

СОКОЛАН ЮЛІЯ

Хмельницький національний університет

<https://orcid.org/0000-0002-0273-5719>e-mail: sokolan.julia@gmail.com

КЛЯСНИЙ НАЗАРІЙ

Хмельницький національний університет

e-mail: toha18501@gmail.com

СОКОЛАН КАТЕРИНА

Хмельницький національний університет

<https://orcid.org/0000-0002-3513-8312>e-mail: sokolan.kateryna@gmail.com

ОПТИМІЗАЦІЯ РЕЖИМІВ ЛАЗЕРНОГО РІЗАННЯ НЕРЖАВІЮЧОЇ СТАЛІ МЕТОДОМ ТАГУЧІ

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 максимізація 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.

Механічна обробка нержавіючої сталі пов'язана із рядом складнощів, які, в свою чергу, обумовлені властивостями матеріалу. Тому одним із найбільш ефективних методів обробки нержавіючої сталі є лазерне різання. Якість виготовлених деталей нерозривно пов'язана із режимами різання.

У роботі розглядається оптимізація режимів лазерного різання нержавіючої сталі методом Тагучі. Проведено дослідження таких параметрів прорізу, як шорсткість, зона термічного впливу та відхилення геометричної форми. Дослідження проводились на верстаті лазерного різання Smart 3015. Встановлено контрольні змінні лазерного різання за методом Тагучі та їх вплив на змінні відгуку.

За результатами проведених досліджень встановлено, що найменші відхилення геометричної форми, зона термічного впливу та шорсткість поверхні досягаються при швидкості лазера 40 см/хв, потужності лазера 1000 Вт, частоті 50 Гц та тиску газу 0,5 МПа. Крім того, встановлено відсотковий вплив кожного із параметрів різання на змінні відгуку. Дослідження за методом Тагучі показало, що 80-90% впливу має саме потужність лазера.

Ключові слова: лазерне різання, режими лазерного різання, ортогональний масив, метод Тагучі, нержавіюча сталь, шорсткість, відхилення геометричної форми, зона термічного впливу.

SOKOLAN IULIA, KLYASNYI NAZARIY, SOKOLAN KATERYNA
Khmelnytskyi National University

OPTIMISATION OF LASER CUTTING MODES OF STAINLESS STEEL BY THE TAGUCHI METHOD

Today, laser cutting is widely used in the automotive, shipbuilding and other industries where aluminium, low-alloy and stainless steel are cut. The choice of a laser system for a cutting process is heavily influenced by criteria such as achieving high cutting speeds and maximising production productivity, which can help to achieve high quality cuts and eliminate the need for rework. Increasing the efficiency of the laser cutting process, as well as its flexibility and quality, can reduce production costs.

Machining stainless steel is associated with a number of difficulties, which, in turn, are caused by the material's properties. That is why laser cutting is one of the most effective methods of processing stainless steel. The quality of manufactured parts is inextricably linked to cutting modes.

The paper envisages the optimisation of stainless steel laser cutting modes using the Taguchi method. Such parameters of the cut as roughness, heat affected zone, and geometric shape deviation were studied. The studies were carried out on a Smart 3015 laser cutting machine. The control variables of laser cutting according to the Taguchi method and their influence on the response variables were determined.

According to the results of the studies, it was found that the smallest deviations in geometric shape, thermal impact zone, and surface roughness are achieved at a laser speed of 40 cm/min, laser power of 1000 W, frequency of 50 Hz, and gas pressure of 0.5 MPa. In addition, the percentage effect of each cutting parameter on the response variables was determined. A study using the Taguchi method showed that 80-90% of the influence is exerted by the laser power.

Keywords: laser cutting, laser cutting modes, orthogonal array, Taguchi method, stainless steel, roughness, geometric shape deviation, heat affected zone.

Постановка проблеми

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 [1].

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.

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 [2].

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 дослідження є оптимізація таких параметрів лазерного різання, як частота та потужність лазера, швидкість різання і тиск газу із застосуванням методу Тагучі.

Виклад основного матеріалу

Метод Тагучі – це статистичні методи, метою яких є поліпшення якості виготовлених деталей. 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 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.

В узагальненому процедура застосування методу Тагучі наведена на рис. 1. За методом Тагучі проводиться оцінка середньої продуктивності шляхом перетинання двох масивів: зовнішнього масиву, який створений для змінних шуму та внутрішнього масиву, який створений на основі контрольних змінних. Функція втрат в основному застосовується для вимірювання втрати якості, яка може бути пов'язана із відхиленням від цільового значення продуктивності і має вигляд:

$$L(y) = k \cdot (y - T)^2, \quad (1)$$

де $L(y)$ – значення функції втрат; y – показник якості, який вимірюється; k – коефіцієнт масштабу; T – номінальне значення показника якості.

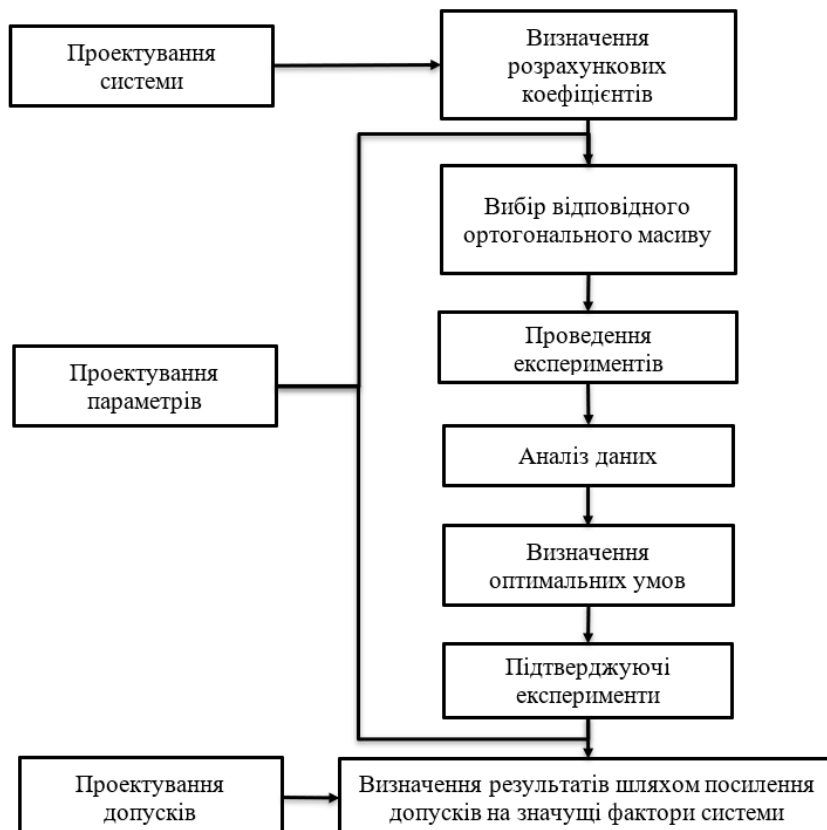


Рис.1 – Етапи дослідження за методом Тагучі

За методом Тагучі значення усереднених показників розраховується за формулою 2, середньоквадратичне відхилення – за формулою 3, а реакції відгуку – за формулою 4.

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

$$L(y) = \log\left(\frac{\sum y^2}{n}\right), \quad (3)$$

$$L(y) = \log\left(\frac{y^2}{s^2 y}\right), \quad (4)$$

де n – кількість проведених досліджень; y – результати відповідних змінних відгуку; $s^2 y$ – дисперсія показника y .

Для отримання експериментальних результатів використовувався верстат Smart 3015. Дослідження проводились для процесу лазерного різання деталей із товстолистового металу.

Параметрами досліджень за методом Тагучі були обрані зона термічного впливу (ЗТВ), середня шорсткість поверхні (R_a) та глибина прорізу (t_a). В якості контрольних змін за методом Тагучі було обрані швидкість різання (см/хв), потужність лазера (Вт), тиск газу (МПа) та частота лазера (Гц). Наведені фактори

за методом Тагучі будуть використовуватись на трьох рівнях, які наведені у табл. 1. У якості ортогонального масиву було обрано масив типу L27. Цьому масиву характерна наявність 27 рядків, які відповідають кількості проведених експериментів (27 разів).

Експериментальні дослідження проводились на пластинках, виготовлених із матеріалу 08X16H11M3, ширина і довжина яких становили 50 мм, а товщина – 3 мм (рис. 2, а). У пластинках лазером робився розріз, в якому після проведення прорізу вимірювалась ширина прорізу, шорсткість на поверхні прорізу та ЗТВ (рис. 2, б). Результати експериментальних досліджень наведені у табл. 2.

При утворенні прорізу деталі на кромках може утворюватися відхилення геометричної форми, в даному випадку конусність, яка розраховувалась за формулою:

$$K = \frac{(a_{\text{верх}} - a_{\text{низ}}) \cdot 180}{t_{\text{листа}} \cdot 2\pi}, \tag{5}$$

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.

Таблиця 1

Присвоєння рівнів контрольним змінним за методом Тагучі

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

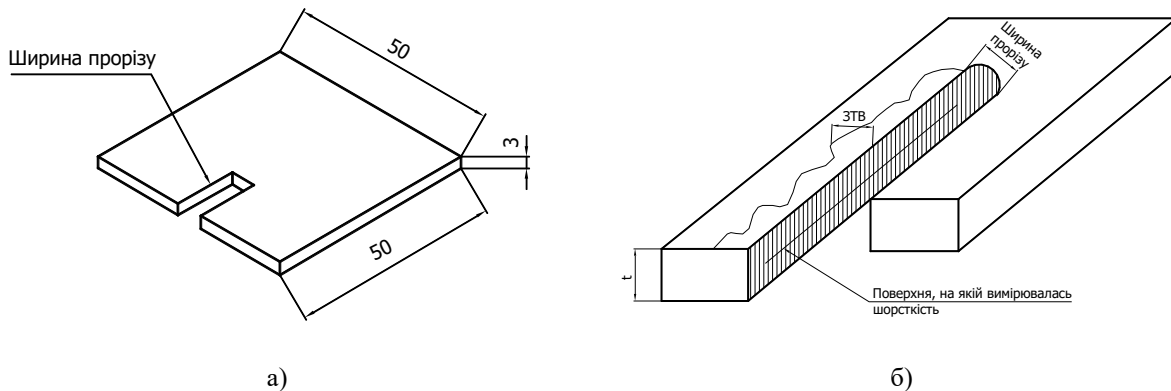


Рис. 2 – Зразок для проведення дослідження: а – розміри зразка; б – вимірювання елементів прорізу

На основі отриманих експериментальних даних за методом Тагучі було побудовано відповідні ортогональні масиви, приклад якого наведений у табл. 3. Змінними виступають швидкість різання (X_1), частота (X_2), тиск газу (X_3) та потужність лазера (X_4). Також досліджується три взаємодії – X_1 та X_4 , X_3 та X_1 , X_1 та X_2 . Після цього отримані експериментальні значення піддавались дисперсійному аналізу, що є обов’язковим етапом використання методу Тагучі [3, 4].

На першому етапі дисперсійного аналізу розраховується варіативне співвідношення (S/N) якісних характеристик процесу лазерного різання. Далі проводиться розрахунок ступеня свободи (позначається DOF). Розрахунок загальної суми квадратів (SS) проводиться за формулою [3]:

$$SS = (\sum y_n) - \frac{T^2}{n}, \tag{6}$$

де n – кількість випробувань; T – сумарне значення варіативного співвідношення; y_n – значення змінної відгуку при експерименті n .

Врахування впливу різних факторів при розрахунку суми квадратів виконується за формулою:

$$SS(X_1) = \frac{x_{13}^2}{9} + \frac{x_{12}^2}{9} + \frac{x_{11}^2}{9} - \frac{T^2}{n}. \tag{7}$$

Врахування похибки при розрахунку суми квадратів розраховується за формулою:

$$SS(\epsilon) = SS - SS(X_1). \tag{8}$$

Розрахунок середнього квадрата, який позначається V виконується за формулою:

$$VV = SS(X_1) - DOF(X_1). \tag{8}$$

Розрахунок значення F виконується за формулою [3]:

$$F = \frac{L_{\text{сер.кв.}}}{SS(\epsilon)}. \tag{9}$$

де $L_{\text{сер.кв.}}$ – середньоквадратичне значення, яке розраховується за формулою 3.

Таблиця 2

Результати експериментальних досліджень визначення відхилення геометричної форми прорізу

Прогін	Середня конусність, К град.	1 рівень	Низ	Верх	2 рівень	Низ	Верх	3 рівень	Низ	Верх
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
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
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

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

$$P(X1) = \frac{SS(X1)}{SS} \cdot 100\% \quad (10)$$

Результати дисперсійного аналізу шорсткості, зони термічного впливу та відхилення геометричної форми прорізу наведені у табл. 3-5. Як видно з табл. 3-5 в процесі лазерного різання найбільший вплив на характеристики шорсткості, конусність прорізу та ЗТВ має параметр X4, який відповідає потужності лазера. Параметр X4 має 80-90% впливу. Близько 10% впливу має параметр X3, який відповідає тиску газу при виконанні лазерного різання нержавіючої сталі.

Для спрощення сприйняття цифрових значень, отриманих в результаті оцінки впливу режимів лазерного різання на характеристики прорізу були побудовані тривимірні графіки, які наведені на рис. 3-5.

Таблиця 3

Дисперсійний аналіз конусності

Параметр різання	Варіативне співвідношення			P	SS	VV	F	DOF
	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 лазера	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

Таблиця 4

Дисперсійний аналіз шорсткості поверхні прорізу

Параметр різання	Варіативне співвідношення			P	SS	VV	F	DOF
	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 лазеру	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

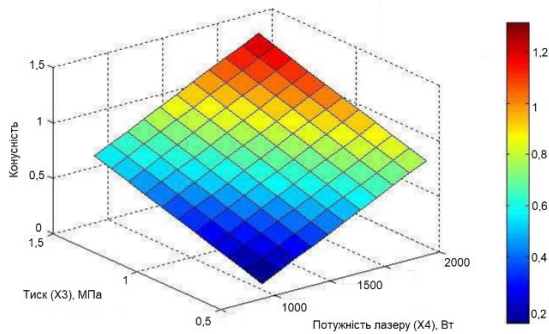


Рис. 3 – Конусність прорізу при зміні потужності лазеру та тиску газу

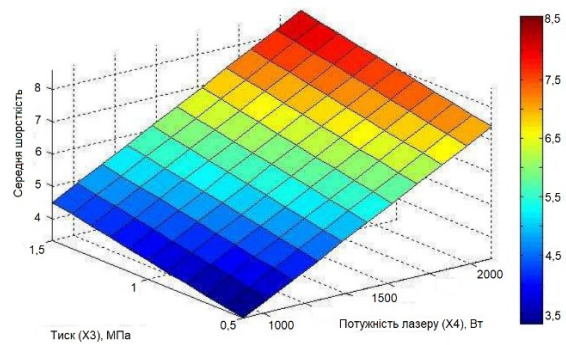


Рис. 4 – Середня шорсткість поверхні прорізу при зміні потужності лазеру та тиску

Таблиця 5

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

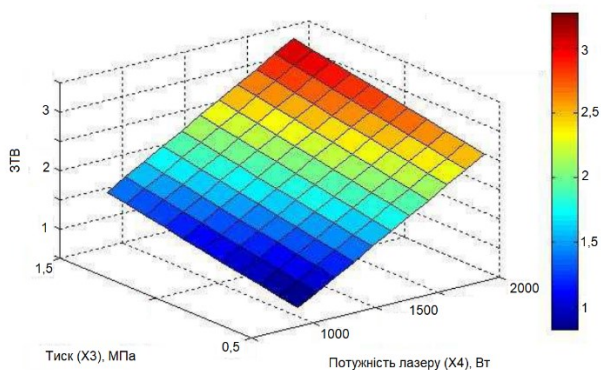


Рис. 5 – Зона термічного впливу при зміні тиску та потужності лазеру

Провівши аналіз отриманих результатів зменшення змінних відгуку (шорсткості поверхні прорізу, відхилення геометричної форми та зона термічного впливу) за методом Тагучі було визначено оптимальні режими різання нержавіючої сталі 08X16N11M3, які наведені в табл. 6.

Як видно з табл. 6, для всіх змінних відгуку найбільш оптимальною буде контрольна змінна X4, яка відповідає потужності лазеру, на рівні 1000 Вт. Аналогічно для всіх змінних відгуку найбільш оптимальним значенням контрольної змінної X3, яка відповідає за тиск газу, є 0,5 МПа.

Таблиця 6

Оптимальні режими різання нержавіючої сталі 08X16Н11М3, визначені методом Тагучі

Контрольні змінні (X)	Змінні відгуку (Y)			Оптимальний параметр різання
	Конусність	Середня шорсткість	ЗТВ	
Швидкість різання X1, см/хв	40	-	-	40
Частота X2, Гц	75	25	-	50
Тиск газу X3, МПа	0,5	0,5	0,5	0,5
Потужність лазеру X4, Вт	1000	1000	1000	1000

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.

Висновки

В роботі було проведено можливість використання методу ортогональних масивів в якості інструменту для оптимізації параметрів лазерного різання нержавіючої сталі 08X16Н11М3. За результатами проведених досліджень було встановлено оптимальні режими лазерного різання, а саме: швидкість різання 40 см/хв, потужність лазеру 1000 Вт, частота 50 Гц, тиск газу 0,5 МПа.

Література

1. 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 «ХПІ», 2020. – 109 с.
2. Види обробки нержавіючої сталі. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://westa.kiev.ua/ua/vidy-obrobotki-nerzhaveushej-stali>
3. Bendell A. Taguchi Methods / A. Bendell – Springer Dordrecht. – 2009. – 212 p.
4. 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.
5. Верстат HGstar Smart3015. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.hg-star.com/ru/budget-laser-cutting-machine/>

References

1. Pupan L.I. Laser technologies in mechanical engineering: a textbook for students of the speciality "Applied Mechanics" of full-time, part-time and distance learning / L.I. Pupan. - Kharkiv: NTU "KhPI", 2020. 109 p.
2. Types of stainless steel processing. [Access mode: <https://westa.kiev.ua/ua/vidy-obrobotki-nerzhaveushej-stali>].
3. Bendell A. Taguchi Methods / A. Bendell - Springer Dordrecht. - 2009. - 212 p.
4. 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.
5. HGstar Smart3015 machine. [Access mode: <https://www.hg-star.com/ru/budget-laser-cutting-machine/>].