

М.В. Романенко^[0009-0006-8803-2278], О.Д. Кагляк^[0000-0002-5602-543X], В.В. Романенко^[0000-0003-1918-7090]*Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»***ОПТИМІЗАЦІЯ ПРОЦЕСУ ГАЗОЛАЗЕРНОГО РІЗАННЯ КОНСТРУКЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ ПОТУЖНИМ ВИПРОМІНЮВАННЯМ ПРИ МОДЕЛЮВАННІ ЗА ПОВНОФАКТОРНИМ ЕКСПЕРИМЕНТОМ**

Розглянуто та вирішено задачу створення спрощених математичних моделей у формі регресійних рівнянь, призначених для визначення оптимальних швидкостей газолазерного різання маловуглецевих і нержавіючих сталей різної товщини при роботі на лазерних установках потужністю до 6 кВт. Аналіз побудованих моделей показав набір факторів, що найбільше впливають на оптимальну швидкість різання таких сталей. Результати розрахунків подано у вигляді таблиці, що дає можливість визначити режими різання листів товщиною від 3 до 12 мм.

Ключові слова: лазер, газолазерне різання, маловуглецева та нержавіюча сталь, оптимальна швидкість різання, математична регресійна модель.

M.V. Romanenko, O.D. Kagliak, V.V. Romanenko

OPTIMIZATION OF THE PROCESS OF GAS LASER CUTTING OF STRUCTURAL MATERIALS WITH POWERFUL RADIATION IN MODELING BY FULL-FACTOR EXPERIMENT

Considered and resolved the problem of creating simplified mathematical models in the form of regression equations used to determine the optimal speeds for gas laser cutting of low-carbon and stainless steels of various thicknesses when operating on laser equipment with a power of up to 6 kW. The aim of the research was to determine the influence of key technological parameters of the gas laser cutting process on the choice of the optimal processing speed for steel sheets with different thicknesses in the conditions of multifactorial experiments. As a result of these experiments, regression mathematical models of the gas laser cutting process for low-carbon and stainless steels were obtained, confirming the possibility of achieving high cutting productivity with simultaneous ensuring of the proper quality of the processed edges. For practical convenience of use, the results of calculations of optimal cutting speeds for low-carbon and stainless steels depending on the studied technological parameters are presented in the form of a table, which makes it possible to quickly and conveniently determine the regimes of gas laser cutting of sheets with a thickness of 3 to 12 mm.

Keywords: laser, gas laser cutting, low-carbon and stainless steel, optimal cutting speed, mathematical regression model.

Постановка проблеми. Попри численні переваги застосування спеціалізованого обладнання, все ж тривають спроби створення та впровадження універсальних інструментів. Одним із можливих рішень є використання одного й того ж лазера в різних технологічних операціях. Попит на багатофункціональний і гнучкий інструмент відкриває для лазерів значні перспективи [1]. Водночас провідні позиції й надалі утримує лазерне різання, на яке припадає 41% застосування лазерного обладнання [2,3].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. В останній час широке застосування отримали волоконні лазери, що відзначаються високою якістю променя та створюють нові можливості обробки, які раніше залишалися недосяжними при роботі з традиційними газовим та твердотільними лазерами. Сьогодні більшість випромінювачів волоконних лазерів працюють як із фіксованими характеристиками променя, так і з використанням зум-оптики чи дорогих фокусуючих головок, що дає можливість компромісних рішень у виробничих процесах, де враховується різноманітність матеріалів, товщин та технологій [4].

У сфері лазерних технологій різання за останні роки спостерігається широке використання потужності лазерних джерел в 2–6 кВт. Це зокрема характерно для продукції відомих виробників, таких як Bystronic, BLM Group, Bodor, Trumpf, Amada, Mazak, Prima Power та інших. Поряд із підвищенням продуктивності зросла і максимальна товщина сталей з 3 до 15 мм, які успішно розрізаються такими лазерами, що досить важливо, адже на такий діапазон товщин припадає основний обсяг металообробки. Лазерне різання, яке довгий час займало провідні позиції лише в сегменті тонких листів, нині активно витісняє плазмове різання у сфері середніх товщин. Водночас зі збільшенням швидкості різання особливої актуальності набуває автоматизація допоміжних процесів: завантаження й розвантаження, зберігання заготовок та готових деталей. При цьому важливо, щоб продуктивність лазерної установки відповідала загальній ефективності виробничої лінії.

Різання конструкційних сталей, до категорії яких, в першу чергу, відносяться маловуглецеві та нержавіючі сталі, виконується при співвісній подачі робочого (асистуючого) газу в зону обробки, коли реалізується процес газолазерного різання (ГЛР). При розкрою конструкційних сталей в якості

асистуючого газу в основному застосовується кисень, стиснене повітря чи азот. Під час ГЛР в середовищі кисню або стисненого повітря внаслідок екзотермічної реакції горіння металу на крайках різу утворюються оксидні нашарування, які згодом необхідно видаляти відповідно до технологічних вимог. Використання азоту є хоч і дорожчим, але більш вигідним варіантом, оскільки дозволяє зменшити потребу в додатковій обробці та отримати готову деталь, придатну для нанесення фарби, порошкового покриття чи зварювання. Такий спосіб розкрою металу має назву «прем'єр» різання. Застосування азоту особливо доцільне для користувачів, яким потрібне просте рішення для запобігання окисленню під час різання, в першу чергу, нержавіючих сталей і які висувають підвищені вимоги до якісних параметрів різу. Крім того, високу якість різання волоконним лазером можна отримати, якщо до азоту додавати кисень. Це додатково підвищує подальшу зварюваність деталей та можливість нанесення порошкового покриття або фарби на вирізани заготовки [5,6].

На відміну від ріжучих головок малопотужних лазерів фокусуєча система лазерів потужністю до 6 кВт повинна мати більш широкий діапазон регулювання положення фокальної площини оптичного перетворюючого елемента лазерного випромінювання. Завдяки цьому одну лазерну головку можна використовувати як універсальне рішення для завдань, що потребують реалізації широкого діапазону швидкостей різання [7,8].

В останній час деякі з компаній, наприклад, фірма Trumpf, займаються впровадженням штучного інтелекту (ШІ) у процеси лазерної обробки, щоб розширити межі можливостей лазерних машин за рахунок не тільки повної їх автоматизації, а й можливості самонавчання такого обладнання. Автоматизовані лазерні системи — лише один із прикладів застосування ШІ. Крім цього, компанія Trumpf розробила рішення для заміни запасних частин лазерного обладнання, що працює завдяки штучній нейронній мережі, яку Trumpf наповнює зображеннями різних компонентів, доступних для замовлення [9].

Щоб забезпечити стабільну якість вирізання деталей та високу ефективність процесу лазерного різання, необхідно вміти обирати оптимальні параметри його реалізації. Саме вони визначають властивості готових виробів, що проявляється у рівні шорсткості поверхні різу, величині ширини прорізу та зони термічного впливу на крайках вирізаної деталі. Для реалізації таких задач в останній час почав застосовуватися метод Тагучі [10], який набуває все більшого широкого застосування у технічних галузях. Такий метод являє собою статистичний підхід, спрямований на покращення якості виготовлення деталей. Сутність цього методу полягає у використанні системного й водночас доволі простого підходу до оптимізації виробничої продуктивності. Головна його мета — підвищення якості продукції незалежно від сфери використання, а також зменшення варіацій у процесах і досягнення стабільних показників ефективності [11].

Постановка завдань. Таким чином, розробка алгоритмів технологічного забезпечення процесів ГЛР сталевих листів із конструкційних металів є актуальною проблемою. Її вирішення дасть можливість отримати математичні моделі для розрахунку оптимальних швидкостей ГЛР таких конструкційних матеріалів як маловуглецеві та нержавіючі сталі різної товщини на лазерному обладнанні потужністю до 6 кВт. Для цього потрібне більш широке вивчення впливу технологічних параметрів, в першу чергу, на розмірні та якісні показники ГЛР конструкційних металів. В подальшому отримані моделі можуть відкрити шляхи реалізації процедури пошуку оптимальних режимів ГЛР різних сталевих матеріалів в реальному виробництві.

Методи та методики дослідження. Найвищої якості поверхні різу можна досягти, виконуючи різання на максимально можливій швидкості, яка ще забезпечує наскрізне прорізання металевих листів певної товщини. Таку швидкість доцільно вважати оптимальною. У праці [12] було представлено методику, суть якої полягала в поступовому ступінчастому збільшенні швидкості різання до того моменту, коли проріз матеріалу заданої товщини ставав неповним. Останнє значення швидкості, за якого ще досягалося наскрізне різання, вважалося оптимальним для заготовки відповідної товщини. Крім того, нами розглядалася можливість виконувати різання заготовки зі змінною швидкістю. Спочатку встановлюють значення швидкості, при якому гарантовано отримуємо повний проріз матеріалу. В подальшому швидкість поступово та безперервно збільшують до моменту, коли наскрізне різання вже не забезпечується. Будемо вважати, що та швидкість, яка на 10 % менша швидкості, коли припиняється повне прорізання, приймається за її оптимальне значення для даної товщини заготовки.

Всі ці методи забезпечують досить точне встановлення шуканої величини швидкості, але реалізація їх на реальному лазерному обладнанні веде до виходу його з ладу в результаті пошкодження оптичної системи лазера. Таке руйнування оптики відбувається тому, що при ненаскрізнному прорізанні металу продукти руйнування з порожнини різку вилітають не вниз, а завертаються наверх та через сопло можуть потрапити на захисне скло. При високій потужності лазера є висока ймовірність, що захисне скло може розтріскатися та зруйнуватися. Мають місце й випадки, коли продукти руйнування можуть долетіти й до фокусувальної лінзи та привести її в непридатність, що в сумі призведе до великих матеріальних затрат та значного часу на ремонт.

Тому нами була застосована наступна методика підбору оптимальної швидкості різання необхідної товщини сталі на заданих режимах ГЛР. Всі виробники лазерного обладнання комплектують супровідну документацію для свого обладнання широким набором таблиць з можливими режимами ГЛР на максимально дозволених швидкостях. Серед цих таблиць легко підібрати такі режими, які б відповідали нашим потребам для отримання математичних моделей, що розробляються нами. Побудова ж моделей дає можливість отримання більш широкого діапазону таких режимів та можливість прогнозування їх застосування для широкого діапазону лазерного обладнання різної потужності. В подальшому експерименти на підібраних режимах виконувалися на нашому обладнанні та отримані різки аналізувалися на їх відповідність до задовільної якості. Таким підходом ми отримували оптимальні швидкості різання на заданих параметрах ГЛР та уникали можливості псування лазерного обладнання.

Викладення основного матеріалу. Аналіз існуючих теоретичних моделей газолазерного різання металічних матеріалів, показав, що на даному етапі відсутні розрахункові залежності, які з достатньою точністю описують взаємозв'язок між технологічними параметрами процесу та розмірними характеристиками отриманих різів. Теоретичні підходи, що базуються на фізичних закономірностях процесу, здебільшого забезпечують лише якісний збіг розрахункових даних з експериментальними результатами й можуть застосовуватися переважно для попередніх оцінок та розрахунків.

Для кількісної оцінки впливу різних факторів на показники отриманих розрізів експерименти можуть виконуватися як у форматі однофакторних, так і багатфакторних досліджень. Нині при дослідженні технологічних процесів з метою опису об'єкту дослідження, тобто для знаходження моделей, які більш точно описують вплив технологічних факторів ГЛР на оптимальні показники різання, все ширше застосовуються експериментально-статистичні методи [13–14]. Проведення багатфакторних експериментів на тих технологічних факторах, що суттєво визначають перебіг процесу ГЛР, дає змогу побудувати математичні регресійні моделі даного процесу. Такі моделі можна використовувати як для опису об'єкту дослідження, так і для подальшого аналізу впливу технологічних чинників на оптимальні показники ГЛР.

При опису процесу обробки статистичними методами математична модель для знаходження параметрів процесу ГЛР (y) в загальному вигляді може бути представлена у вигляді рівняння [14]:

$$y = f(\beta_0, \beta_1 \dots \beta_K; x_1, x_2, \dots x_K), \quad (1)$$

де $\beta_0, \beta_1 \dots \beta_K$ – шукані параметри моделі (коефіцієнти регресії); $x_1, x_2, \dots x_K$ – незалежні керовані змінні.

Для отримання розрахункових параметрів математичної моделі існують різні методи. У регресійному аналізі найбільш широке поширення отримав метод найменших квадратів. При цьому на підставі апріорної інформації, визначають тип теоретичної кривої, потім знаходять її параметри. Для встановлення правильності опису процесів різання рівняннями регресії був виконаний статистичний аналіз отриманих регресійних моделей [14]. Можливе виконання розрахунків коефіцієнтів рівнянь регресії та проведення статистичного аналізу отриманих регресійних моделей при використанні Excel-таблиць.

Попередні експерименти, описані в літературних джерелах [15], дозволили встановити, що найбільш суттєвими чинниками, що впливають на підбір оптимальної швидкості різання при ГЛР конструкційних матеріалів таких, як маловуглецева та нержавіюча сталь, є товщина листа сталі H , потужність лазерного випромінювання P та тиск асистуючого газу p , що подається в зону різання. Існують також інші технологічні фактори, що впливають на оптимальну швидкість ГЛР такі, як величина та напрямок розфокусування сфокусованого лазерного променя по відношенню до поверхні заготовки, що розрізається, та вид асистуючого робочого газу, але, щоб не ускладнювати

отримані нами регресійні моделі, ці параметри в кожному конкретному випадку краще фіксувати на оптимальних значеннях, які будуть приведені нижче. Для встановлення цих оптимальних значень перерахованих другорядних параметрів повністю підходить згаданий нами вище набір таблиць від виробників лазерного обладнання з можливими режимами ГЛР на максимально дозволених швидкостях. На підставі цих таблиць була визначена також область зміни вибраних суттєвих факторів ГЛР, які в подальшому, як прийнято в регресійному аналізі, будемо називати незалежними змінними та встановлені рівні і інтервали варіювання для кожного такого фактору відповідно для маловуглецевих та нержавіючих сталей (табл. 1). Фіксовані значення інших параметрів ГЛР приведені під табл. 1.

Табл. 1.

Рівні та інтервали варіювання досліджуваних факторів та фіксовані значення деяких другорядних технологічних параметрів* при ГЛР маловуглецевих та нержавіючих сталей

Досліджувані фактори Рівні варіювання	Маловуглецева сталь			Нержавіюча сталь		
	Н, мм	Р, кВт	р, МПа	Н, мм	Р, кВт	р, МПа
	x_1	x_2	x_3	x_1	x_2	x_3
Зоряне плече (+ α^{**})	11,705	5,518	0,112	11,705	6,023	0,5103
Верхній рівень (+I)	10	4,7	0,095	10	5	0,425
Основний рівень (0)	7,5	3,5	0,07	7,5	3,5	0,3
Нижній рівень (-I)	5	2,3	0,045	5	2	0,175
Зоряне плече (- α)	3,295	1,482	0,028	3,295	0,977	0,0898
Інтервал варіювання	2,5	1,2	0,025	2,5	1,5	0,125

* для ГЛР вуглецевих сталей: асистуючий газ — кисень, величина та напрямок розфокусування — +4,5...+7,0 мм (в залежності від товщини заготовки), відстань від сопла до заготовки — 0,7...1,0 мм; для ГЛР нержавіючих сталей: асистуючий газ — стиснене повітря або азот, величина та напрямок розфокусування — 0...-2,5 мм (в залежності від товщини заготовки), відстань від сопла до заготовки — 0,5...0,8 мм.

** зіркове $\alpha = 1,682$.

Оскільки залежність швидкості газолазерного різання від обраних технологічних параметрів у загальному випадку має нелінійний характер [15], для опису регресійних рівнянь процесу в досліджуваній області факторів було застосовано квазі-D-оптимальний план другого порядку [14,16]. Робоча матриця цього плану для маловуглецевих та нержавіючих сталей наведена в табл. 2. Відповідно для кожної з цих сталей, значення \bar{y}_1 та \bar{y}_2 оптимальної швидкості ГЛР для кожної серії дослідів, наведені в табл. 2, отримані як середньо-арифметичне з двох величин, узятих із різних та раніше згаданих таблиць виробників.

Опрацювання експериментальних даних із використанням методів математичної статистики дало змогу отримати регресійні рівняння, які описують вплив зазначених технологічних факторів на величину оптимальної швидкості різання.

Обчислення коефіцієнтів цих рівнянь, а також статистичний аналіз побудованих моделей проводилися за допомогою Excel-таблиць. Підсумки статистичної обробки моделей регресії для маловуглецевих та нержавіючих сталей також наведені в табл. 2. Виходячи із даних цієї таблиці, встановлено, що отримані залежності коректно відображають процес ГЛР досліджуваних сталей та можуть бути ефективно використані на практиці.

Отримані регресійні моделі в кодованій шкалі виміру незалежних змінних мають наступний вигляд:

– для маловуглецевих сталей:

$$\hat{y}_1 = 1,975 - 0,559x_1 + 0,220x_2 + 0,121x_3 + 0,019x_{12} + 0,179x_1^2; \quad (2)$$

© М.В. Романенко, О.Д. Кагляк, В.В. Романенко

– для нержавіючих сталей:

$$\hat{y}_2 = 3,066 - 1,735x_1 + 1,702x_2 + 0,244x_3 - 0,231x_{12} + 0,381x_{13} + 0,797x_1^2; \quad (3)$$

Створені регресійні моделі процесу ГЛР конструкційних сталей можуть застосовуватися як для розв'язання прямого завдання — визначення оптимальної швидкості різання для заданої товщини металу, обраних потужності лазера та тиску асистуючого газу, так і для обчислень оберненого завдання — пошуку можливої товщини сталей, що розрізаються на наявному обладнанні та при заданій швидкості різання.

Табл. 2.

Звідна таблиця багатфакторного експерименту при обробці маловуглецевих та нержавіючих сталей.

№ досліду	Умови проведення дослідів			Результати експериментів і значення відгуку			
				Маловуглецева сталь		Нержавіюча сталь	
	x_1	x_2	x_3	\bar{y}_1	\hat{y}_1	\bar{y}_2	\hat{y}_2
1	2	3	4	5	6	7	8
1.	-	-	-	2,3	2,399	3,45	3,794
2.	+	-	-	1,2	1,232	0,75	0,025
3.	-	+	-	2,85	2,051	7,75	7,649
4.	+	+	-	1,75	1,697	3,3	2,954
5.	-	-	+	2,6	2,616	3,1	3,507
6.	+	-	+	1,45	1,473	1,1	1,263
7.	-	+	+	3,1	3,031	6,6	7,386
8.	+	+	+	2,1	1,964	4,5	4,217
9.	$+\alpha$	0	0	1,5	1,542	1,7	2,403
10.	$-\alpha$	0	0	3,45	3,421	9,1	8,238

Продовження табл. 2.							
1	2	3	4	5	6	7	8
11.	0	$+\alpha$	0	2,2	2,352	5,95	5,909
12.	0	$-\alpha$	0	1,75	1,611	0,3	0,183
13.	0	0	$+\alpha$	2,1	2,160	4,1	3,456
14.	0	0	$-\alpha$	1,8	1,753	2,15	2,636
15.	0	0	0	2,05	1,975	3	3,066
16.	0	0	0	1,9	1,975	3,1	3,066
Статистичний аналіз адекватності моделей	Дисперсія похибки досліду			0,1178		0,1634	
	Дисперсія адекватн.			0,2108		0,3969	
	F- критерій (розрахун.)			1,789		2,429	
	F- критерій (табл.знач.)			2,657		2,538	

Для зручності використання представлені вище регресійні моделі, які приведені в кодованій системі вимірювання, були трансформовані у вигляді з коефіцієнтами в натуральній шкалі. Значення цих коефіцієнтів відображені в табл. 3.

Табл. 3.

Значенні коефіцієнтів регресійних моделей в натуральній шкалі виміру для маловуглецевих (y_1) та нержавіючих (y_2) сталей.

Моделі	Коефіцієнти рівнянь регресії в натуральній шкалі									
	\tilde{b}_0	\tilde{b}_1	\tilde{b}_2	\tilde{b}_3	\tilde{b}_{12}	\tilde{b}_{13}	\tilde{b}_{23}	\tilde{b}_1^2	\tilde{b}_2^2	\tilde{b}_3^2
y_1	4,516	-0,682	0,111	4,842	-	0,100	0,208	0,029	0,762	-10,548
y_2	3,066	-1,734	1,702	0,244	-0,231	0,381	-	0,797	-	-

Окрім подання отриманих результатів у вигляді рівнянь регресії, було здійснено їх графічну інтерпретацію у формі двовимірних перерізів трьох вимірних поверхонь, які описують кожну із моделей. Так, закономірності зміни оптимальної швидкості ГЛР залежно від технологічних параметрів в результаті обробки маловуглецевих сталей наведені на рис. 1 (а, в, д). Відповідно, ці ж результати для нержавіючої сталі представлені на рис. 1 (б, г, е). Всі значення технологічних факторів, які були використані для отримання відповідних графіків, вказані на кожному із

рисунків. Так, наприклад, приведені на рис. 1, а закономірності відображають двовимірні перерізи відповідних поверхонь відгуків для маловуглецевих сталей та встановлюють залежність оптимальної швидкості ГЛР від товщини сталі при різних значеннях потужності лазерного випромінювання в 2, 4 та 6 кВт для величини тиску робочого газу $p = 0,1$ МПа.

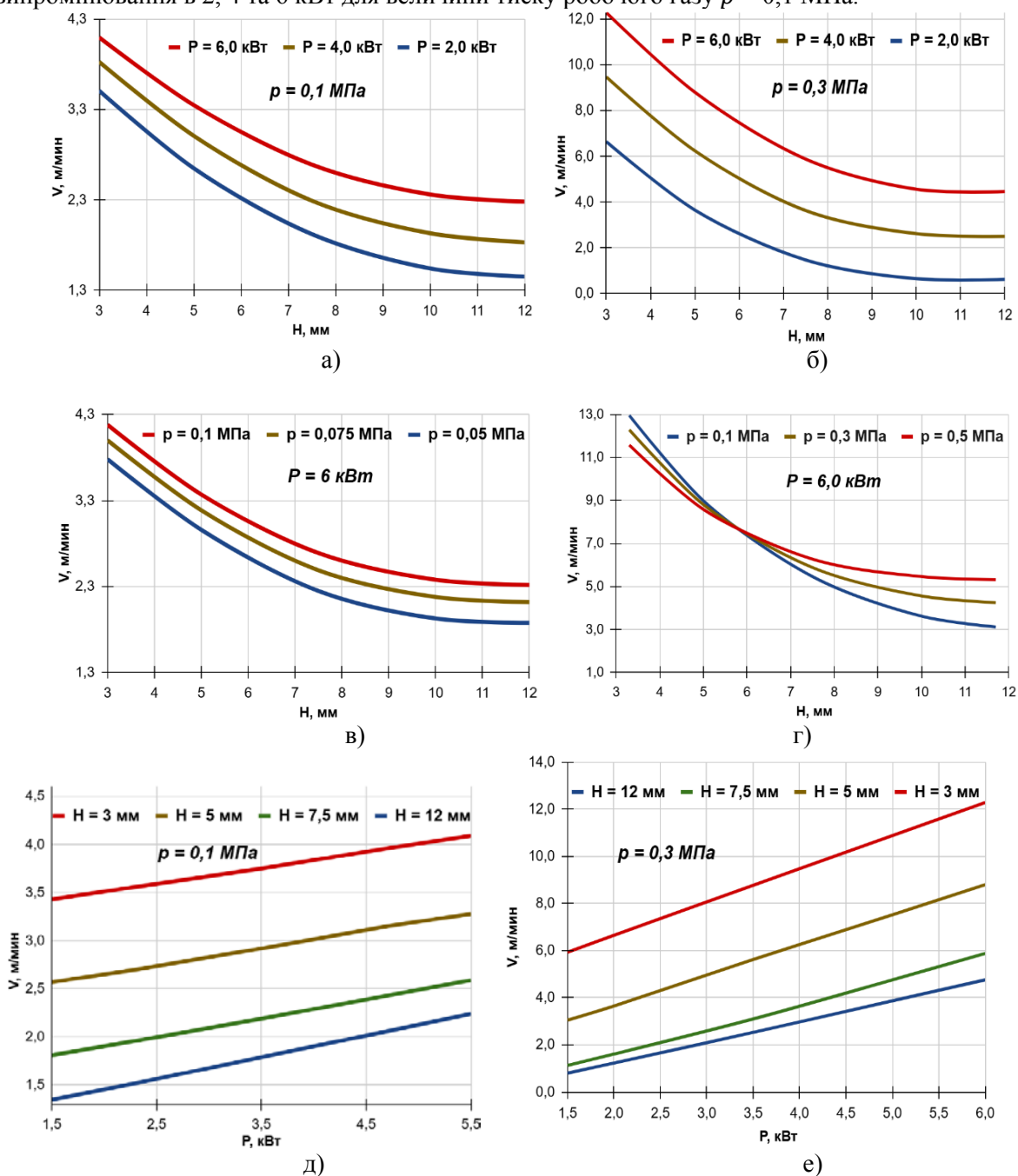


Рис. 1. Залежність оптимальної швидкості різі від приведених на графіках значеннях технологічних параметрів ГЛР для маловуглецевих (а, в, г) та нержавіючих сталей (б, г, е)

Аналіз отриманих двовимірних перерізів регресійних моделей свідчить, що під час різання маловуглецевих та нержавіючих сталей найбільш істотний вплив на оптимальну швидкість ГЛР має товщина металу, що підлягає розрізанню. Далі за значимістю йде потужність лазерного випромінювання, а потім — тиск асистуючого газу. При цьому швидкість різання різко зменшується зі збільшенням товщини сталі та більш помірно зростає при підвищенні потужності лазерного випромінювання та тиску робочого газу. Крім того, збільшення товщини листової маловуглецевої сталі у поєднанні з підвищенням потужності лазера спричиняє додаткове збільшення швидкості

обробки (рис. 1, а), що підтверджується позитивними коефіцієнтами при взаємодії цих факторів у рівнянні (2). Цей ефект неможливо було виявити при виконанні однофакторних експериментів.

Для нержавіючих сталей має місце більш суттєве зростання швидкості ГЛР при зменшенні товщини цієї сталі та підвищенні потужності лазера і тиску асистуючого газу. А ось ефект взаємодії між товщиною сталі та тиском робочого газу носить настільки істотний характер, що графіки залежності швидкості різання від товщини заготовки зі зміною тиску супроводжуючого газу перехрещуються (рис. 1, г). Це легко пояснити тим, що для тонколистових металів при збільшенні тиску газу значно зростає ефект охолодження металу цим газом.

Таким чином, при різанні маловуглецевих сталей 6 кВт лазером, не залежно від їх товщини, потрібно виконувати ГЛР на максимальних значеннях потужності лазерного випромінювання та тиску асистуючого кисню в якості робочого газу. В дослідженому нами діапазоні – це 0,1 МПа. При розрізанні ж нержавіючих сталей потужність випромінювання теж повинна бути максимальна, а ось тиск асистуючого газу (стисненого повітря чи азоту) буде залежати від товщини заготовки: для товщин від 3 до 6 мм – це 0,1 МПа, а від 7 до 12 мм – це 0,5 МПа. При цьому не потрібно забувати, що використання підвищеного тиску робочого газу веде до його більших витрат, що може бути економічно недоцільним.

Крім того, з аналізу рис. 1, д та рис. 1, е можна зробити висновок, що під час різання листів однакової товщини збільшення потужності лазерного випромінювання з 1,5 до 6,0 кВт забезпечує приріст швидкості обробки для маловуглецевих сталей в середньому на 30 %. При цьому зі зменшенням товщини розрізуваного матеріалу вплив потужності лазерного променя на продуктивність обробки стає більш відчутним. З огляду на те, що вартість лазерних установок істотно зростає зі збільшенням їх потужності, використання більш потужного обладнання для ГЛР маловуглецевих сталей не завжди є економічно виправданим. Дещо інакше цей аналіз виглядає для нержавіючих сталей, бо приведений вище приріст потужності випромінювання дає зростання швидкості різання більше, ніж в два рази, що виправдовує застосування більш потужного обладнання для ГЛР цих сталей.

На рис. 2, а та 2, б представлений вигляд різів, отриманих при ГЛР відповідно маловуглецевих та нержавіючих сталей для товщин, що відповідають (або близькі до них) рівням варіювання цього параметру в табл. 1.

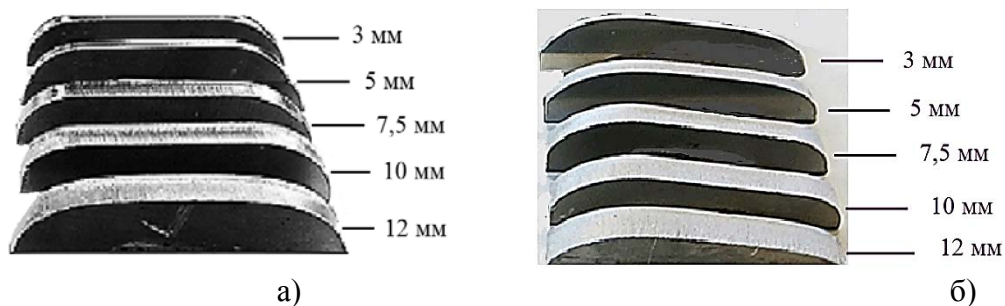


Рис. 2. Фото різів, отриманих в заготовках різної товщини в маловуглецевих (а) та нержавіючих (б) сталях

Для оцінки якості виконання процесу ГЛР в заготовках із маловуглецевої та нержавіючої сталі на рис. 3 приведені збільшені фото поверхні різів в заготовок товщиною 12 мм в цих сталях. Слід також відмітити, що різ в нержавіючій сталі відноситься до категорії так званих «прем'єр» різів та виконаний при використанні азоту в якості асистуючого газу.

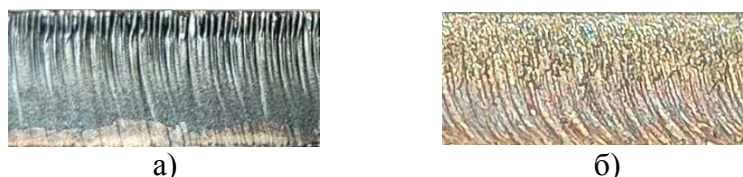


Рис. 3. Вигляд якісних різів, виконаних в сталі товщиною 12 мм в маловуглецевій (а) та нержавіючій (б) сталі.

Для широкого практичного використання основні результати розрахунків по встановленню оптимальної швидкості різання листових матеріалів із маловуглецевої та нержавіючої сталі в

залежності від досліджених технологічних факторів, які отримані по регресивним моделям, що описані залежностями (2) та (3), представлені в табл.4, завдяки якій є можливість зручно та швидко підбирати режими ГЛР названих сталей товщиною від 3 до 12 мм.

Табл. 4.

Режими різання маловуглецевих та нержавіючих сталей різної товщини лазерним випромінюванням заданої потужності при оптимальних значеннях інших технологічних факторів

Вид сталі	Потужність лазерного випромінювання, кВт	Товщина листа, мм	Розрахована оптимальна швидкість ГЛР, м/хв.
Маловуглецева*	2	3	3,51
		5	2,65
		8	1,72
		12	1,45
	4	3	3,83
		5	3,01
		8	2,10
		12	1,83
	6	3	4,10
		5	3,35
		8	2,50
		12	2,28
Нержавіюча**	2	3	6,64
		5	3,65
		8	1,10
		12	0,62
	4	3	9,47
		5	6,24
		8	3,32
		12	2,50
	6	3	12,28
		5	8,80
		8	5,50
		12	4,46

* – асистуючий газ – кисень при величині тиску в 0,1 МПа; величина та напрямок розфокусування – +4,5...+7,0 мм (в залежності від товщини заготовки); відстань від сопла до заготовки – 0,7...1,0 мм.

** – асистуючий газ – стиснене повітря або азот при величині тиску в 0,3 МПа; величина та напрямок розфокусування – 0...-2,5 мм (в залежності від товщини заготовки); відстань від сопла до заготовки – 0,5...0,8 мм.

В подальшому нами заплановане створення он-лайн калькулятора, який дозволить користувачу розв'язувати як пряму задачу — при введенні змінних параметрів різки (товщини заготовки, потужності лазерного випромінювання, тиску асистуючого газу) та запропонованих фіксованих значеннях інших режимів ГЛР отримувати необхідне значення потрібної швидкості різання, так і одне із зворотних завдань — наприклад, при заданій товщині заготовки та тиску робочого газу, а також потрібній швидкості різання розрахувати достатню потужність лазера для виконання такої операції ГЛР. Он-лайн калькулятор передбачатиме можливість розширення діапазону його застосування при введенні нових результатів регресійного аналізу процесу ГЛР, наприклад, для лазерного випромінювання в 20 кВт.

Висновки. Літературний аналіз показав, що розробка алгоритмів технологічного забезпечення процесів ГЛР сталевих листів з конструкційних металів дає змогу сформулювати

© М.В. Романенко, О.Д. Кагляк, В.В. Романенко

відносно прості математичні моделі, які дають змогу обчислювати оптимальні швидкості різання маловуглецевих і нержавіючих сталей товщиною від 3 до 12 мм на обладнанні потужністю до 6 кВт. Створені моделі у подальшому відкривають перспективи визначення оптимальних режимів ГЛР різних сталевих матеріалів у режимі реального часу.

Для визначення оптимальної швидкості різання залежно від ключових технологічних параметрів була застосована оригінальна методика, що ґрунтується на аналізі технічної документації виробників лазерного устаткування. Відібрані режими перевірялися шляхом експериментів на наявній лазерній установці, а отримані результати оцінювалися за критеріями якості різі.

У результаті багатофакторних досліджень були отримані регресійні математичні моделі процесу ГЛР для маловуглецевих і нержавіючих сталей. Їхній аналіз, а також розгляд двовимірних перерізів поверхонь, описуваних цими моделями, показав, що найбільш вагомим фактором для оптимальної швидкості різання є товщина заготовки. Другим параметром за значущістю є потужність лазерного випромінювання, а третім — тиск асистуючого газу. При цьому зі збільшенням товщини сталі (особливо нержавіючої) швидкість різання суттєво знижується, тоді як підвищення потужності лазера і тиску газу призводить до помірної її зростання.

Встановлено, що при обробці листів однакової товщини підвищення потужності випромінювання з 1,5 до 6,0 кВт збільшує швидкість різання маловуглецевих сталей в середньому лише на 30 %, тому застосування високопотужних лазерних установок для таких матеріалів не завжди є економічно доцільним. Для нержавіючих сталей цей же діапазон збільшення потужності забезпечує понад дворазове зростання швидкості різання, що повністю обґрунтовує використання потужнішого обладнання.

Для практичного застосування результати розрахунків, що визначають оптимальні швидкості різання листових матеріалів із маловуглецевої та нержавіючої сталей залежно від досліджених технологічних параметрів, подані у вигляді таблиці. Використання таблиці дозволяє швидко й зручно обирати режими газолазерного різання цих конструкційних сталей товщиною від 3 до 12 мм.

У перспективі планується створення он-лайн калькулятора, який дозволить, виходячи із введених параметрів різання (товщини листа, потужності лазерного випромінювання та тиску асистуючого газу), а також фіксованих додаткових умов ГЛР, оперативно отримувати розрахункові значення оптимальної швидкості різання в он-лайн режимі.

Список використаних джерел:

1. Graf T., Abdou Ahmed M., Berger P., Onuseit V., Weber R. THE LASER: One universal tool for manufacturing. *Industrial Laser Solutions*, 2019, January/February, 13–15.
2. Overton G., Nogee A., Belforte D., Wallace J., Gefvert B. What goes up. *Annual Laser Market Review & Forecast. Laser Focus World*, 2019, January, 40–65.
3. Belforte D. A. 2018 was another record year, contending with turmoil. *Industrial Laser Solutions*, 2019, January/February, 9–11.
4. Dahv A. V. KLINER, Roger L. Fiber laser has all-fiber tunable beam quality. *Laser Focus World*, 2021, April, 5–48.
5. Stanczyk N. Improving cutting speed and edge quality. *Industrial Laser Solutions*, September/October, 2018, 15–16.
6. Dustin D. How to select the right setup for your fiber laser cutting needs. *Industrial Laser Solutions*, September/October, 2018, 17–19.
7. Fiber laser technology improves metal cutting / Dahv Kliner, Brian Vict — nLIGHT, Vancouver, WA, www.nlight.net // *Industrial Laser Solutions*. 2018. September/October. P. 23–26.
8. Belforte D. Feasibility study tackles effective laser beam cutting underwater. *Industrial Laser Solutions*. March/April, 2019, 6.
9. Daum K. With these projects, TRUMPF is making artificial intelligence a reality // [url: https://www.trumpf.com/en_int/magazine/with-these-projects-trumpf-turns-ai-into-reality/10.07.2019](https://www.trumpf.com/en_int/magazine/with-these-projects-trumpf-turns-ai-into-reality/10.07.2019).
10. Bendell A. *Taguchi Methods*. Springer Dordrecht, 2009. – 212 p.
11. Соколан Ю., Клясний Н., Соколан К. Оптимізація режимів лазерного різання нержавіючої сталі методом Тагучі. *Вісник Хмельницького національного університету. Серія: Технічні науки*, 1 (331), 2024, 364 – 369.

12. Alsaadawy M. et al. A comprehensive review of studying the influence of laser cutting parameters on surface and kerf quality of metals. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2024, 30, 1039–1074.
13. Літнарівич Р.М. Побудова і дослідження математичної моделі за джерелами експериментальних даних методами регресійного аналізу. Навчальний посібник, МЕНУ, Рівне, 2011.-140 с.
14. Radchenko S.G. Metodologija regressionnogo analiza [Methodology of regression analysis], Kornijchuk, Kyiv, 2011. – 376 p.
15. Kovalenko V.S. Romanenko V.V., Oleshchuk, L.M. Low-waste processes of laser beam cutting. Kyiv, Technika, 1987. – 112 p.
16. Лапач С.М. Проблеми побудови регресійних моделей процесів різання металів. Вісник НТУУ «КПІ». Серія машинобудування, 2014, 3 (72), 40–47.

Рецензент: Л.Ф. Головка, д.т.н., проф.

Дата надходження статті до видання: 12.02.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 24.03.2026

Дата оприлюднення 14.04.2026