

Хмельницький національний університет  
Факультет інженерії, транспорту та архітектури  
Кафедра технології машинобудування

**ДИПЛОМНА РОБОТА**

Оптимізація процесу лазерного різання шляхом використання методу ортогональних масивів

Назва теми

Рівень вищої освіти: другий (магістр)

Галузь знань: 13 Механічна інженерія

Шифр і назва галузі знань

Спеціальність: 131 Прикладна механіка

Шифр і назва спеціальності

Спеціалізація: Технології машинобудування

Назва

Освітня програма: Технології машинобудування

Назва

Шифр 22401

Виконав

студент 2 курсу група ПМТм-22-1

Шифр



Назарій КЛЯСНИЙ

Ім'я, прізвище

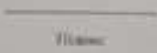
Керівник: к.т.н., доцент



Катерина СОКОЛАН

Ім'я, прізвище

Нормконтролер



Сергій БИСЬ

Ім'я, прізвище

До захисту допускаю

Завідувач кафедри

Технології машинобудування

Назва



Віталій ТКАЧУК

Ім'я, прізвище

Дата 27.12.2023

Хмельницький 2023

Завідувачу кафедри  
Віталію ТКАЧУКУ

здобувача вищої освіти (студента)  
ШБ, факультет, «курс», «група»  
Назарія КЛЯСНОГО  
ФІЛА, гр. ПМТм-22-1

### ЗАЯВА

З правилами чинного Положення про систему забезпечення академічної доброчесності в Хмельницькому національному університеті, згідно з яким виявлення академічного плагіату є підставою для відмови в допуску кваліфікаційної роботи до захисту і застосування заходів дисциплінарної та академічної відповідальності, ознайомлений (а). Про використання програмно-технічних засобів для перевірки кваліфікаційних робіт здобувачів вищої освіти на академічний плагіат оповіщений (а) та надаю свою згоду на обробку й збереження університетом моєї роботи в інституційному репозитарії університету.

Також надаю університету право на передачу моєї роботи для обробки та збереження в базах даних програмно-технічних засобів (Unicheck та/або Anti-Plagiarism) і використання роботи для виявлення академічного плагіату в інших роботах, які перевіряються програмно-технічними засобами та користувачами, що мають доступ до цих програмно-технічних засобів, виключно в обмежених цілях для виявлення плагіату в текстах робіт.

Робота надається для перевірки в електронному варіанті. Електронна версія моєї роботи збігається (ідентична) з друкованою.

20.11.23

дата



підпис

ХМЕЛЬНИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

ГОЛОВІ ЕКЗАМЕНАЦІЙНОЇ КОМІСІЇ

Направляється студент Клясний Назарій Сергійович на захист дипломного проєкту (роботи)  
за спеціальністю 131 - Прикладна механіка

На тему: Оптимізація процесу лазерного різання шляхом використання методу ортогональних масивів

Дипломний проєкт (робота), рецензії і довідка про перевірку на плагіат додаються.

Декан факультету

*Віктор Олександренко*  
ВІКТОР ОЛЕКСАНДРЕНКО  
Дата підпису: \_\_\_\_\_

ДОВІДКА УСПІШНОСТІ

Клясний Н. С. за період навчання на факультеті інженерії, транспорту та архітектури з 2022 по 2022 роки повністю виконав навчальний план спеціальності з таким розподілом оцінок за національною шкалою: відмінно 0,00 %, добре 100,00, задовільно 0,00 %, шкальною ЄКТС: А 9,09 %, В 45,45 %, С 45,45 %, D 0,00 %, E 0,00 %.

Методист факультету

*Методист*  
Дата підпису: \_\_\_\_\_

ВИСНОВОК КЕРІВНИКА ДИПЛОМНОГО ПРОЄКТУ (РОБОТИ)  
ТА ОБГРУНТУВАННЯ ОЦІНКИ

Студент Клясний Назарій Сергійович отримав завдання і працював над дипломною роботою згідно графіка. Під час роботи показав гарні теоретичні знання та вмівня застосовувати їх на практиці.

Оцінка дипломного проєкту (роботи)

Керівник дипломного проєкту

*дуже добре*  
*Соколан К.С.*  
Соколан К.С.  
Дата підпису: 28. грудня 2023 р.

ВИСНОВОК КАФЕДРИ ПРО ДИПЛОМНИЙ ПРОЄКТ (РОБОТУ)

Дипломний проєкт (роботу) розглянуто. Студент Клясний Н. С. допускається до захисту цього проєкту (роботи) в екзаменаційній комісії.

Завідувач кафедри

Технології машинобудування  
*Ткачук С.Ф.*  
Ткачук С.Ф.  
Дата підпису: 28. грудня 2023 р.

РІШЕННЯ ЕКСПЕРТНОЇ КОМІСІЇ КАФЕДРИ Технології машинобудування  
 ПРО ДОПУСК КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ ДО ЗАХИСТУ

Підтверджуємо ознайомлення з результатами звіту/звітів подібності щодо роботи, продуктиваними програмно-технічним засобом (ами) перевірки текстів на плагіат:  
 Назва кваліфікаційної роботи «Оптимізація процесу лазерного різання шляхом використання методу ортогональних масивів»

Автор Н.С. Клясний

Освітня програма Технології машинобудування

Спеціальність: 131 Прикладна механіка

Науковий керівник: К.С. Соколан

Після аналізу звіту подібності зроблено такий висновок:

№	Висновок	Позначка про відповідність
1	Запозичення, виявлені в роботі, є звичайними і не є плагіатом (далі – зазначаються підстави віднесення запозичень до правомірних, якщо потрібно). Робота приймається до захисту.	Робота приймається до захисту.
2	Виявлені запозичення не є плагіатом, розміщені в розділах, які не описують безпосередньо авторське дослідження, але кількість цитат перевищує обсяг, виправданий поставленою метою роботи (далі – зазначаються деталі та аргументовані підстави віднесення запозичень до правомірних). Робота приймається до захисту, але має бути відкоригована.	
3	Виявлені запозичення не є плагіатом, але частково розміщені в розділах, які описують безпосередньо авторське дослідження, а кількість цитат перевищує обсяг, виправданий поставленою метою роботи. Робота може бути допущена до захисту після того як буде відкоригована та допрацьована і успішно пройде повторну перевірку на академічний плагіат.	
4	Робота містить навмисні тексти спотворення, передбачувані спроби укривити запозичень або інші прояви академічного плагіату. Робота містить фабрикацію або фальсифікацію даних. Робота не допускається до захисту.	
5	Інше:	

Підтвердження:

...UNICHECK – 3,57%.....

...Anti-Plagiarism v.15.257 – 2,0 %.....

Дата

Завідувач кафедри

Підпис

Віталій ТКАЧУК

Ім'я, прізвище

Гарант освітньої програми

Підпис

Віталій ТКАЧУК

Ім'я, прізвище

Керівник кваліфікаційної роботи

Підпис

Катерина СОКОЛАН

Ім'я, прізвище

**РЕЦЕНЗІЯ**

на дипломну роботу студента Клясного Н.С.  
Тема роботи: Використання методу ортогональних масивів з метою оптимізації процесів лазерного різання

Тема дипломної роботи, та її зміст відповідають обраній спеціальності. Дипломна робота має необхідні розділи згідно завдання.

У дипломній роботі студент розглянув можливість використання методу ортогональних масивів для оптимізації параметрів лазерного різання деталей із нержавіючої сталі.

У першому розділі наведені короткі характеристики процесу лазерного різання, а також деталі та обладнання, які виготовляються таким методом.

У другому і третьому розділі наведена методологія проведення дослідження методом ортогональних масивів, а також процес обробки отриманих експериментальних результатів.

Четвертий розділ присвячений моделюванню та оптимізації процесу лазерного різання. В розділі розглядаються основні характеристики лазерного різання, такі як потужність лазера, частота, швидкість різання та тиск газу, а також їх вплив на такі параметри деталі, як відхилення у геометричній формі кромки прорізу, шорсткість поверхні прорізу та зона термічного впливу.

Отримані у четвертому розділі результати надали можливість обрати оптимальні показники лазерного різання при виготовленні деталей із нержавіючої сталі 08X16H11M3.

Вагомих недолісів в дипломній роботі не виявлено.

Серед зауважень можна відзначити, що тривимірні графіки впливу параметрів різання в тексті роботи бажано було б роздрукувати у кольоровому вигляді.

Дипломна робота, виконана згідно завдання, в повному обсязі на високому технічному рівні та заслуговує оцінки «відмінно».

Рецензент: к.т.н., доц.,  
каф. МДВРС, ХНУ

«24» «12» 2023 р.



Горбунко С.П.

## Анотація

**Тема роботи:** «Оптимізація процесу лазерного різання шляхом використання методу ортогональних масивів»

Автор: Клясний Н.С., Керівник роботи: Соколан К.С.

Об'єм пояснювальної записки 86 сторінки. Графічна частина: 8 листів формату А1.

Спеціальність: 131 Прикладна механіка.

В дипломній роботі розглянуто процес оптимізації параметрів лазерного різання деталей із нержавіючої сталі шляхом застосування методу ортогональних масивів.

**Актуальність.** Лазерні технології відрізняються від традиційних методів обробки відсутністю контактних явищ в зоні обробки та можливістю точно дозованого інтенсивного підведення енергії до поверхні виробу; локальністю за глибиною та площею фізичних процесів у зоні термічного впливу при збереженні вихідних властивостей основного об'єму та відсутністю значних деформацій оброблюваних деталей; можливістю обробки практично будь-яких матеріалів, незалежно від їх механічних властивостей, з високою якістю і продуктивністю. Для підтримання встановленого рівня якості виготовлення деталей та високої продуктивності самого процесу лазерного різання важливим є підбір оптимальних параметрів процесу різання. Ці параметри впливають на характеристики готових деталей, що відображається у шорсткості отриманої поверхні, ширині прорізу та розмірі зони термічного впливу.

**Метою** дипломної роботи є оптимізація таких параметрів лазерного різання, як частота та потужність лазера, швидкість різання і тиск газу із застосуванням методу ортогональних масивів.

**Об'єкт дослідження** – параметри лазерного різання та їх вплив на характеристики поверхонь деталей, що утворюються.

**Предмет дослідження** – характеристики поверхонь, які утворюються в процесі лазерного різання деталей.

**Наукова новизна.** В роботі проведено аналіз можливості використання методу ортогональних масивів для підбору оптимальних параметрів лазерного різання.

**Практичне значення.** Встановлено оптимальні параметри лазерного різання нержавіючої сталі 08X16N11M3. Практичного застосування результати дипломної роботи можуть отримати на виробництвах, які виконують лазерне різання деталей із нержавіючої сталі.

**Апробація результатів.** За результатами проведених досліджень опубліковано наукову статтю у журналі категорії Б Вісник ХНУ. Технічні науки.

**Ключові слова:** нержавіюча сталь, лазер, лазерне різання, оптимізація параметрів різання, ортогональні масиви.

Автор роботи

Клясний Н.С.

\_\_\_\_\_ 2023 р.

## Abstract

**Theme of the work:** «Optimisation of the laser cutting process using the orthogonal array method»

Author: Klyasnyi N.S., Supervisor: Sokolan K.S.

The volume of the explanatory note is 86 pages. Graphic part: 8 sheets of A1 format.

Speciality: 131 Applied mechanics.

The work deals with the process of optimising the parameters of laser cutting of stainless steel parts by applying the method of orthogonal arrays.

**Relevance.** Laser technologies differ from traditional processing methods in the absence of contact phenomena in the processing zone and the possibility of precisely dosed intensive energy supply to the surface of the product; localised physical processes in the thermal impact zone in terms of depth and area, while maintaining the original properties of the main volume and the absence of significant deformations of the processed parts; the ability to process almost any material, regardless of its mechanical properties, with high quality and productivity. To maintain the established level of quality of manufacturing parts and high productivity of the laser cutting process itself, it is important to select the optimal cutting process parameters. These parameters affect the characteristics of the finished parts, which is reflected in the roughness of the surface, the width of the slot and the size of the heat affected zone.

The **purpose** of the work is to optimise laser cutting parameters such as laser frequency and power, cutting speed and gas pressure using the orthogonal array method.

The **object** of research is laser cutting parameters and their influence on the characteristics of the surfaces of the formed parts.

The **subject** of research is the characteristics of surfaces formed in the process of laser cutting of parts.

**Scientific novelty.** The work analyses the possibility of using the method of orthogonal arrays to select the optimal parameters of laser cutting.

**Practical significance.** The optimum parameters of laser cutting of stainless steel 08X16H11M3 have been determined. The results of the thesis can be applied in production facilities that perform laser cutting of stainless steel parts.

**Approbation of the results.** Based on the results of the research, a scientific article was published in the category B journal "KhNU Bulletin. Technical sciences.

**Keywords:** stainless steel, laser, laser cutting, optimisation of cutting parameters, orthogonal arrays.

The author of the work

Klyasnyi N.S.

\_\_\_\_\_ 2023

## ЗМІСТ

	с.
ВСТУП.....	14
1 ЗАГАЛЬНИЙ РОЗДІЛ.....	16
1.1 Особливості технологічного процесу лазерного різання .....	16
1.2 Постановка проблеми.....	22
1.3 Характеристики матеріалу, що використовується.....	22
1.4 Характеристики деталей, які виготовляються методом лазерного різання.....	24
1.5 Обладнання лазерного різання .....	28
2 МЕТОДОЛОГІЯ ПРОВЕДЕННЯ ДОСЛІДЖЕННЯ .....	34
2.1 Метод Тагучі або метод ортогональних масивів .....	34
2.2 Представлення результатів у вигляді поверхні відгуку .....	37
2.3 Планування експерименту .....	38
3 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИЙ РОЗДІЛ .....	40
3.1 Кількісні характеристики лазерного різання.....	40
3.2 Обробка результатів експериментальних досліджень.....	45
4 ОПТИМІЗАЦІЯ ПАРАМЕТРІВ ЛАЗЕРНОГО РІЗАННЯ МЕТОДОМ ОРТОГОНАЛЬНИХ МАСИВІВ .....	51
4.1 Перевірка експериментальних результатів.....	51
4.2 Математична модель .....	52
4.3 Оптимізація режимів лазерного різання для зменшення конусності прорізу .	54
4.3.1 Оцінка за варіативним співвідношенням.....	54
4.3.2 Оцінка за середньоквадратичним відхиленням .....	60
4.3.3 Оцінка за середнім значенням.....	66
4.4 Оптимізація режимів лазерного різання для зменшення середньої шорсткості поверхні .....	71

4.5 Оптимізація режимів лазерного різання для зменшення зони термічного впливу .....	77
4.6 Визначення оптимальних параметрів лазерного різання .....	83
5 ОХОРОНА ПРАЦІ .....	85
5.1 Правила безпеки при роботі на лазерних установках.....	85
5.2 Розрахунок штучного освітлення у приміщенні, де використовується лазерне обладнання .....	88
ВИСНОВКИ.....	93
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	94
ДОДАТКИ.....	97

## ВСТУП

На сьогоднішній день лазерне різання знайшло широкого застосування у сферах автомобілебудування, суднобудування та в інших галузях промисловості, в яких відбувається процес різання алюмінію, низьколегованої та нержавіючої сталі. На вибір лазерної системи для процесу різання вагомий вплив мають такі критерії, як досягнення високих швидкостей різання та максимізації продуктивності виробництва, завдяки якій можна досягнути високої якості прорізу та виключити необхідність проведення повторної обробки деталей. Підвищення ефективності процесу лазерного різання, а також його гнучкості та якості дозволяють знизити витрати на виробництві.

Використання лазерних технологій – прогресивний напрямок у машинобудуванні, який в останні роки набув значного розвитку. Застосування лазерного випромінювання є ефективним в авіаційній та автомобільній промисловості, в спеціальних галузях, пов'язаних із застосуванням важкооброблюваних матеріалів. Можливості сфокусованого пучка лазерного випромінювання як універсального інструменту унікальні.

Лазерні технології відрізняються від традиційних методів обробки відсутністю контактних явищ в зоні обробки та можливістю точно дозованого інтенсивного підведення енергії до поверхні виробу; локальністю за глибиною та площею фізичних процесів у зоні термічного впливу при збереженні вихідних властивостей основного об'єму та відсутністю значних деформацій оброблюваних деталей; можливістю обробки практично будь-яких матеріалів, незалежно від їх механічних властивостей, з високою якістю і продуктивністю. Дана технологія має високий рівень трудо- і енергозбереження, а також екологічної чистоти. У ряді випадків лазерна технологія є єдиною для вирішення важливих технологічних завдань. Регулювання введеної в технологічний об'єкт енергії дозволяє одному й тому ж матеріалу надавати принципово різні властивості. На базі використання лазерного променя створено принципово нові технології виготовлення виробів у машинобудуванні.

Для підтримання встановленого рівня якості виготовлення деталей та високої продуктивності самого процесу лазерного різання важливим є підбір оптимальних параметрів процесу різання. Ці параметри впливають на характеристики готових деталей, що відображається у шорсткості отриманої поверхні, ширині прорізу та розмірі зони термічного впливу.

Метою дипломної роботи є оптимізація таких параметрів лазерного різання, як частота та потужність лазера, швидкість різання і тиск газу із застосуванням методу ортогональних масивів.

За результатами дипломної роботи опублікована стаття у науковому журналі Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки, яка відноситься до фахових журналів категорії Б зі спеціальності 131 Прикладна механіка.

# 1 ЗАГАЛЬНИЙ РОЗДІЛ

## 1.1 Особливості технологічного процесу лазерного різання

Лазерне різання вважається одним із найсучасніших методів обробки матеріалу, принцип якого полягає в розрізанні матеріалу за допомогою потужного лазерного променя. В процесі лазерного різання, промінь може мати три різні положення: під поверхнею матеріалу, безпосередньо на самі поверхні та над поверхнею матеріалу. Власне розміщення лазерного променя залежить від властивостей матеріалу, що обробляється, та його товщини.

Умовно процес лазерного різання можна розділити на два основні етапи:

1. Розігрів металу до появи випарів та моменту його плавлення;
2. Видалення металу струменем газу, що подається під тиском.

«В основу методу входить три технологічні процеси:

- сублимація різання;
- газокиснева;
- різка плавленням» [14].

Лазерному променю характерна висока потужність випромінювання, яка в безперервному режимі може сягати  $10^8$ - $10^9$  Вт/см<sup>2</sup>, а в імпульсному –  $10^{16}$ - $10^{17}$  Вт/см<sup>2</sup> [6]. Завдяки цим властивостям лазер став високо ефективним інструментом, яким можна майже миттєво нагріти матеріалу, при чому вся площа заготовки не піддається тепловій деформації. До переваг використання такого методу різання матеріалу також відноситься високий ступінь керованості лазерного променя і можливість його застосування в автоматизованих системах.

В процесі лазерного різання сфокусований лазерний промінь (ЛП) потрапляє на площину заготовки, де відбувається локальне плавлення матеріалу із його частковим випаровуванням. Матеріал видаляється імпульсом газового струменя, що виходить із сопла. Такий струмінь одночасно виконує функцію захисту від попадання зварювальних бризок та парів.

«Лазерне різання використовується для розкрою і точної обробки фасонних деталей, які неможливо обробити іншим способом унаслідок їх крихкості, низької жорсткості, високої твердості або вони є дуже складними для обробки іншими способами. Цим способом доцільно виготовляти штучні складні деталі – розмір партії одночасно оброблюваних деталей мало впливає на собівартість одиниці продукції» [6].

Існує два основних режими лазерного різання – імпульсне та безперервне. При імпульсному різанні використовуються імпульсні лазери, а імпульсний характер обробки деталі забезпечує мінімальну глибину прогрівання матеріалу.

Для безперервного лазерного різання використовуються лазери безперервної дії, потужність яких лежить в межах від декількох кіловат до сотень кіловат. При використанні таких лазерів в зону дії ЛП подається струмінь газу, найчастіше вуглекислого. Сам газ обирається в залежності від матеріалу, що обробляється. Наприклад, для різання пластиків, фанери, деревини, картону, паперу в зону обробки подається інертний газ або повітря. Застосування таких газів пояснюється необхідністю охолодження зрізаних країв, а також вони перешкоджають розширенню області різання і згорання матеріалу.

При лазерному різанні більшості металів, кераміки, скла, використовується газ, струмінь якого видуває розплавлений матеріал із зони опромінення. Завдяки цьому стає можливим досягнення високої точності різання та отримання малої шорсткості поверхні.

Лазерне різання відноситься до методів променевої обробки матеріалів. Відмінною рисою таких методів обробки є відсутність традиційного ріжучого інструменту, а його роль при цьому виконує лазерний промінь. В технологіях розмірної обробки променеві методи можна віднести до фізико-хімічних методів обробки (рис. 1.1).

Лазерна обробка може використовуватись практично для всіх видів матеріалів, не зважаючи на їх показники в'язкості та твердості. Такий вид обробки набув широкого застосування у медицині, ювелірній промисловості,

сільському господарстві, мікроелектроніці, комунікаційних технологіях, а також у машинобудуванні (рис. 1.2).

Лазери класифікуються за рядом параметрів, до яких відносяться принцип агрегатного стану активної речовини, спосіб збудження активної речовини, величина випромінюваної потужності, довжина хвилі генерованого випромінювання, режим роботи, енергія імпульсу, ККД та безпека використання [16].

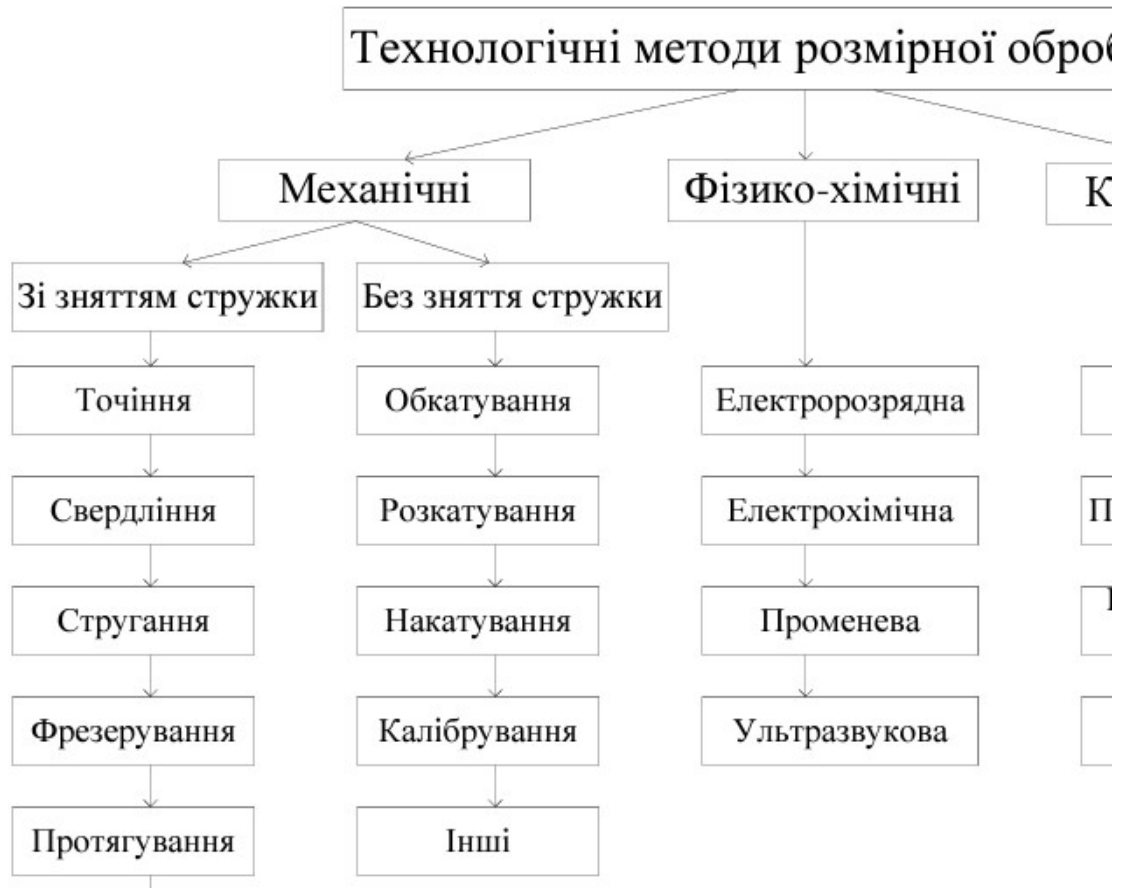


Рисунок 1.1 – Класифікація методів розмірної обробки



Рисунок 1.2 – Сфери застосування лазерного різання

«З усіх типів лазерів одними з найбільш поширених, у тому числі у машинобудуванні, є твердотільні лазери (рис. 1.3). Аналіз світового ринку лазерів свідчить про інтенсивне зростання обсягу їх продажу (рис. 1.4)» [16].

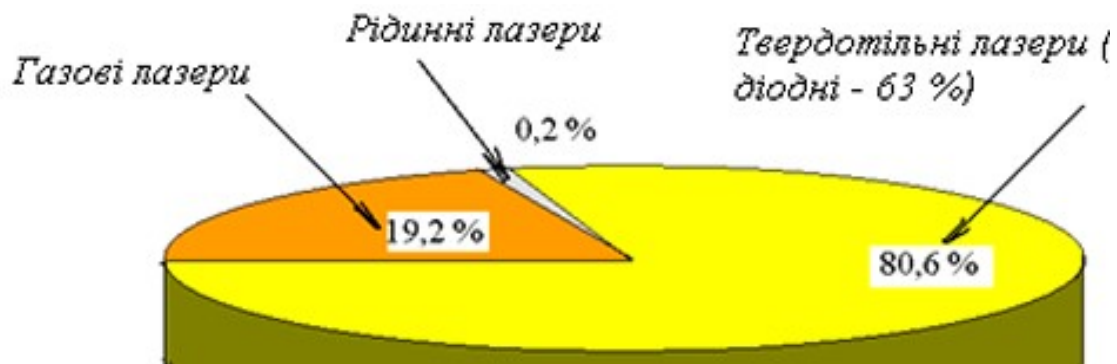


Рисунок 1.3 – Відносна частка типів промислових лазерів

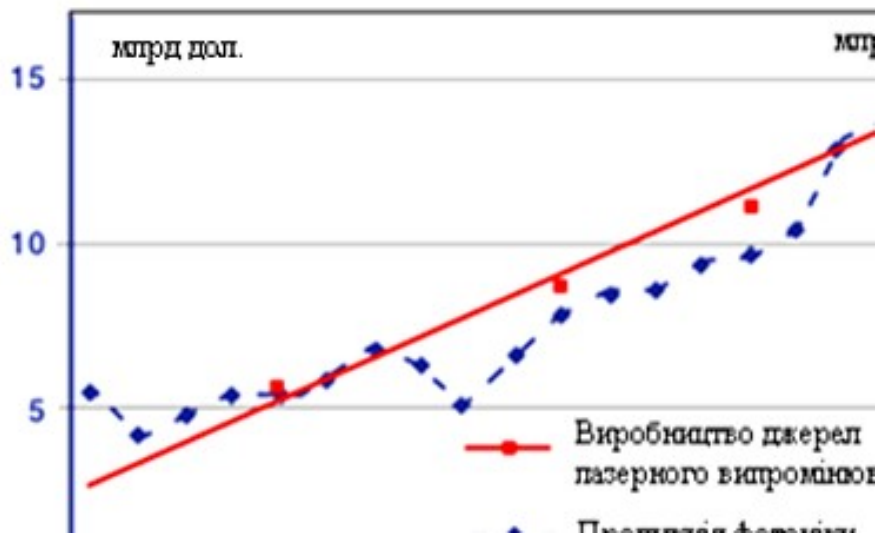


Рисунок 1.4 – Динаміка зміни світового обсягу виробництва пристроїв лазерного випромінювання

Застосування лазерного різання в порівнянні із традиційними методами обробки має ряд переваг, а саме:

- відсутність реального механічного контакту між інструментом та заготовкою;
- високий ступінь локалізації лазерного впливу на матеріал;
- безінерційність при переміщенні ЛП;
- можливість управління показником температури в зоні обробки деталі лазером;
- легка зміна положення ріжучого елемента (лазерного променя) у просторі;
- відсутність зносу інструмента;
- високий ступінь автоматизації лазерного обладнання;
- підвищення якості, надійності, точності обробки.

Сутність обробки висококонцентрованим потоком енергії ЛП полягає у перетворенні енергії джерела в теплову енергію. Ця теплова енергія спричиняє зміни у агрегатному стані або структурно-фазові зміни поверхневого шару виробу.

Аналіз продажів промислових лазерів, який проведений у [16] показав, що найбільший відсоток застосування лазерів належить саме процесу лазерного різання і сягає 41% від продажу лазерів за видами їх використання (рис. 1.5).

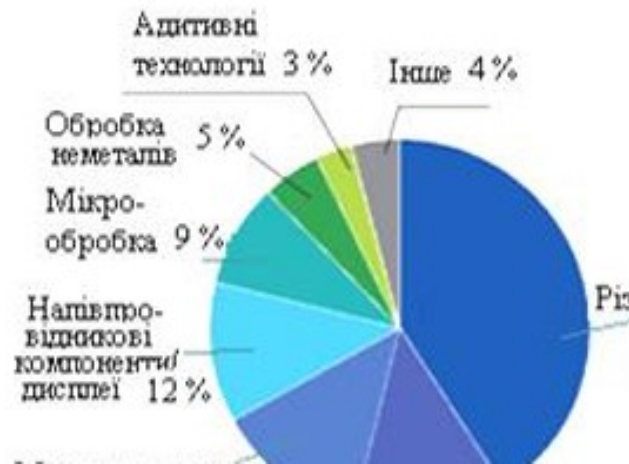


Рисунок 1.5 – Розподіл продажів лазерів за видами їх використання [16]

Відносна оброблюваність матеріалів лазерним випромінюванням – це властивість, яка характеризує рівень складності виконання лазерної обробки (лазерного різання) певного матеріалу. Відносна оброблюваність матеріалів лазером наведена у табл. 1.1. На відміну від механічної обробки, оброблюваність лазерним випромінюванням визначається теплофізичними властивостями матеріалу (теплоємністю, теплоти плавлення, температури плавлення та випаровування), а не механічними властивостями.

Таблиця 1.1 – Відносна оброблюваність матеріалів лазером

Матеріал	Відносна оброблюваність	Температура плавлення, °C
Свинець	35,8	327
Алюміній	4,57	660
Титан	3,5	1671
Хром	1,87	1890
Залізо	1,66	1539

Мідь	1,43	1083
Молібден	1,25	2623
Вольфрам	1	3400

## 1.2 Постановка проблеми

В рамках досліджень було поставлено три основні задачі, а саме:

1. Визначення вимог до лазерного обладнання для різання деталей із матеріалу 08X16H11M3, а також вплив параметрів обробки деталей на якість різальної кромки.

2. Визначення параметрів обробки деталей при лазерному різанні нержавіючої сталі 08X16H11M3, які впливають на шорсткість поверхні ( $R_a$ ), нерівномірність геометрії прорізу ( $t_a$ ), зону термічного впливу ( $ЗТВ$ ).

3. Вимоги до оптимізації кожної шорсткості поверхні деталі та ширини прорізу.

## 1.3 Характеристики матеріалу, що використовується

Нержавіюча сталь широко використовується в будівництві, промисловості та в організації інженерних систем. Для деталей типу фітингів, фланців, нержавіючих труб, тощо – це основна сировина для виготовлення. Нержавіючій сталі характерні якісні техніко-експлуатаційні властивості, яка обумовлюється наявністю на поверхні матеріалу оксидної плівки. Ця плівка утворюється на завершальних етапах виробництва в результаті контакту сплаву з киснем, а основною функцією плівки є саме захист поверхні від корозії.

Під впливом зовнішніх негативних факторів, таких як висока температура, пил, хімічні навантаження, оксидний шар на поверхні нержавіючої сталі може стоншуватись. Саме тому якісна обробка нержавіючої сталі дуже важлива [5].

Нержавіючі сталі за хімічним складом представляють собою сплави на основі заліза, які містять приблизно 12% хрому – кількість хрому, необхідна для запобігання утворення корозії. Зазвичай відсоток вуглецю у нержавіючих сталях

становить менше 0,03%. Існують нержавіючі сталі, які містять 30% хрому та менше 50% заліза. Інші елементи додаються до хімічного складу нержавіючої сталі для покращення характеристик. До таких елементів відносяться молібден, титан, алюміній, мідь, тощо.

Таблиця відповідності сталі 08X16H11M3 її зарубіжним аналогам та стандартам, за якими вона виготовляється, наведені у таблиці 1.2.

Таблиця 1.2 – Зарубіжні аналоги сталі 08X16H11M3

Країна	Маркування	Стандарт
США	316	-
Чехія	17346	CSN
Польща	0H17N12M2T	PN
Швеція	2347	SS
Китай	0Cr17Ni12Mo2	GB
Євросоюз	1.4401X5CrNiMo17-12-2	EN
Японія	SUS316	JIS
Німеччина	X5CrNiMo17-12-2	DIN, WNr

Для проведення дослідження процесу лазерного різання було обрано матеріал 08X16H11M3. Це високолегована жаростійка сталь, хімічний склад якої включає в себе:

- до 0,08% вуглецю (C);
- до 0,6% кремнію (Si);
- 1-1,5% мангану (Mn);
- 8,5-10 нікелю (Ni);
- до 0,02% сірки (S);
- до 0,035% фосфору (P);
- 15,5-17% хрому (Cr);
- 1,5-2 молібдену (Mo).

Густина такої сталі становить  $7900 \text{ кг/м}^3$ , модуль пружності –  $2,14 \cdot 10^5$  МПа при  $20^\circ\text{C}$ , коефіцієнт лінійного розширення коливається від  $17,1 \cdot 10^6$  1/град (при  $100^\circ\text{C}$ ) до  $19,81 \cdot 10^6$  1/град (при  $800^\circ\text{C}$ ).

Механічна обробка нержавіючої сталі пов'язана із рядом складнощів, які, в свою чергу, обумовлені властивостями матеріалу. До цих складнощів відносяться:

- швидкий знос ріжучого інструменту;
- необхідність постійного видалення стружки;
- підвищення щільності матеріалу в ході деформації [5].

#### 1.4 Характеристики деталей, які виготовляються методом лазерного різання

Одним із поширених варіантів застосування нержавіючої сталі є нержавіюче кріплення. Завдяки властивостям матеріалу, таким деталям властиві високі міцнісні характеристики, до яких відносяться:

- стійкість до корозії,
- висока зносостійкість,
- стійкість до температурних перепадів,
- вогнестійкість,
- стійкість до намагнічування та окислення.

Такі якості матеріалу гарантують тривалий експлуатаційний період кріплення.

Нержавіюче кріплення використовуються для зберігання реактивних речовин в хімічній промисловості. Крім того, такі деталі використовуються у з'єднаннях, на які впливає підвищене вібраційне навантаження, тобто використовуються у сферах приладобудування, авіавиробництва та машинобудування.

Частиною такого нержавіючого кріплення є шайби. Шайба – це кріпильна деталь у вигляді кільця різної форми та призначення. Зазвичай підкладається під

гайку або головку гвинта [21]. Як самостійний кріпильний виріб, шайба не застосовується. Основне її призначення - при спільному використанні з болтами, шпильками і гайками - при стягуванні деталей розподіляти навантаження по більшій площі поверхні. Зазвичай, якщо кріпильний елемент (головка болта або гайка) безпосередньо прилягають до сталевій поверхні і отвір деталі, що скріплюється, відповідає нормативному, то шайби, в більшості випадків, не потрібні.

Під час використання круглих або квадратних шайб загального призначення потрібно мати на увазі, що їхня товщина має бути достатньою, щоб запобігти прогину і перенапруженню. Скошені шайби необхідні в місцях, де болти знаходяться не перпендикулярно до опорної поверхні.

В роботі розглядається лазерне різання шайб із нержавіючої сталі, які наведені на рис. 1.6, а характеристики шайб наведені у табл. 1.3-1.6.

Таблиця 1.3 – Характеристики шайби гровера DIN 127B

Індекс	Номінальний діаметр $d_1$ , мм	Зовнішній діаметр $d_2$ , мм	Товщина шайби $s$ , мм
<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>
05	5,4	9,2	1,2

Продовження таблиці 1.3

1	2	3	4
06	6,5	11,8	1,6
08	8,5	14,8	2,0
10	10,7	18,1	2,2
12	12,7	21,1	2,5
14	14,7	24,1	3,0
16	17,0	27,4	3,5
20	21,1	33,6	4,0
24	25,5	40,0	5,0

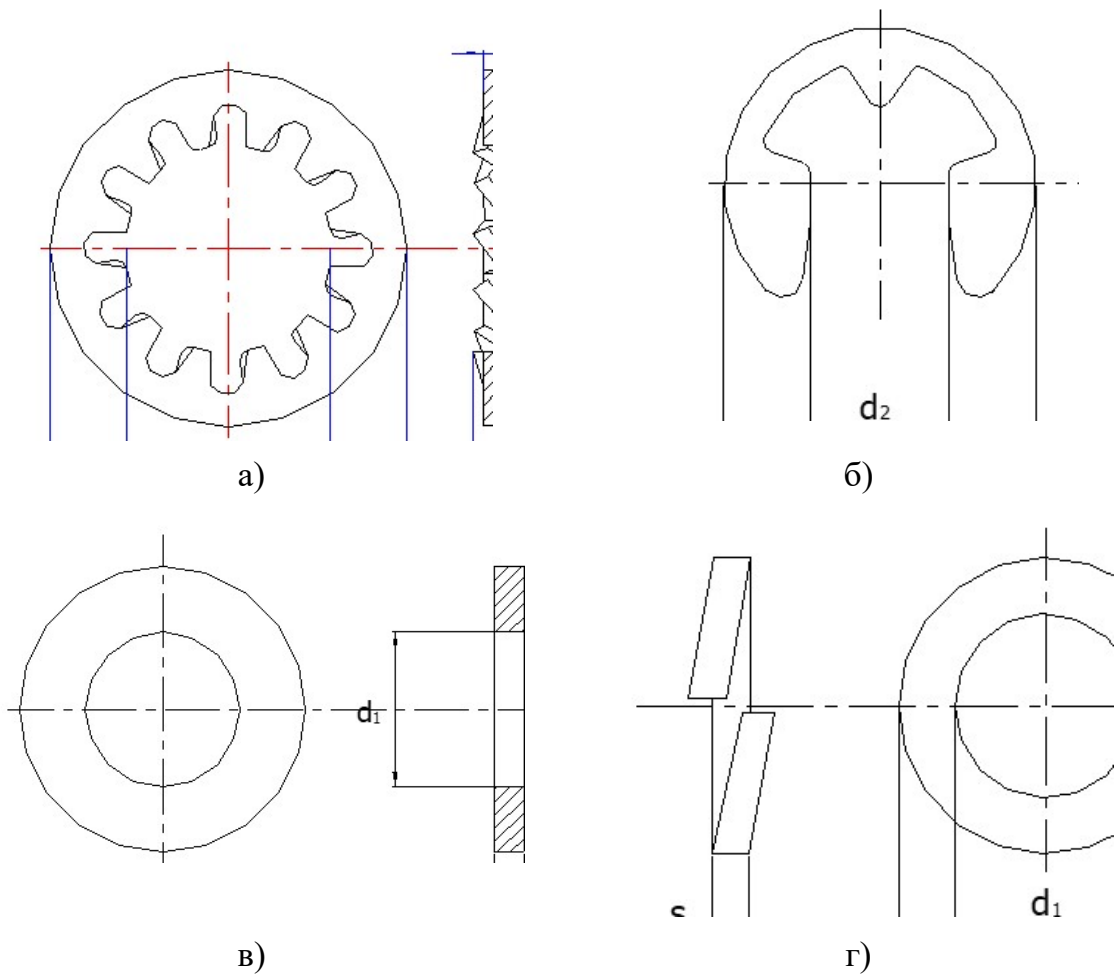


Рисунок 1.6 – Шайби:

а – стопорна DIN 6798 J; б – стопорна DIN 6799;

в – пласка DIN 125B; г – гровер DIN 127B

Таблиця 1.4 – Характеристики шайби стопорної DIN 6798 J

	M3	M4	M5	M6	M8	M10	M12	M14	M16	M18	M20	M22	M24
Номінальний діаметр $d_1$ , мм	3,2	4,3	5,3	6,4	8,4	10,5	13	15	17	19	21	23	25
Зовнішній діаметр $d_2$ , мм	6	8	10	11	15	18	20,5	24	30	30	33	36	38
Товщина шайби $s$ , мм	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,0	1,2	1,4	1,4	1,5	1,5

Таблиця 1.5 – Характеристики шайби стопорної DIN 6799

	M3	M4	M5	M6	M8	M10	M12	M14	M16	M18	M20	M24
Номінальний діаметр $d_1$ , мм	3,2	4,0	5,0	6,0	7,0	8,0	9,0	10	12	15	19	24
Зовнішній діаметр $d_2$ , мм	7,3	9,3	11,3	12,3	14,3	16,3	18,8	20,4	23,4	29,4	37,6	44,6
Товщина шайби $s$ , мм	0,6	0,7	0,7	0,7	0,9	1,0	1,1	1,2	1,3	1,5	1,8	2,0

Таблиця 1.6 – Характеристики шайби пласкої DIN 125B

	M3	M4	M5	M6	M8	M10	M12	M14	M16	M20	M22	M24
Номінальний діаметр $d_1$ , мм	3,2	4,3	5,3	6,4	8,4	13	15	17	19	21	23	25
Зовнішній діаметр $d_2$ , мм	7	9	10	12	16	24	28	30	34	37	39	44
Товщина шайби $s$ , мм	0,5	0,8	1,0	1,6	1,6	2,5	2,5	3,0	3,0	3,0	3,0	4,0

### 1.5 Обладнання лазерного різання

В якості досліджуваного верстату було обрано верстат виробництва HGTech, серії HG Smart, модель Smart 3015 (рис. 1.7). Як відзначає виробник, серія Smart представляє собою найбільш економічно ефективно обладнання для виконання лазерного різання для різання міді, заліза, латуні, сплавів, титану, алюмінію та інших матеріалів [4].

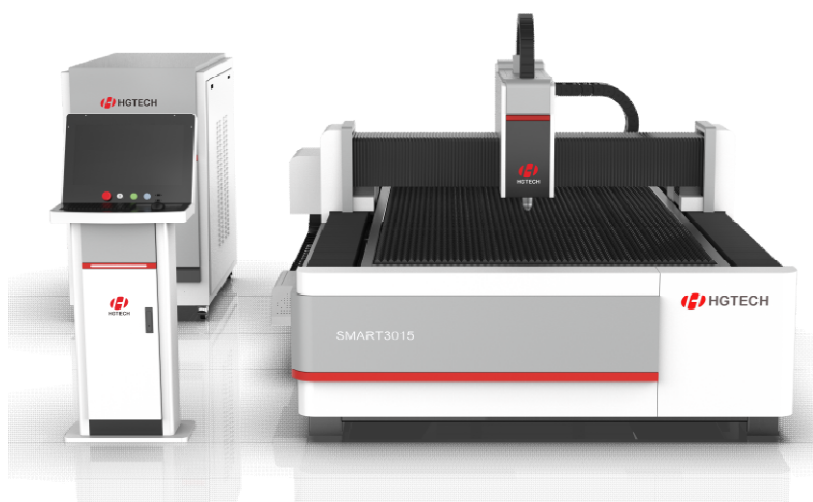


Рисунок 1.7 – Верстат лазерного різання Smart 3015

Потужність лазерного променя у цьому верстаті лежить в межах від 1000 до 6000 Вт. Джерелом лазерного випромінювання у верстаті слугує лазер Fiber, а головка для лазерного різання – WSX NC30A F125мм. Лазерна головка має функцію автоматичного фокусування.

Площа різання у верстаті становить 3000 мм в довжину і 1500 мм в ширину, звідки і формується маркування 3015. В цій серії також існують модель 4015, 6015 та 8015. Перші дві цифри відповідають за розмір різання по довжині, а останні дві – за ширину. Загальні габарити верстату мають розмір 4550 мм в довжину, 2280 мм в ширину і 2100 мм в висоту.

Точність позиціонування верстату по осям Y та X складає 0,02 мм, а при репозиціонуванні – 0,03 мм. Джерело живлення такого верстату повинно мати наступні характеристики:

- реактивна потужність 35 кВА;
- частота мережі 50/60 Гц;
- живлення 380 В.

Вартість такого верстату в Україні становить 50 550 у.о. (приблизно 1,88 млн. грн.). Технічні характеристики верстату наведені в табл. 1.7.

Таблиця 1.7 – Технічні характеристики верстату Smart 3015 [4]

Характеристика	Значення
Хід по осі Z	120 мм
Хід по осі Y	1530 мм
Хід по осі X	3050 мм
Максимальна швидкість позиціонування	100 м/хв
Максимальна вантажопідйомність	1000 кг
Прискорення	1,2 G

До робочого середовища, в якому працює лазер, висувається ряд вимог, які наведені в табл. 1.8.

Таблиця 1.8 – Вимоги до робочого середовища [4]

Система	Назва	Характеристик и	Примітка
1	2	3	4
Навколишнє середовище	Вологість	Менше 70%	
	Температура	5-40°C	Рекомендується встановлювати кондиціонер у приміщенні із лазером
Захисний газ	Азот	Більше 99,996%	Для захисту лазерної головки
Подача газу	Газ для різання	Кисень більше 99,95%	Залежно від матеріалу, що обробляється
		Азот більше 99,95%	
Подача води	Вода для охолодження	Деіонізована вода	Також допускається використання дистильованої води
Матеріал, що ріжуть	Лист металу	Не піддається корозії	
Джерело живлення	Охолоджувач	6 кВА	1. Нормальний рівень енергоспоживання в середньому становить приблизно 27 кВА 2. Загальна потужність менше 54 кВА
	Заземлення	Менше 4 Ом	
	Стабільність живлення	Менше 2,5%	
	Джерело лазерного випромінювання	13 кВА	
	Інші прилади	21 кВА	
	Станина верстату	14 кВА	

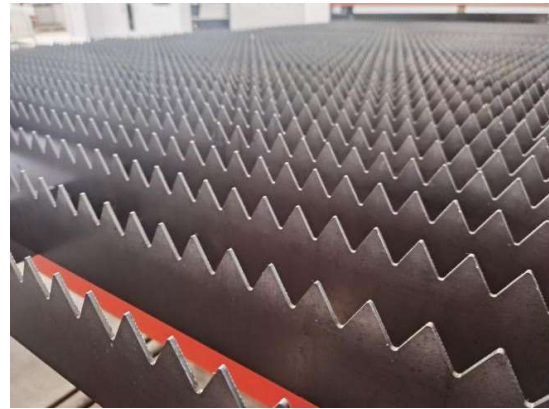
Ключові функції верстату Smart 3015 наступні:

1. Рух лазерної головки має стрибковий характер, завдяки чому зменшується час руху лазерної головки.
2. Використовується високочутлива система дотримання висоти положення лазерної головки, завдяки чому сопло не торкається матеріалу в процесі виконання високошвидкісного різання.
3. Завдяки автоматичному регулюванню потужності лазера в процесі різання гарантується якісна обробка.
4. У верстаті доступне налаштування регулювання потужності лазера при обробці отворів для покращення поверхні отворів.
5. Функція «повернення різання». Під цією функцією виробник розуміє можливість повернення лазера у необхідне положення для виконання процесу повторного різання у випадках неякісного різання при першому проході.
6. Можливість виконання різання в довільному положенні.
7. Можливість виконання паузи в процесі обробки та продовження із відповідного місця після вимкнення паузи.
8. Можливість виконання не тільки лазерного різання, але й лазерного гравірування матеріалу. Тобто верстат можна використовувати також і для нанесення маркування на деталі.
9. На панелі управління в режимі реального часу відображається траєкторія руху лазера.
10. Завдяки удосконаленому клапану високого тиску відбувається автоматичний контроль тиску повітря, кисню та азоту.
11. Для збереження даних з обробки використовується база даних HGTech, яка поставляється разом із верстатом.

Верстат для лазерного різання Smart 3015 має посилений корпус (рис. 1.8, а), основа якого представляє собою інтегровану конструкцію, виготовлену із міцних високоякісних матеріалів. З метою зменшення вібрацій у верстаті та запобігання його впливу на процес різання, у конструкції верстату передбачена зубчаста пластина (рис. 1.8, б).



а)



б)



в)



г)



д)



е)

Рисунок 1.8 – Конструктивні елементи верстату Smart 3015:

а – корпус; б – зубчаста пластина; в – система відсмоктування диму;  
г – лазерна головка; д – серводвигун; е – модуль змащувально-охолоджуючої рідини

У верстаті передбачена вбудована система відсмоктування диму та фільтрації повітря (рис. 1.8, в), робота якої автоматично регулюється в процесі різання. Ввімкнення витяжної системи базується на траєкторії руху інструменту да відповідає положенню лазерної головки (рис. 1.8, г).

Внутрішня структура лазерної головки повністю герметична, завдяки чому мінімізується можливість забруднення оптичної лінзи. Регулювання лазерної головки здійснюється за допомогою вирівнювання по двом точкам, при чому механізм автоматичного фокусування приводиться в дію серводвигуном (рис. 1.8, д). За подачу змащувально-охолоджуючої рідини (ЗОР) відповідає автоматична система змащення (рис. 1.8, е).

## 2 МЕТОДОЛОГІЯ ПРОВЕДЕННЯ ДОСЛІДЖЕННЯ

### 2.1 Метод Тагучі або метод ортогональних масивів

Метод Тагучі – це статистичні методи, метою яких є поліпшення якості виготовлених деталей. Має іншу назву – метод ортогональних масивів. Ці методи набули широкого поширення для поліпшення якості виготовлених деталей в техніці та біотехнології [3].

За методом Тагучі пропонується системний та достатньо простий підхід до оптимізації продуктивності на виробництві. Основою метою застосування цього методу є підвищення якості продукції, незалежно від сфери її застосування, або ж мінімізації варіацій продуктивності та процесів досягнення цільових показників ефективності.

У методі Тагучі, або методі ортогональних масивів (МОМ) використовується ряд змінних, а саме:

- контрольні змінні (позначаються  $X$ ) – це змінні, які при виготовленні деталі можна контролювати;

- змінні шуму (позначаються  $Z$ ) – це змінні, які неможливо або занадто складно контролювати при виробництві деталі. Такі шумові змінні можуть викликати зміну змінних відгуку  $Y$  та призвести до втрати якості виготовленої продукції;

- змінні відгуку (позначаються  $Y$ ) – представляють собою характеристики продуктивності та функції керування.

За методом Тагучі (МОМ) проводиться оцінка середньої продуктивності шляхом перетинання двох масивів: зовнішнього масиву, який створений для змінних шуму та внутрішнього масиву, який створений на основі контрольних змінних.

На рис. 2.1 показано дизайн внутрішнього і зовнішнього масиву. Значення відгуку генеруються для кожного рядка внутрішнього масиву. Наприклад, рядок під номером 1 внутрішнього масиву, у якого зовнішній стовпчик 1, дає значення

відгуку  $y_{11}$ , а такий же внутрішній рядок із зовнішнім стовпчиком 2 дає значення відгуку  $y_{12}$ .

Масив змінних шуму

				·										
				$Z_2$										
				$Z_1$										
		$x_1$	$x_2$	$x_3$	·	1	2	3	4	·				
Масив контрольних змінних	1	+	+	+	·	$Y_{11}$	$Y_{12}$	$Y_{13}$	·	·	$\mu_{y1}$	$\sigma_{y1}$	$S/N_{y1}$	$L_{y1}$
	2	-	+	+	·	$Y_{21}$	$Y_{22}$	$Y_{23}$	·	·	$\mu_{y2}$	$\sigma_{y2}$	$S/N_{y2}$	$L_{y2}$
	3	+	-	+	·	$Y_{31}$	$Y_{32}$	$Y_{33}$	·	·	$\mu_{y3}$	$\sigma_{y3}$	$S/N_{y3}$	$L_{y3}$
	4	-	-	+	·	$Y_{41}$	$Y_{42}$	$Y_{43}$	·	·	$\mu_{y4}$	$\sigma_{y4}$	$S/N_{y4}$	$L_{y4}$
	·	·	·	·	·	·	·	·	·	·	·	·	·	·
	·	·	·	·	·	·	·	·	·	·	·	·	·	·
	·	·	·	·	·	·	·	·	·	·	·	·	·	·
	·	·	·	·	·	·	·	·	·	·	·	·	·	·

Рисунок 2.1 – Принцип побудови ортогонального масиву

Маючи дисперсію та середнє значення кожного внутрішнього рядка ортогонального масиву, можна провести порівняння експериментів та визначити набір налаштувань керування, який найбільш оптимально буде сягати середнього значення та мінімальної варіації.

У МОМ використовується втрата якості, яка вимірюється відповідною функцією, та співвідношення сигнал-шум. Після цього проводиться поєднання ефектів варіації продуктивності та середньої продуктивності. Співвідношення сигнал/шум залежить від кожного окремого відгуку, який досліджується. Функція втрат в основному застосовується для вимірювання втрати якості, яка може бути пов'язана із відхиленням від цільового значення продуктивності (рис. 2.2) [3].

В узагальненому процедура застосування методу ортогональних масивів наведена на рис. 2.3.

Функція втрат за МОМ має вигляд:

$$L(y) = k \cdot (y - T)^2, \tag{2.1}$$

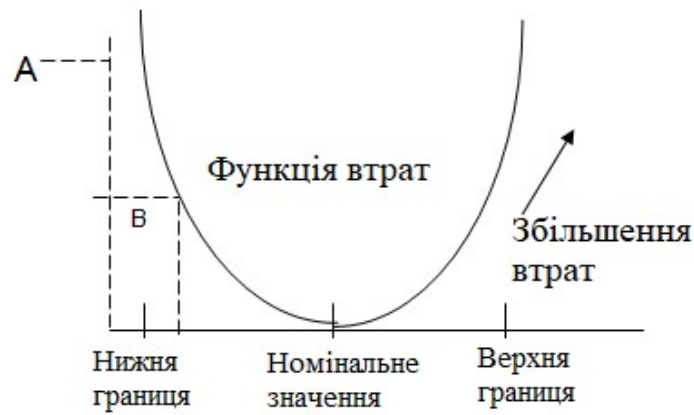


Рисунок 2.2 – Функція втрат якості виготовлених деталей

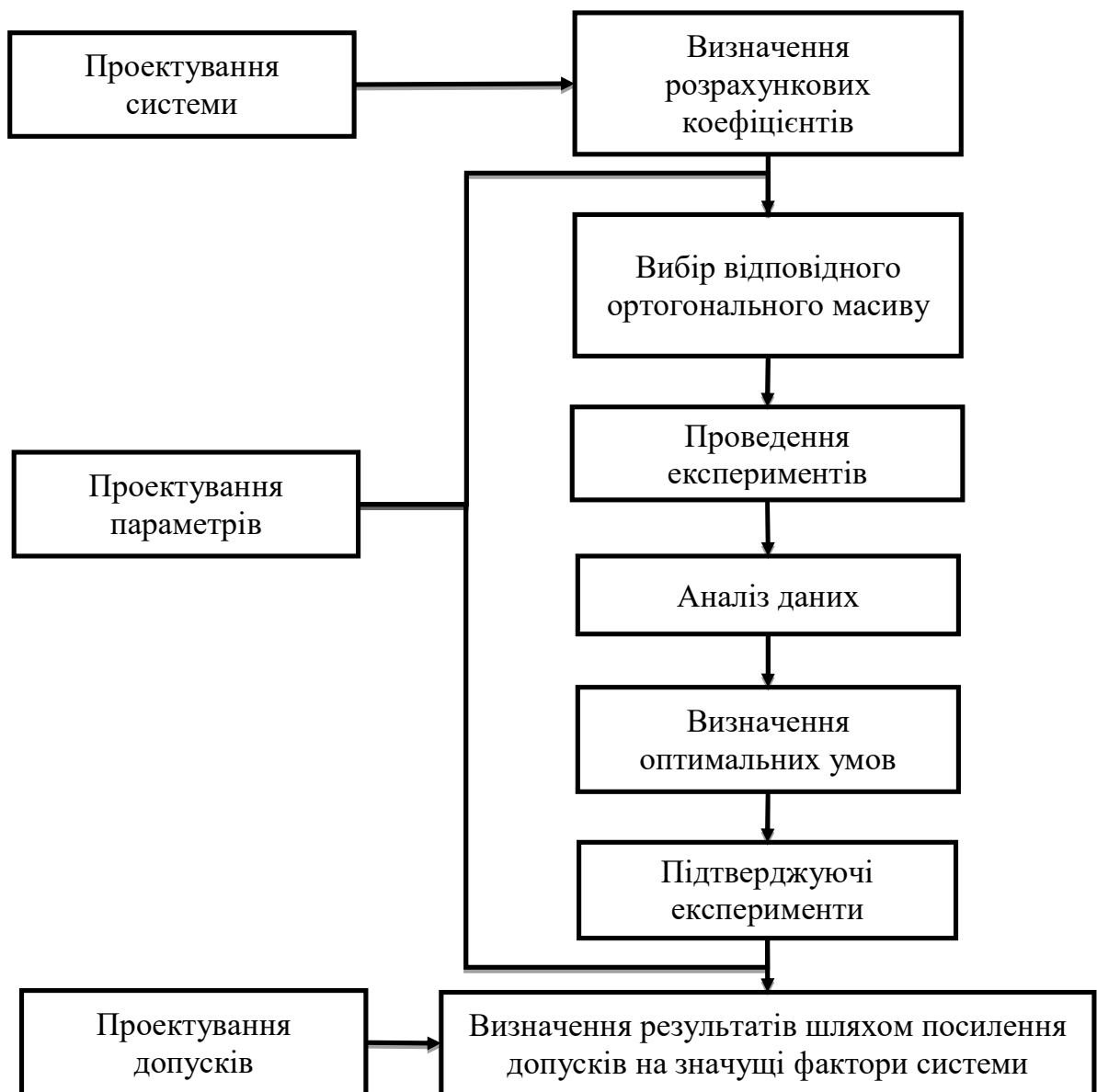


Рисунок 2.3 – Етапи дослідження за методом ортогональних масивів

де  $L(y)$  – значення функції втрат;

$y$  – показник якості, який вимірюється;

$k$  – коефіцієнт масштабу;

$T$  – номінальне значення показника якості.

За MOM значення усереднених показників розраховується за формулою 2.2, середньоквадратичне відхилення – за формулою 2.3, а реакції відгуку – за формулою 2.4.

$$L(y) = \log\left(\frac{\sum y^2}{n}\right), \quad (2.2)$$

$$L(y) = \log\left(\frac{\sum \frac{1}{y^2}}{n}\right), \quad (2.3)$$

$$L(y) = \log\left(\frac{y^2}{s^2 y}\right), \quad (2.4)$$

де  $n$  – кількість проведених досліджень;

$y$  – результати відповідних змінних (шорсткості, ЗТВ або ширини прорізу);

$s^2 y$  – дисперсія показника  $y$ .

## 2.2 Представлення результатів у вигляді поверхні відгуку

RSM (Response Surface Methodology) метод або методологія поверхні відгуку – це сукупність статистичних та математичних методів для побудови емпіричних моделей. Метою застосування даного методу є оптимізація відгуку системи, для якої проводиться експеримент. На відгук впливає ряд незалежних змінних. Експеримент в цьому методі називається прогоном та представляє собою серію тестів, в яких у входні змінні вносяться зміни для виявлення причин змін у вихідній реакції [2].

Метою застосування RSM методу у роботі є зменшення варіабельності якості процесу лазерного різання та виготовлених деталей. За цим методом

відбувається побудова графіків, приклад якого наведено на рис. 2.4. Основна увага в цьому методі приділяється наступним характеристикам:

- проектування процесів, які були б стійкі до зміни їх компонентів;
- мінімізація варіабельності вихідної реакції цільової деталі;
- проектування деталей та процесів, які були б стійкими до умов навколишнього середовища, тобто вони не є чутливими до факторів, які важко піддаються контролю.

В рамках дослідження процесів лазерного різання з метою їх оптимізації такий метод може бути використаний для:

- пошуку факторів, які надають найкращий відгук;
- пошуку факторів та їх значень, які задовольняють технологічні та експлуатаційні характеристики деталей;
- моделювання взаємозв'язку між кількісними параметрами та реакцією системи за RSM методом.

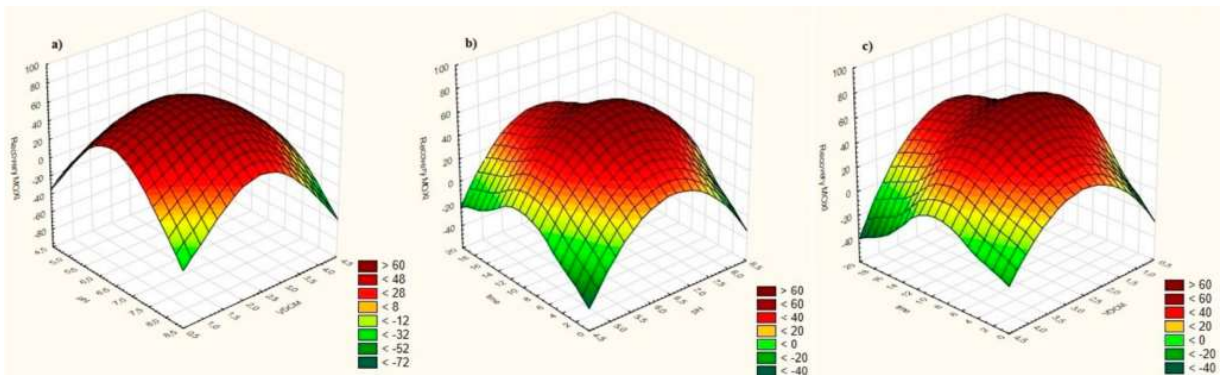


Рисунок 2.4 – Приклад графіків, побудованих за RSM-методом

### 2.3 Планування експерименту

Для отримання експериментальних результатів використовувався верстат Smart 3015 на Sheremeta Studio 3D, м. Хмельницький. Дослідження проводились для процесу лазерного різання деталей із товстолистового металу. Параметрами досліджень за методом ортогональних масивів були обрані зона термічного впливу (ЗТВ), середня шорсткість поверхні ( $R_a$ ) та глибина прорізу ( $t_a$ ).

В якості контрольних змін за MOM було обрані:

- швидкість різання, см/хв;
- потужність лазера, Вт;
- тиск газу, МПа;
- частота лазера, Гц.

Наведені фактори за MOM будуть використовуватись на трьох рівнях. У табл. 2.1 наведені досліджувані фактори та рівень, який був їм присвоєний. У якості ортогонального масиву було обрано масив типу L27. Цьому масиву характерна наявність 27 рядків, які відповідають кількості проведених експериментів (27 разів). В ортогональному масиві на трьох рівнях розміщуються стовпчики із 13 рядками, яка показана в табл. А.1. В табл. А.2 наведено контрольні зміни для проведення експериментальних досліджень.

Таблиця 2.1 – Присвоєння рівнів за MOM відповідним контрольним змінним

Змінні	Рівні		
	1	2	3
Швидкість різання, см/хв	40	20	10
Частота, Гц	125	75	25
Тиск, МПа	1,5	1	0,5
Потужність лазера, Вт	2000	1500	1000

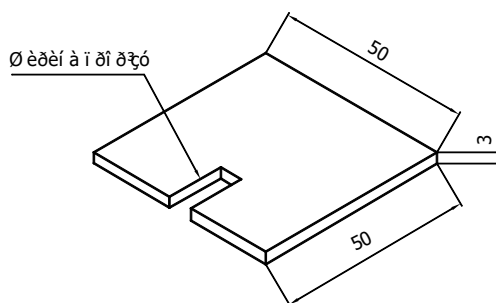
## 3 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИЙ РОЗДІЛ

### 3.1 Кількісні характеристики лазерного різання

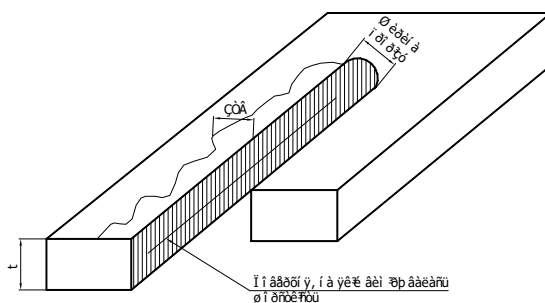
В якості кількісних характеристик лазерного різання виступали:

- шорсткість поверхні ( $R_a$ );
- ширина прорізу ( $t_a$ );
- зона термічного впливу.

Експериментальні дослідження проводились на пластинках, виготовлених із матеріалу 08Х16Н11М3, ширина і довжина яких становили 50 мм, а товщина – 3 мм (рис. 3.1, а). У пластинках лазером робився розріз, в якому після проведення прорізу вимірювалась ширина прорізу, шорсткість на поверхні прорізу та ЗТВ (рис. 3.1, б).



а)



б)

Рисунок 3.1 – Зразок для проведення дослідження:  
а – розміри зразка; б – вимірювання елементів прорізу

Ширина прорізу (рис. 3.1, б) представляє собою відстань, яка розділяє дві поверхні та є характеристикою кількості матеріалу, який видаляється в процесі виконання лазерного різання. Ширина прорізу залежить від потужності лазера та розміру плями фокусування лазерного випромінювання, а також частково залежать від швидкості різання.

У випадку використання кисню в процесі лазерного різання нержавіючої сталі, на ширину прорізу також впливає тиск подачі газу. Така динамічна природна пояснюється нестабільністю протікання екзотермічної реакції окислення поверхні нержавіючої сталі і призводить до нерівномірності глибини прорізу (або канавки, у випадку різання заготовок більшої товщини) та ширини прорізу. Для створення відносно рівномірної ширини прорізу в процесі лазерного різання (ЛР) рекомендується використовувати середовище інертних газів.

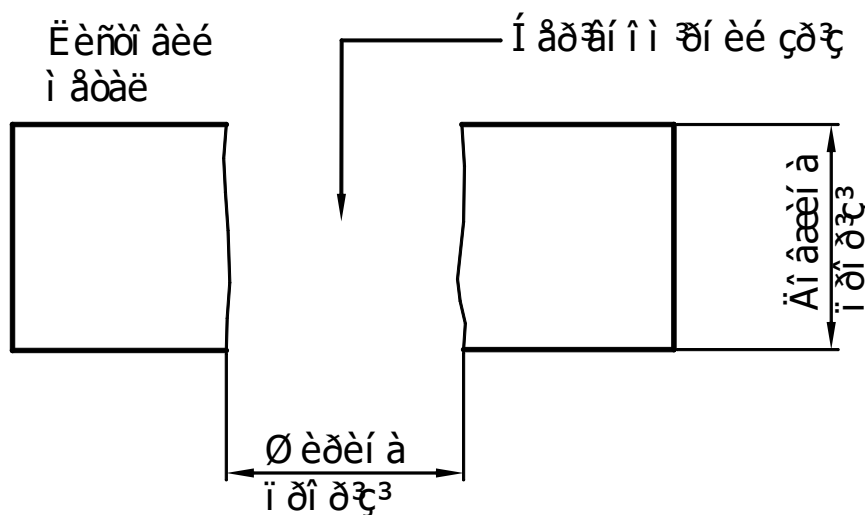


Рисунок 3.2 – Схематичне зображення прорізу, який утворюється в процесі лазерного різання

Після проведення експериментальних досліджень ширину прорізу ( $t_a$ ) вимірювалась штангенциркулем. У табл. 3.1 наведено значення нижньої та верхньої кромки при довжині прорізу 15 мм.

Таблиця 3.1 – Значення нижньої та верхньої кромок при довжині прорізу 15 мм

Прогін	Середня конусність, $K$ град.	1 рівень	Низ	Верх	2 рівень	Низ	Верх	3 рівень	Низ	Верх
<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>	<i>5</i>	<i>6</i>	<i>7</i>	<i>8</i>	<i>9</i>	<i>10</i>	<i>11</i>
1	1,46	1,33	0,35	0,49	1,45	0,33	0,48	1,6	0,32	0,49
2	1,35	1,2	0,33	0,45	1,55	0,26	0,43	1,3	0,32	0,46
3	1,49	1,23	0,26	0,39	1,75	0,21	0,4	1,5	0,31	0,47
4	0,8	0,74	0,41	0,49	0,68	0,42	0,49	0,98	0,38	0,49
5	0,84	0,89	0,3	0,39	0,87	0,3	0,39	0,77	0,28	0,36
6	0,9	0,95	0,31	0,41	0,89	0,31	0,41	0,88	0,38	0,47
7	0,74	0,87	0,36	0,45	0,71	0,21	0,45	0,66	0,39	0,46
8	0,74	0,73	0,3	0,37	0,88	0,37	0,3	0,62	0,3	0,36
9	0,7	0,65	0,37	0,43	0,59	0,23	0,43	0,87	0,32	0,41
10	0,77	0,88	0,3	0,39	0,78	0,33	0,32	0,67	0,18	0,25
11	0,76	0,86	0,33	0,42	0,66	0,28	0,4	0,77	0,3	0,38
12	0,85	0,94	0,31	0,41	0,75	0,33	0,36	0,88	0,16	0,25
13	0,54	0,66	0,29	0,36	0,57	0,19	0,25	0,41	0,18	0,23
14	0,55	0,54	0,39	0,45	0,65	0,28	0,35	0,46	0,32	0,37
15	0,55	0,67	0,27	0,34	0,45	0,31	0,36	0,55	0,26	0,32
16	0,48	0,45	0,28	0,33	0,41	0,17	0,21	0,59	0,21	0,28
17	0,4	0,39	0,39	0,43	0,45	0,24	0,29	0,38	0,24	0,28
18	0,45	0,98	0,33	0,37	0,42	0,18	0,23	0,57	0,28	0,34
19	0,32	0,36	0,33	0,36	0,31	0,16	0,2	0,29	0,18	0,22
20	0,41	0,51	0,33	0,38	0,32	0,33	0,37	0,41	0,33	0,37
21	0,21	0,22	0,18	0,21	0,19	0,34	0,36	0,23	0,18	0,21
22	0,3	0,32	0,19	0,23	0,31	0,2	0,23	0,27	0,2	0,23
23	0,34	0,41	0,21	0,25	0,34	0,28	0,32	0,27	0,33	0,36

Продовження таблиці 3.1

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
24	0,22	0,27	0,22	0,25	0,22	0,25	0,27	0,18	0,18	0,2
25	0,26	0,33	0,14	0,18	0,22	0,21	0,24	0,25	0,21	0,24
26	0,23	0,19	0,15	0,17	0,3	0,18	0,21	0,22	0,23	0,25
27	0,32	0,35	0,14	0,18	0,33	0,18	0,21	0,28	0,27	0,3

Конусність прорізу розраховувалась за формулою:

$$K = \frac{(a_{\text{верх}} - a_{\text{низ}}) \cdot 180}{t_{\text{листа}} \cdot 2\pi}, \quad (3.1)$$

де  $t_{\text{листа}}$  – товщина листа, мм;

$a_{\text{верх}}$  – ширина верхньої частини прорізу, мм;

$a_{\text{низ}}$  – ширина нижньої частини прорізу, мм;

$K$  – конусність, град.

Для вимірювання шорсткості поверхні використовувався тестер Walcom SRT-6210 (рис. 3.3), вартість якого в Україні складає 43 тис. грн. [19]. Цей тестер призначений для вимірювання шорсткості поверхонь за допомогою виносного датчика, що робить його зручним для вимірювання шорсткості на поверхнях виробів складної геометричної форми.

При проведенні вимірювань шорсткості на поверхні, що обробляється, розміщується датчик тестера, який потім ковзає вздовж однорідним чином. Такий рух приводить в дію внутрішній механізм. Датчик отримує покази шорсткості за допомогою вбудованого гострого зонду. Нерівності поверхні викликають зміщення зонду, в результаті чого змінюється індуктивність сенсору і, в подальшому, генерується аналоговий сигнал. За вивід результатів вимірювання шорсткості на дисплей приладу відповідає цифровий блок, який конвертує отриманий сигнал.

До особливостей тестера Walcom SRT-6210 можна віднести [19]:

- автоматичне або ручне вмикання;
- використання USB виходу для під'єднання до ЕОМ;
- простий у використанні, легкий у вазі та маленький за розміром;
- сумісний із чотирма стандартами: JIS, ANSI, DIN, ISO;
- має вбудований акумулятор;
- має функцію вводу-виводу через Bluetooth;
- містить точний індуктивний датчик.



Рисунок 3.3 – Тестер Walcom SRT-6210

Для оцінки шорсткості поверхні використовувалось середнє значення (рис. 3.4). Зона термічного впливу (рис. 3.5) після виконання прорізу вимірювалась штангенциркулем.

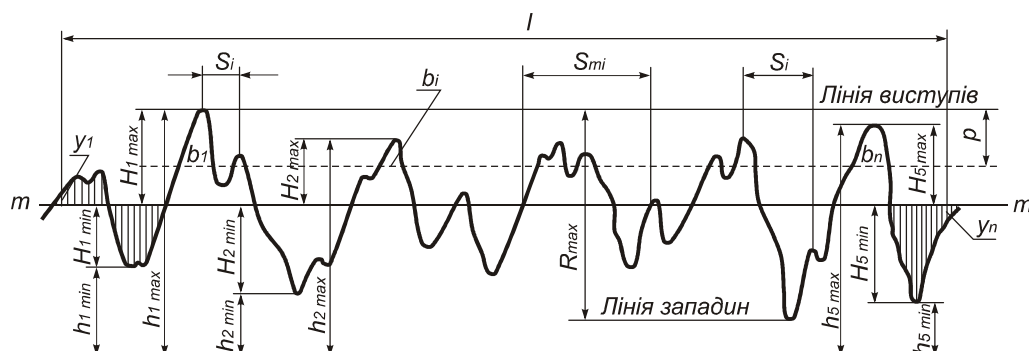


Рисунок 3.4 – Визначення середньої шорсткості поверхні

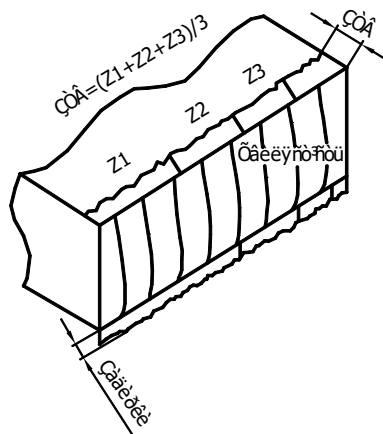


Рисунок 3.5 – Вимірювання зони термічного впливу

### 3.2 Обробка результатів експериментальних досліджень

При проведенні експериментальних досліджень змінювались значення змінних, які були за MOM визначені як контрольні змінні, а саме:

- швидкість різання;
- частота;
- тиск газу;
- потужність лазера.

Змінними відгуку за MOM є:

- зона термічного впливу;
- шорсткість поверхні прорізу;
- ширина прорізу.

За методом ортогональних масивів аналіз даних проводиться за середньоквадратичним відхиленням отриманих показників. В подальшому змінні, які мають вплив на процес лазерного різання використовуються для оптимізації ЛР.

Значення показників, які виступають за методом ортогональних масивів змінними відгуку, наведені у табл. А.3-А.5.

На основі отриманих експериментальних даних за MOM було побудовано відповідні ортогональні масиви, які наведені в табл. А.6-А.8. У табл. А.6 наведено ортогональний масив на 27 рядків ті реакції відгуку. Змінними виступають швидкість різання (X1), частота (X2), тиск газу (X3) та потужність лазера (X4). Також досліджується три взаємодії – X1 та X4, X3 та X1, X1 та X2.

Аналогічним чином було отримано значення усереднених показників за MOM (табл. А.7) та стандартне відхилення показників (табл. А.8).

За MOM після отримання даних, які наведені у табл. А.6-А.8, необхідно провести дослідження параметрів процесу лазерного різання які мають суттєвий вплив на вихідні параметри (конусність прорізу, середня шорсткість та ЗТВ). Для цього проводиться дисперсійний аналіз.

У таблицях 3.2-3.4 наведено результати дисперсійного аналізу за методом ортогональних масивів.

На першому етапі дисперсійного аналізу розраховується *варіативне співвідношення* (S/N) якісних характеристик процесу лазерного різання. Наприклад, фактор, який має вплив на зміну характеристики лазерного різання - це X1 на першому рівні (тобто елемент ортогонального масиву X11). Тоді в ортогональному масиві сумуються всі значення характеристики, які були отримані при значенні фактору  $X1 = 1$ .

Далі проводиться розрахунок *ступеня свободи* (позначається DOF). Наприклад, фактор X1 має три рівні і два ступеня свободи. Кожен фактор має на один ступінь свободи менше, ніж кількість його рівнів. Загальна DOF системи рівна  $n-1$  кількості проведених експериментальних досліджень.

Розрахунок *загальної суми квадратів* (SS) проводиться за формулою [3]:

$$SS = (\sum y_n) - \frac{T^2}{n}, \quad (3.1)$$

де  $n$  – кількість випробувань;

$T$  – сумарне значення варіативного співвідношення;

$y_n$  – значення змінної відгуку при експерименті  $n$ .

Таблиця 3.2 – Дисперсійний аналіз конусності

Параметр різання	Варіативне співвідношення			<i>P</i>	<i>SS</i>	<i>VV</i>	<i>F</i>	<i>DOF</i>
	1	2	3					
X1 Швидкість різання	55,5	46,2	39,1					2
X2 Частота	53,8	43,7	43,4					2
X3 Тиск газу	26,9	51,9	62,1	11,61	72,7	36,39	10,88	2
X4 Потужність лазеру	2,45	41,5	96,9	79,86	500,9	250,4	74,88	2
X1X2	46,0	45,6	49,3				0,89	4
X1X3	47,0	43,0	50,9				4,1	4
X1X4	45,9	42,7	52,3				5,2	4
Похибка				8,53		3,34	53,5	16
Всього				100			627,2	26

Врахування впливу різних факторів (на прикладі фактору X1) при розрахунку суми квадратів виконується за формулою:

$$SS(X1) = \frac{x_{13}^2}{9} + \frac{x_{12}^2}{9} + \frac{x_{11}^2}{9} - \frac{T^2}{n}. \quad (3.2)$$

Врахування похибки при розрахунку суми квадратів розраховується за формулою:

$$SS(\varepsilon) = SS - SS(X1). \quad (3.3)$$

Таблиця 3.3 – Дисперсійний аналіз шорсткості

Параметр різання	Варіативне співвідношення			<i>P</i>	<i>SS</i>	<i>VV</i>	<i>F</i>	<i>DOF</i>
	1	2	3					
X1 Швидкість різання	57,5	53,3	56,2		1,02			2
X2 Частота	53,9	57,9	55,2		0,92			2
X3 Тиск газу	62,3	55,3	49,3	10,39	9,3	4,67	14,23	2
X4 Потужність лазера	74,5	54,8	37,7	83,76	75,3	37,65	114,7	2
X1X2	57,9	56,5	52,6		1,6			4
X1X3	55,1	55,5	56,5		0,1			4
X1X4	55,3	55,2	56,4		0,09			4
Похибка				5,85	5,25	0,32		16
Всього				100	89,9			26

Розрахунок середнього квадрата, який позначається *V* виконується за формулою:

$$VV = SS(X1) - DOF(X1). \quad (3.4)$$

Розрахунок значення *F* виконується за формулою [3]:

$$F = \frac{L_{\text{сер.кв.}}}{SS(\varepsilon)}. \quad (3.5)$$

де  $L_{\text{сер.кв.}}$  – середньоквадратичне значення, яке розраховується за формулою 2.3.

Таблиця 3.4 – Дисперсійний аналіз зони термічного впливу

Параметр різання	Варіативне співвідношення			$P$	$SS$	$VV$	$F$	$DOF$
	1	2	3					
X1 Швидкість різання	2,3	2,3	2,7		0,015			2
X2 Частота	2,3	2,5	2,5		0,004			2
X3 Тиск газу	2,9	2,5	1,9	9,64	0,059	0,03		2
X4 Потужність лазеру	4,2	2,0	1,2	85,59	0,53	0,26		2
X1X2	2,5	2,4	2,4		0,0018			4
X1X3	2,4	2,5	2,4		0,0003			4
X1X4	2,4	2,4	2,5		0,00026			4
Похибка				4,77	0,0296	0,0019		16
Всього				100	0,6196			26

Відсоток внеску певного параметру рівня на його вплив на змінні відгуку розраховується наступним чином:

$$P(X1) = \frac{SS(X1)}{SS} \cdot 100\%. \quad (3.6)$$

Як видно з табл. 3.2-3.4 в процесі лазерного різання найбільший вплив на характеристики шорсткості, конусність прорізу та ЗТВ має параметр X4, який

відповідає потужності лазеру. Параметр X4 має 80-90% впливу. Близько 10% впливу має параметр X3, який відповідає тиску газу при виконанні лазерного різання нержавіючої сталі.

## 4 ОПТИМІЗАЦІЯ ПАРАМЕТРІВ ЛАЗЕРНОГО РІЗАННЯ МЕТОДОМ ОРТОГОНАЛЬНИХ МАСИВІВ

### 4.1 Перевірка експериментальних результатів

Завершальним етапом в підборі оптимальних параметрів лазерного різання за MOM є перевірка якісних характеристик. Розрахунковий оптимальний рівень параметрів, які мають вплив на процес лазерного різання за MOM, розраховується за формулою [3]:

$$Y_{\text{прогн.}} = Y_{\text{сер.}} + \sum Y_n - Y_{\text{сер.}}, \quad (4.1)$$

де  $Y_{\text{сер.}}$  – це загальний середній відгук;

$Y_n$  – це середній відгук для параметрів, які мають вплив на якісні характеристики.

Порівняння фактичних і прогнозованих значень середньої шорсткості поверхні, ЗТВ та конусності прорізу наведені у табл. 4.1 та 4.2. Як видно з табл. 4.1 та 4.2, спостерігається високий рівень збіжності між зазначеними параметрами, що свідчить про підтвердження експериментальних результатів.

Таблиця 4.1 – Фактичні та прогнозовані значення середньої шорсткості та конусності прорізу за двома параметрами

		Прогнозоване значення	Фактичне значення
	1	2	3
ЗТВ	Оптимальний рівень за MOM	X23, X13	X23, X13
	Значення	1386,9	1387,2

Продовження таблиці 4.1

	1	2	3
Шорсткість	Оптимальний рівень за MOM	X11	X11
	Значення	133,5	126,7
Конусність прорізу	Оптимальний рівень за MOM	X23, X13	X23, X13
	Значення	47,9	48,8

Таблиця 4.2 – Фактичні та прогнозовані значення середньої шорсткості та конусності прорізу за трьома параметрами

		Прогнозоване значення	Фактичне значення
ЗТВ	Оптимальний рівень за MOM	X21, X11	X21, X11
	Значення	0,2818	0,2831
Шорсткість	Оптимальний рівень за MOM	X21, X11	X21, X11
	Значення	15	14,5
Конусність прорізу	Оптимальний рівень за MOM	X43, X21, X11	X43, X21, X11
	Значення	1,67	1,7

#### 4.2 Математична модель

RSM метод використовується для аналізу впливу змінних, які мають незалежний початковий вплив на відгук від параметрів системи. В роботі параметрами системи є конусність прорізу, шорсткість поверхні та ЗТВ. Метою побудови таких математичних моделей є побудова зв'язку для спрощення процесу оптимізації і має вигляд [2]:

$$Y = \varepsilon + F(X1, X2, X3 \dots), \quad (4.2)$$

де  $\varepsilon$  – похибка;

$X1, X2, X3$  – параметри процесу.

Коефіцієнти параметрів за RSM методом можна представити у наступному вигляді [2]:

$$[B] = \neg([Z] \cdot [Z]^T) \cdot [F] \cdot [Z]^T, \quad (4.3)$$

де  $\neg$  - знак інверсії;

$[B]$  – масив коефіцієнтів параметрів лазерного різання;

$[Z]$  – ортогональний масив;

$[F]$  – масив вимірних змінних відгуку за MOM;

$[Z]^T$  – транспонований масив.

Для оцінки точності моделі, яка використовується для прогнозування, визначаються відхилення  $U_i$  та середнє відхилення  $U$ :

$$U_i = \left| \frac{R_{\text{факт}} - R_{\text{прогн.}}}{R_{\text{факт}}} \right| \cdot 100\%, \quad (4.4)$$

$$U = \frac{\sum U_i}{n}, \quad (4.5)$$

де  $R_{\text{факт}}$  – фактичний відгук (шорсткість, ЗТВ або конусність пропилу);

$R_{\text{прогн.}}$  – прогнозований відгук;

$U_i$  – середнє відсоткове відхилення від фактичних даних;

$n$  – кількість отриманих фактичних даних.

Для переконання у якості отриманої математичної моделі необхідні статистичні дані. Ці дані необхідно підібрати таким чином, щоб для одного діапазону значень модель відображала якісні результати, в той час як для іншого діапазону – не якісні.

Була обрана *сума абсолютних залишків*, оскільки адекватність отриманої моделі обернено пропорційна розміру її залишків [15]:

$$AR = \sum_{i=1}^n |ir|. \quad (4.6)$$

Середній абсолютний залишок розраховується за формулою [15]:

$$ARR = \frac{AR}{n}. \quad (4.7)$$

### 4.3 Оптимізація режимів лазерного різання для зменшення конусності прорізу

#### 4.3.1 Оцінка за варіативним співвідношенням

Підхід, описаний у розділі 4.2 використовувався для створення математичної моделі залежності конусності прорізу від параметрів різання. Фактична (за результатами проведених експериментів) та математично змодельована конусність прорізу наведена на рис. 4.1.

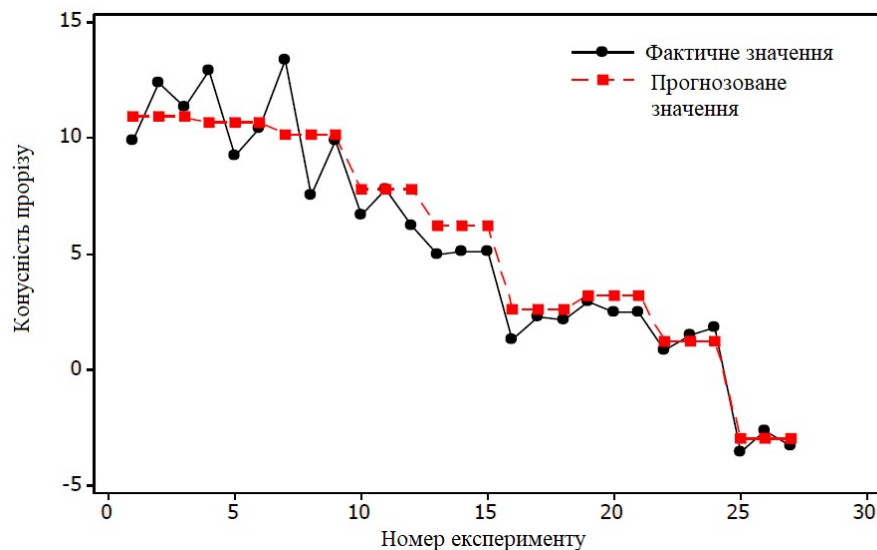


Рисунок 4.1 – Фактичні та прогнозовані значення конусності прорізу за варіативним співвідношенням

На рис. 4.2-4.7 показані контурні та поверхневі значення конусності прорізу в залежності від параметрів обробки лазерним різанням (від X1 до X2 та поєднані параметри X1X2, X1X3). У табл. 4.3 наведено прогнозовані та фактичні змінні відгуку для конусності прорізу. Усереднена точність моделі становить 78,86%.

Таблиця 4.3 – Порівняння фактичних та прогнозованих значень конусності прорізу за варіативним співвідношенням

Прогон	Прогнозоване значення	Фактичне значення	Відхилення
<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>
1	2,9	3,3	10,6
2	2,9	2,6	11,8
3	2,9	3,5	17,1
4	1,2	1,8	3,19
5	1,2	1,4	15,0
6	1,2	0,8	46,9
7	3,2	2,4	29,8
8	3,2	2,4	29,2
9	3,2	2,9	9,7
10	2,6	2,1	21,9
11	2,6	2,2	13,7
12	2,6	1,3	99,9
13	6,1	5,0	21,4
14	6,1	5,1	21,1
15	6,1	4,9	24,2
16	7,8	6,2	25,8
17	7,8	7,7	0,2
18	7,8	6,6	17,0
19	10,1	9,8	2,7



Продовження таблиці 4.3

1	2	3	4
20	10,1	7,5	34,6
21	10,1	13,3	24,3
22	10,6	10,4	2,3
23	10,6	9,2	15,4
24	10,6	12,9	17,3
25	10,9	11,3	3,8
26	10,9	12,3	11,6
27	10,9	9,8	10,7
AR			570,8
ARR			21,1
Середня точність моделі, %			78,86

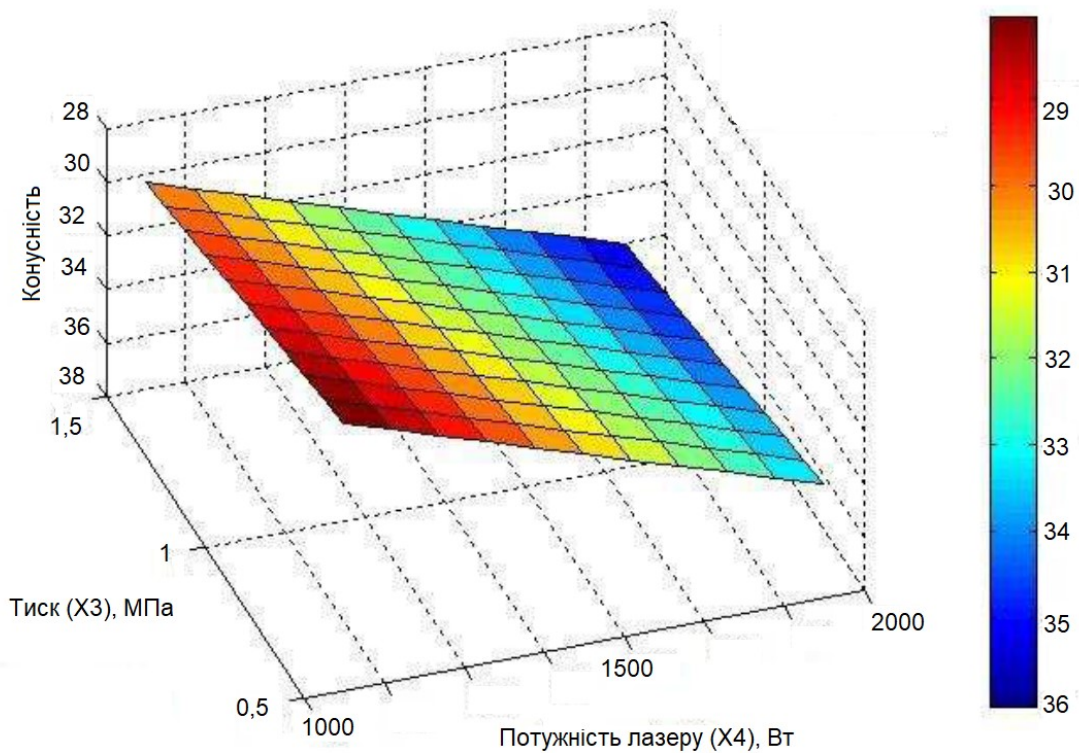


Рисунок 4.2 – Конусність прорізу при зміні тиску газу та потужності лазеру (частота 75 Гц, швидкість різання – 20 см/хв)

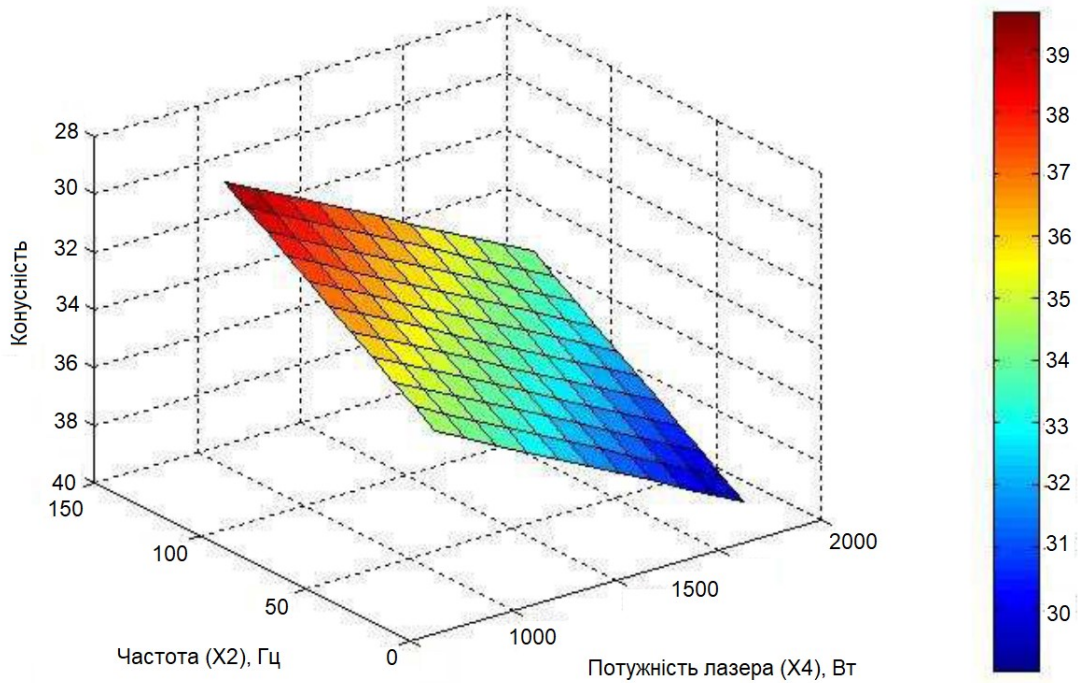


Рисунок 4.3 - Конусність прорізу при зміні частоти та потужності лазеру  
(тиск 1МПа, швидкість різання 20 см/хв)

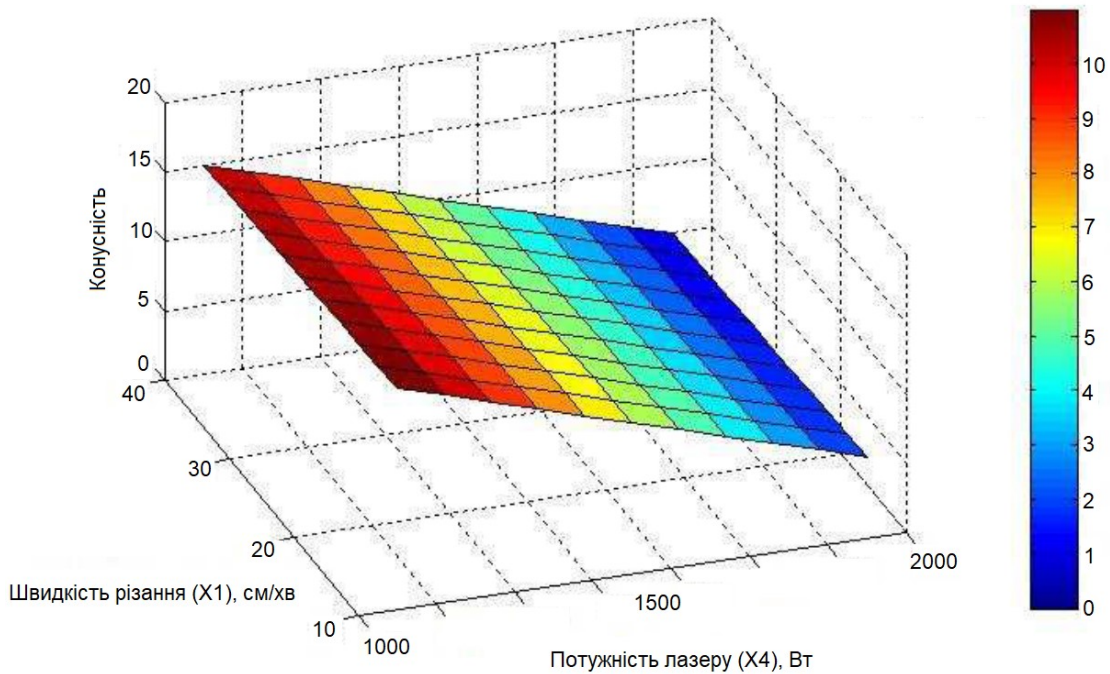


Рисунок 4.4 – Конусність прорізу при зміні швидкості різання та потужності  
лазеру  
(тиск 1МПа, частота 75 Гц)

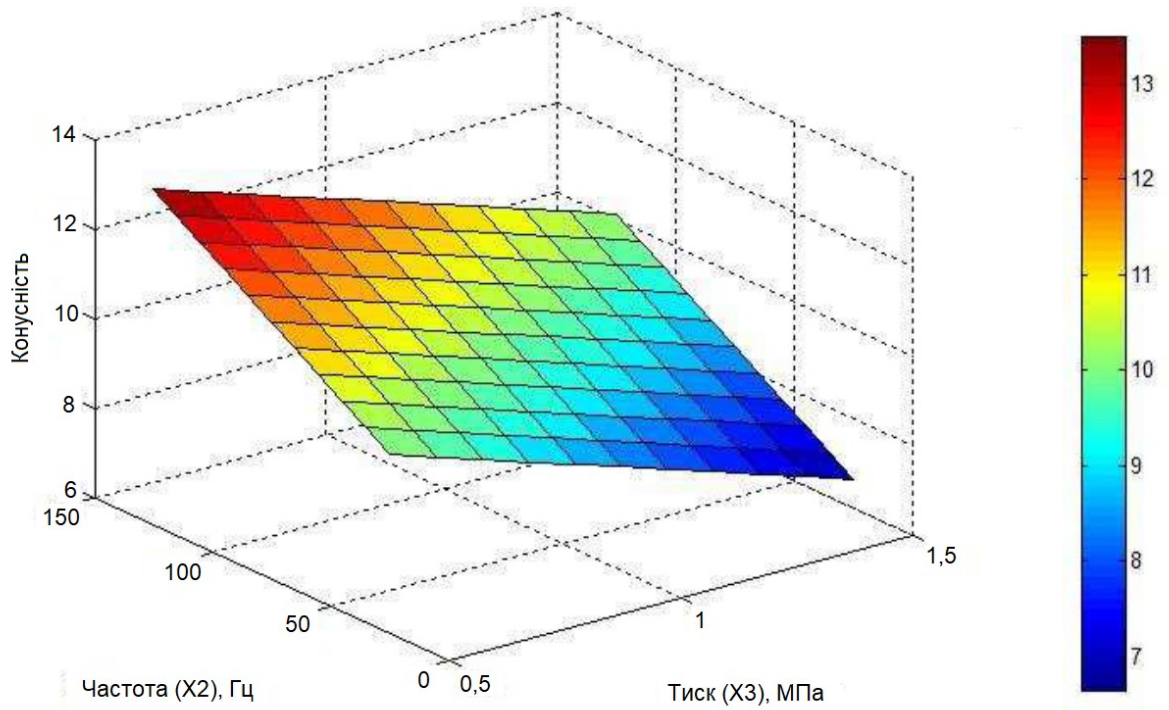


Рисунок 4.5 - Конусність прорізу при зміні частоти та тиску газу  
(швидкість різання 20 см/хв, потужність лазеру – 1500 Вт)

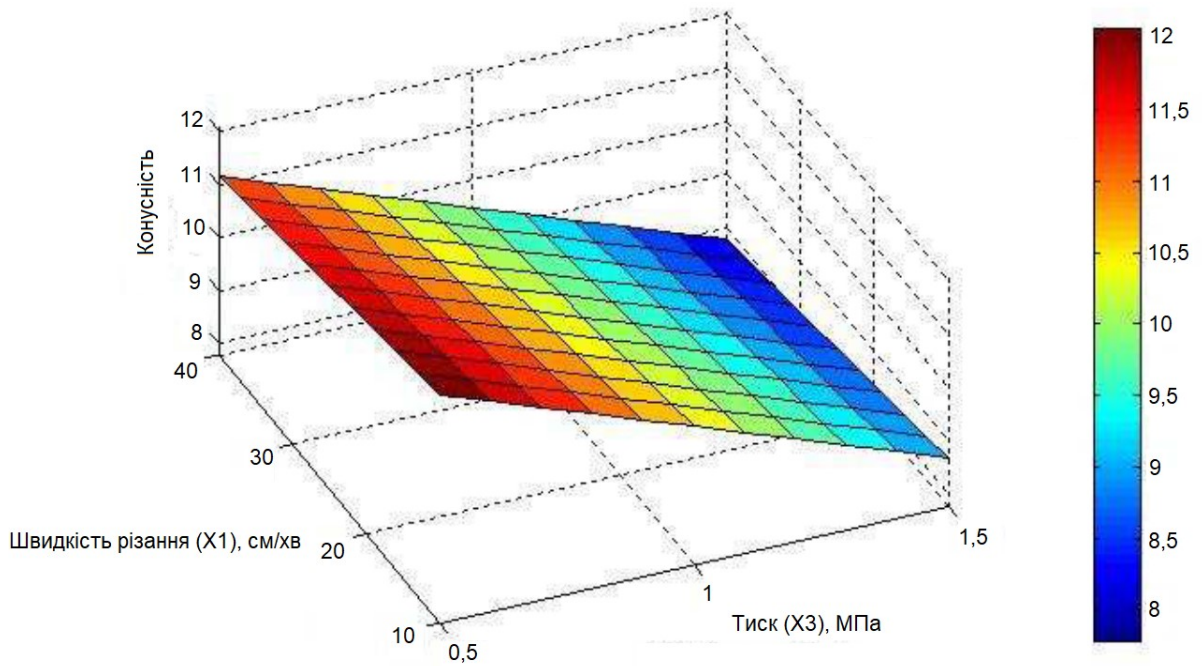


Рисунок 4.6 - Конусність прорізу при зміні швидкості різання та тиску газу  
(потужність лазеру – 1500 Вт, частота – 75 Гц)

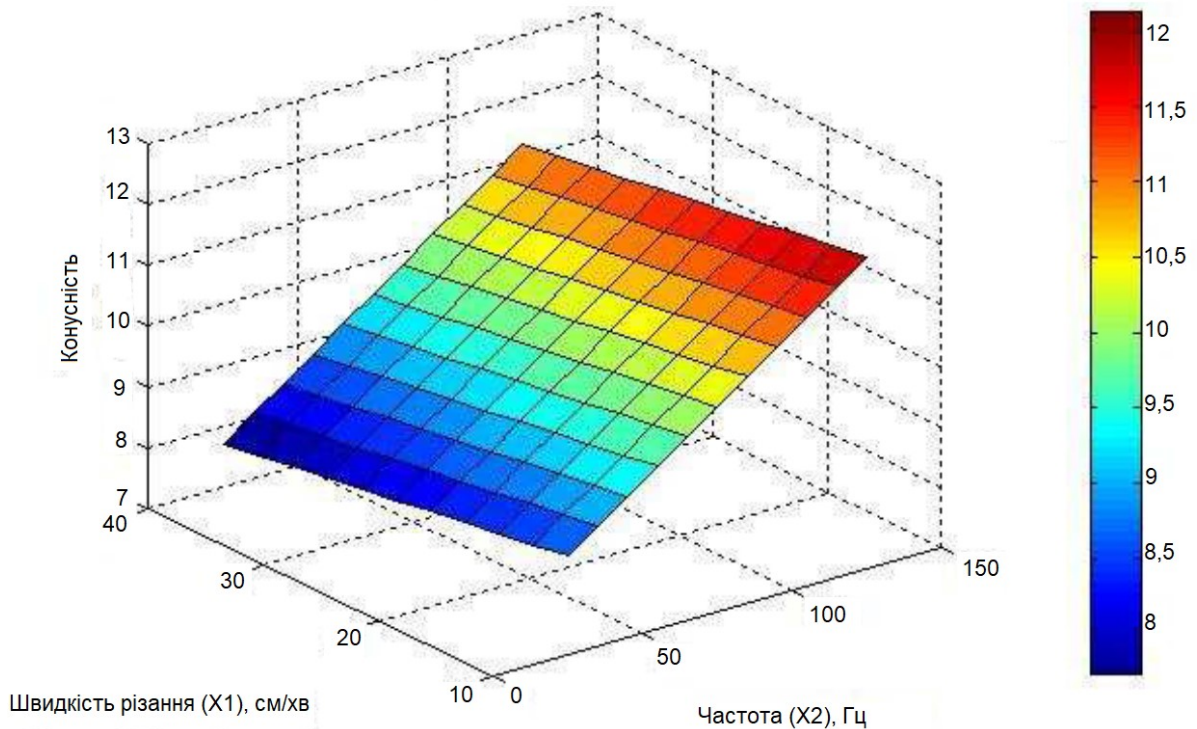


Рисунок 4.7 - Конусність прорізу при зміні швидкості різання та частоти  
(потужність лазеру – 1500 Вт, тиск газу – 1 МПа)

Провівши аналіз отриманих результатів зменшення конусності прорізу за МОМ за варіативним співвідношенням, можна зробити висновок, що найменша конусність прорізу досягається при наступних режимах різання:

- потужність лазеру 1500 Вт;
- швидкість різання 40 см/хв;
- частота 50 Гц;
- тиск газу 1,5 МПа.

#### 4.3.2 Оцінка за середньоквадратичним відхиленням

За методом ортогональних масивів було проведено аналіз впливу режимів лазерного різання за середньоквадратичним відхиленням. На рис. 4.8 наведено відхилення фактичних значень, отриманих в результаті експерименту, від значень, які були отримані за допомогою методу ортогональних масивів.

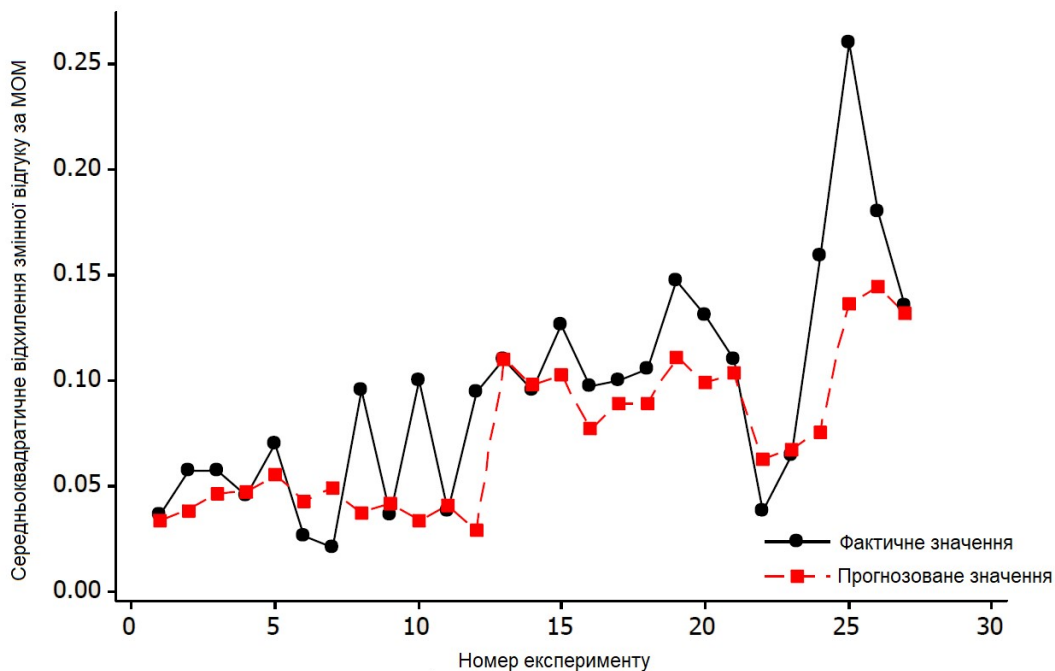


Рисунок 4.8 – Фактичні і прогнозовані значення конусності поверхні за середньоквадратичним відхиленням

На рис. 4.9-4.14 показані розрахункові тривимірні графіки для значень конусності за середньоквадратичним відхиленням по методу ортогональних масивів. У табл. 4.4 наведені відповідні фактичні та прогнозовані значення, а також середню точність математичної моделі.

Таблиця 4.4 – Порівняння фактичних та прогнозованих значень конусності прорізу за середньоквадратичним відхиленням

Прогон	Прогнозоване значення	Фактичне значення	Відхилення
1	2	3	4
1	0,13	0,13	2,6
2	0,14	0,18	20
3	0,13	0,26	47,5
4	0,07	0,15	52,6
5	0,06	0,06	4,8

Продовження таблиці 4.4

1	2	3	4
6	0,1	0,03	65,7
7	0,09	0,1	5,7
8	0,11	0,13	24,3
9	0,08	0,14	24,6
10	0,08	0,1	15,1
11	0,07	0,1	10,9
12	0,1	0,09	20,9
13	0,09	0,12	19,1
14	0,11	0,09	2,4
15	0,02	0,11	0,009
16	0,04	0,09	69,5
17	0,03	0,03	8,6
18	0,04	0,1	66,6
19	0,03	0,03	14,8
20	0,04	0,09	61,3
21	0,04	0,02	136,1
22	0,05	0,02	61,5
23	0,04	0,07	21,2
24	0,04	0,04	5,1
25	0,03	0,05	18,8
26	0,03	0,05	32,4
27	0,03	0,03	6,3
AR			819,5
ARR			30,35
Середня точність моделі, %			69,65

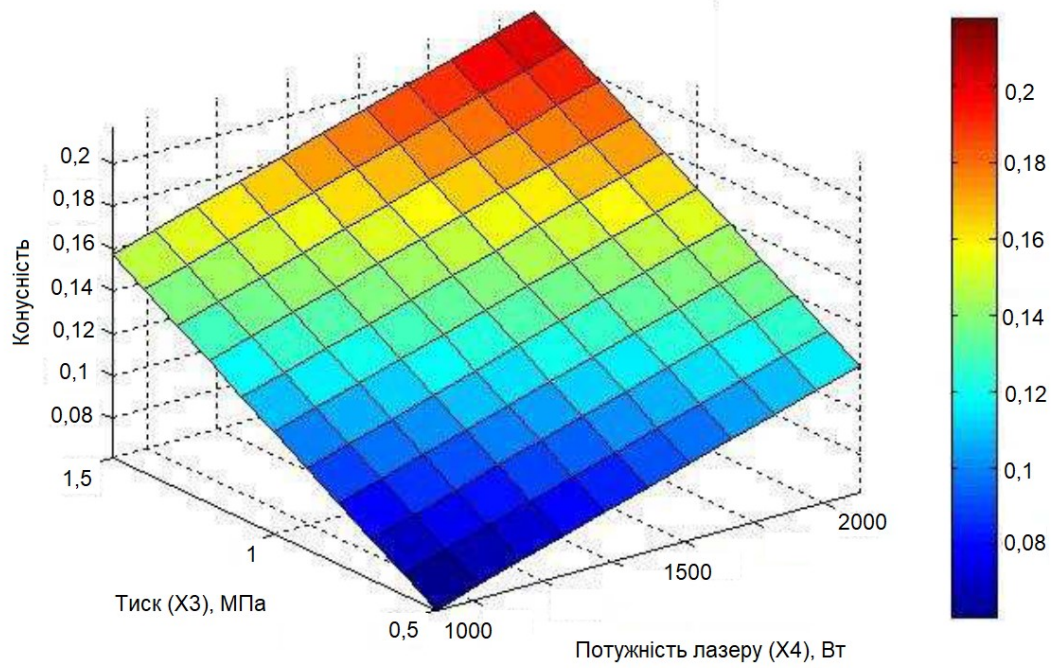


Рисунок 4.9 – Конусність прорізу при зміні тиску газу та потужності лазеру  
(частота 75 Гц, швидкість різання 20 см/хв)

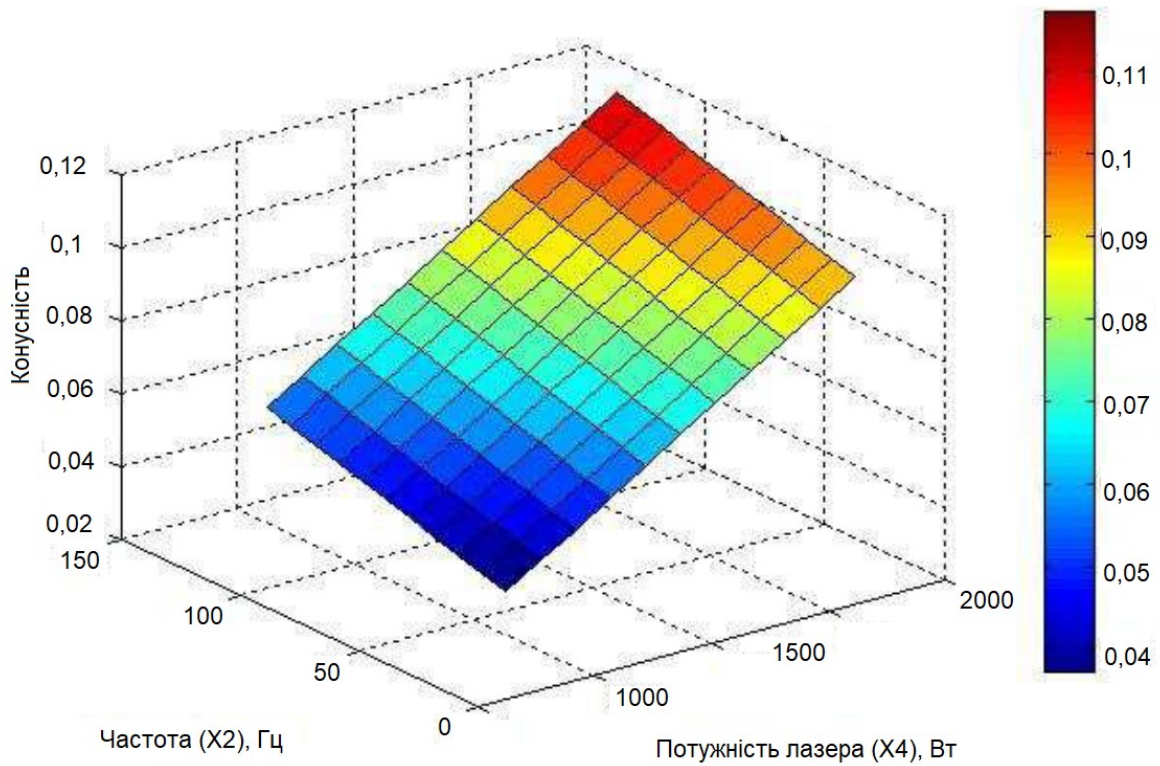


Рисунок 4.10 - Конусність прорізу при зміні частоти та потужності лазеру  
(тиск 1МПа, швидкість різання 20 см/хв)

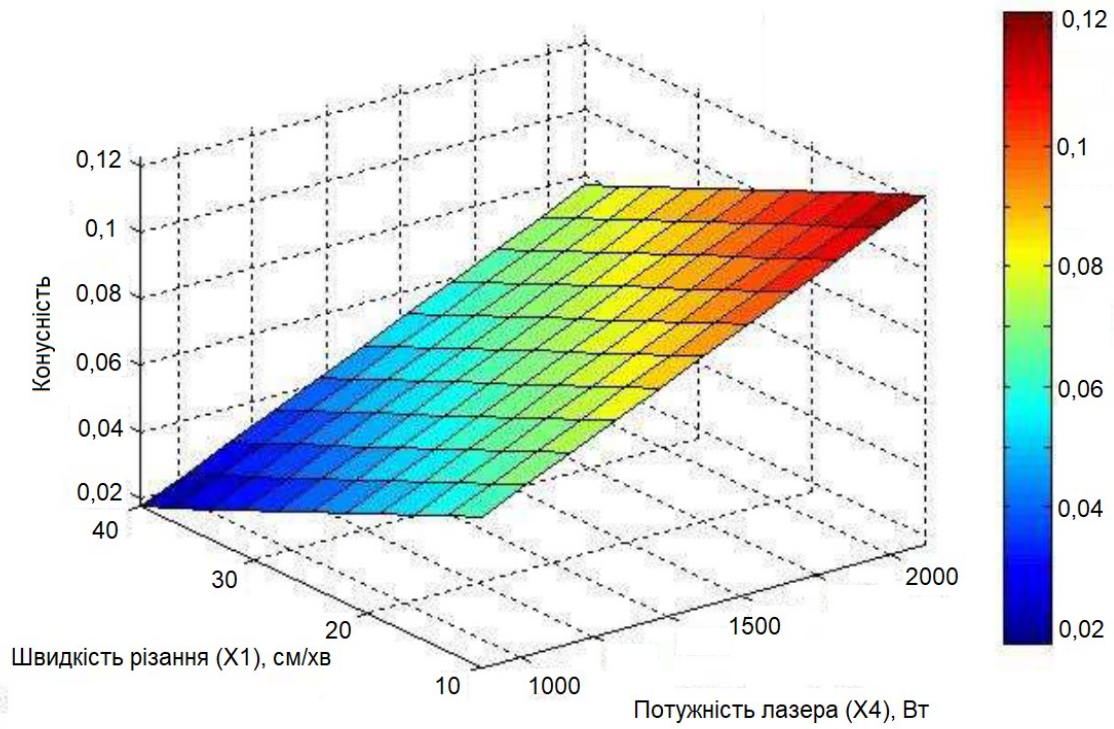


Рисунок 4.11 - Конусність прорізу при зміні швидкості та потужності лазеру  
(тиск 1МПа, частота 75 Гц)

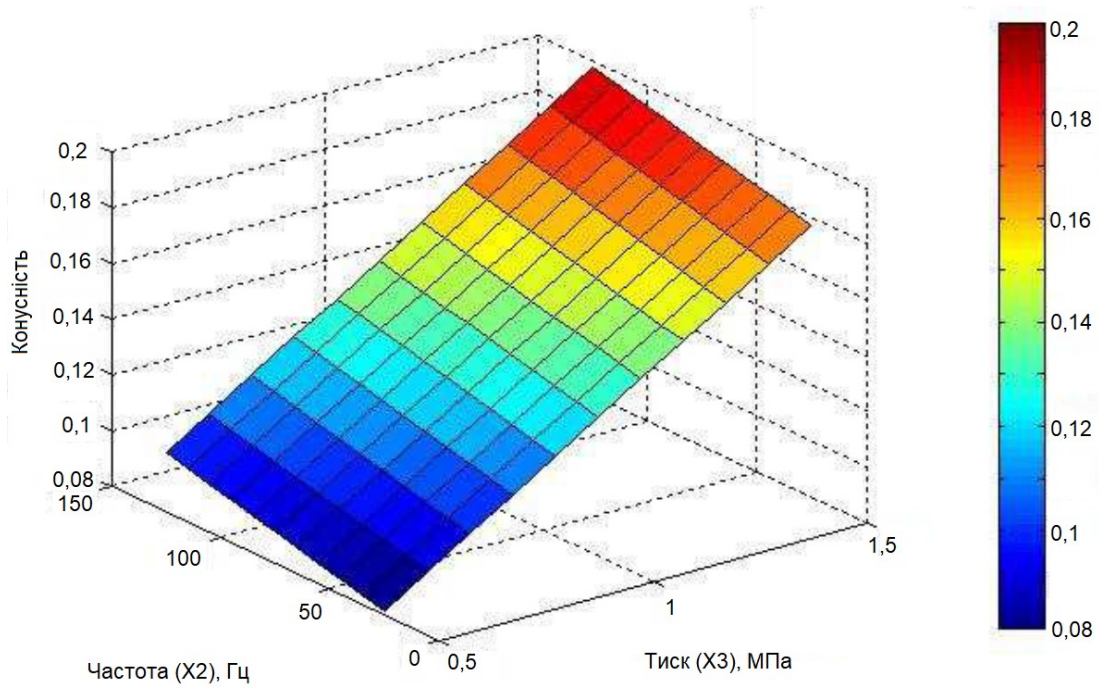


Рисунок 4.12 – Конусність прорізу при зміні частоти та тиску  
(потужність лазеру 1500 Вт, швидкість різання 20 см/хв)

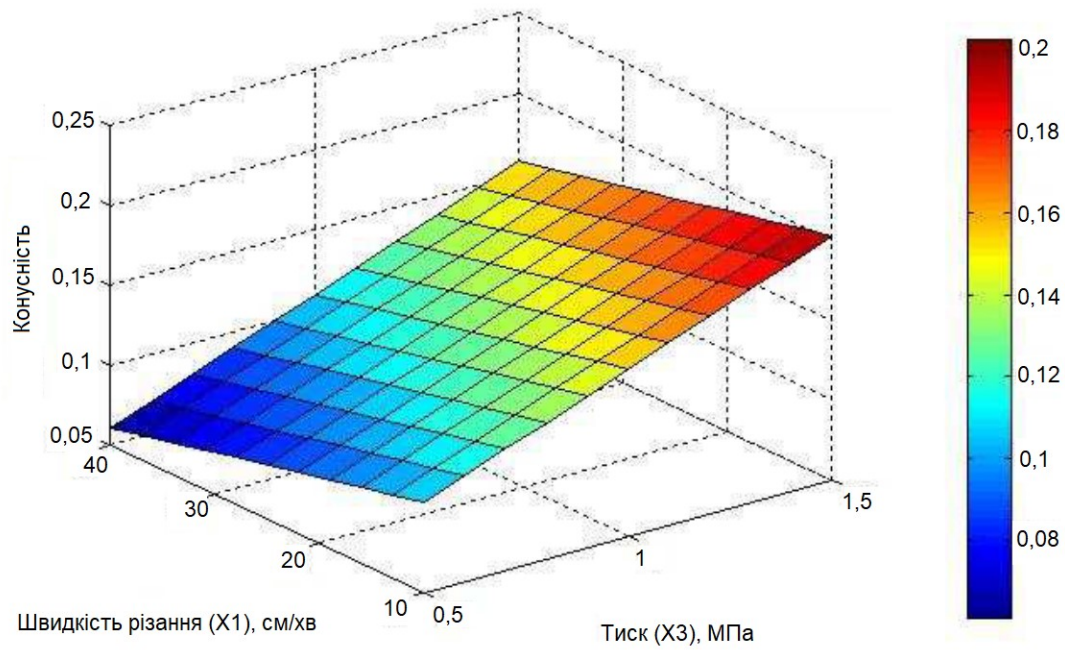


Рисунок 4.13 – Конусність прорізу при зміні швидкості різання та тиску  
(потужність лазеру 1500 Вт, частота 75 Гц)

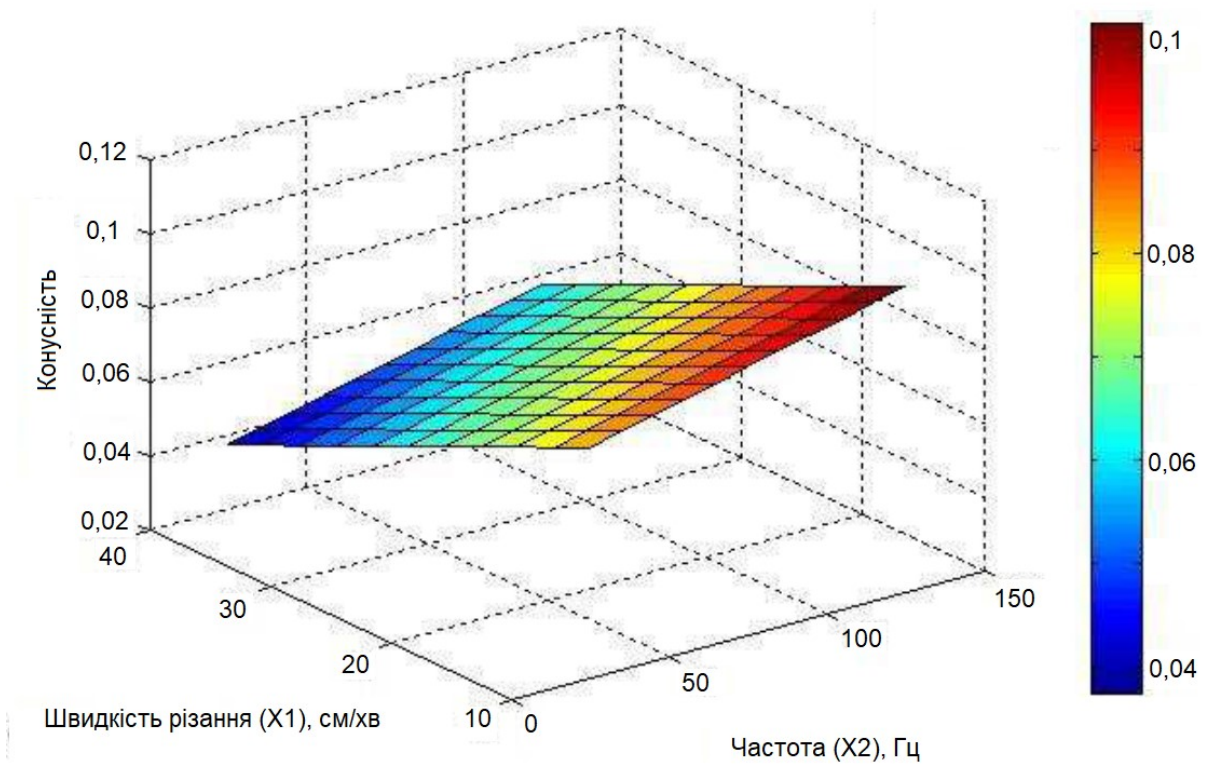


Рисунок 4.14 – Конусність прорізу при зміні швидкості різання та частоти  
(потужність лазеру 1500 Вт, тиск 1 МПа)

Середня точність моделі становить 69,65%, що менше за точністю моделі за варіативним співвідношенням.

Провівши аналіз отриманих результатів зменшення конусності прорізу за MOM за середньоквадратичним відхиленням, можна зробити висновок, що найменша конусність прорізу досягається при наступних режимах різання:

- потужність лазеру 1000 Вт;
- швидкість різання 40 см/хв;
- частота 50 Гц;
- тиск газу 0,5 МПа.

#### 4.3.3 Оцінка за середнім значенням

Останній підхід, який застосовується за методом ортогональних масивів – це визначення прогнозованих параметрів за середнім значенням. Застосовується аналогічний підхід, як і у розділах 4.3.2 та 4.3.3.

На рис. 4.15 наведено порівняння прогнозованих та фактичних значень конусності прорізу. У табл. 4.5 наведені отримані значення, а на рис. 4.16-4.21 показані тривимірні поверхні за RSM методом для середніх значень за MOM.

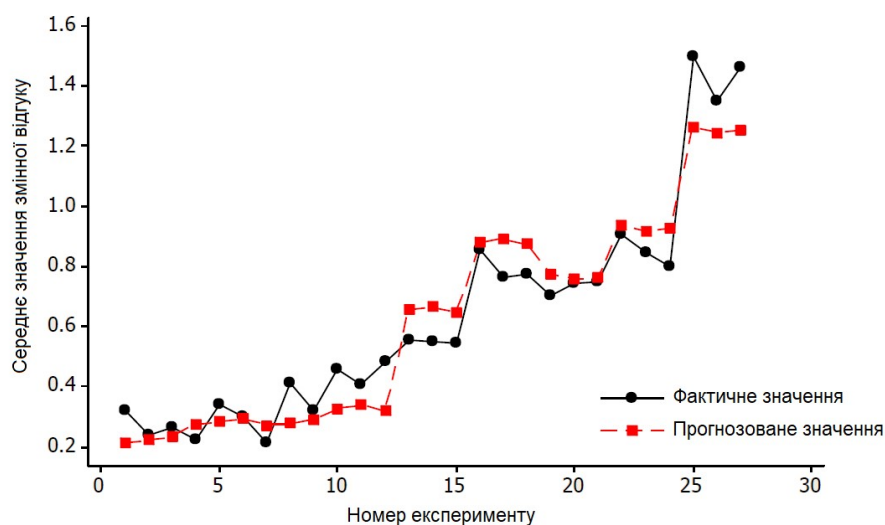


Рисунок 4.15 – Фактичні і прогнозовані значення конусності поверхні за середнім значенням змінної відгуку

Таблиця 4.5 – Порівняння фактичних та прогнозованих значень конкусності прорізу за середнім значенням змінної відгуку

Прогон	Прогнозоване значення	Фактичне значення	Відхилення
<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>
1	1,25	1,46	14,2
2	1,24	1,35	7,7
3	1,26	1,49	15,5
4	0,92	0,8	15,5
5	0,91	0,84	8,8
6	0,93	0,9	3,3
7	0,76	0,74	2,4
8	0,75	0,7	1,9
9	0,77	0,77	10,8
10	0,87	0,76	12,5
11	0,89	0,85	16,8
12	0,88	0,54	2,8
13	0,64	0,55	18,5
14	0,66	0,55	20,9
15	0,65	0,48	17,6
16	0,32	0,4	33,7
17	0,33	0,45	16,6
18	0,32	0,32	28,3
19	0,28	0,41	9,7
20	0,27	0,21	32,7
21	0,27	0,3	27,1
22	0,29	0,34	2,0
23	0,28	0,22	16,9
24	0,27	0,26	23,6

Продовження таблиці 4.5

1	2	3	4
25	0,23	0,23	12,6
26	0,22	0,32	6,3
27	0,21	0,32	33,0
AR			412,96
ARR			15,29
Середня точність моделі, %			84,71%

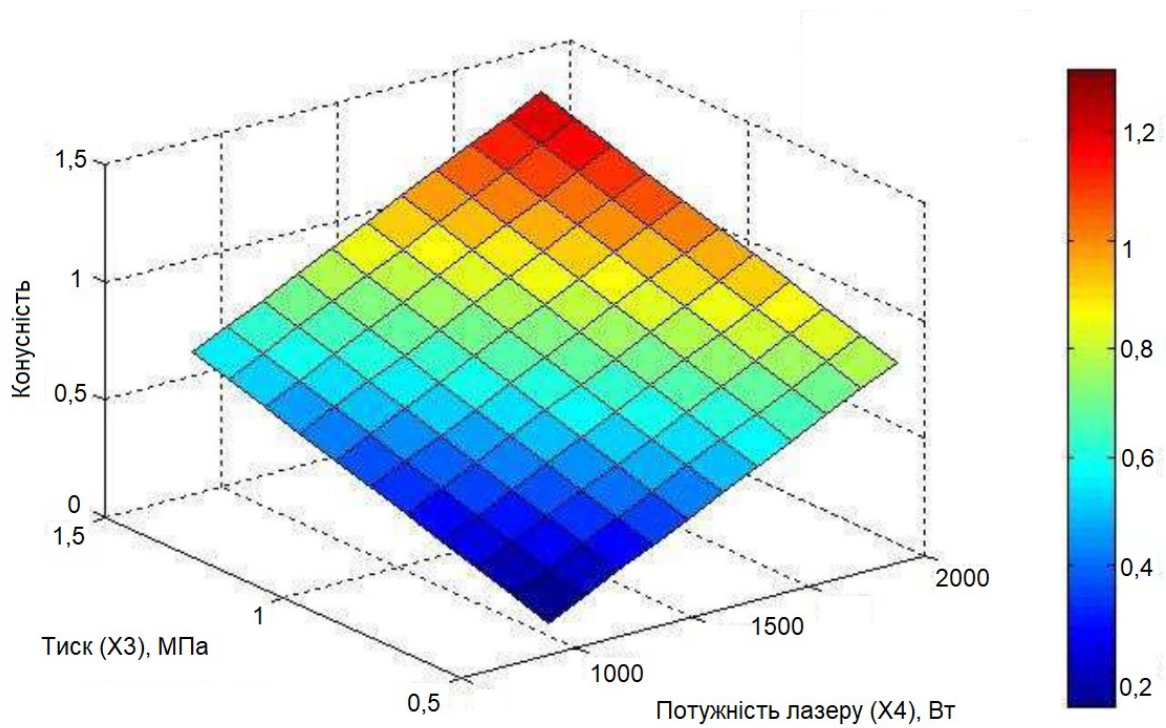


Рисунок 4.16 – Конусність прорізу при зміні потужності лазеру та тиску газу  
(частота 75 Гц, швидкість різання 20 см/хв)

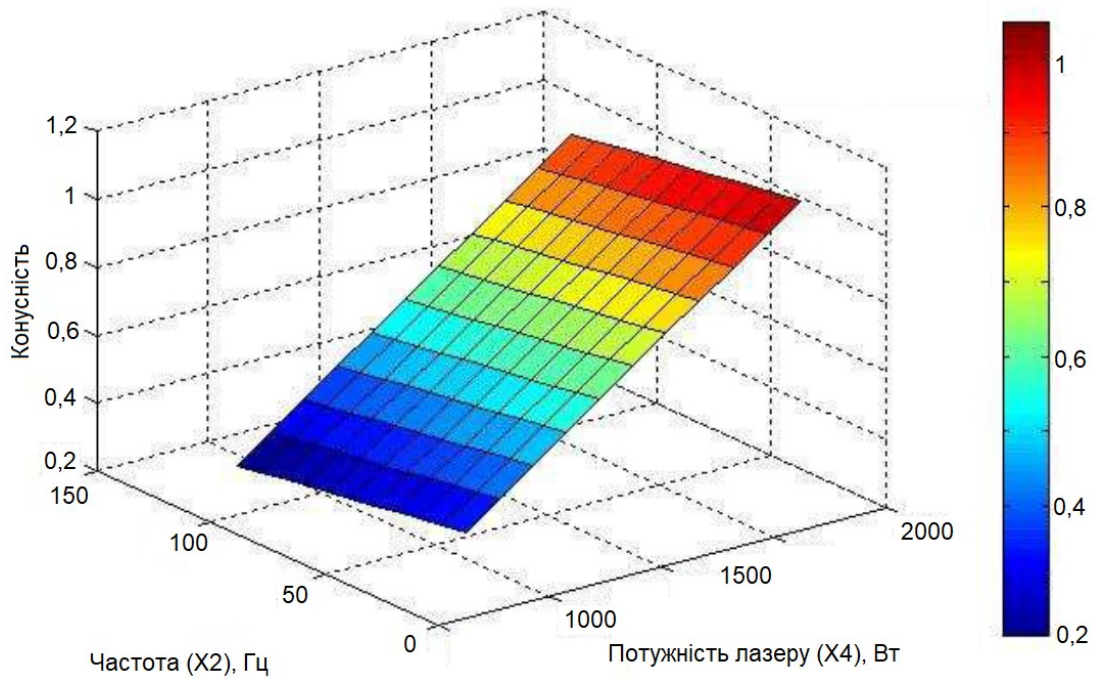


Рисунок 4.17 – Конусність прорізу при зміні потужності лазеру та частоти  
(тиск 1 МПа, швидкість різання 20 см/хв)

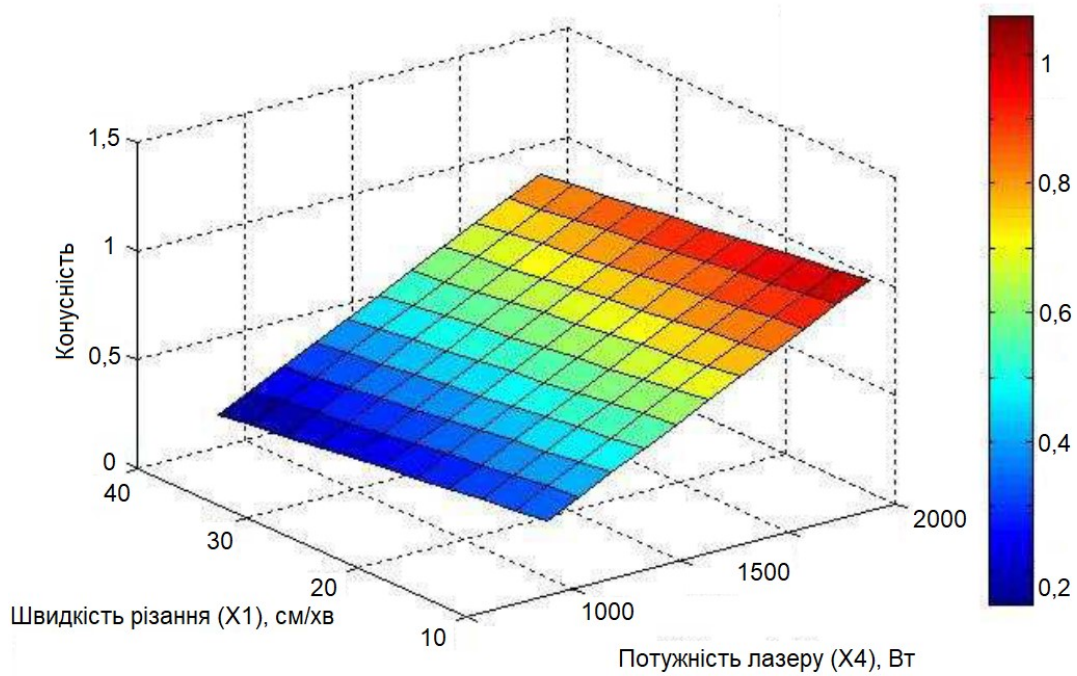


Рисунок 4.18 – Конусність прорізу при зміні потужності лазеру та швидкості  
різання (тиск 1 МПа, частота 75 Гц)

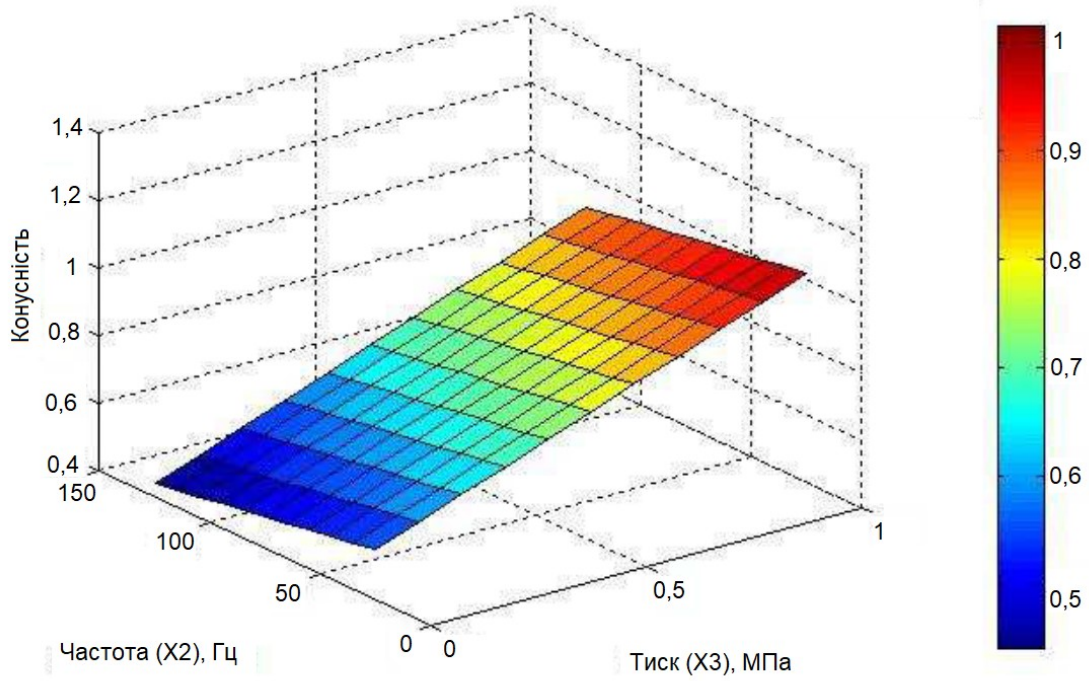


Рисунок 4.19 – Конусність прорізу при зміні тиску та частоти  
(потужність лазеру 1500 Вт, швидкість різання 20 см/хв)

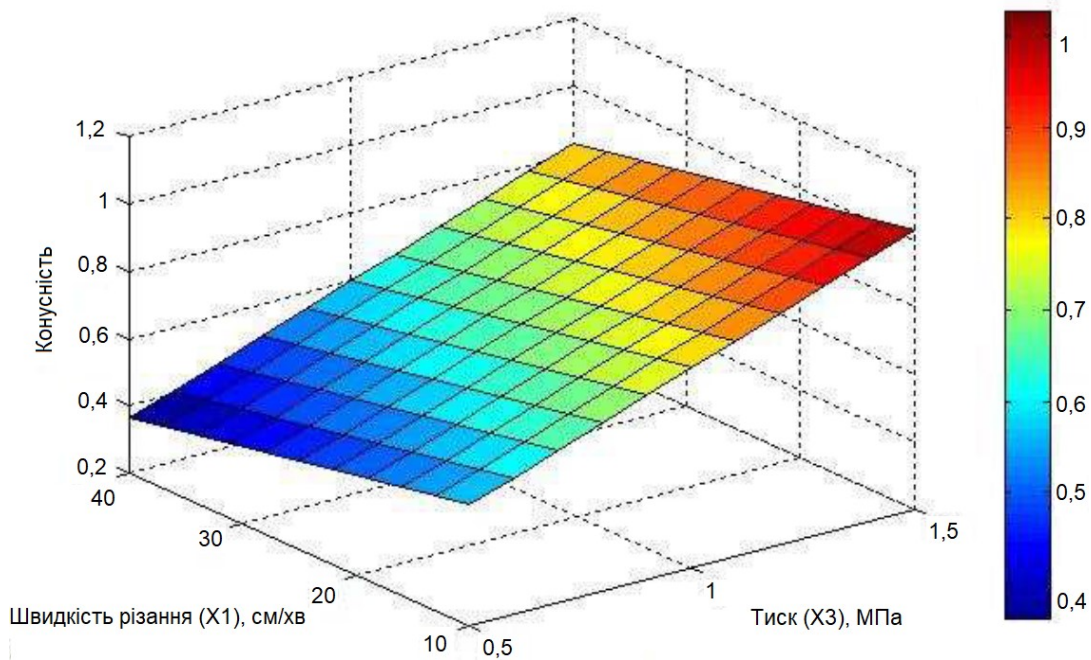


Рисунок 4.20 – Конусність прорізу при зміні тиску та швидкості різання  
(потужність лазеру 1500 Вт, частота 75 Гц)

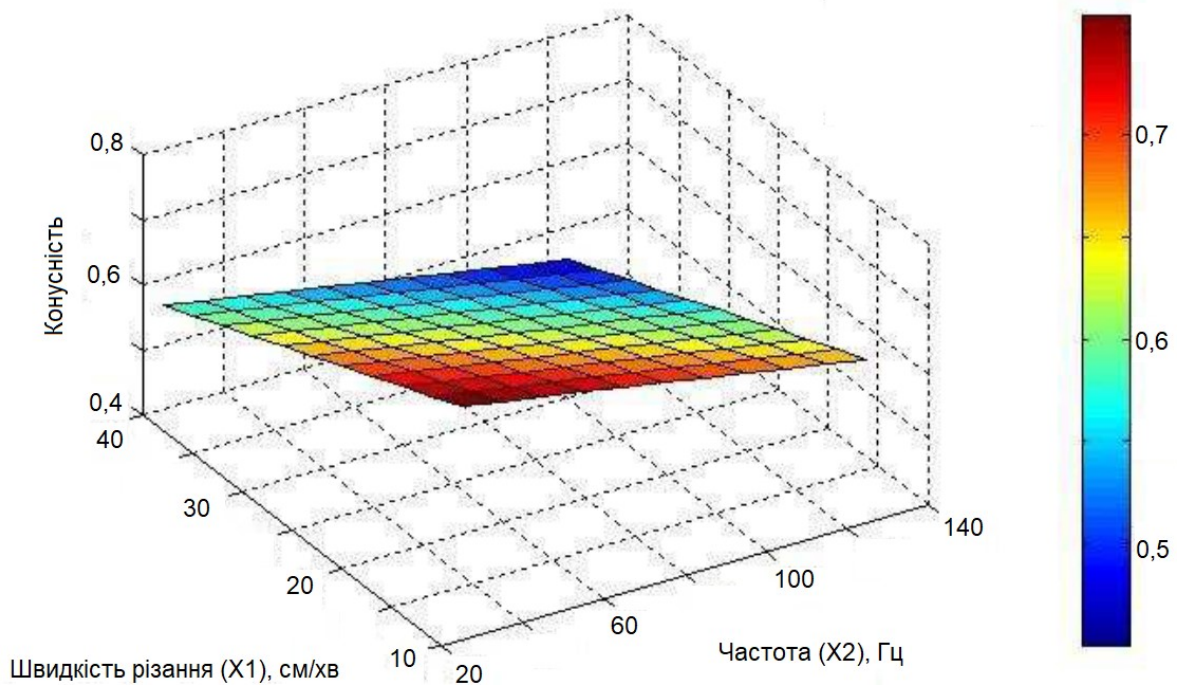


Рисунок 4.21 – Конусність прорізу при зміні частоти та швидкості різання (потужність лазеру 1500 Вт, тиск 1 МПа)

Провівши аналіз отриманих результатів зменшення конусності прорізу за МОМ за середнім значенням, можна зробити висновок, що найменша конусність прорізу досягається при наступних режимах різання:

- потужність лазеру 1000 Вт;
- швидкість різання 40 см/хв;
- частота 100 Гц;
- тиск газу 0,5 МПа.

#### 4.4 Оптимізація режимів лазерного різання для зменшення середньої шорсткості поверхні

Враховуючи, що параметри конусності, ЗТВ та середньої шорсткості поверхні є елементами однієї системи, а за методом ортогональних масивів вони представляють собою єдину систему змінних відгуку, то необхідно застосовувати до кожної змінної відгуку однакові підходи в рамках МОМ.

При проведенні аналізу впливу режимів різання на показник конусності трьома методами, середня точність кожного із методів становила:

- за середнім значенням – 84,71%;
- за середньоквадратичним відхиленням – 69,95%;
- за варіативним співвідношенням – 78,86%.

Тому при проведенні оптимізації режимів лазерного різання для зменшення середньої шорсткості поверхні слід враховувати точність кожної із моделей для змінної відгуку, яка відповідає конусності прорізу. Оскільки найбільша точність моделі для конусності була у підході за середнім значенням, то для шорсткості та ЗТВ також буде розглядатись підбір оптимальних режимів різання саме за середнім значенням по методу ортогональних масивів.

Аналогічно до дослідження, проведеного у розділі 4.3.3, на рис. 4.22 наведено порівняння фактичних та прогнозованих значень середньої шорсткості поверхні, а у табл. 4.6 наведено значення для кожного відхилення.

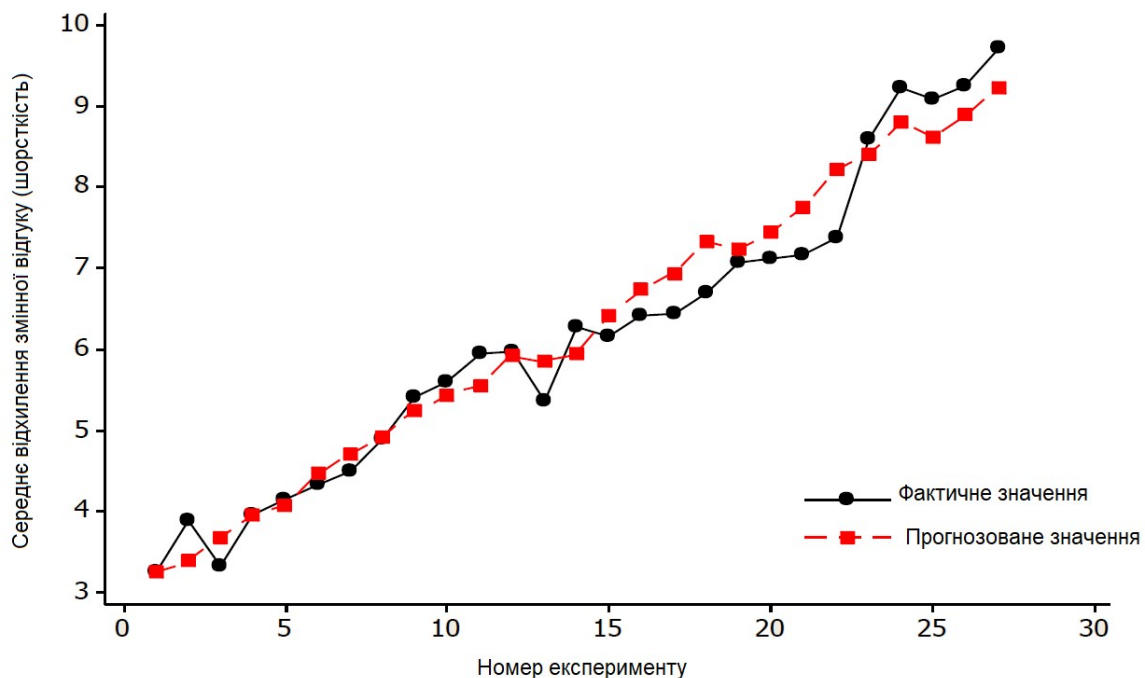


Рисунок 4.22 – Фактичні і прогнозовані значення середньої шорсткості поверхні за середнім значенням змінної відгуку

Таблиця 4.6 – Порівняння фактичних та прогнозованих значень середньої шорсткості прорізу за середнім значенням змінної відгуку

Прогон	Прогнозоване значення	Фактичне значення	Відхилення
<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>
1	9,22	9,7	4,92
2	8,89	9,23	3,68
3	8,6	9,07	5,13
4	8,79	9,21	4,48
5	8,39	8,59	2,25
6	8,21	7,37	11,45
7	7,73	7,16	8,07
8	7,44	7,12	4,51
9	7,22	7,08	2,04
10	7,33	6,69	9,66
11	6,93	6,43	7,91
12	6,73	6,41	5,0
13	6,41	6,15	4,36
14	5,95	6,27	5,07
15	5,84	5,37	8,89
16	5,92	5,98	0,93,
17	5,56	5,94	6,36
18	5,42	5,6	3,16
19	5,24	5,41	2,95
20	4,93	4,89	0,82
21	4,7	4,51	4,43
22	4,46	4,33	3,17
23	4,07	4,14	1,49
24	3,96	3,96	0,05

25	3,68	3,33	10,71
----	------	------	-------

Продовження таблиці 4.6

1	2	3	4
26	3,4	3,9	12,76
27	3,25	3,27	0,58
AR			134,83
ARR			4,99
Середня точність моделі, %			95,01

Аналогічно було побудовані графіки зміни середньої шорсткості поверхні від параметрів лазерного різання (рис. 4.23-4.28). При аналізі по двом параметрам, як і у попередніх дослідженнях, інші два параметри вважалися на рівні середніх значень, як це передбачено за методом ортогональних масивів.

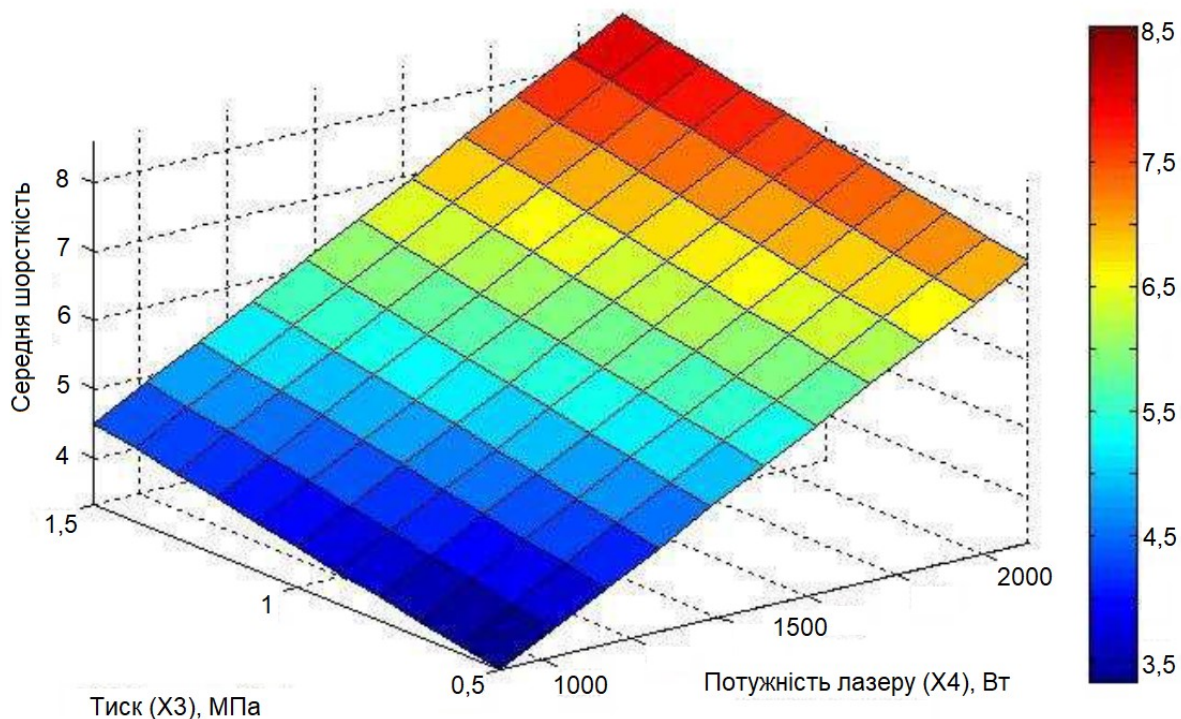


Рисунок 4.23 – Середня шорсткість поверхні прорізу при зміні потужності лазера та тиску (частота 75 Гц, швидкість різання 20 см/хв)

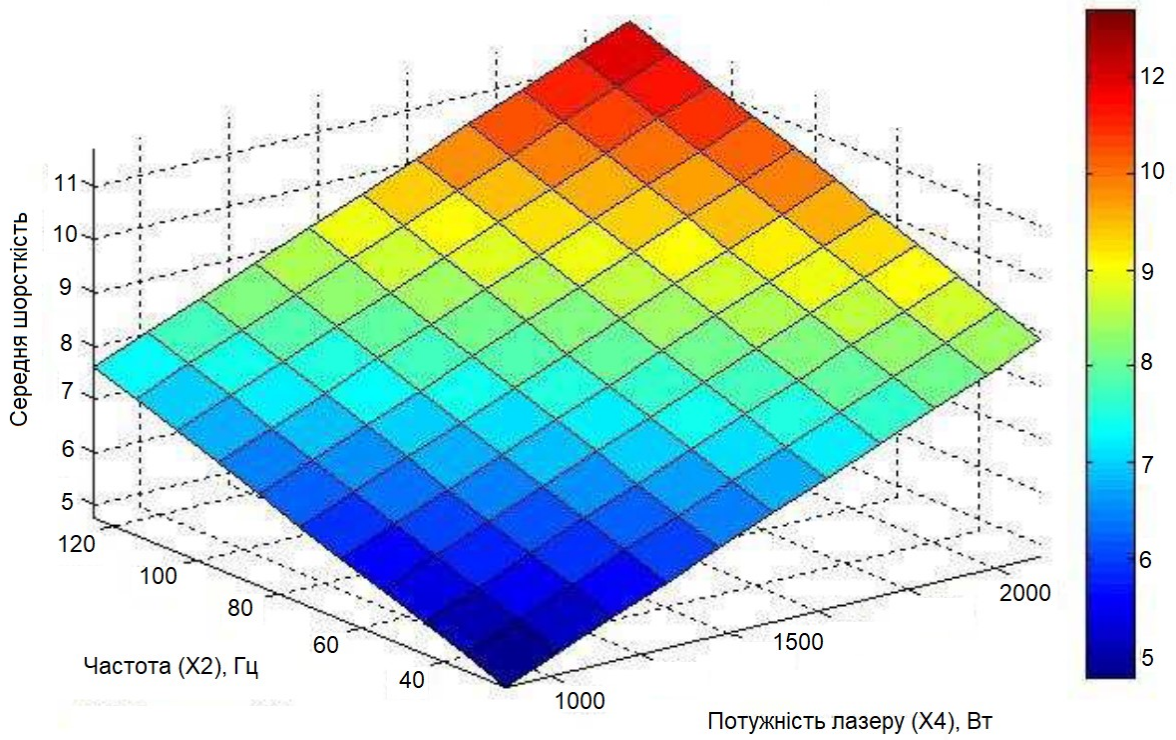


Рисунок 4.24 – Середня шорсткість поверхні прорізу при зміні потужності лазеру та частоті (тиск 1 МПа, швидкість різання 20 см/хв)

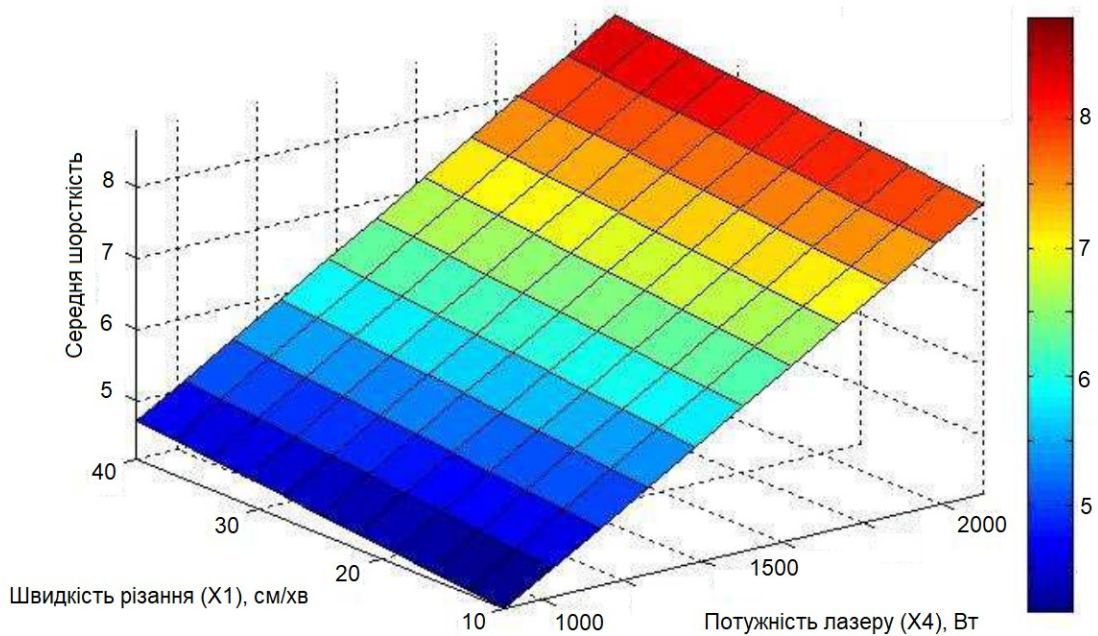


Рисунок 4.25 – Середня шорсткість поверхні прорізу при зміні потужності лазеру та швидкості різання (тиск 1 МПа, частота 75 Гц)

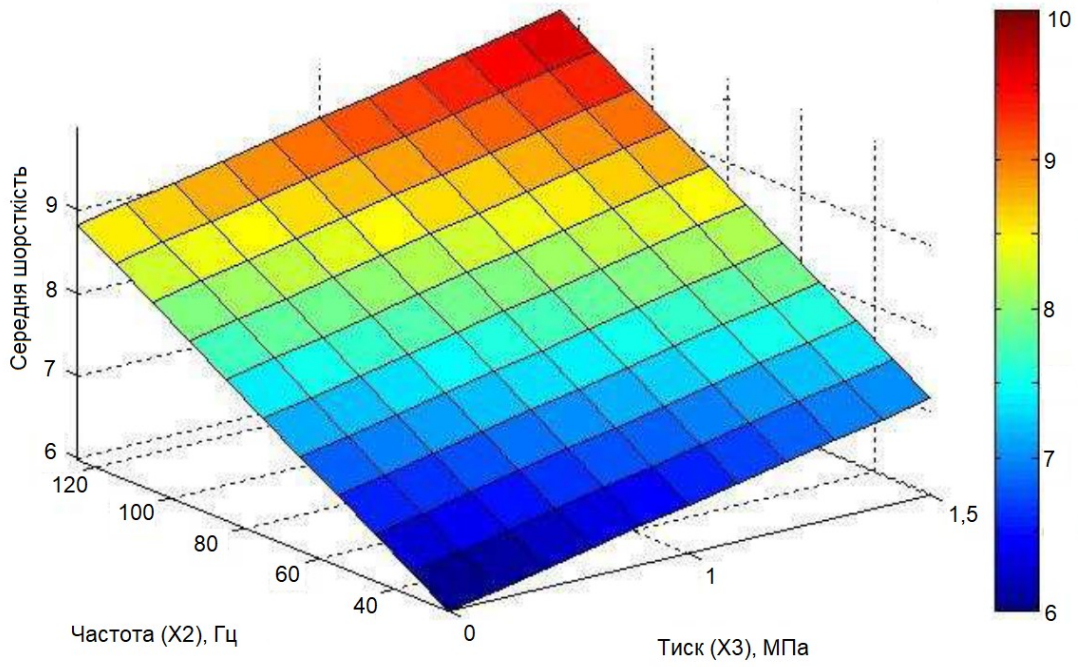


Рисунок 4.26 – Середня шорсткість поверхні прорізу при зміні тиску та частоти (потужність лазеру 1500 Вт, швидкість різання 20 см/хв)

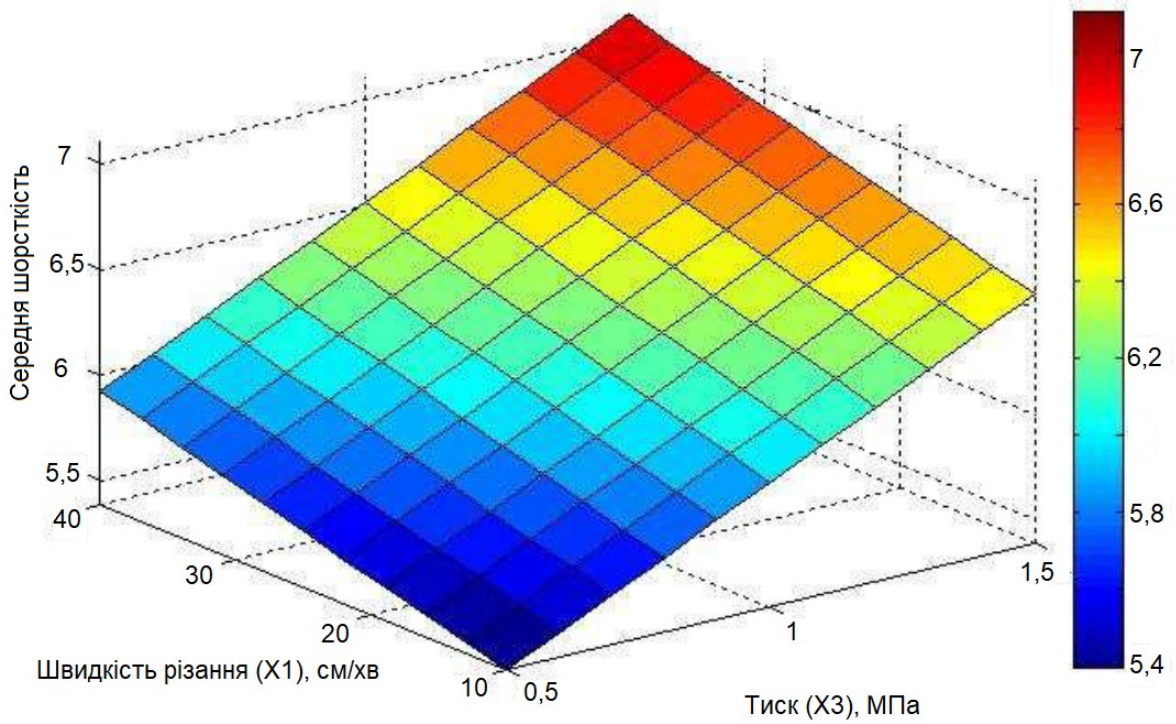


Рисунок 4.27 – Середня шорсткість поверхні прорізу при зміні тиску та швидкості різання (потужність лазеру 1500 Вт, частота 75 Гц)

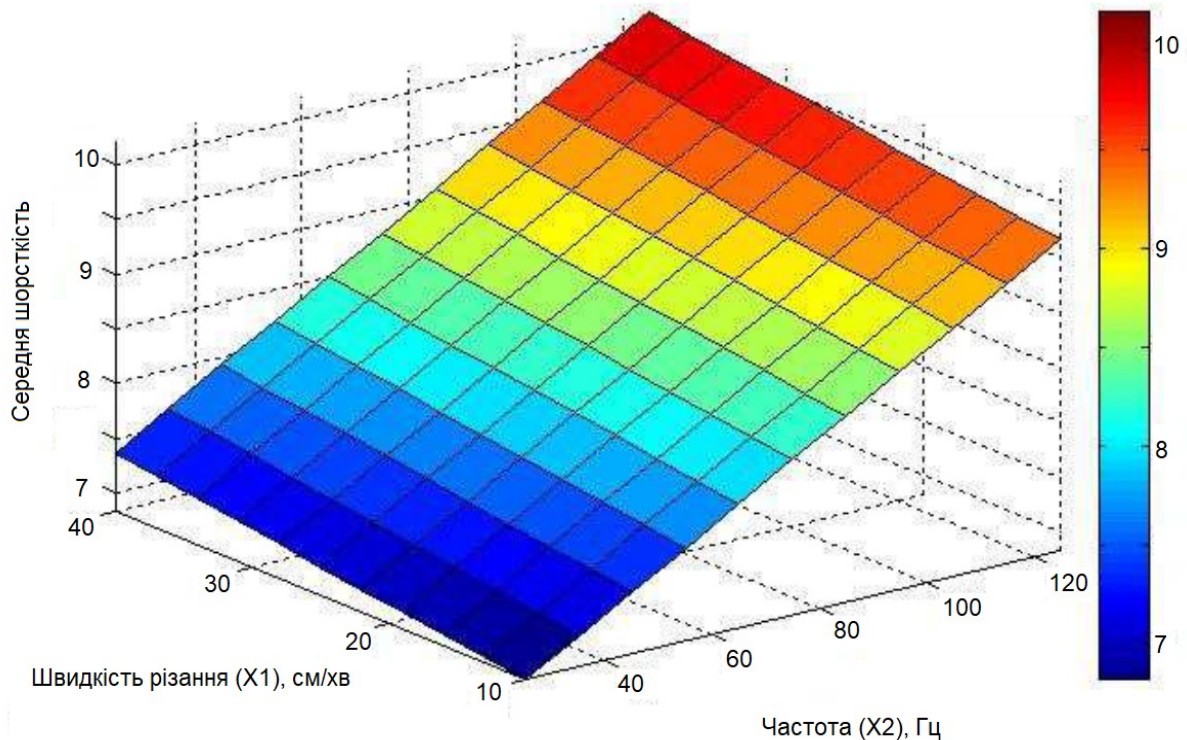


Рисунок 4.28 – Середня шорсткість поверхні прорізу при зміні частоти та швидкості різання (потужність лазеру 1500 Вт, тиск 1 МПа)

Провівши аналіз отриманих результатів зменшення шорсткості поверхні прорізу за МОМ за середнім значенням, можна зробити висновок, що найменша шорсткість поверхні прорізу досягається при наступних режимах різання:

- потужність лазеру 1000 Вт;
- частота 25 Гц;
- тиск газу 0,5 МПа.

Слід відзначити, що швидкість різання майже не має впливу на показник шорсткості.

#### 4.5 Оптимізація режимів лазерного різання для зменшення зони термічного впливу

Остання зміна відгуку при розгляді процесу лазерного різання методом ортогональних масивів – це зона термічного впливу (ЗТВ). Результати аналізу

були отримані аналогічно, до результатів середньої шорсткості та конусності поверхні (див. 4.3 та 4.4), при чому застосовувався підхід за середнім значенням.

Порівняння фактичних та отриманих результатів наведені у табл. 4.7 та на рис. 4.29, а вплив параметрів різання на показник ЗТВ наведений на рис. 4.30-4.35.

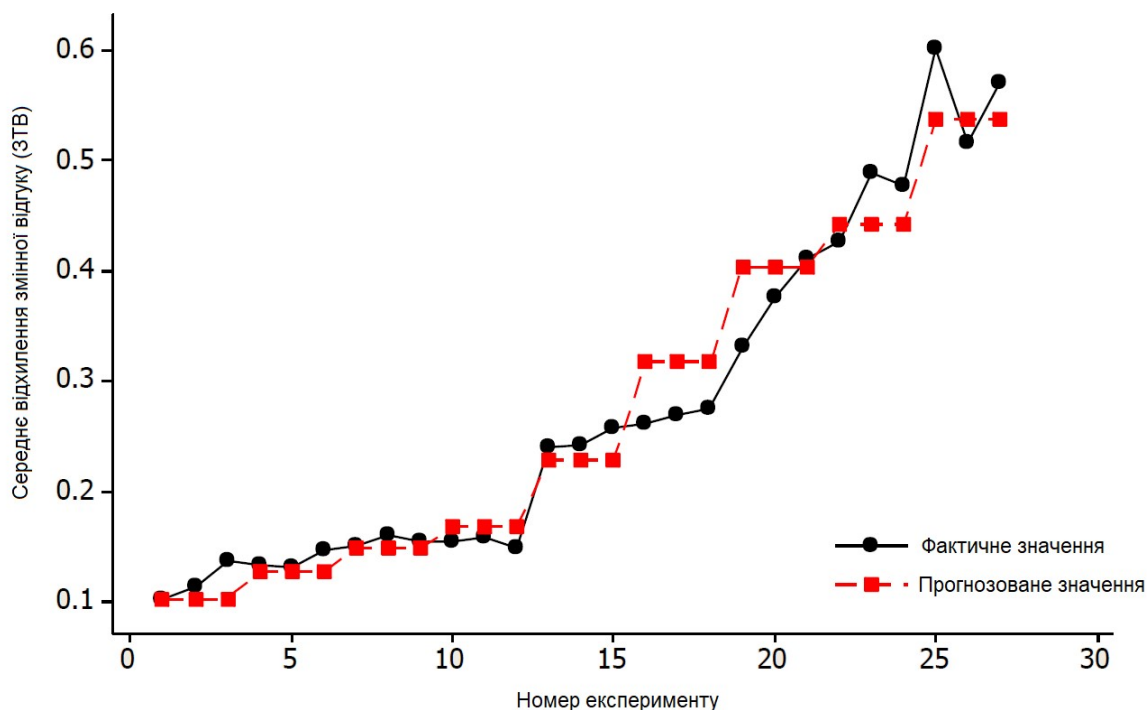


Рисунок 4.29 – Фактичні і прогнозовані значення ЗТВ за середнім значенням змінної відгуку

Таблиця 4.7 – Порівняння фактичних та прогнозованих значень ЗТВ за середнім значенням змінної відгуку

Прогон	Прогнозоване значення	Фактичне значення	Відхилення
<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>
1	0,53	0,57	5,5
2	0,53	0,51	4,51

3	0,53	0,6	10,4
---	------	-----	------

*Продовження таблиці 4.7*

<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>
4	0,44	0,47	7,4
5	0,44	0,48	9,5
6	0,44	0,42	3,5
7	0,4	0,41	1,9
8	0,4	0,37	7,1
9	0,4	0,33	21,7
10	0,31	0,27	15,3
11	0,31	0,26	17,9
12	0,31	0,26	21,0
13	0,22	0,25	11,3
14	0,22	0,24	5,4
15	0,22	0,23	4,6
16	0,16	0,14	13,3
17	0,16	0,15	6,8
18	0,16	0,15	8,9
19	0,14	0,15	4,0
20	0,14	0,15	7,0
21	0,14	0,15	1,5
22	0,12	0,14	13,0
23	0,12	0,13	2,3
24	0,12	0,13	4,5
25	0,1	0,13	24,8
26	0,1	0,11	8,7
27	0,1	0,1	0,2
AR			243,0
ARR			9,0

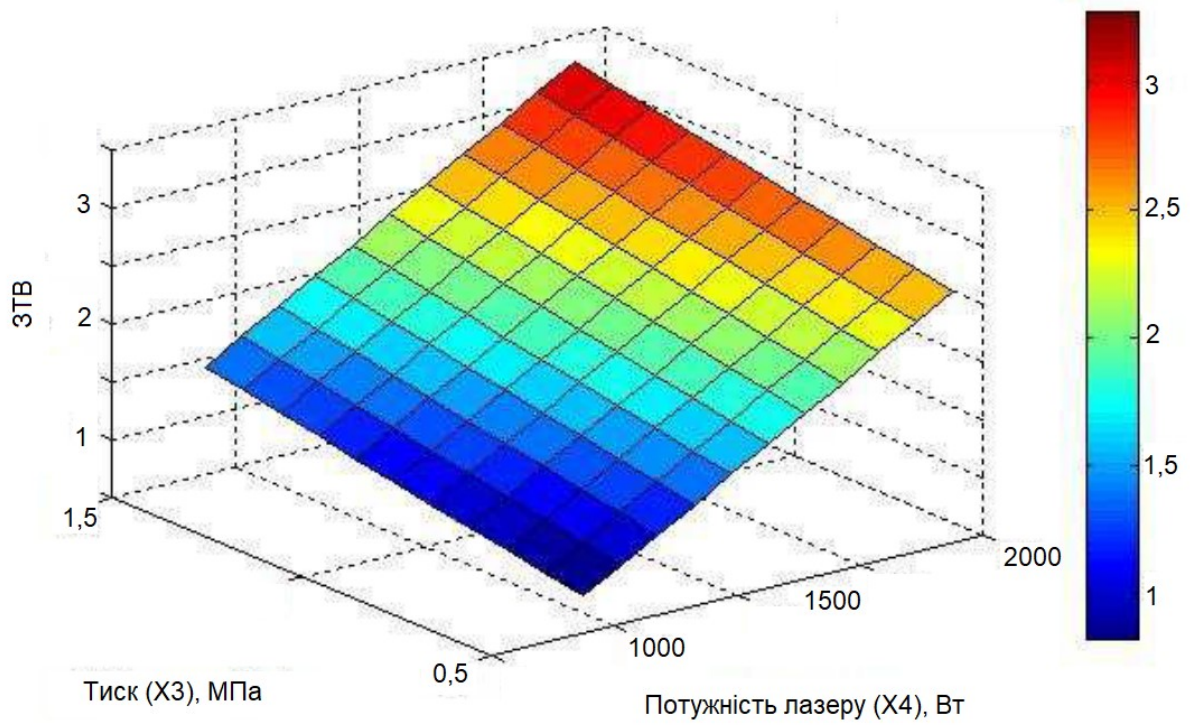


Рисунок 4.30 – ЗТВ при зміні тиску та потужності лазеру  
(частота 75 Гц, швидкість різання 20 см/хв)

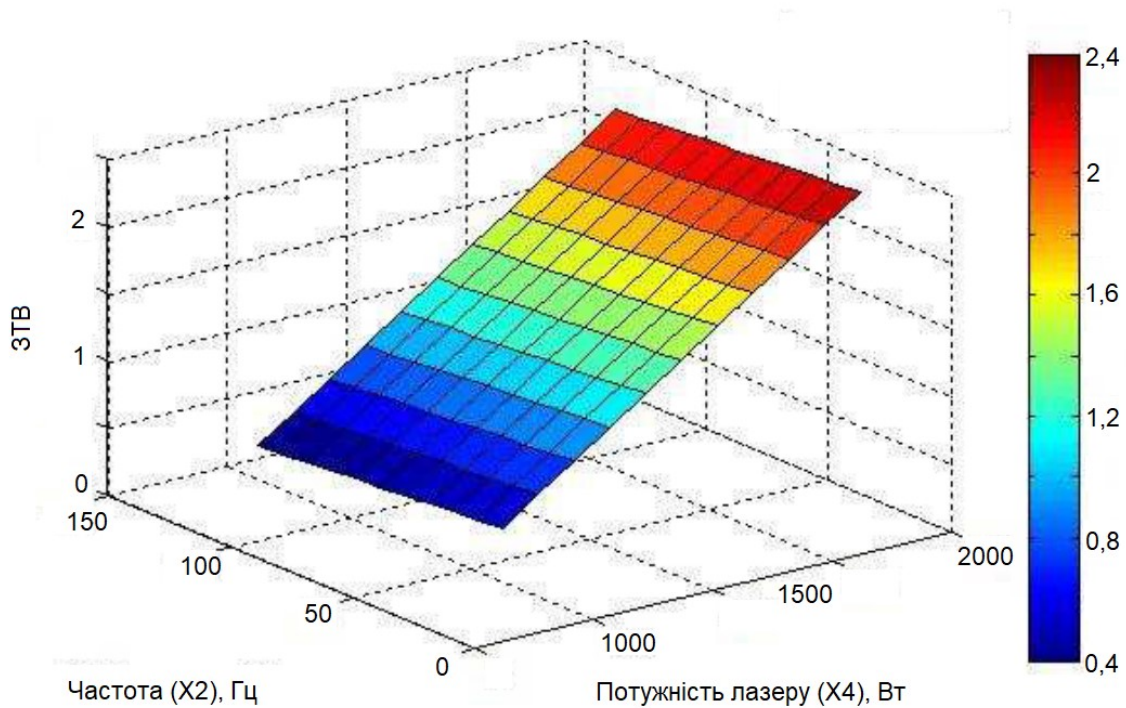


Рисунок 4.31 – ЗТВ при зміні частоти та потужності лазеру  
(тиск 1 МПа, швидкість різання 20 см/хв)

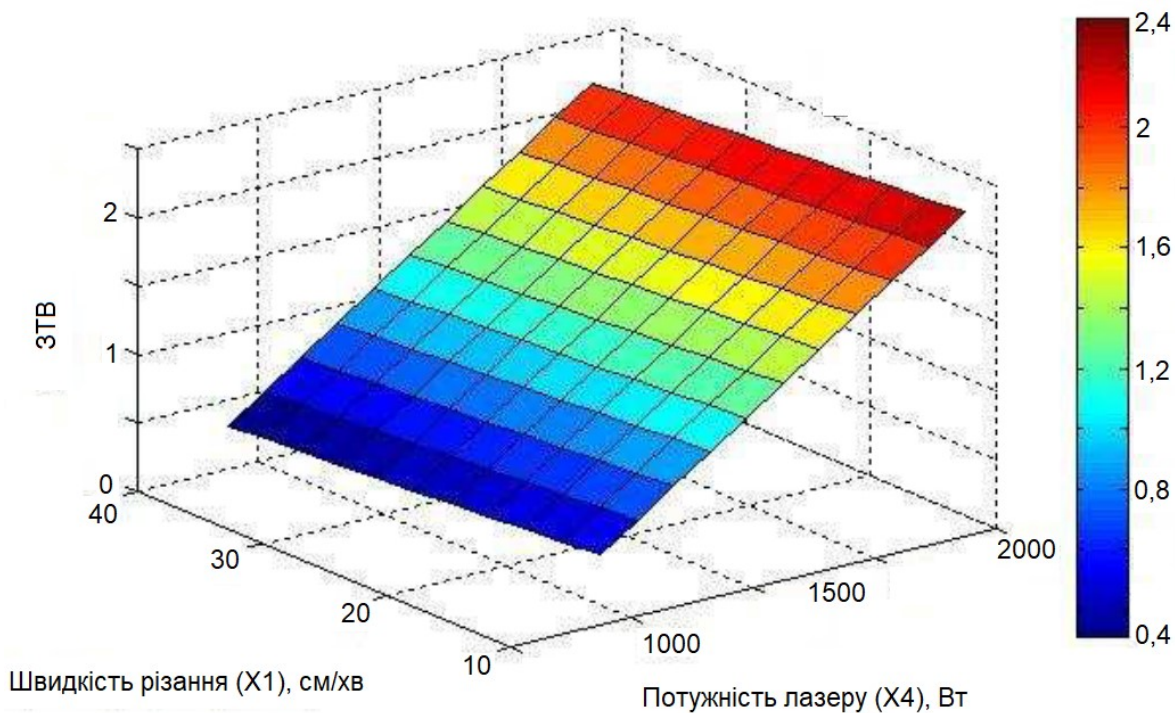


Рисунок 4.32 – ЗТВ при зміні швидкості різання та потужності лазеру  
(тиск 1 МПа, частота 75 Гц)

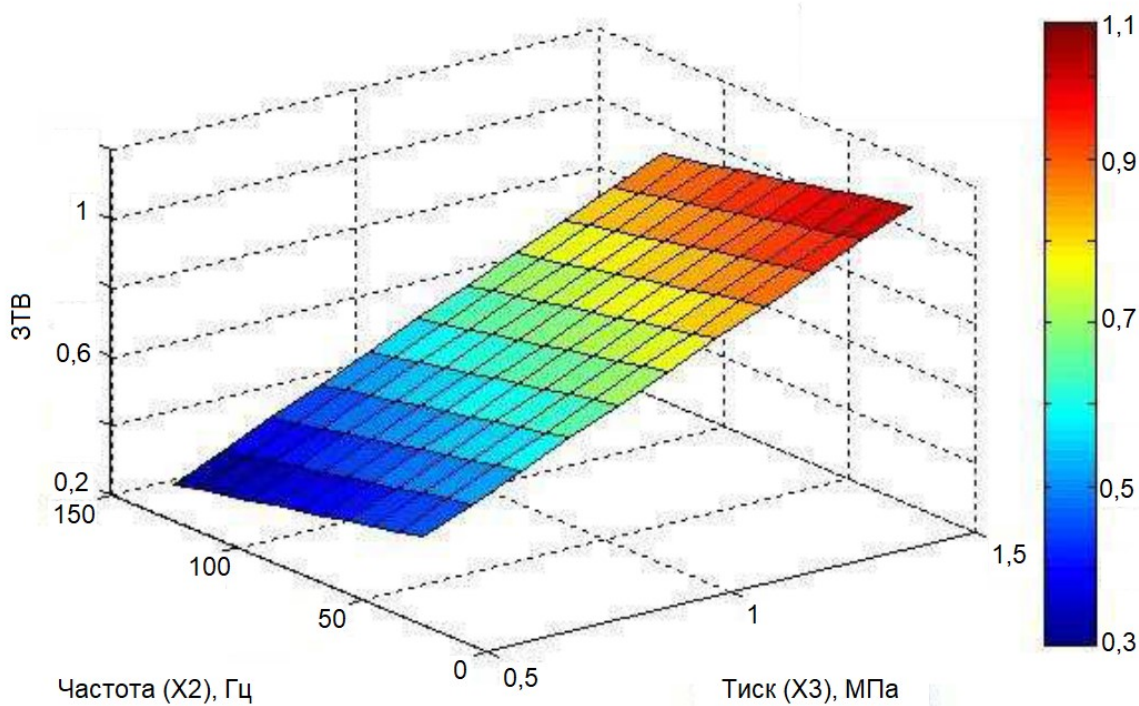


Рисунок 4.33 – ЗТВ при зміні частоти та тиску  
(потужність лазера 1500 Вт, швидкість різання 20 см/хв)

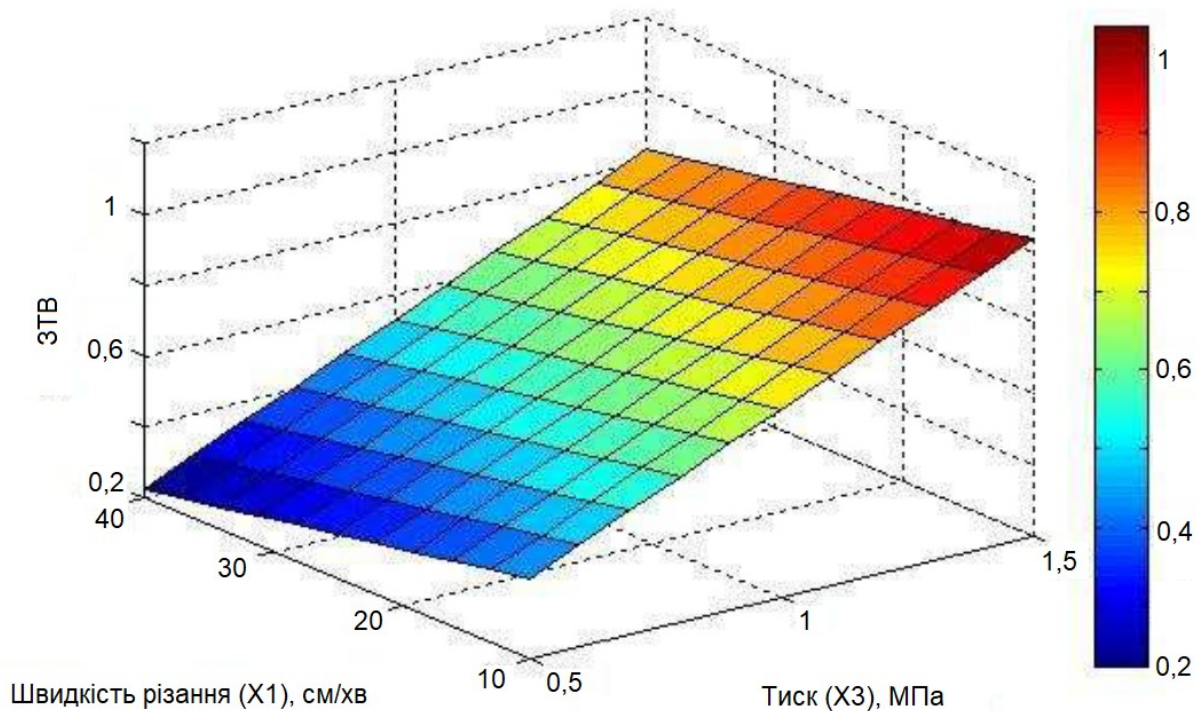


Рисунок 4.34 – ЗТВ при зміні швидкості різання та тиску  
(потужність лазера 1500 Вт, частота 75 Гц)

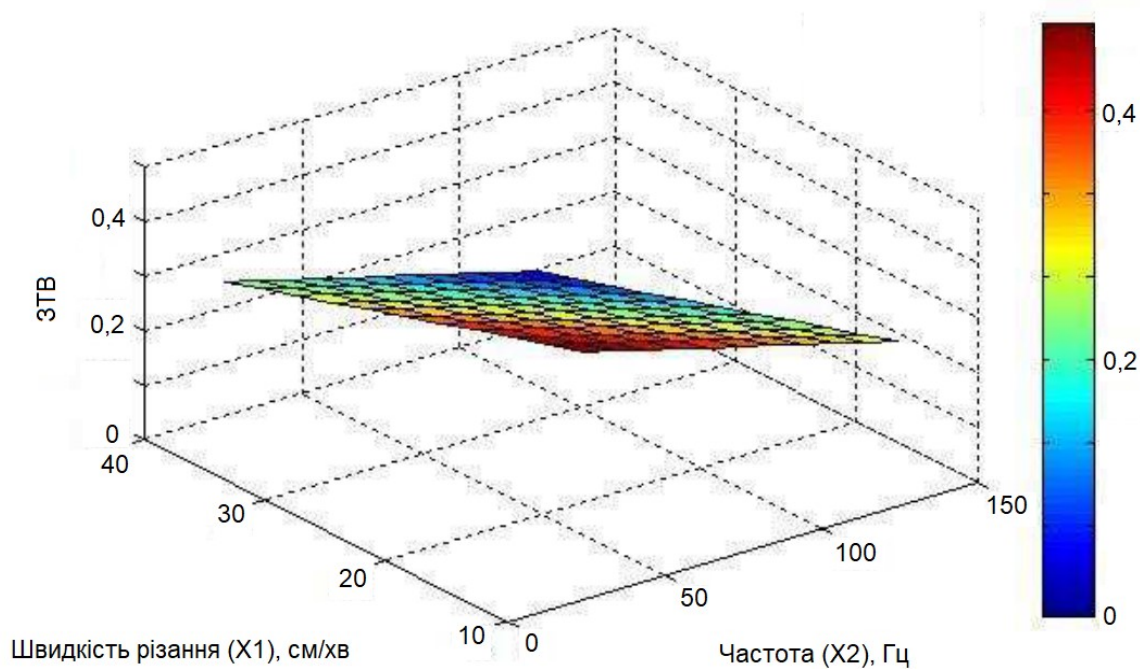


Рисунок 4.35 – ЗТВ при зміні швидкості різання та частоти  
(потужність лазера 1500 Вт, тиск 1 МПа)

Провівши аналіз отриманих результатів зменшення зони термічного впливу поверхні прорізу за MOM за середнім значенням, можна зробити висновок, що найменша ЗТВ досягається при наступних режимах різання:

- потужність лазеру 1000 Вт;
- тиск газу 0,5 МПа.

Слід відзначити, що швидкість різання та частота майже не мають впливу на ЗТВ.

#### 4.6 Визначення оптимальних параметрів лазерного різання

В розділах 4.3-4.5 було проведено аналіз впливу кожної контрольної змінної (тиск газу, швидкість різання, потужність лазеру та частота) в процесі лазерного різання на змінні відгуку (середня шорсткість поверхні, конусність прорізу та зона термічного впливу) за методом ортогональних масивів.

Для кожної окремої змінної відгуку було встановлено оптимальні параметри лазерного різання. У табл. 4.8 наведено зведені дані по кожному окремому параметру різання та оптимальні значення.

Таблиця 4.8 – Оптимальні параметри різання

Контрольні змінні (X)	Змінні відгуку (Y)			Оптимальний параметр різання
	Конусність	Середня шорсткість	ЗТВ	
Швидкість різання X1, см/хв	40	-	-	40
Частота X2, Гц	100	25	-	25
Тиск газу X3, МПа	0,5	0,5	0,5	0,5

Потужність лазера X4, Вт	1000	1000	1000	1000
-----------------------------	------	------	------	------

Як видно з табл. 4.8, для всіх змінних відгуку найбільш оптимальною буде контрольна змінна X4, яка відповідає потужності лазера, на рівні 1000 Вт. Аналогічно для всіх змінних відгуку найбільш оптимальним значенням контрольної змінної X3, яка відповідає за тиск газу, є 0,5 МПа.

У випадку із швидкістю різання, вона має незначний вплив на параметр середньої шорсткості поверхні та ЗТВ, тому для цих змінних відгуку нею можна нехтувати. Тому оптимальним значенням приймається значення, при якому найкращий показник конусності прорізу, тобто контрольна змінна X1, яка відповідає швидкості різання, на рівні 40 см/хв.

Основна і єдина розбіжність наявна для контрольної змінної X2, яка відповідає частоті обробки лазером. Ця контрольна змінна має незначний вплив на ЗТВ, тому для цієї змінної відгуку нею можна нехтувати. Для змінних відгуку конусності та середньої шорсткості поверхні вона становить 100 та 25 Гц відповідно, тобто максимальне та мінімальне значення, при яких проводились експериментальні дослідження.

У випадку такої відмінності в методі ортогональних масивів існує правило, що приймається значення для тієї моделі, якій характерна вища середня точність. Середня точність конусності за середнім значенням становить 84,71% (табл. 4.5), а для середньої шорсткості (табл. 4.6) – 96%. Тому приймається значення для змінної відгуку, яка відповідає середній шорсткості, тобто 25 Гц.

## 5 ОХОРОНА ПРАЦІ

### 5.1 Правила безпеки при роботі на лазерних установках

Безпека роботи із лазерним обладнанням регламентується відповідною інструкцією з охорони праці [9]. В цій інструкції наведені принципи дії лазерів та основні положення щодо безпечної роботи із лазерами.

До роботи із лазерним обладнанням (ЛО) допускаються лише ті особи, які досягли повноліття, пройшли медичний огляд, за результатами якого було встановлено можливість допустити особу до роботи із ЛО. Крім того, такі особи повинні пройти відповідний інструктаж на робочому місці, а також здати іспит з правил техніки безпеки. До роботи із ЛО допускаються лише особи, кВАліфікаційна група яких не нижче III.

При роботі на ЛО необхідно додержуватися правил внутрішнього розпорядку. Суворо заборонено залишати обладнання без нагляду, а також споживати спиртні напої та палити на робочому місці.

Устаткування та установка повинні бути закріплені за відповідальною особою, у посадові обов'язки якої входить відповідальність за технічний стан та гарантування безпечної роботи із ЛО.

Всі створені та придбані установки із ЛО необхідно представляти інституту із охорони праці та техногенної безпеки. Цей інститут приймає відповідне ЛО та видає дозвіл за встановленим зразком на право експлуатації лазерного обладнання.

На працівників, які працюють із ЛО, діє ряд шкідливих та небезпечних виробничих факторів, які залежать, в першу чергу, від конструкції лазера. До таких факторів відносяться:

- висока напруга;
- лазерне випромінювання, яке може бути відбитим, прямим або розсіяним;
- електромагнітні поля;

– токсичні і агресивні сполуки, які є конструктивними елементами лазерів;

- світлове випромінювання;
- іонізуюче випромінювання;
- ультрафіолетове випромінювання;
- видалення тепла від нагрітих поверхонь та устаткування;
- інфрачервоне випромінювання.

Безпека в робочому приміщенні, де використовується ЛО, повинна бути забезпечена наявністю ряду відповідного обладнання, а саме:

- укомплектованої аптечки для надання першої медичної допомоги;
- засоби первинного пожежогасіння (рекомендується використання вуглекислотного вогнегасника);
- діелектричні коврики поблизу щитка та пульта керування (рис. 5.1, а);
- діелектричні рукавиці (рис. 5.1, б);
- предмети санітарної гігієни (рушник, умивальник, мило);
- захисні окуляри із фільтрами (рис. 5.1, в);
- заземлювачі (рис. 5.1, г).

В робочому приміщенні, де розміщене ЛО, при роботі установки обов'язково повинно знаходитись не менше двох осіб одночасно. Самостійна робота із ЛО категорично забороняється.

На входній двері у приміщення із ЛО і на самому устаткуванні із лазером обов'язково повинні знаходитись знаки небезпеки «Лазерна небезпека» (рис. 5.2). Ставляться вимоги і до внутрішньої відділки стін приміщення, яка повинна обов'язково мати світлопоглинаючу поверхню. За умови використання лазерів 3 та 4 класу на дверях приміщення обов'язково повинен висіти знак «Стороннім вхід заборонено», а двері повинні мати внутрішні замки.

Першим і певно головним правилом безпечної роботи із лазером є правило ніколи не дивитись на лазерний промінь. Довжина хвалі лазерного випромінювання впливає на потенційні місця пошкодження очей працівника.

При роботі із ЛО кожен працівник повинен мати захисні окуляри (рис. 5.1, в). Такі окуляри необхідно використовувати навіть при роботі із слабкими лазерами, випромінювання яких становить 15 мВт.



а)



б)



в)



г)

Рисунок 5.1 – Обов'язкові елементи для безпеки працівників при роботі із лазерним обладнанням:

а – діелектричний коврик; б – діелектричні рукавиці; в – захисні окуляри;

г - заземлювачі



Рисунок 5.2 – Знак «Лазерна небезпека»

Ступінь захисту окулярів вимірюється в показнику, який має назву оптична щільність і позначається OD. Цей показник показує, у скільки разів захисні окуляри послаблюють вплив світла на очі працівника. Якщо OD становить 1, то це означає, що окуляри захищають в 10 разів. В свою чергу, оптична щільність 3 означає послаблення впливу світла у 1000 разів, а OD6 – у мільйон разів.

Окуляри необхідно підбирати в залежності від лазера, який використовується. Правильним OD буде таке значення, при якому у випадку прямого попадання лазера на площину окулярів залишається потужність, що відповідає 2 класу і становить максимум 1 мВт.

## 5.2 Розрахунок штучного освітлення у приміщенні, де використовується лазерне обладнання

Оскільки робота із лазером передбачає виникнення світлового випромінювання від обладнання, то у приміщенні, де використовується ЛО необхідно правильно і точно провести розрахунок штучного освітлення.

Розрахунок загального рівномірного штучного освітлення регламентується «ДБН В.2.5-28:2018 Природне і штучне освітлення» [12]. При розрахунку використовується метод коефіцієнту світлового потоку, який розраховується за формулою:

$$F = \frac{Z \cdot S \cdot K \cdot E}{\eta}, \quad (5.1)$$

де  $\eta$  – коефіцієнт світлового потоку, %;

$S$  – площа приміщення, м<sup>2</sup>;

$F$  – загальний світловий потік в приміщенні, Лм;

$Z$  – відношення середнього значення освітленості в приміщення до мінімального;

$E$  – нормована освітленість в приміщенні за ДБН В. 2.5-28:2018, лк.

Для виробничих приміщень із розрядом зорових робіт I-III класу нормована освітленість на поверхні робочого місця становить 400 люкс.

Приміщення, де встановлене ЛО має наступні розміри:

- довжина 30 м;
- ширина 20 м;
- висота стелі 2,8 м.

Для визначення коефіцієнту світлового потоку спочатку необхідно розрахувати індекс приміщенні  $I$ , який залежить від висоти зависання світильника. У приміщенні використовуються світильники ЛПОЗ4 (рис. 5.3). В цьому світильнику розміщується три люмінесцентні лампи, а висота світильника становить 321 мм. Висота робочої поверхні становить 0,8 м. Тоді висота зависання світильника становить:

$$H_p = H - h_{pn} - h_z = 2,8 - 0,35 - 0,8 = 1,65 \text{ м} \quad (5.2)$$

де  $h_{pn}$  – висота робочої поверхні, м;

$h_z$  – висота світильника, м;

$H$  – висота приміщення, м.



### Рисунок 5.3 – Світильник ЛПО34

На основі отриманого значення можемо розрахувати індекс приміщення:

$$I = \frac{S}{H_p(A+B)} = \frac{20 \cdot 30}{1,65(20+30)} = \frac{600}{1,65 \cdot 50} = 7,27 \quad (5.3)$$

де  $B$  і  $A$  – ширина і довжина приміщення відповідно, м;

$S$  – площа приміщення, м<sup>2</sup>;

$H_p$  – висота зависання світильника над робочою поверхнею, м.

На основі отриманого індексу приміщення необхідно обрати за табл. 5.1 коефіцієнт використання світлового потоку. Як видно з табл. 5.1, він залежить від типу світильника та коефіцієнтів відбиття стін, підлоги та стелі. У приміщенні ці коефіцієнти становлять 50, 30 та 70% відповідно. Тоді, за табл. 5.1,  $\eta = 75\%$ .

Таблиця 5.1 – Значення коефіцієнту світлового потоку

Світильник	ЛПО13, ЛПО34, ОД						ЛСП01, ЛСП				
	70		30		50		30	70			
<i>Р<sub>під.</sub></i> , %	50		30		50	30	10	50		30	
<i>Р<sub>стін.</sub></i> , %	30	10	30	10	10		10	30	10	30	10
<i>Р<sub>стелі.</sub></i> , %	Коефіцієнт використання $\eta$ , %										
Індекс $I$	26	25	20	19	17	13	6	19	18	15	14
0,5	30	28	24	23	20	16	8	24	22	18	18
0,6	34	32	28	27	22	19	10	27	26	22	21
0,7	38	36	31	30	24	21	11	31	29	25	25
0,8	40	38	34	33	26	23	12	34	32	28	28
0,9	43	41	37	35	28	25	13	37	35	32	30
1,0	46	43	39	37	30	26	14	40	37	34	33
1,1	49	46	42	40	32	28	15	43	41	38	36
1,25	54	49	47	44	34	31	17	48	44	42	40
1,5	57	52	51	47	36	33	18	52	48	46	43
1,75	60	54	54	50	38	35	19	55	50	50	46
2,0	62	56	57	52	39	37	20	58	52	53	49
2,25	64	58	59	54	40	38	21	60	54	55	51

Тоді загальний світловий потік в приміщенні буде становити:

$$F = \frac{EKSZ}{\eta} = \frac{400*1,5*600*1,1}{0,75} = 528000 \quad (5.4)$$

Розрахунковий світловий потік за ДБН дозволяється змінювати в межах від -10% до +20%. Тоді межі світлового потоку в приміщенні, де встановлено ЛО, становлять:

$$528000 * 0,9 \dots 528000 * 1,2 = 475200 \dots 633600 \text{ Лм} \quad (5.5)$$

Приймаємо розрахункове значення світлового потоку на рівні 510 тис. люменів.

Розрахунок штучного освітлення буде проводитись за умови використання люмінісцентних ламп ЛД80, світловий потік якої становить 4250 Лм. Тоді кількість ламп у приміщенні, де встановлено ЛО:

$$N_{\text{лампи}} = F_{\text{заг}} / F_{\text{лампи}} = 510000/4250 = 120 \text{ штук} \quad (5.6)$$

Оскільки в кожному світильнику ЛПО34 розміщується три люмінісцентні лампи, то кількість світильників в приміщенні становить:

$$N_{\text{світильників}} = 120/3 = 40 \text{ штук} \quad (5.7)$$

Схема розміщення світильників у виробничому цеху, де відбувається процес лазерного різання, наведена на рис. 5.4.

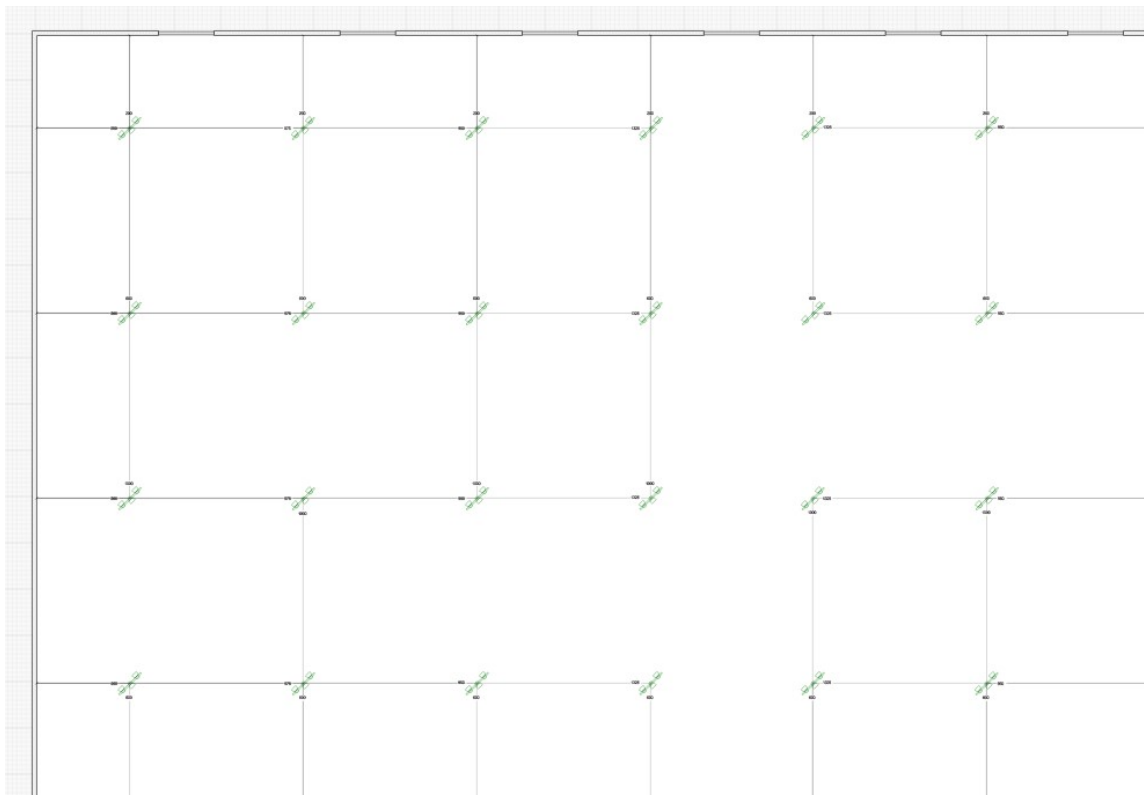


Рисунок 5.4 – Схема розміщення світильників

Відстань від світильників до стін становить 200 мм. Відстань між світильниками становить 345 мм по довжині і 400 мм по ширині приміщення.

## ВИСНОВКИ

В роботі було проведено можливість використання методу ортогональних масивів в якості інструменту для оптимізації параметрів лазерного різання нержавіючої сталі. Була використана математична модель, за якою було розраховано прогнозовані значення змінних відгуку (конусності прорізу, середньої шорсткості поверхні та зони термічного впливу). Ці прогнозовані значення порівнювались із фактично отриманими значеннями в ході експериментальних досліджень. Було встановлено незначне відхилення значень, тобто використання методу ортогональних масивів надає достовірні результати.

В методі ортогональних масивів існує три принципові підходи визначення змінних відгуку – за варіативним співвідношенням, за середньоквадратичним значенням та за середнім значенням. При оцінці кожного із підходів та порівнянні із фактично отриманими в результаті експерименту було встановлено, що найбільшу точність (85% і більше) надає розрахунок змінних відгуку за середнім значенням.

Подальший етап обробки даних, отриманих за методом ортогональних масивів був оброблений і представлений у вигляді тривимірних графіків зміни параметрів нержавіючої сталі 08X16N11M3 (змінних відгуку). За результатами графічного представлення розрахункових значень було встановлено оптимальні параметри лазерного різання, а саме:

- швидкість різання 40 см/хв;
- потужність лазеру 1000 Вт;
- частота 25 Гц;
- тиск газу 0,5 МПа.

Також в роботі розглядалось питання забезпечення належного освітлення у приміщеннях, в яких встановлюється лазерне обладнання. Наведено основні положення стосовно безпеки роботи із лазерами, а також підібрано засоби індивідуального захисту.

Практичного застосування результати дипломної роботи можуть отримати на виробництвах, які виконують лазерне різання деталей із нержавіючої сталі.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Bendell A. Taguchi Methods / A. Bendell – Springer Dordrecht. – 2009. – 212 p.
2. Myers R.H. Response Surface Methodology: Process and Product Optimization Using Designed Experiments / R.H. Myers, Montgomery D.C., Anderson-Cook C.M. – Wiley. – 2016. – 1722 p.
3. Roy K.R. Design of Experiments Using the Taguchi Approach: 16 Steps to Product and Process Improvement / K.R. Roy. - Wiley-Interscience. – 2001. – 560 p.
4. Верстат HGstar Smart3015. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.hg-star.com/ru/budget-laser-cutting-machine/> (дата звернення 18.09.2023)
5. Види обробки нержавіючої сталі. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://westa.kiev.ua/ua/vidy-obrabotki-nerzhaveushej-stali> (дата звернення 16.09.2023)
6. Геворкян Е.С. Інтегровані технології обробки матеріалів [Текст]: підручник / Е.С. Геворкян, Л.А. Тимофеева, В.П. Нерубацький та ін. – Харків: УкрДУЗТ, 2016. – 238 с.
7. Головка Л.Ф. Технологія лазерної поверхневої обробки матеріалів. / Л.Ф. Головка. – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://lftf.kpi.ua/documents/PLPO/PLPO-lec.pdf> (дата звернення 11.09.2023)
8. ДБН В.2.5-28:2018 Природне і штучне освітлення. – Київ, Мінрегіон України. – 2018. – 137 с.
9. Інструкція з охорони праці при роботі на лазерних установках. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://kukh.ho.ua/kurs/LO/LIT/pb.pdf> (дата звернення 25.11.2023)
10. Ковальова О.О. Методичні вказівки до виконання практичних робіт з дисципліни «Планування і обробка результатів експерименту» (для студентів 5 курсу денної форми навчання за спеціальностями 8.06010302 «Раціональне

використання і охорона водних ресурсів», 8.06010108 «Водопостачання та водовідведення») / Харк. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова; уклад.: О. О. Ковальова. – Х.: ХНУМГ, 2014. – 74 с.

11. Назаренко Л.А. Конспект лекцій з курсу «Планування і обробка результатів експерименту» (для студентів денної і заочної форм навчання спеціальності 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка) / Харків. нац. унт міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова ; уклад. : Л. А. Назаренко. – Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2018. – 163 с.

12. НПАОП 28.5-1.02.-07. Правила охорони праці при термічній обробці металів. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: [https://dnaop.com/html/32418\\_13.html](https://dnaop.com/html/32418_13.html) (дата звернення 25.11.2023)

13. Одарченко А.М. Управління якістю товарів: навч. посібник / А. М. Одарченко, Д. М. Одарченко, М. С. Одарченко, О. О. Лісніченко, Я. М. Черненко. – Х. : ХДУХТ, 2018. – 270 с.

14. Особливості лазерного різання металопрокату. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://kt-stal.com.ua/osobennosti-lazernoy-rezki-metallor> (дата звернення 12.09.2023)

15. Павленко П.М. Математичне моделювання систем і процесів: навч. посіб. / П.М. Павленко, С.Ф. Філоненко, О.М. Чередніков, В.В. Трейтук – К. : НАУ, 2017. – 392 с.

16. Пупань Л.І. Лазерні технології у машинобудуванні: навч. посібник для студентів спеціальності «Прикладна механіка» денної, заочної та дистанційної форм навчання / Л. І. Пупань. – Харків: НТУ «ХП», 2020. – 109 с.

17. Романенко, В. Конструктивні та технологічні вдосконалення процесу лазерної різки металів / В. Романенко, М. Блощин, І. Жегет, Ю. Юрченко Ю // Технічні науки та технології. - 2022. - № 4 (30). - С. 71-79.

18. Статюха Г.О. Вступ до планування оптимального експерименту: Навч. посібн. для студ. спец. 092502 – Комп'ютерно-інтегровані технологічні процеси і виробництва / Уклад.: Г.О. Статюха, Д.М. Складанний, О.С. Бонаренко – К.: ІВЦ «Політехніка», 2011. – 117 с.

19. Тестер Walcom SRT-6210. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://simvolt.ua/tester-shorstkost-poverhn-walcom-srt-6210-ua.html/> (дата звернення 01.10.2023)

20. Характеристики матеріалу 08X16H11M3. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: [http://www.splav-kharkov.com/mat\\_start.php?name\\_id=48](http://www.splav-kharkov.com/mat_start.php?name_id=48) (дата звернення 16.09.2023)

21. Шайба стопорна. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://bolt.ua/%D1%88%D0%B0%D0%B9%D0%B1%D1%8B-%D1%88%D0%B0%D0%B9%D0%B1%D0%B0-%D1%81%D1%82%D0%BE%D0%BF%D0%BE%D1%80%D0%BD%D0%B0%D1%8F-din-6798-a-%D0%BA%D1%83%D0%BF%D0%B8%D1%82%D1%8C-%D1%88%D0%B0%D0%B9%D0%B1%D1%8B> (дата звернення – 24.09.2023)

22. Шевченко І.А. Стандарти якості та сертифікація продукції: навчальний посібник для здобувачів ступеня вищої освіти магістра спеціальності 133 «Галузеве машинобудування» освітньо-професійної програми «Металургійне обладнання» / І.А. Шевченко, Т.О. Васильченко, А.О. Власов. - Запоріжжя : ЗНУ. - 2020. - 136 с.

## ДОДАТКИ

№ рядка	Формат	Позначення	Найменування	Кількість	Примітка
1			Документація загальна		
2					
3					
4	A4	ДРМ.ФІТА.23.00.00 ПЗ	Розрахунково-пояснювальна записка		
5	A1	ДРМ.ФІТА.23.01.01.00	Характеристики деталей	1	
6	A1	ДРМ.ФІТА.23.01.02.00	Верстат Smart3015	1	
7	A1	ДРМ. ФІТА.23.02.01.00	Методологія проведення дослідження	1	
8	A1	ДРМ.ФІТА.23.03.01.00	Досліджуваний зразок	1	
9	A1	ДРМ.ФІТА.23.04.01.02	Математична модель	1	
9	A1	ДРМ.ФІТА.23.04.02.00	Відхилення геометричної форми	1	
10	A1	ДРМ.ФІТА.23.04.03.00	Шорсткість поверхні	1	
11	A1	ДРМ.ФІТА.23.04.04.00	Зона термічного впливу	1	
12					
13					

					ДРМ.ФІТА.23.00.00ПЗ			
Зм.	Арк	№ докум.	Підпис	Дата				
Розробив.		Клясний Н.С.			Відомість роботи	Літера	Аркуш	Аркушів
Перевірив		Соколан К.С.					4	86
Н. Контр.		Бись С.С.			ХНУ ПМТМ-22-97			
Затвердив		Ткачук В.П.						

