомобільна промисловість: обробка салону (багажник, дверні панелі, накладки, потолок); склопластикові елементи кузова та бампери; вироби електронної промисловості; друковані плати; зачищення кабелю.
- Нафтогазова промисловість: різання обсадних труб для виведення з експлуатації нафтових свердловин; рятувальні роботи; нарізка та ремонт платформ.
- Підводне будівництво та будівельна галузь: різання труб; піскоструминна обробка та розрізання кородованої арматури; свердлення болтових отворів; ремонт доріг та мостів; підземні роботи та врізка опор.

Харчова промисловість: нарізання деяких продуктів (хліб, розділка крупної риби, зрізання жиру з м'яса).

На додаток до згаданих програм, ГАР технологія використовується при виготовленні мікроелектромеханічних систем (MEMS). Виготовлення мікромодулів для електричного контакту та обробки напівпровідників також може бути виконано ефективно. Зазвичай використовують видалення невеликих виливків і гравіювання реєстраційних номерів на загартованому склі, яке використовується для автомобільних вікон. Крім того, це чудова техніка для фрезерування невеликих пазів у твердих металевих компонентах і для видалення невеликих отворів, розмірів з голкові. Крім того, ГАР економічно використовується для матування та шліфування скла порівняно з будь-якою технікою шліфування чи травління [12]. Виходячи із застосування, товщина різання матеріалів може бути типовою для нержавіючої сталі до 100

мм, алюмінію 120 мм, скла 100 мм і каменю 140 мм [13]. На малюнку 4 показано деякі зразки виготовлені за ГАР технологією.

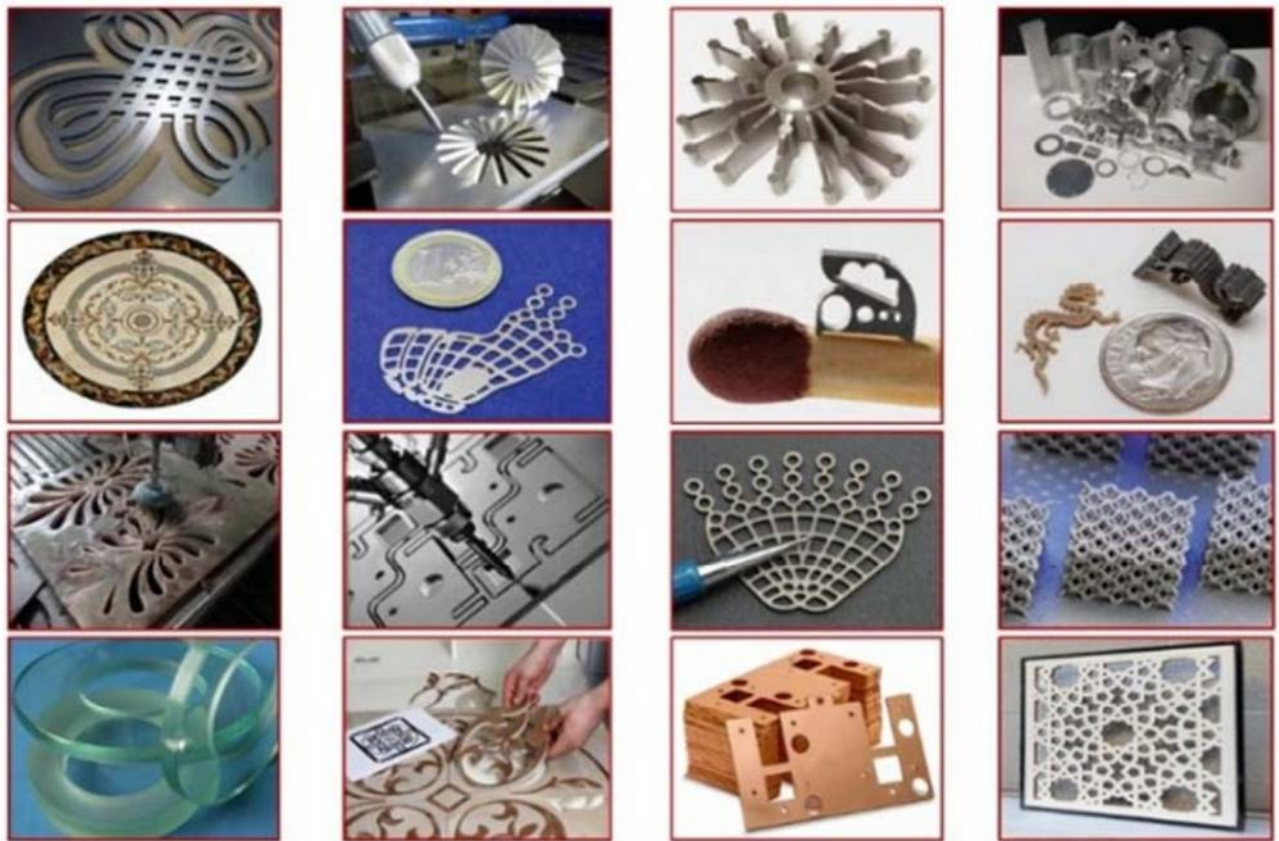


Рисунок 1.4 – Приклади застосування ГАР технології

1.3 Застосування інтелектуальних моделей у ГАР технології

Використання інтелектуальних моделей у ГАР листового металу відкриває нові можливості для оптимізації та автоматизації технологічних процесів та підвищення якості виробництва.

Вони дозволяють не лише моделювати складні процеси, а й впливати на них, щоб покращити ефективність та точність. Аспекти, де інтелектуальні моделі можуть забезпечити велику користь:

- оптимізація параметрів. Інтелектуальні моделі можуть аналізувати величезні обсяги даних та встановлювати оптимальні параметри різання, такі

як тиск води, швидкість руху інструменту, кут різання тощо, для досягнення найкращих результатів з точності, швидкості та ефективності;

- прогностичні можливості. Інтелектуальні моделі можуть передбачати результати різання з високою точністю, допомагаючи попередньо оцінити якість та особливості різаних матеріалів;

- автоматизація та адаптивне керування. Ці моделі дозволяють автоматизувати процеси різання, реагувати на зміни умов та адаптуватися до них, забезпечуючи стабільність та точність процесу. Інтелектуальні моделі дозволяють автоматизувати багато аспектів різання, забезпечуючи простішу інтеграцію виробничих процесів та знижуючи залежність від операторського втручання. Ці моделі можуть забезпечувати систему зворотного зв'язку, яка автоматично адаптує параметри різання під час процесу на основі зміни умов, що дозволяє підтримувати стабільність та якість різання навіть у змінних умовах;

- мінімізація втрат. З підвищенням точності різання, моделі можуть зменшити втрати матеріалу, знижуючи витрати та покращуючи виробничі показники. Використання оптимізованих параметрів різання, передбачування результатів та уникнення дефектів допоможе зменшити витрати на матеріали, час та енергію.;

- покращення якості продукції. Моделі можуть працювати на запобігання утворення скосів, дефектів або недоліків у виробі, враховуючи різні фактори, такі як напруження матеріалу, особливості різання тощо. Інтелектуальні моделі сприяють уникненню дефектів та покращують якість виробленої продукції.

- Інтеграція з системами Industry 4.0. Інтелектуальні моделі можна інтегрувати з іншими виробничими системами в рамках концепції Industrial IoT Industry 4.0, щоб забезпечити цифрову трансформацію та оптимізацію ланцюгів забезпечення виробництва.

Ці інтелектуальні моделі можуть стати потужним інструментом для покращення якості, швидкості та ефективності ГАР листового металу, роблячи цей процес більш точним, ефективним та економічно вигідним.

Побудова таких моделей вимагає збору й аналізу даних, розуміння процесів WJ / AWJ і застосування алгоритмів машинного навчання чи інших технологій штучного інтелекту.

Процедуру ідентифікації глибини різання за технологією ГАР за допомогою системи нечіткої логіки (FL) представлено в [14]. Як залежні параметри глибини різання запропоновано тиск води, масову витрату абразиву, діаметр фокусуєчого сопла та поперечну швидкість струменя. Розроблено три розроблені методи визначення точності прогнозування глибини різання будь-яких конструкційних матеріалів.

Стратегія 1 працювала з побудовою системи нечіткої логіки на основі Мамдані, яка спирається лише на знання.

Стратегія 2 залежить від бази даних і системи FL на основі правил.

Стратегія 3 автоматично генерує для отримання оптимального значення двійковий кодований генетичний алгоритм (GA). Точність оцінки автоматичної системи FL (тобто Стратегії 3) виявилася кращою, ніж дві інші стратегії.

В [15] представлено моделювання ГАР за допомогою математичного апарата нечіткої логіки (FL), оптимізації бази правил, бази даних із подальшим використанням генетичного алгоритму (GA) разом із двійковим кодом GA. Незважаючи на моделювання за допомогою нечіткої логіки, вихідні параметри, а саме шорсткість поверхні R_a , та MRR – швидкість видалення матеріалу (металу), були передбачені для різних комбінацій параметрів процесу ГАР, таких як тиск води на вихідному діаметрі сопла, переміщення струменя абразивної суміші, масова витрата води і масова витрата абразивних частинок, швидкість подачі суміші до сопла, або швидкість переміщення суміші між соплом і поверхнею матеріалу.

В [16] представлено удосконалений алгоритм для оптимізації параметра процесу на основі навчання та оптимізації (“teaching-learning-based optimization (TLBO) algorithm”) для отримання оптимальних параметрів процесу абразивно-струминної обробки.

Процес, заснований на викладанні й навчанні, надихає алгоритм, і він працює над результатом впливу «вчителя» на результат навчання. У випадку ГАО для крихкого та пластичного матеріалу алгоритм TLBO покращився на ~8% та ~12% відповідно порівняно з моделюванням «випадкового відпалу» (SA) та GA. Було зроблено висновок, що алгоритм TLBO можна використовувати для багатоцільових задач оптимізації процесів.

У [17] проведені експерименти з різання боросилікатного скла методом ГАР. Глибина різання вимірюється за допомогою різних налаштувань параметрів процесу – тиску води, швидкості потоку абразиву, швидкості переміщення та відстані до матеріалу. Розроблена таким чином модель глибини різання дає уявлення про вплив різних параметрів на різання аморфного боросилікатного скла за допомогою ГАР. Оптимальний стан налаштування параметрів керування також знаходиться за допомогою роєвого алгоритму (PSO).

З процесом ГАО пов'язано безліч параметрів: пов'язані параметри процесу обробки AWJ представлені в [18]. Багато дослідників зосередилися на розумінні впливу найбільш впливових параметрів, таких як швидкість видалення матеріалу, шорсткість поверхні, пропили та мікроструктурні властивості. Дуже небагатьма дослідниками було запропоновано методи покращення якості поверхні та пропилу [19]. На основі досконалого знання механізму видалення металу AWJ різні методи, такі як полірування, токарна обробка, свердління [20], фрезерування і поверхнева фінішна обробка [21] були прогресивно розроблені з акцентом на економічність.

Як зазначалося раніше, процес обробки AWJ найкращий для 2D і 3D обробки. Немає відмінностей між різанням м'якої будівельної сталі або

матеріалів з нержавіючої сталі, чавуна, всі однаково добре обробляються, і головне: облікові параметри для матеріалу одного типу (метал) ті ж самі. Якщо під час процесу обробки є високі вимоги до якості, параметри процесу повинні бути правильно підібрані, а процес обробки повинен бути завершений до появи ділянок деформації різку або зайвого стирання поверхні.

Оптимізацію параметрів для більшого видалення матеріалу та сягнення рекомендованої шорсткості поверхні було виконано [22] з інтеграцією метода Тагучі з дисперсійним аналізом варіацій альтернатив (ANOVA). Аналіз показує, що відстань протистояння поверхні впливає на MRR, тоді як на шорсткість поверхні сильно впливає швидкість потоку абразиву. Досліджено [23], що найвпливовішими факторами є тиск води для робочого матеріалу з нержавіючої сталі 403, за яким слідує відстань протистояння і швидкість потоку абразиву. У [24] використано методологію поверхні відгуку (RSM) з дизайном Вох-Бехнкен (BBD). Результати дали висновок, що поперечна швидкість (заготовки відносно ріжучого струму) є впливовим фактором разом із тиском води, швидкістю потоку абразиву та кутом нахилу.

Незважаючи на великий обсяг наукових праць, доступних у інтернет-просторі, досліджень, присвячених інтелектуальним моделям впливу робочих параметрів на швидкість різання конструкційної сталі не знайдено.

Ще одне важливе питання – це повторне використання в ТП досить дорогих абразивів. Після первинного використання в циклі ТП абразиви змінюють свої: розмір частинок, щільність, але майже незмінною залишається основна ріжуча характеристика – твердість.

Причина полягає в тому, що кількість нових абразивів, які використовуються для зарядки в бункер та кількість перероблених абразивів після циклу не сильно відрізняється [25]. Крім того, значно змінюється щільність нових абразивів при зміні розміру завантажуваних частинок (рис.1.5) (приблизно на 22,8%, коли розмір завантажуваних абразивів змінюється від >75 до >125 мкм).

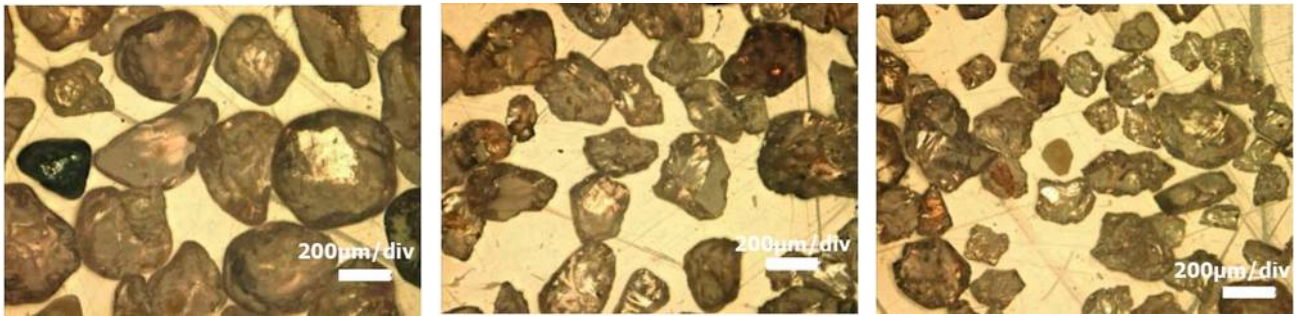
а) $d_p < 180$ мкмб) $90 < d_p < 105$ в) $70 < d_p < 90$

Рисунок 1.5 – Розмір часток абразиву d_p , в залежності від вживаності:

а) новий граніт GMA#80; б) вживаний 1 раз ; в) вживаний 2 рази

Отже, вартість абразиву на метр і, отже, загальна вартість різання на метр значною мірою залежать від того, у котрий раз використовується абразив та його поточного діаметру частинок d_p .

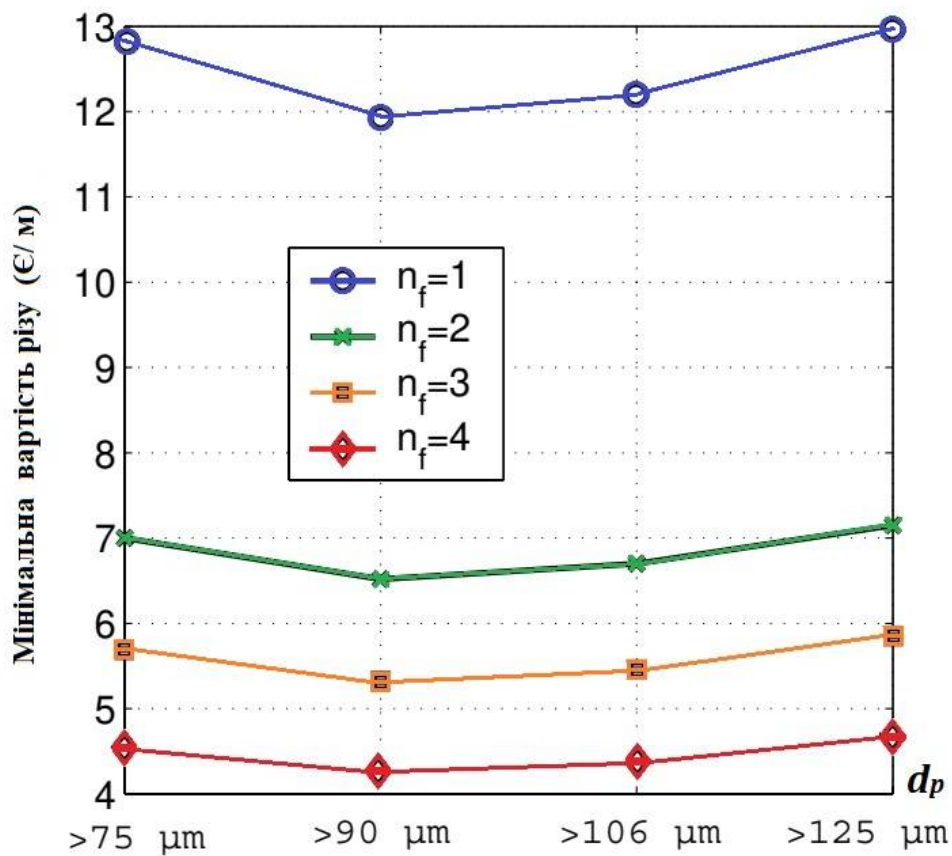


Рисунок 1.6 – Залежність вартості метру різання від розміру часток абразиву, що вживані у ГАР: $n_f = 1$ – вперше, ..., $n_f = 4$ – вчетверте

Враховуючи, що швидкість різання при заданих обмеженнях параметрів та технічних можливостях виробництва є одним з головних показників ефективності виробництва, доцільно розробити інтелектуальну модель ідентифікації оптимальних параметрів ГАР з максимальною швидкістю різання конструкційної сталі.

1.4 Постановка задачі дослідження

ГАР металу забезпечує високу точність та дозволяє виконувати складні вирізання без значної термічної деформації. Цей метод знайшов широке застосування у виробництві для створення різноманітних деталей та вирізання складних форм. Множину факторів та параметрів, що впливають на процес ГАО представлено на рис.1.7.

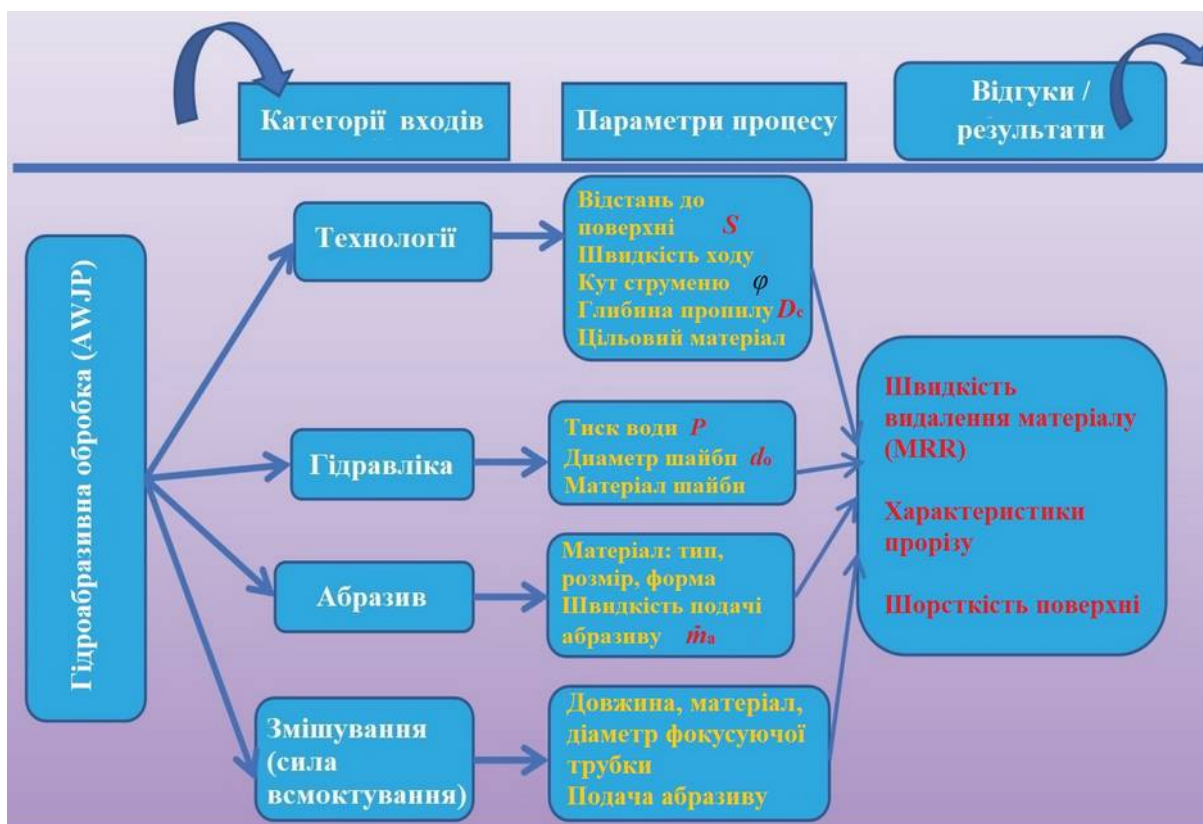


Рисунок 1.7 – Фактори та параметри, що впливають на процес ГАО

Метою кваліфікаційно роботи є розробка інтелектуальної моделі ідентифікації оптимальних параметрів ГАР для максимальної швидкості різку при змінних характеристиках абразиву за експериментальними даними для конструкційної сталі М250. Завдання, які необхідно вирішити задля вирішення поставленої мети:

- аналіз предметної області;
- аналіз існуючих моделей процесу гідроструминної порізки листового металу;
- розробка інтелектуальної моделі ГАР листового металу для оптимізації часу різання при заданих обмеженнях та характерних параметрах процесу;
- експериментальні дослідження запропонованої моделі.

2 АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ МОДЕЛЕЙ ПРОЦЕСУ ГІДРОСТРУМІННОЇ ПОРІЗКИ ЛИСТОВОГО МЕТАЛУ

Основні переваги технології ГАР (рис 2.1) перед подібними методами (лазерне різання, плазмове різання, механічне різання) полягають у наступному.

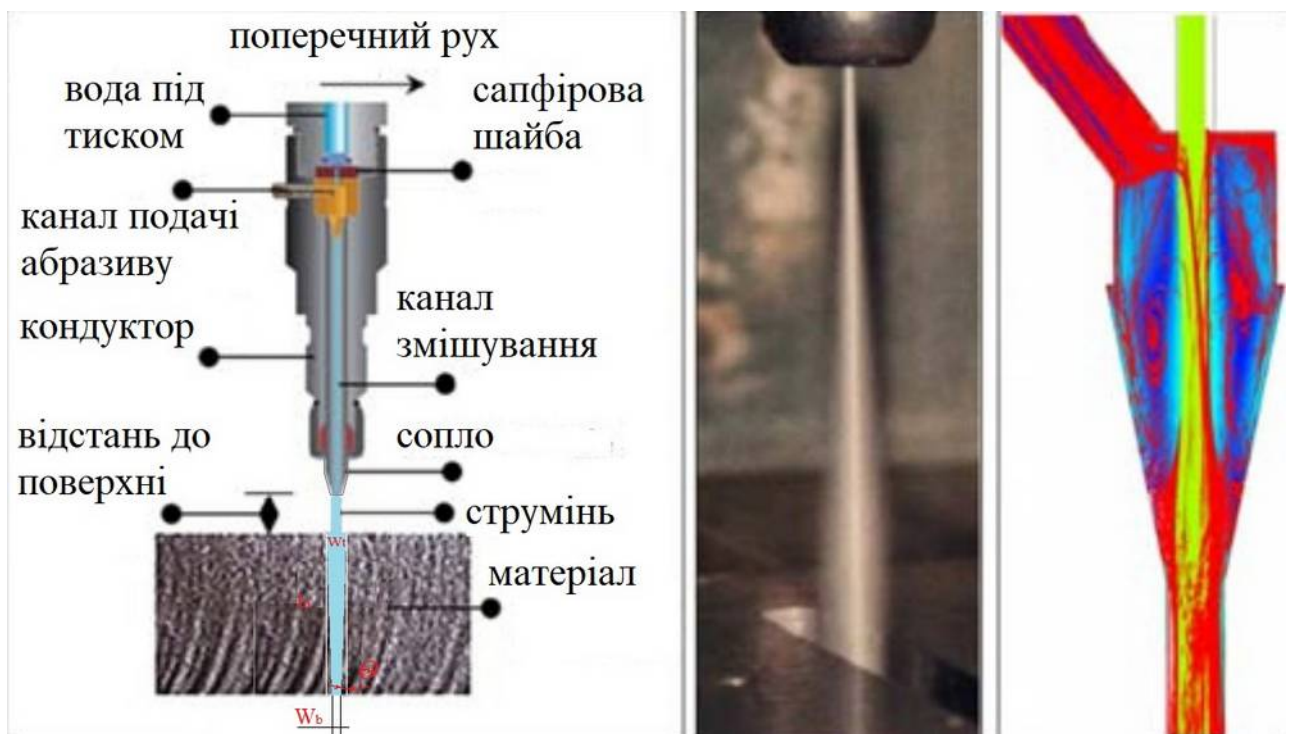


Рисунок 2.1 – Технологія ГАР та вихор, створений усередині камери змішування водою (жовтий), повітрям (веселка) та абразивами (червоний)

Швидкість ГАР висока. Різання здійснюється з різними швидкостями - від 1 мм/хв до 30000 мм/хв, в залежності від типу і товщини матеріалу, що розрізається. Різ можна починати в будь-якій точці заготовки і при цьому не потрібно попередньо робити отвір. Середнє споживання води в ГАР агрегаті невелике - близько 3-4 л/хв, незважаючи на високий тиск використання (400 МПа і більше).

Струміннь крізь маленький отвір сопла діаметром від 0,1 мм до 0,9 мм спрямовується в бік робочої зони (зазвичай під кутом атаки $\varphi = 90^\circ$) для виконання процедури мікрорізання. Тиск води прискорюється в отворі, як зазначено диференціальним рівнянням Бернуллі (рівняння Бернуллі є законом збереження енергії застосоване до ідеальної рідини) до швидкості v_j , яку зазначено в рівнянні (2.1):

$$v_j = \frac{ds}{dt} = \mu \left(\frac{2P}{\rho_w} \right)^{0.5} \quad (2.1)$$

де s – відстань отвору сопла до цільової поверхні, t – час досягнення струменем цільової поверхні, P – тиск води, ρ_w – щільність води (г/см^3) і μ – коефіцієнт узгодження ($\mu < 1.0$, з типовим значенням 0.86), який є мірою розбіжності з теоретичною швидкістю струменя. [24]. Зазвичай сопла виготовляються з високостійких до зносу матеріалів, таких як сапфір (термін служби: 300 годин) або карбід вольфраму, мають прямокутну або круглу геометрію та можуть бути спрямовані до поверхні цілі на 180° або під прямим кутом на 90° .

2.1 Узагальнена емпірична модель ГАР

Загалом емпіричні моделі ГАР до недавнього часу розроблялись на основі набору експериментальних даних з використанням техніки регресійного аналізу. Поширена узагальнена модель ГАР з досить високим ступенем погодженості ($2 \div 0.2\%$) експериментальних та обчислених за моделлю даних [26] пов'язує змінні процесу:

$$D_c = A \frac{\dot{m}_a}{\rho_w d_j u} \left(\frac{P}{E} \right)^\alpha \cdot \left(\frac{s}{d_p} \right)^\beta \cdot \left(\frac{\dot{m}_a s}{d_p^3 \rho_p u} \right)^\gamma \cdot \left(\frac{\rho_p u^2}{P} \right)^\delta \quad (2.2)$$

а саме: D_c – глибину різання,
 P – тиск води, (МПа),
 u – швидкість руху сопла (різання) (мм/с),
 s – відстань від сопла до цільового матеріалу, (мм),
 \dot{m}_a – масову витрату абразиву, (г/с),
 ρ_p – щільність частинок, (кг/м³),
 ρ_w – щільність води (кг/м³),
 d_j – діаметр струменя (мм),
 d_p – середній діаметр частинки абразиву, (мм),
 E – модуль пружності матеріалу (МПа),
 $\alpha, \beta, \gamma, \delta$ – емпіричні показники, що враховують реальні умови застосування моделі, її «індивідуальність».

Для розробки моделі обирають найбільш важливі за впливом на процес змінні та їх комбінації [27]: глибину різання, тиск води, масову витрату абразиву, швидкість руху сопла, відстань від сопла до поверхні (рис.2.2).

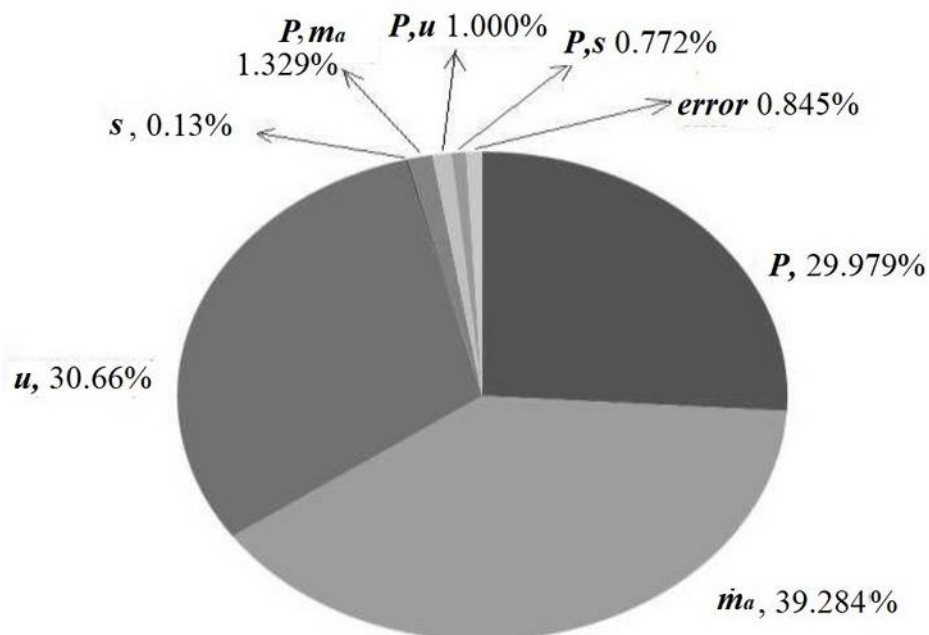


Рисунок 2.2 – Оцінка впливу головних факторів ТП та їх комбінацій на ГАР

Тоді функція степеневого закону може бути представлена в наступному вигляді.

$$D_c = a_0 P^{a_1} \cdot \dot{m}_a^{a_2} \cdot u^{a_3} \cdot s^{a_4}, \quad (2.3)$$

де a_i є константами відповідної степеневі функції, яку потрібно оцінити. Потім функція степеневого закону лінеаризується, беручи значення натурального логарифма, і рівняння стає таким:

$$\ln(D_c) = \ln(a_0) + a_1 \ln(P) + a_2 \ln(\dot{m}_a) + a_3 \ln(u) + a_4 \ln(s). \quad (2.4)$$

На основі наведеної вище лінійної моделі виконується простий регресійний аналіз із експериментальними даними, наприклад в середовищі MATLAB, і знаходяться невідомі коефіцієнти A_0, \dots, A_4 .

$$\ln(D_c) = A_0 + A_1 \ln(P) + A_2 \ln(\dot{m}_a) + A_3 \ln(u) + A_4 \ln(s). \quad (2.5)$$

Потім лінійні залежності повертаються до степеневих функцій в експоненціальній формі:

$$D_c = e^{A_0} \cdot P^{A_1} \cdot \dot{m}_a^{A_2} \cdot u^{A_3} \cdot s^{A_4}. \quad (2.6)$$

З рівняння (2.6) нескладно вивести параметр швидкості різ у логарифмічній (2.7) або степеневій (2.8) формі:

$$\ln(u) = \dots \quad (2.7)$$

$$u = \left(\frac{e^{A_0} \cdot P^{A_1} \cdot \dot{m}_a^{A_2} \cdot s^{A_4}}{D_c} \right)^{\frac{1}{A_3}}. \quad (2.8)$$

2.2 Експериментальні дані

М'яка сталь є найпоширенішою формою сталі, оскільки її ціна порівняно низька забезпечує властивості матеріалу, прийнятні для багатьох застосувань. Вона використовується у дуже великій кількості, наприклад, як конструкційна сталь. Це найбільш універсальна форма сталі. В якості зразків використовували пластини з м'якої сталі марки М250. Розміри цих пластин з м'якої сталі становили 150 x 100 x 60 мм. Обладнання, що використовувалося для обробки зразків, являло собою різак АВ Best Matic - Ingersoll Rand (КМТ) make Water Jet Sweden КМТ оснащений насосом з розрахунковим тиском 500 МПа ступінчастим регулюванням тиску.

В табл.2.1 наведено параметри ГАР, які буде включено в модель, сірим фоном виділено не впливові параметри або константи.

Таблиця 2.1 – Категорії та діапазони параметрів процесу ГАР

Технологія	Гідравліка	Абразив/ матеріал	Змішування
відстань, $s = 1.8;$ $3.5; 5.0 \times 10^{-3} \text{ м}$	тиск води, P $=270;335;400$ МПа	тип абразиву (твердість) - гранит	Довжина фокусуючої трубки, l_f , (мм)
швидкість ходу головки, $u = 0.5;$ $1.5; 2.5 \times 10^{-3} \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$	діаметр шайби, $d_o,$ $0.35 \times 10^{-3} \text{ м}$	розмір / щільність $\rho_p = 4100 \div 5150 \text{ кг/м}^3$	Діаметр фокусуючої трубки / сопла, $d_f = 1.05 \times 10^{-3} \text{ м}$
напрямок ходу - лінійний, $z = 180^\circ$	матеріал шайби: шт. сапфір	Форма - куб	матеріал фокусуючої трубки
кут атаки, $\varphi = 90^\circ$		діаметр частинок, $d_p = (0.18 \div 0.105) \times 10^{-3} \text{ м}$	напрямок подачі абразиву, $f_a = 45^\circ$
глибина різку, $D_c,$ (мм)		швидкість подачі абразиву, $m_a = 8; 11.5; 15 \text{ г} \cdot \text{с}^{-1}$	
Матеріал сталь М250 $\rho_s = 7850 \text{ кг/м}^3$		Модуль пружності М250, $E = 210000 \text{ МПа}$	

Як і за будь-якого виду обробки матеріалів найбільш сприятливі умови для здійснення процесу ГАР можуть бути досягнуті за рахунок вибору його оптимальних параметрів: тиску робочої рідини, форми і діаметра отвору сопла, відстані сопла від поверхні, що розрізається, швидкості подачі, числа проходів (або кількість сопел, що припадають на одиницю довжини різку), необхідні розрізання матеріалу.

Після перетворень рівняння (2.2) з урахуванням значень емпіричних коефіцієнтів $\alpha, \beta, \gamma, \delta$, наведених в [28], та реальних даних отримано еталонний розрахунковий вираз:

$$u^i = \left(\frac{461 \cdot P^{0.311} \cdot \dot{m}_a^{0.119} \cdot d_p^{1.77} \cdot \rho_p^{0.867}}{D_c \cdot s^{0.008} \cdot \rho_w \cdot d_j} \right)^{\frac{1}{0.147}}, \quad (2.9)$$

де в формулі:

u – швидкість руху сопла (різання) (м/с),

P – тиск води, (МПа),

\dot{m}_a – масова витрата абразиву, (кг/с),

d_p – середній діаметр частинки абразиву, (м),

ρ_p – щільність частинок, (кг/м³),

D_c – глибину різання, (м),

s – відстань від сопла до цільового матеріалу, (м),

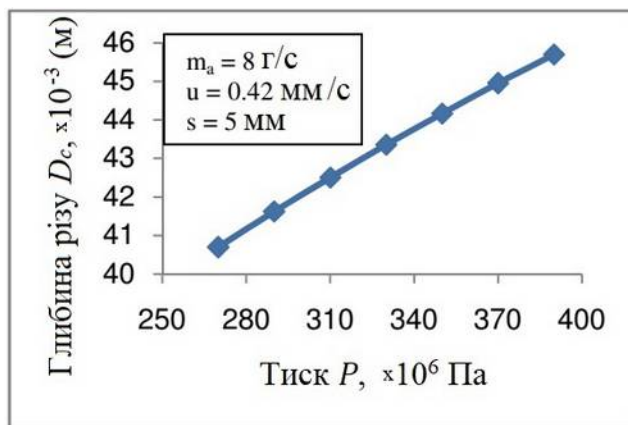
ρ_w – щільність води (кг/м³),

d_j – діаметр сопла, (м).

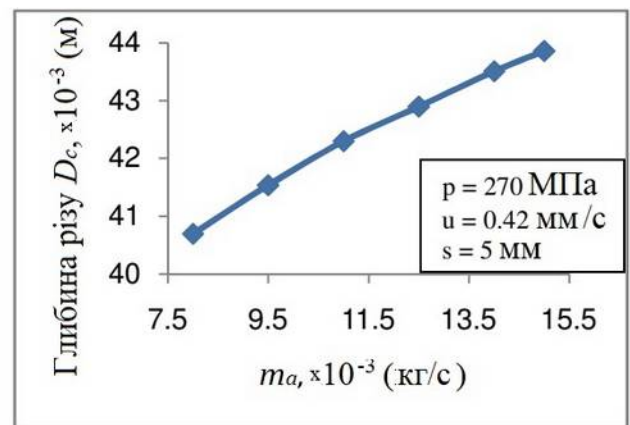
Експериментальні дані (1945 записів), що були надані для аналізу партнерами Загребського університету (факультет машинобудування та кораблебудування) в рамках проходження ХНУРЕ конкурсу на участь у проекті INITIATE Європейської Ініціативи Досконалості, в табличному вигляді наведено в додатку А.1.

Загальний характер поведінки моделі процесу ГАР в залежності від параметрів можна оцінити за графіками (рис.2.3). Масова витрата абразиву \dot{m}_a

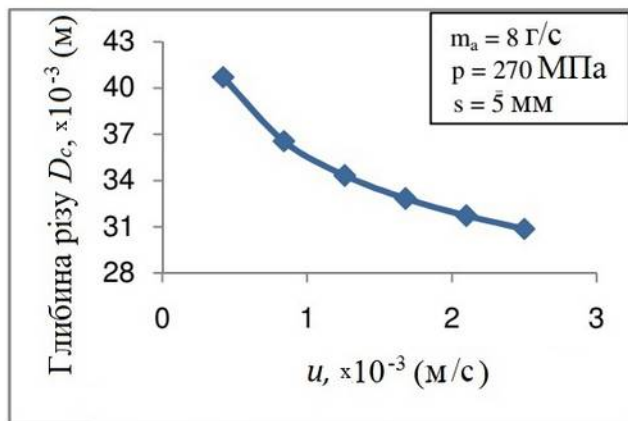
та тиск рідини P мають найбільший вплив на продуктивність ГАР. Процес ГАР можливий у разі, коли тиск струменя рідини на одиницю площі поверхні різку перевищує межу міцності матеріалу, що обробляється. За рівних умов подальше підвищення тиску струменя рідини (через зростання її кінетичної енергії) призведе до потенційної можливості збільшення товщини матеріалу, що розрізається за один прохід.



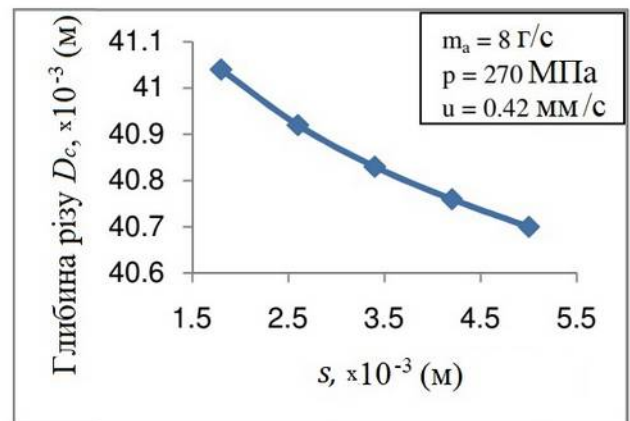
а) Тиск подачі води



б) Витрати абразиву



в) Швидкість різки



г) Відстань до цільової поверхні

Рисунок 2.3 – Оцінка впливу головних факторів ТП

та їх комбінацій на ГАР

Якщо врахувати, що струмінь високого тиску має найбільшу кінетичну енергію поблизу зрізу сопла, надмірне видалення поверхні обробки від сопла може призвести до виключення процесу гідрорізання. Для визначення s користуються залежністю:

$$s = (33 \div 67) d_f. \quad (2.10)$$

При цьому менші значення s відповідають меншим діаметрам сопел і більшим тискам витікання струменя і, навпаки, більші значення s – більшим діаметрам сопел і меншим тискам витікання струменя.

Число проходів визначається залежно від технічних можливостей обладнання. За заданих умов гідрорізання товстих матеріалів можна проводити за кілька проходів.

З РОЗРОБКА ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ МОДЕЛІ ГІДРОСТРУМІННОЇ ПОРІЗКИ ЛИСТОВОГО МЕТАЛУ

3.1 Аналіз проблеми гідроструминної порізки

Швидкий розвиток індустрії та технологій вимагає постійного вдосконалення процесів обробки матеріалів. Пошук способів прискорення процесу різання та зменшення витрат часу та ресурсів є важливим для підвищення ефективності виробництва. Дослідження та впровадження інтелектуальних моделей у галузі гідроструминного різання відкриває нові можливості для технічних інновацій та подальшого розвитку цієї технології. Інтелектуальні моделі дозволяють оптимізувати та вдосконалювати технологічні процеси, забезпечуючи виробництво більш точних та якісних деталей.

Гідроструминне різання – це інноваційний процес обробки матеріалів, що поєднує близько 12 параметрів, що впливають один на одного під час виконання ТП. Причому враховуючи різноманітність матеріалів різання від металів до скла з їх характеристиками, переважність компонентів (параметрів моделі) впливу мінлива навіть в одному класі матеріалів.

Характер попарного взаємопливу головних факторів процесу зображено на рис.3.1.

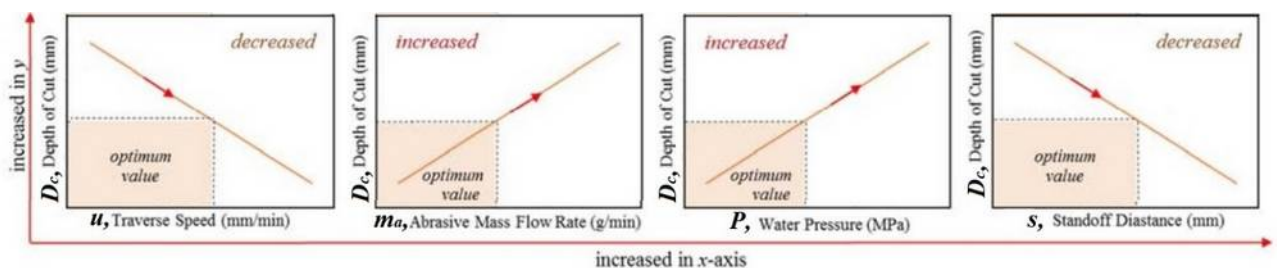


Рисунок 3.1 – Характер взаємопливу головних факторів ГАР

3.2 Інтелектуальна модель гідрострумінної порізки листового металу

Абразивне водоструминне різання перевершує багато інших нетрадиційних процесів обробки різних матеріалів, особливо матеріалів, які важко різати, процес знайшов широке застосування в промисловості. В роботі оцінюється вплив параметрів процесу на швидкість різання, що є важливим показником ефективності різання при абразивному водоструминному різанні м'якої сталі. Експерименти проводилися при змінному тиску води, швидкості переміщення сопла (різання), зміні масових витрат абразиву та відстані зазору для різання м'якої сталі за допомогою процесу абразивного водоструминного різання. Вплив цих параметрів на швидкість різання було вивчено на основі результатів експериментальних досліджень. Для вибору оптимальних параметрів процесу за допомогою регресійного аналізу розроблено емпіричну модель для прогнозування глибини різання при гідроабразивному різанні м'якої сталі. Ця розроблена модель була перевірена та підтверджена експериментальними результатами, які показують високу застосовність моделі в межах використовуваного експериментального діапазону.

Гідроабразивне різання має ряд явних переваг перед іншими нетрадиційними технологіями різання, наприклад відсутність теплових спотворень, висока універсальність обробки, мінімальні напруги на заготовці, висока гнучкість і малі сили різання. Технологія зарекомендувала себе як ефективна технологія обробки різних конструкційних матеріалів. Він перевершує багато інших методів різання в обробці різноманітних матеріалів і знайшов широке застосування в промисловості. У цьому методі потік дрібних абразивних частинок вводиться в гідроструминь, і таким чином імпульс гідроструминя частково передається абразивним частинкам. Основна роль води полягає насамперед у прискоренні великої кількості абразивних частинок до високої швидкості та створенні висококогерентного струминя. Цей струминь потім направляється в робочу зону для виконання різання. Це також

економічно ефективна та екологічно чиста технологія, яка може бути використана для обробки ряду інженерних матеріалів, особливо складних для різання, таких як кераміка, метали. Однак AWJC має деякі обмеження та недоліки. Як і у випадку будь-якого процесу механічної обробки, на якість процесу AWJC істотно впливають параметри налаштування процесу. Існує багато пов'язаних параметрів у цій техніці, основні з яких тиск води, швидкість потоку абразиву, швидкість руху струменя, відстань і діаметр фокусуєчого сопла – вони всі мають велике значення, але їх можна достатньо точно контролювати [29]. Основні показники якості процесу включають досягну глибину різку, ширину пропилу та показник якості поверхні після різку. Було запропоновано ряд методів для покращення якості пропилу та якості поверхні.

Швидкість різання є показником ефективності, в багатьох промислових застосуваннях вона є основною ціллю процесу. Але для м'якої сталі таких моделей не розроблено. Потрібні додаткові дослідження та еспериментальне моделювання, щоб повністю зрозуміти вплив важливих параметрів процесу на цей параметр процесу.

У роботі оцінюється вплив параметрів процесу абразивного гідроабразивного різання на швидкість різання м'якої сталі. З огляду на плавні зміни параметрів процесу ГАР та технічні можливості тільки ступінчастого налаштування агрегату, доцільним вважається розробка радіально-базисної моделі ШНМ для ідентифікації оптимальних параметрів

Для створення такої інтелектуальної системи необхідно враховувати характер зміни вхідних параметрів, архітектуру штучної нейронної мережі (ШНМ), що розробляється, і набори даних для навчання.

Здатність нейронних мереж апроксимувати невідомі області відображення «вхід-вихід» широко використовується для ідентифікації об'єктів. Властивості радіально-базисної мережі Φ повністю визначаються радіально-базисними функціями, які використовуються в нейронах

прихованого шару і утворюють певну основу для вхідного векторного зображення x наступної структури:

$$\varphi(x) = \Phi(\|x - c\|, \sigma) = \Phi(r, \sigma) \quad (3.1)$$

де $\varphi(x)$ – багатовимірна функція, що залежить від відстані $r = \|x - c\|$ між вхідним вектором x і його власним центром c і параметра σ ширини (масштабу), який визначає локальну область вхідного простору, на яку «реагує» дана функція. Таким чином, кожен нейрон прихованого шару обчислює відстань між вхідним вектором і його центром і виконує деяке нелінійне перетворення $\Phi(r, \sigma)$ над ним. Найпоширенішими є радіальні базисні функції Гауса (GRB), що мають пік у центрі та монотонно спадають із віддаленням від центру.

Зображення структури ШНМ, яка реалізує відображення $R^n \rightarrow R^1$, показано на рис. 4.

У більшості практичних застосувань центри нейронів (нод) c_i і параметри ширини σ_i є фіксованими, і налаштовуються лише синаптичні ваги w_i .

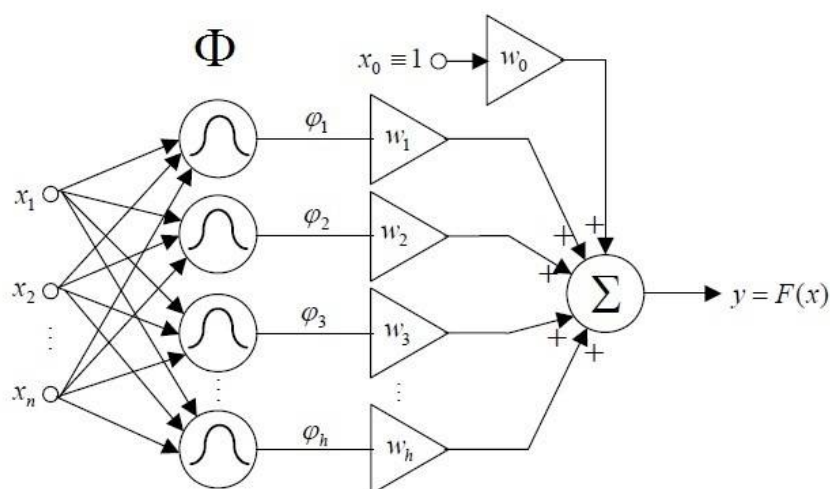


Рисунок 3.1 – Мережа радіальних базисних функцій, що реалізує

відображення
$$y = F(x) = w_0 + \sum_{i=1}^h w_i \varphi_i(x)$$

Складні об'єкти моделюються за допомогою багатовимірного Гаусіану:

$$\varphi(x) = \Phi(\|x - c\|, \Sigma) = \exp(-(x - c)^T \Sigma^{-1} (x - c)) = \exp(-\|x - c\|_{\Sigma^{-1}}^2), \quad (3.2)$$

де коваріаційна матриця вимірів Σ визначає форму, розмір і орієнтацію так званого рецепторного поля радіально-базисної функції. В $\Sigma = \text{diag}(\sigma_1^2, \sigma_2^2, \dots, \sigma_n^2)$ – гіпереліпсоїді осі збігаються з осями вхідного простору і мають $2\sigma_i$ довжину вздовж i -ї осі.

Типовим прикладом, який демонструє можливості радіально-базисних мереж, є задача інтерполяції для багатовимірної функції n змінних, визначених у N точках $x(1), x(2), \dots, x(k), \dots, x(N)$. Відомі відповідні значення цієї функції: $d(1), d(2), \dots, d(k), \dots, d(N)$. Проблема полягає у відображенні, яке задовольняє визначення умов інтерполяції:

$$d(1), d(2), \dots, d(k), \dots, d(N) \quad (3.3)$$

Техніка радіального базису в даному випадку полягає у виборі наступної функції F :

$$F(x) = \sum_{k=1}^N w_k \Phi_k(\|x - c_k\|, \sigma_k) = \sum_{k=1}^N w_k \Phi_k(\|x - x(k)\|, \sigma_k) \quad (3.4)$$

де $\Phi(\text{arg})$ – радіально-базисна функція, центрами якої є точки $x(k)$. З урахуванням (3.2), (3.3) можна записати систему лінійних рівнянь для знаходження коефіцієнтів (синаптичних ваг) w_k :

$$\begin{pmatrix} \Phi_{11} & \Phi_{12} & \cdots & \Phi_{1N} \\ \Phi_{21} & \Phi_{22} & \cdots & \Phi_{2N} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \Phi_{N1} & \Phi_{N2} & \cdots & \Phi_{NN} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} w_1 \\ w_2 \\ \vdots \\ w_N \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} d(1) \\ d(2) \\ \vdots \\ d(N) \end{pmatrix} \quad (3.5)$$

Де $\Phi_{kj} = \Phi(\|x(j) - x(k)\|, \sigma_k); k = 1, \dots, N; j = 1, \dots, N$.

Позначаючи $d = (d(1), d(2), \dots, d(N))^T, w = (w_1, w_2, \dots, w_N)^T, \Phi = \{\Phi_{kj}\}$,
отримуємо:

$$\Phi w = d, \quad (3.6)$$

звідки:

$$w = \Phi^p d, \quad (3.7)$$

де Φ^p псевдоінверсна до Φ матриця.

Мережі RBF є універсальними апроксиматорами, і оскільки присутній лише один нелінійний прихований шар, параметри лінійного вихідного шару підлягають налаштуванню за допомогою стандартних процедур [30]. Для їх навчання можна використовувати високу швидкість і властивості фільтрації, що дуже корисно при обробці «зашумлених» вимірювань.

Нелінійне відображення входу-виходу може бути описано співвідношенням:

$$d = f(x), \quad (3.8)$$

Де $x - (n+1)$ – вхідний вектор, d – вихід, $f(x)$ – невідома вектор-функція, яка обчислюється за допомогою навчальної вибірки $\{x(k), d(k)\}, k=1, 2, \dots, N$.

Завдання навчання апроксимуючої нейронної мережі полягає в тому, щоб знайти функцію $F(x)$, настільки близьку до $f(x)$, що:

$$\|F(x) - f(x)\| \leq \varepsilon, \forall x(k): k=1, 2, \dots, N, \quad (3.9)$$

де $F(x)$ – відображення, реалізоване мережею, ε – мале додатне число, що визначає точність апроксимації. У цьому контексті проблема апроксимації

повністю збігається з проблемою «навчання з учителем» або навчання під керівництвом, де послідовність $\forall x(k): k=1,2,\dots,N$ відіграє роль вхідного сигналу ШНМ, а $f(x)$ – навчальний сигнал ().

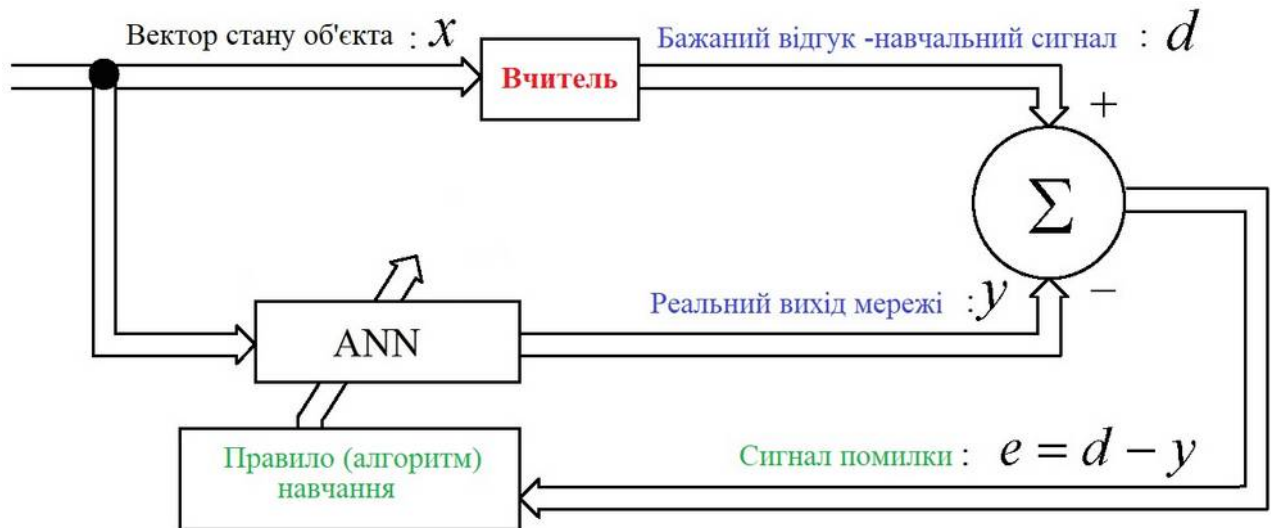


Рисунок 3.2 – Схема навчання з «вчителем»

Процес побудови моделі ділиться на два етапи – структурну та параметричну ідентифікацію, а застосування ШНМ також вимагає вирішення двох задач: визначення структури мережі та налаштування (навчання) її параметрів.

Зазвичай зміна структури мережі здійснюється шляхом її поступового ускладнення шляхом додавання нових нейронів, що виконується щоразу, коли виникає додаткова помилка ідентифікації $e=d-y$ при появі нового вхідного сигналу, що перевищує допустимий. Навчання (параметрична ідентифікація) полягає у визначенні параметрів мережі і зводиться до мінімізації помилки ідентифікації – як правило, функціоналу квадратичної помилки:

$$J(k) = \|\varepsilon(k)\|^2 = \|d(k) - y(k)\|^2. \quad (3.10)$$

На практиці найбільш поширеними є дискретні алгоритми навчання виду:

$$w_{ji}(k+1) = w_{ji}(k) + \eta(k) e_j(k) x_i(k), \quad (3.11)$$

або у векторній формі:

$$w_j(k+1) = w_j(k) - \eta_k \nabla_{w_j} E_j(k) = w_j(k) + \eta(k) e_j(k) x_i(k), \quad (3.12)$$

Де $\nabla_{w_j} E_j(k) = -e_j(k) x_i(k)$ – вектор градієнта цільової функції за синаптичними вагами. Швидкість процесу навчання за алгоритмом (3.10), (3.11) повністю визначається вибором параметра η_k , який визначає крок зсуву в просторі настроюваних параметрів. Цей параметр природно підібрати так, щоб швидкість збіжності поточних значень $w_j(k)$ до оптимальних гіпотетичних ваг була максимальною. Вводимо до розгляду вектор відхилень поточних значень $w_j(k)$ від оптимальних у вигляді:

$$\tilde{w}_j(k) = w_j - w_j(k), \quad (3.13)$$

і розв'язавши диференціальне рівняння:

$$\frac{\partial \|\tilde{w}_j(k)\|^2}{\partial \eta} = 0, \quad (3.14)$$

оптимальне значення крокового параметра можна отримати у вигляді:

$$\eta(k) = \|x(k)\|^{-2}, \quad (3.15)$$

що веде до однокрокового алгоритму навчання:

$$w_j(k+1) = w_j(k) + \frac{e(k) x(k)}{\|x(k)\|^2}. \quad (3.16)$$

В теорії ШНМ вираз (3.16) відомий як однокроковий алгоритм навчання Качмажа – Відроу – Хоффа [31], за яким і буде налагоджена мережа в цьому дослідженні з огляду на монотонність змін та велику кількість вхідних даних.

3.3 Конфігурація та налагодження моделі гідрострумінної порізки листового металу

З огляду на вираз (2.9) в загальному вигляді модель ГАР можна представити наступним чином:

$$u = F(P, \dot{m}_a, d_p, \rho_p, D_c, s, \rho_w, d_j), \quad (3.17)$$

де згідно експериментальних вимірів (табл.2.1) умовно постійними (нерегульованими) прийняті наступні, що було досліджено:

d_p – середній діаметр частинки абразиву, (м),

ρ_p – щільність (питома маса) частинок абразиву, (кг/м³),

ρ_w – щільність води (1000 кг/м³),

d_j – діаметр сопла робочої головки, (м).

Пара змінних (\dot{m}_a, ρ_p) характеризує властивості абразивних частинок, і присутні в ступеневій формі в параметрі D_c . Змінні (\dot{m}_a, ρ_p) присутні в вимірах в двох комбінаціях: нового абразиву (0.00018;4100) та поновленого після першого циклу використання (0.000105;5150). Кожній з комбінацій відповідають біля 900 вимірювань.

Таким чином можна знизити розмірність моделі (3.17):

$$u = F(P, \dot{m}_a, D_c, s), \quad (3.18)$$

обираючи структуру РБМ 4 – N – 1, де N кількість нейронів в прихованому шарі. У середовищі MathLab було проведено ряд

експериментальних випробувань із числом N з сигмоїдальними активаційними функціями і результати чого було обрано наступну структуру (рис.3.3):

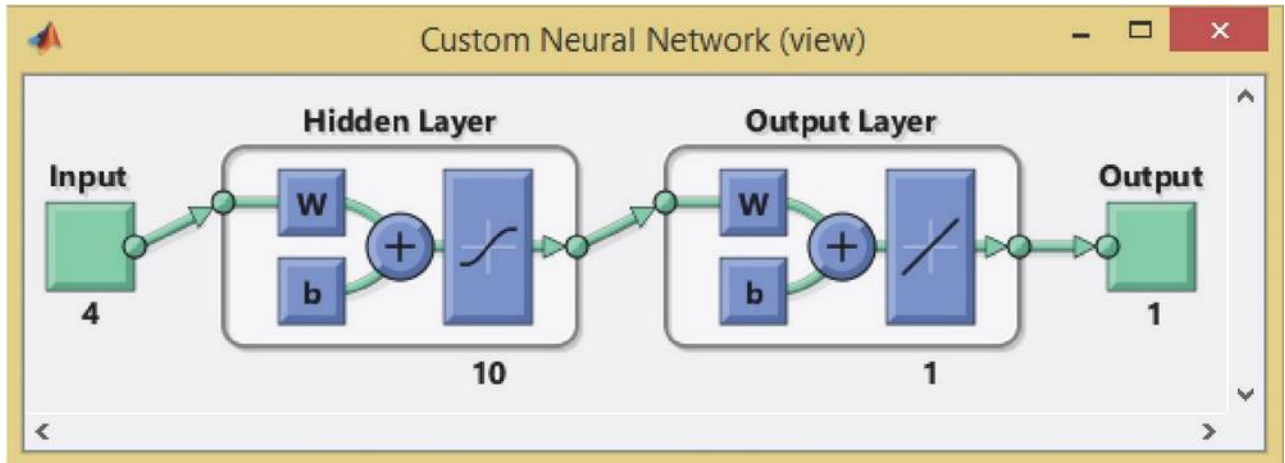


Рисунок 3.3 – Структура модельованої ШНМ

Вхідні значення незалежних змінних для навчання та тестування були випадковим чином розподілені на тренувальний та тестовий набори у співвідношенні 70% до 30% та пронормовані за наступною процедурою:

$$\bar{d} = \left(\frac{d - d_{min}}{d_{max} - d_{min}} \right) \times (n_{max} - n_{min}) + n_{min}, \quad (3.19)$$

де \bar{d} – нормалізовані значення даних, d – числові значення даних кожної незалежної змінної;

d_{max}, d_{min} – максимальні та мінімальні значення даних, відповідно, кожної змінної; n_{min} та n_{max} є мінімальним і максимальним значеннями, відповідно, нового діапазону. У нашому випадку $n_{min} = 0$ та $n_{max} = +1$.

Рівняння (3.19) набуває вигляду:

$$\bar{d} = \left(\frac{d - d_{min}}{d_{max} - d_{min}} \right). \quad (3.20)$$

Оцінювання помилок навчання, перевірки та тесту декількох конфігурацій ШНМ проводилося за допомогою чотирьох статистичних параметрів, а саме: абсолютного середнього відносного відхилення (AARD%), середньоквадратичної помилки (MSE), кореневої середньоквадратичної помилки (RMSE) і коефіцієнта кореляції r^2 . Математичні рівняння цих параметрів [32] наведено нижче:

$$AARD\% = \frac{100}{N} \sum_{i=1}^N \frac{|u_i^{\text{exp}} - u_i^{\text{ANN}}|}{u_i^{\text{exp}}}, \quad (3.21)$$

$$MSE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (u_i^{\text{exp}} - u_i^{\text{ANN}})^2, \quad (3.22)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (u_i^{\text{exp}} - u_i^{\text{ANN}})^2}, \quad (3.23)$$

$$r^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (u_i^{\text{exp}} - \bar{u})^2 - \frac{\sum_{i=1}^N (u_i^{\text{exp}} - u_i^{\text{ANN}})^2}{N}}{\sum_{i=1}^N (u_i^{\text{exp}} - \bar{u})^2}, \quad (3.24)$$

Де u – швидкість різання;

u^{exp} і u^{ANN} – представляють експериментальну та оцінену ШНМ швидкість різання;

\bar{u} – середнє значення експериментальної швидкості різання;

N – кількість використуваних пар значень.

Таблиця 3.1 – Порівняння помилок навчання декількох конфігурацій ШНМ

Конфігу-	r^2	Помилка навчання
----------	-------	------------------

рація	загальне	AARD	MSE	RMSE	r^2
ШНМ	2	3	4	5	6
4-1-1	0.9848	0.0864	$5.5236 \cdot 10^{-11}$	$7.4321 \cdot 10^{-6}$	0.9849
4-2-1	0.9872	0.0812	$4.4658 \cdot 10^{-11}$	$6.6826 \cdot 10^{-6}$	0.9876
4-3-1	0.9914	0.0514	$3.1604 \cdot 10^{-11}$	$5.6217 \cdot 10^{-6}$	0.9914
4-4-1	0.9916	0.0594	$2.8458 \cdot 10^{-11}$	$5.3346 \cdot 10^{-6}$	0.9919
4-5-1	0.9931	0.0453	$2.1807 \cdot 10^{-11}$	$4.6698 \cdot 10^{-6}$	0.9937
4-6-1	0.9950	0.0390	$1.6685 \cdot 10^{-11}$	$4.0848 \cdot 10^{-6}$	0.9952
4-7-1	0.9855	0.0839	$5.2792 \cdot 10^{-11}$	$7.2658 \cdot 10^{-6}$	0.9953
4-8-1	0.9931	0.0441	$2.2292 \cdot 10^{-11}$	$6.3358 \cdot 10^{-6}$	0.9936
4-9-1	0.9886	0.0648	$4.0142 \cdot 10^{-11}$	$4.7214 \cdot 10^{-6}$	0.9987
4-10-1	0.9889	0.0630	$3.9534 \cdot 10^{-11}$	$6.2876 \cdot 10^{-6}$	0.9893
4-11-1	0.9899	0.0477	$3.4877 \cdot 10^{-11}$	$5.9056 \cdot 10^{-6}$	0.9900
4-12-1	0.9875	0.0771	$4.4745 \cdot 10^{-11}$	$6.6892 \cdot 10^{-6}$	0.9875

Таблиця 3.2 – Порівняння помилок перевірки конфігурацій ШНМ

Конфігурація ШНМ	r^2 загальне	Помилка навчання			
		AARD	MSE	RMSE	r^2
1	2	3	4	5	6
4-1-1	0.9848	0.1040	$6.8054 \cdot 10^{-11}$	$8.2495 \cdot 10^{-6}$	0.9847
4-2-1	0.9872	0.0968	$5.9795 \cdot 10^{-11}$	$7.7327 \cdot 10^{-6}$	0.9862
4-3-1	0.9914	0.0651	$3.9511 \cdot 10^{-11}$	$6.2858 \cdot 10^{-6}$	0.9910
4-4-1	0.9916	0.0835	$3.5984 \cdot 10^{-11}$	$5.9987 \cdot 10^{-6}$	0.9913
4-5-1	0.9931	0.0875	$3.4220 \cdot 10^{-11}$	$5.8498 \cdot 10^{-6}$	0.9919
4-6-1	0.9950	0.0793	$2.5853 \cdot 10^{-11}$	$5.0846 \cdot 10^{-6}$	0.9938
4-7-1	0.9855	0.0940	$6.2538 \cdot 10^{-11}$	$7.9081 \cdot 10^{-6}$	0.9951
4-8-1	0.9931	0.0827	$3.3818 \cdot 10^{-11}$	$5.8154 \cdot 10^{-6}$	0.9919
4-9-1	0.9886	0.0909	$5.2919 \cdot 10^{-11}$	$4.7214 \cdot 10^{-6}$	0.9874
4-10-1	0.9889	0.0893	$5.3437 \cdot 10^{-11}$	$7.3101 \cdot 10^{-6}$	0.9876
4-11-1	0.9899	0.0920	$4.5248 \cdot 10^{-11}$	$6.7267 \cdot 10^{-6}$	0.9891
4-12-1	0.9875	0.9875	$5.8320 \cdot 10^{-11}$	$7.6368 \cdot 10^{-6}$	0.9858

Таблиця 3.3 – Порівняння помилок тесту кількох конфігурацій ШНМ

Конфігурація ШНМ	r^2 загальне	Помилка навчання			
		AARD	MSE	RMSE	r^2
1	2	3	4	5	6

4-1-1	0.9248	0.0968	6.2149·	7.8834·	0.9173
4-2-1	0,9272	0.1005	5.0716·	7.1215·	0.9194
4-3-1	0,9314	0.0396	2.8074·	5.2985·	0,9227
4-4-1	0,9316	0.0750	3.3369·1	5.7766·	0,9222
4-5-1	0,9331	0,0772	2.9697·	5.4495·	0,9327
4-6-1	0,9350	0,0591	3.7071·	6.7959·	0,9358
4-7-1	0,9355	0,0897	5.0535·	7.1088·	0,9389
4-8-1	0,9431	0,0733	2.8552·	5.3434·	0,9429
4-9-1	0,9386	0,0801	4.0283·1	6.3469·	0,9416
4-10-1	0,9450	0,0651	2.6184·	4.1318	0,9467
4-11-1	0,9399	0,0837	3.7076·	6.0890·	0,9315
4-12-1	0,9375	0,0790	4.1049·	6.4070·	0,9207

Як видно з таблиць 3.1 – 3.3, коли кількість прихованих нейронів збільшується до 10 у процесах навчання та перевірки, значення AARD, MSE та RMSE набору даних перевірки стають меншими, ніж інші конфігурації, тоді як значення r^2 стає вищим. Додавання більшої кількості нейронів у прихований шар може не покращити прогнозовані результати, це підтверджено в тій же таблиці, де значення AARD [%], MSE та RMSE зростають, а значення r^2 безперервно зменшується. Отже, для досліджуваного теплообмінника оптимальна конфігурація ШНМ складається з шести нейронів в одному прихованому шарі. Таким чином обрано ШНМ конфігурації 4–10–1.

4 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ МОДЕЛІ

4.1 Імітаційне моделювання ШНМ

Для наглядного подання поведінки розробленої ШНМ в пакеті MathLab було побудовано ряд поверхонь у тому числі і за транспонованими даними повнозв'язної моделі. Фрагмент лістингу програмного коду виводу поверхонь наведено на рис.4.1:

```
a=linspace(0.0080,0.0150,100);
b=linspace(0.0018,0.0050,100);
simul(2,1:num_intervals*num_intervals) = 0;
for i=1:num_intervals;
for j=1:num_intervals;
simul(1,(i-1)*num_intervals+j)=a(1,i);
simul(2,(i-1)*num_intervals+j)=b(1,j);
end;
end;
tri=delaunay(simul(1,:),simul(2,:));
P=data(:,3:4:7)';
T=data(:,4)';
net=newrbe(P,T,1.5);
out=sim(net,simul);
figure;
trisurf(tri,simul(1,:),simul(2,:),out(1,:));
```

Рисунок 4.1 – Фрагмент лістингу програмного коду

При поданні тривимірних поверхонь інші параметри фіксовано.

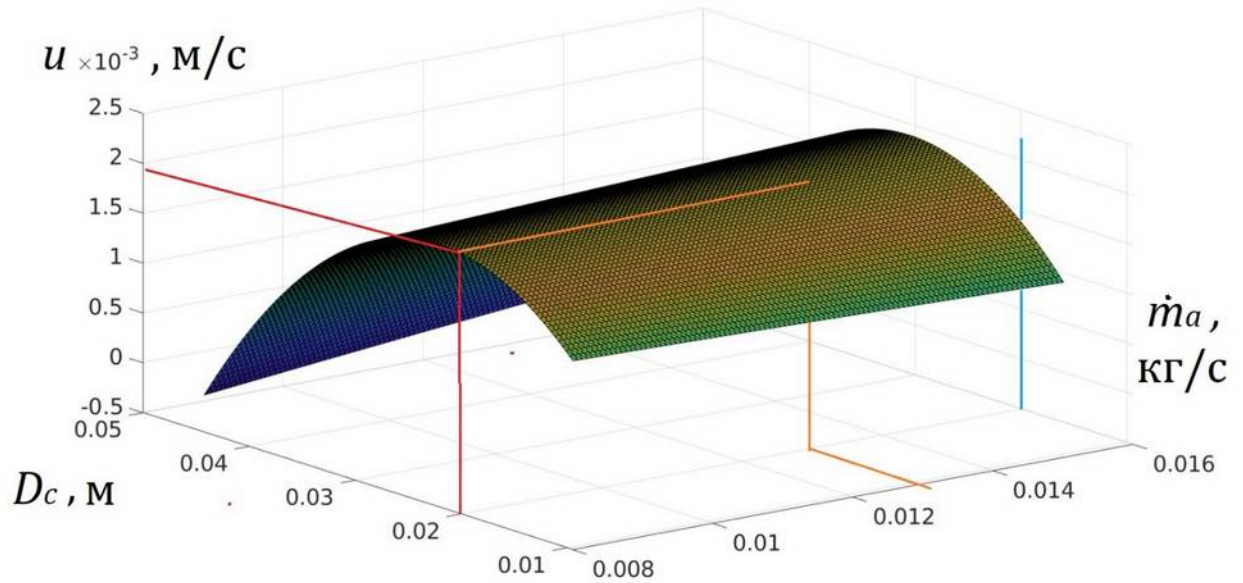


Рисунок 4.2 – Поверхня $u=F(\dot{m}_a, D_c)$

Так при завданні глибини різку $D_c = 0.02$ м та масового обороту абразиву $\dot{m}_a = 0.0124$ кг/с максимальною швидкістю різку буде $u = 1.9$ м/с при фіксованих значеннях інших параметрів.

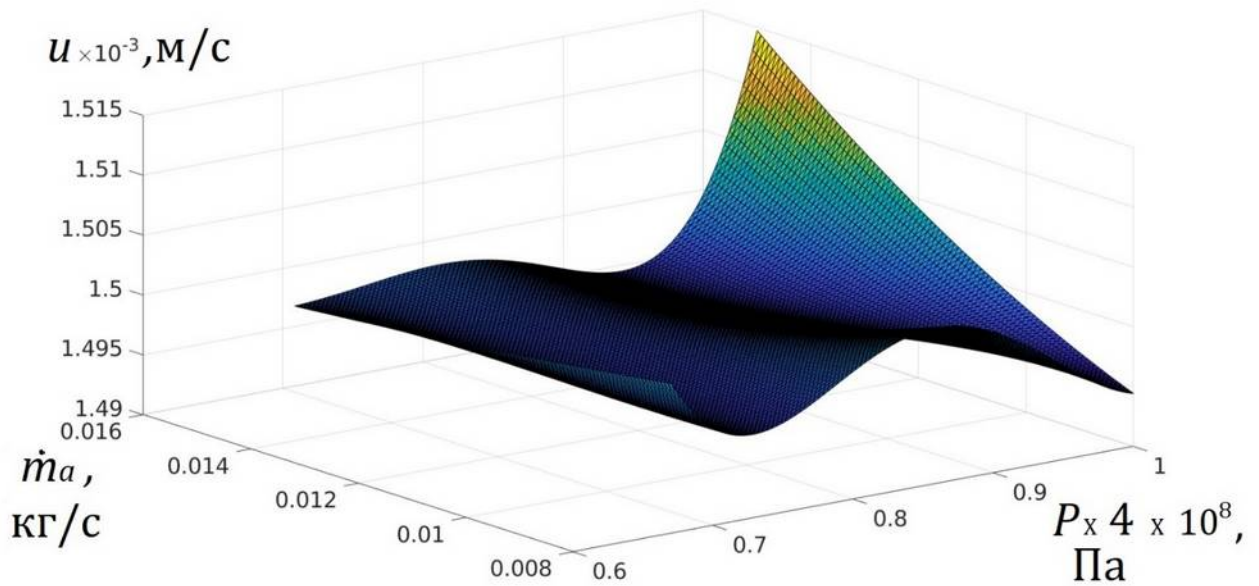


Рисунок 4.3 – Поверхня $u=F(P, \dot{m}_a)$

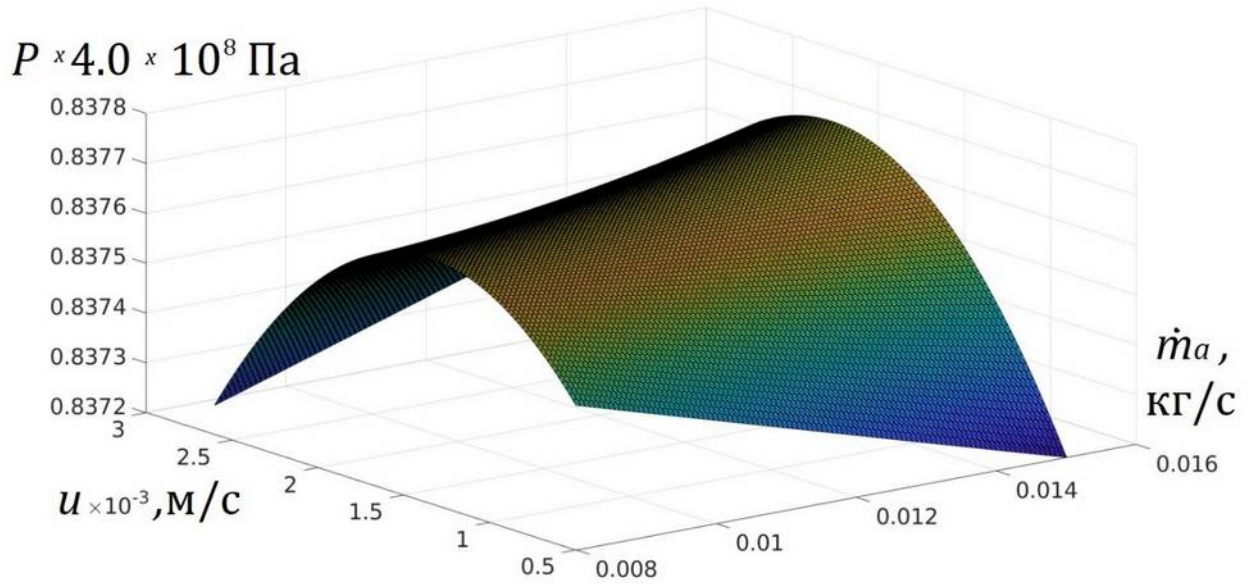


Рисунок 4.4 – Поверхня $P=F(\dot{m}_a, u)$

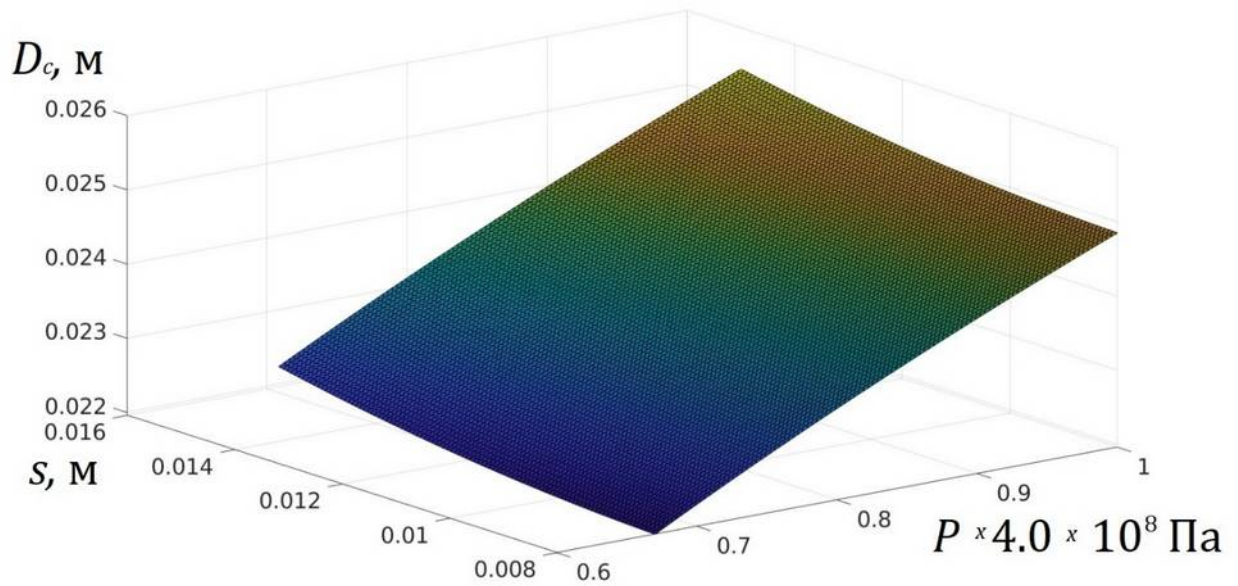


Рисунок 4.5 – Поверхня $D_c^{\square}=F(P, s)$

4.2 Вартісний критерій вибору оптимальних параметрів

Величини деяких параметрів, визначених ШНМ для оптимізації процесу ГАР, неможливо досягнути точно: тиск у більшості насосів регулюється

дискретно-ступінчасто; діаметр та щільність частинок абразиву особливо при вторинному застосуванні теж неможливо підібрати за завданням. Тому, як і у більшості подібних процесів, приходиться оцінювати декілька варіантів налаштування параметрів.

Для цього треба доцільно використати вартісний критерій, вирішуючи оптимізаційну задачу мінімізації операційних витрат C_{OPM} при максимізації швидкості різання u для виконання завдань D_c (обмежень). Запропонований критерій має наступну структуру:

$$C_{OPM} = \begin{cases} \arg \max_x (u(D_c)) \\ \text{for } B_1 \cdot a_1 \cdot P + B_2 \cdot a_2 \cdot \dot{m}_a \rightarrow \min \end{cases}, \quad (4.1)$$

Де B_1 – питома вартість забезпечення необхідного тиску ГАР з урахуванням собівартості електроенергії на 1м різі з заданою глибиною D_c ;

B_2 – питома вартість забезпечення масового обігу необхідного за діаметром та щільністю абразиву або еквівалентної суміші абразивів;

a_1, a_2 – вагові коефіцієнти значущості факторів, визначаються експертами.

ВИСНОВКИ

В кваліфікаційній роботі було розроблено інтелектуальний інструмент оцінювання величини опору забруднення для теплообмінника з поперечним потоком, а саме штучну нейронну мережу прямого поширення з метою визначення максимальної швидкості гідроструминного різання металу з використанням абразиву для ідентифікації параметрів виробничих режимів в рамках оптимізації роботи агрегату гідроабразивного різання. За допомогою моделі було досліджено вплив зв'язків між параметрами процесу та відгуком.

Модель ШНМ на основі алгоритму зворотного поширення була розроблена після використання 70% експериментальних даних для навчання. Після процесу навчання, валідації та тестування було виявлено, що модель 4–10–1 прямого поширення з сигмоїдальним функціями активації є найкращою архітектурою для визначення швидкості різання металу. При тестуванні значення r^2 було близьке до 1 ($r^2_{ALL} = 0,9450$). AARD становив 0,0651% під час процесу тестування, а MSE і RMSE були менш ніж 0,0005% для процесу навчання, що вказує на те, що прогнози результати мережі добре узгоджуються з експериментальними даними.

Запропоновано вартісний критерій оцінювання обраного набору параметрів для процесу різання.

Запропонований підхід побудови ШНМ прямого поширення для оперативного керування та ідентифікації, також був апробований у аналогічній задачі очищення поверхні прокату [33,34], а отримані результати підтверджують, адекватність розробленої моделі достатня для реальних ТП.

Запропоноване рішення при адаптації ШНМ під параметри іншої марки сталі може бути використано для розробки програмного додатку інтерфейсів ЧПУ гідроструминних різальних агрегатів для підвищення ефективності процесу різання.

ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. World Economic Forum. URL: <https://www.weforum.org/reports/annual-report-2021-2022/in-full>. (дата звернення 26.11.2023)
2. Zhang, S., et al., Use of pre-profiling a milled pocket as a means of improving machining and lowering energy costs, in 2007 WJTA Conference and Expo, Houston, Editor. 2007: Texas. Paper 3-H.
3. Hashish, M., On the modeling of abrasive-waterjet cutting, in 7th Int. Symposium. on Jet Cutting Technology, Ottawa, Editor. 1984: Canada. p. 249-265.
4. Zeng, J. and T. J. Kim, Development of an abrasive waterjet kerf cutting model for brittle materials, in 11th Int. Conf. on Jet Cutting Technology, S. Andrews, Editor. 1992: Scotland. p. 483-501.
5. Alsoufi, M. S., Dhia K. Suker, Abdulaziz S. Alsabban, and Sufyan Azam, Experimental Study of Surface Roughness and Micro-Hardness Obtained by Cutting Carbon Steel with Abrasive WaterJet and Laser Beam Technologies. American Journal of Mechanical Engineering, 2016. 4(5): p. 173-181.
6. Feng, Y. X., et al., An Experimental Study on Milling Al₂O₃ Ceramics with Abrasive Waterjet. Key Engineering Materials, 2007. 339: p. 500-504.
7. Snider, D. and M. Hashish, AWJ trimming of composites and cutting of other materials using 6-axis robots, in WJTA-IMCA Conference and Expo. 2011: Houston, Texas, Paper A3.
8. Lauand, V. H., W. T. Hennies, and A. J. Stellan, Glass and marble (cachoeiro de itapemirim) milling with abrasive water jetting, in 19th Int. Conference Water Jetting, B. Group, Editor. 2008: Nottingham. p. 121-139.
9. Abdullah, R., A. Mahrous, and A. Barakat, Surface quality of marble machined by abrasive water jet. Cogent Engineering, 2016. 3(1): p. 1178626.

10. Borkowski, P. J., Application of Abrasive-Water Jet Technology for Material Sculpturing. Transactions of the Canadian Society for Mechanical Engineering, 2010. 34(3-4): p. 389-400.
11. Badgujar, P. P. and M. G. Rathi, Abrasive Waterjet Machining-A State of Art IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering (IOSR-JMCE) 2014. 11(3): p. 59-64.
12. Kvietková, M., Š. Barčík, and M. Gašparík, Optimization of the Cutting Process of Wood-Based Agglomerated Materials by Abrasive Water-Jet. Acta Silvatica et Lignaria Hungarica, 2014. 10(1): p. 31-47.
13. Brandt, C. and H. Louis, Influence of the nozzlegeometry on abrasive water jets, in Proc. of the 5th Int. Conf. on Water Jet Tech. 1998: New Delhi, India. p. 330-344.
14. Vundavilli, P. R., et al., Fuzzy logic-based expert system for prediction of depth of cut in abrasive water jet machining process. Knowledge-Based Systems, 2012. 27: p. 456-464.
15. Aultrin, K. S. J., M. D. Anand, and P. Jose, Modelling the Cutting Process and Cutting Performance in Abrasive Water Jet Machining Using Genetic-Fuzzy Approach. Procedia Engineering, 2012. 38: p. 4013-4020.
16. Venkata Rao, R. and V. D. Kalyankar, Parameter optimization of modern machining processes using teaching–learning-based optimization algorithm. Engineering Applications of Artificial Intelligence, 2013. 26(1): p. 524-531.
17. Ushasta Aicha, Simul Banerjeea, Asish Bandyopadhyaya, Probal Kumar Dasb. Abrasive Water Jet Cutting of Borosilicate Glass. Procedia Materials Science 3rd International Conference on Materials Processing and Characterisation (ICMPC 2014). 6 (2014) 775–785. doi: 10.1016/j.mspro.2014.07.094.
18. Shanmugam, D. K., Wang, J., & Liu, H. (2008). Minimisation of kerf tapers in abrasive waterjet machining of alumina ceramics using a compensation technique. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 48(14), 1527-1534.

19. Shanmugam, D. K., & Masood, S. H. (2009). An investigation on kerf characteristics in abrasive waterjet cutting of layered composites. *Journal of materials processing technology*, 209(8), 3887- 3893.
20. Yong, Z., & Kovacevic, R. (1997). Modeling of jetflow drilling with consideration of the chaotic erosion histories of particles. *Wear*, 209(1-2), 284-291.
21. Borkowski, P. (2004). Theoretical and experimental basis of hydro-jet surface treatment. Publ. Koszalin University of Technology.
22. Ramprasad, U. G., & Kamal, H. (2015). Optimization MRR of Stainless steel 403 in abrasive water jet machining using ANOVA and Taguchi method. *International Journal of Engineering Research and Applications*, 5(5), 86-91.
23. Liu, D., Huang, C., Wang, J., Zhu, H., Yao, P., & Liu, Z. (2014). Modeling and optimization of operating parameters for abrasive waterjet turning alumina ceramics using response surface methodology combined with Box–Behnken design. *Ceramics International*, 40(6), 7899-7908.
24. Momber, A. W. and R. Kovacevic, *Principles of Abrasive Water Jet Machining*, 394p. 1st edition, 2012, London: Springer-Verlag London. ISBN 978-1-4471-1574-8. <https://doi.org/10.1007/978-1-4471-1572-4>
25. Vu Ngoc Pi, *Performance Enhancement of Abrasive Waterjet Cutting*, 187p. 2nd edition, 2008, Rotterdam: PrintPartners Ipskamp. ISBN: 978-90-9023096-2
26. M.Chithirai Pon Selvan, N.Mohana Sundara Raju, R.Rajavel. Effects of Process Parameters on Depth of Cut in Abrasive Waterjet Cutting of Cast Iron. *International Journal of Scientific & Engineering Research*, 2011, V.2, Issue 9, p.1-5.
27. Ushasta Aich, Simul Banerjee, Asish Bandyopadhyay, Probal Kumar Das. Abrasive Water Jet Cutting of Borosilicate Glass. 3rd International Conference on Materials Processing and Characterisation (ICMPC 2014), *Procedia MaterialsScience* 6 (2014) 775 – 785. <https://doi: 10.1016/j.mspro.2014.07.094>
28. Chithirai Pon Selvan, N.Mohanasundara Raju. INFLUENCE OF ABRASIVE WATERJET CUTTING CONDITIONSON DEPTH OF CUT OF

MILD STEEL. International Journal of Design and Manufacturing Technology (IJDMT), Volume 3, Issu 1, (2012), pp. 48-57. URL: www.iaeme.com/ijdmt.html.

29. Kashyap, K., Srinivas, S., 2019. Effect of Process Parameters on Depth of Penetration & Surface Roughness in Abrasive Waterjet Cutting of Copper. AMM 895, 301–306. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/amm.895.301>.

30. M. Fan, J. Hu, R. Cao, K. Xiong, X. Wei, “Modeling and prediction of copper removal from aqueous solutions by nZVI/rGO magnetic nanocomposites using ANN-GA and ANN-PSO”, Sci Rep. 2017 Dec 21; 7(1):18040. doi: 10.1038/s41598-017-18223-y.

31. D. Needell, S. Deanna, W. Srebro, et al. “Stochastic gradient descent, weighted sampling, and the randomized Kaczmarz algorithm”, Mathematical Programming, 155 (2016), pp. 549–573.

32. Білецький В. С., Смирнов В. О. Моделювання процесів збагачення корисних копалин. – Донецьк: Східний видавничий дім, 2013. – 304 с.

33. O. Ilyunin, M. Khodak, V. Pyrohov, O. Pasholoc, M. Tryhuba, S. Serdiuk. Intelligent models for control of jet hydro-processing of rolled steel defects. Інтегровані технології та енергозбереження. Системи управління та обробки інформації, — Харків: НТУ «ХПІ», 2023. – №2,- с.45-56 ISSN 2078-5364 (print) ISSN 2708-0625 (online).

34. O. Ilyunin, S. Serdiuk, V. Pyrohov, M. Tryhuba. FEATURES OF USING INTELLIGENT AUTOMATION FOR WATER JET TECHNOLOGY. Materials of the XI international scientific-practical conference «Information Control Systems and Technologies» (ICST- ODESSA – 2023) 21 th – 23 th September, 2023, p.85. <http://icst-conf.com/2023.pdf>. (Scopus)