

В.І. Осипенко, С.П. Середюк

Черкаський державний технологічний університет

**ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ВИЗНАЧЕННЯ ЕФЕКТИВНИХ РЕЖИМІВ ТА
АНАЛІТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ ЛАЗЕРНОГО РІЗАННЯ
НИЗЬКОВУГЛЕЦЕВИХ СТАЛЕЙ ОПТОВОЛОКОННИМ ЛАЗЕРОМ ПОТУЖНІСТЮ
12 КВТ**

У статті наведено результати експериментального дослідження процесу газолазерного різання низьковуглецевих сталей випромінюванням оптоволоконного лазера потужністю 12 кВт у середовищі кисню. Встановлено залежності оптимальної потужності лазера та максимальної швидкості різання від товщини листового матеріалу. Отримано аналітичні апроксимаційні залежності та запропоновано узагальнену технологічну модель процесу різання. Проведено енергетичний аналіз і показано зростання енергоефективності процесу зі збільшенням товщини матеріалу. Результати можуть бути використані для прогнозування ефективних технологічних режимів лазерної обробки.

Ключові слова: лазерне різання; оптоволоконний лазер; низьковуглецева сталь; кисневе газолазерне різання; технологічні режими різання; швидкість різання; енергоефективність процесу; математична модель різання.

V.I. Osypenko, S.P. Serediuk

**EXPERIMENTAL DETERMINATION OF EFFICIENT PROCESSING PARAMETERS
AND ANALYTICAL MODELING OF LOW-CARBON STEEL LASER CUTTING WITH A
12 KW FIBER LASER**

The paper presents the results of an experimental study of gas-assisted laser cutting of low-carbon steels using a high-power 12 kW fiber laser in an oxygen environment. The research was carried out on sheet steel of various thicknesses using full factorial experimental planning methods. The relationships between the optimal laser power and the maximum cutting speed as functions of material thickness were determined. Based on the experimental data, analytical approximation dependencies were obtained and a generalized technological model describing the cutting process was proposed. The model links cutting speed with laser power and sheet thickness and demonstrates good agreement with experimental results. In addition, an energy analysis of the process was performed, showing a significant increase in energy efficiency with increasing material thickness due to the contribution of exothermic oxidation and improved heat localization in the cutting channel. The obtained results can be used to predict efficient technological parameters for industrial laser cutting of low-carbon steels.

Keywords: laser cutting; fiber laser; low-carbon steel; oxygen-assisted laser cutting; cutting process parameters; cutting speed; energy efficiency; mathematical model of laser cutting.

Постановка проблеми. Процес лазерного різання низьковуглецевих сталей у середовищі кисню є складним теплофізичним та гідродинамічним процесом, що включає взаємодію лазерного випромінювання з матеріалом, плавлення металу, хімічну реакцію окиснення та видалення продуктів плавлення струменем асистуючого газу. На першому етапі відбувається поглинання енергії лазерного випромінювання поверхнею металу. Поглинута енергія призводить до швидкого нагрівання матеріалу до температури плавлення та часткового випаровування. Після утворення розплавленої зони струмінь кисню ініціює екзотермічну реакцію окиснення заліза, яка постачає додаткове тепло в зону різання і дозволяє скорочувати витрати лазерної енергії. Виділення додаткової теплоти внаслідок хімічної реакції сприяє підвищенню ефективності процесу різання порівняно з інертними газами та дозволяє збільшити товщину матеріалу, що підлягає обробці. Важливу роль відіграє також гідродинаміка потоку газу. Струмінь кисню виконує дві основні функції: інтенсифікує реакцію окиснення та видаляє розплавлений метал з зони різання. Ефективність видалення розплаву значною мірою визначає якість сформованої кромки. Із збільшенням товщини матеріалу збільшується об'єм розплавленого металу та тепловідвід у масив деталі. Це призводить до необхідності підвищення потужності лазерного випромінювання та зменшення швидкості переміщення ріжучої головки. В останній час в багатьох промислових підприємствах України виникла гостра потреба якісного газолазерного різання сталей великих товщин (15 мм – 25 мм). Відкликаючись на потреби ринку провідний виробник лазерних технологічних установок в Україні компанія «Арамис» започаткувала випуск лінійки установок, укомплектованих оптоволоконними лазерами потужністю 12 кВт. При газолазерному різанні низьковуглецевих сталей за використання в якості асистуючого газу кисню таку потужність економічно доцільно використовувати при різанні сталей товщиною більше 15 мм. Однак в рамках конкретного підприємства часто виникає потреба в різанні на даних потужних установках відносно невеликих товщин (від 2 мм і вище). Визначення ефективних режимів різання у всьому

стандартному діапазоні товщин є складною багатоетапною задачею, вирішення якої вимагає системного комплексу експериментальних досліджень, аналізу отриманих результатів та їх апроксимації математичними функціями, побудови узагальненої математичної моделі процесу. Такий підхід забезпечує досягнення максимальної швидкості різку за заданої якості поверхонь отриманих деталей, що і обумовлює високу економічну ефективність технології за використання оптоволоконних лазерів з максимальною вихідною потужністю 12 кВт.

Аналіз останніх досліджень і публікацій.

В сучасних технологіях лазерного розкрою низьковуглецевих сталей використання в якості асистуючого газу кисню є широко поширеним і складним застосуванням [1, 2]. Екзотермічна реакція кисню із залізом дає високу швидкість різання для низьковуглецевих сталей та збільшує максимальну товщину різання для конкретної максимальної вихідної потужності оптоволоконного лазера. Це робить економічно привабливим використання кисню для товстих листів, але породжує ряд проблем [3, 4]. Кисень, як асистуючий газ, виконує дві основні функції: видаляє рідкий розплав з зони різання та вносить суттєвий вклад в енергетичний баланс процесу завдяки додатковій теплоті реакції окислення. При зниженому тиску рідкий метал не видалятиметься з необхідною швидкістю. Завищений тиск призводить до зростання теплоти горіння та об'ємів розплавленого металу, який не встигатиме повністю видалятися з зони різання. Ефективність видалення розплаву значною мірою визначає якість сформованої кромки [8]. В роботі [2] показано що вагомий вплив на термічну ефективність горіння має чистота кисню. Із збільшенням товщини матеріалу збільшується об'єм розплавленого металу та тепловідвід у масив деталі. Це призводить до необхідності підвищення потужності лазерного випромінювання та зменшення швидкості переміщення ріжучої головки. На процес кисневого газолазерного різання також суттєво впливають: положення фокусу променя лазера відносно поверхні заготовки; геометричні параметри сопла; висота різання (відслідковуваний зазор); швидкість різання [4, 5]. Поряд зі швидкістю різання якість поверхонь отриманих деталей визначає необхідність подальшої обробки деталей і тим самим безпосередньо впливає на економічну ефективність технології. Критичний огляд публікацій наведений в роботі [8] показав, що найбільш важливими і контрольованими параметрами якості є шорсткість, ширина різку в верхній та нижній площинах заготовки, перпендикулярність (нахил) отриманих поверхонь. Дані параметри повинні жорстко відповідати вимогам стандарту ISO 9013:2017 [4]. Розширений комплекс можливостей обумовлений появою потужних 12 кіловатних лазерів показав необхідність експериментального обґрунтування ефективності використання потужності лазерного променя з точки зору продуктивності процесу та якості отриманих деталей, аналізу та математичної обробки результатів експериментальних досліджень, які можуть бути використані для прогнозування ефективних технологічних режимів лазерної обробки.

Мета статті – експериментальне визначення ефективних режимів лазерного різання листових низьковуглецевих сталей випромінюванням потужного оптоволоконного лазера (12 кВт) у середовищі асистуючого газу – кисню. Встановлення залежності оптимальної потужності лазерного випромінювання та максимальної швидкості якісного різання від товщини оброблюваного матеріалу. Отримання аналітичних залежностей та узагальненої технологічної моделі процесу різання, які можуть бути використані для прогнозування технологічних режимів лазерної обробки.

Вклад основного матеріалу.

Обладнання, та методи дослідження. Експерименти виконувалися на серійному верстаті компанії «Арамис», провідного виробника лазерних технологічних установок в Україні. Основні інформація про верстат наведена в таблиці 1.

Табл. 1

Моделі основних систем верстата для проведення досліджень

Верстат	AFX-PRO-12000-1530-LD
Модель лазера, Ø оптоволоконна	MAX Photonics 12 kWt, оптоволоконно 100 мкм
Модель оптичної головки, коліматор	BOCS BLT642, f 200 мм

Оброблялася листовая сталь Ст3сп стандартного ряду товщин (мм) 2; 3; 4; 5; 6; 8; 10; 12; 14; 16; 20; 25. Спираючись на матеріали попередніх досліджень авторів [9, 10] в оптичній головці верстата встановлювалися серійні двоканальні сопла компанії Thermaxcut з вихідними діаметрами центрального отвору 1,2 мм; 1,5 мм; 1,8 в залежності від товщини листа. Внутрішня структура та розміри сопла з вихідним діаметром 1,5 мм показана на рис. 1.

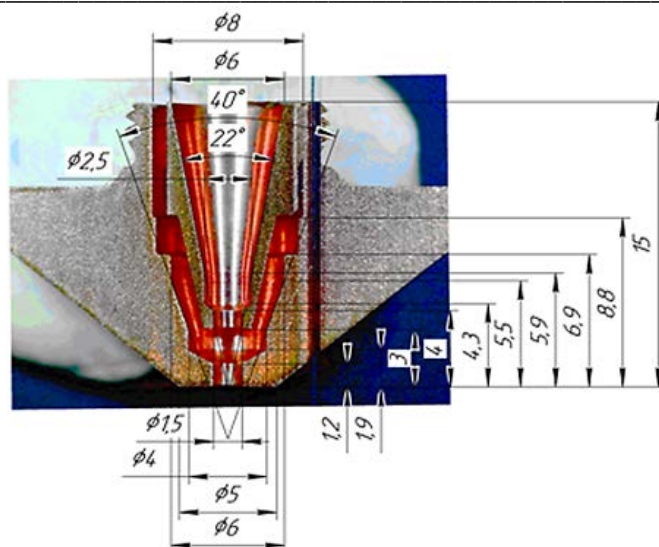
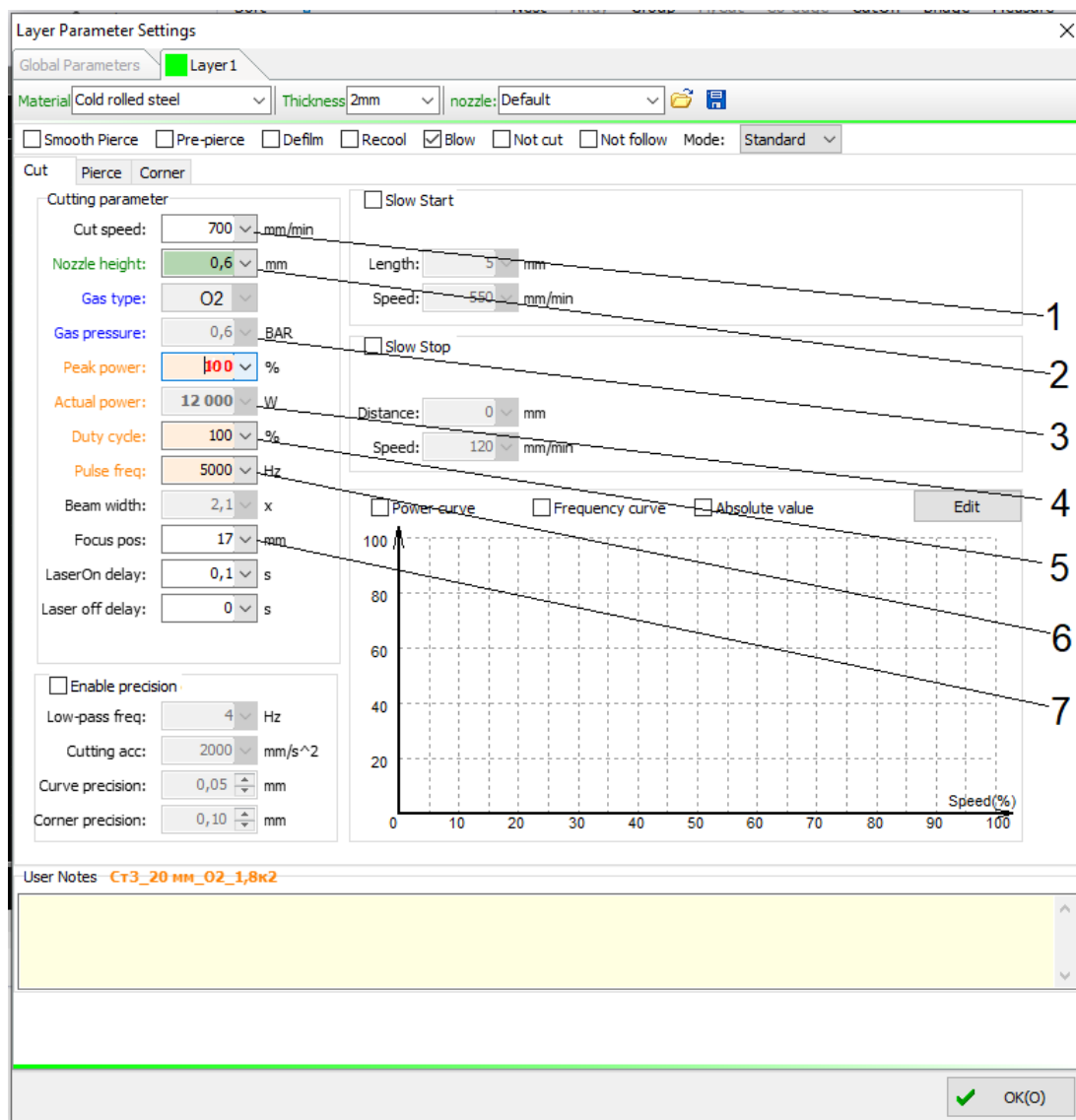


Рис. 1. Внутрішня структура та розміри двоканального сопла з діаметром центрального отвору 1,5 мм компанії Thermacut

Використання двоканальних (двошарових) сопел для газолазерного різання низьковуглецевих сталей зумовлено фізикою процесу окислення металу киснем – це, по суті, кероване горіння. Зовнішній шар газу двоканального сопла допомагає точніше сфокусувати «робочий» кисень у вузьку щілину різу. Це дозволяє отримувати чистий зріз навіть на великих товщинах без зайвого випалювання металу навколо. Окрім того зовнішній кільцевий потік газу виступає фізичним бар'єром. Він «відсікає» навколишнє повітря, не даючи азоту змішуватися з центральним струменем високочистого кисню (атмосферне повітря містить близько 78% азоту. Навіть потрапляння 1–2% азоту в зону різу різко знижує ефективність окислення). Збільшення діаметра сопла при зростанні товщин – це встановлення балансу між фізикою плавлення та гідродинамікою видування металу. Для прорізання металу товщиною 20 мм потрібно окислити (спалити) значно більшу масу заліза, ніж на 5–10 мм. Більший діаметр дозволяє подати великий об'єм газу на низькій швидкості. Це забезпечує стабільне горіння по всій глибині різу (до самого низу плити). Велике сопло дозволяє працювати на мінімальному тиску (0.4–0.8 бар). Газ заповнює різ м'яко, підтримуючи реакцію горіння без зайвого «роздування» факела на поверхні. Як асистуючий газ застосовувався кисень з чистотою 99,97 (рівень чистоти, який в основному використовують замовники верстатів даного типу). Комплекс досліджень виконувався з використанням методів планування повнофакторного експерименту (ППФЕ). Факторний простір включав вихідну потужність лазера (Q – кВт), швидкість різання (F – м/хв), тиск асистуючого газу (P – бар, кисень з чистотою 99,97%), положення фокусу відносно поверхні листа (S – ±мм). Відповідно до паспортних даних оптичної головки в фокальній площині діаметр лазерної плями становив 200 мкм. Контрольований зазор між поверхнею деталі та соплом становив 0,6 мм і залишався незмінним в кожному досліді. Значення факторів на трьох рівнях (нульовий, верхній, нижній) задавалися і контролювалися системою числового програмного керування (ЧПК) верстата з точністю, яка відповідає паспортним даним верстата (рис. 2). Зразки з наявністю ґрат відбраковувалися і не досліджувалися, так як ґрат є очевидною ознакою незадовільного результату досліді. При детальному дослідженні прийнятих зразків, визначалися режими з максимальними швидкостями різання за умови відповідності вимогам стандарту ISO 9013:2017. Відповідно до вимог стандарту у прийнятих зразків контролювалися шорсткість бокових поверхонь (за Ra та Rz), верхня та нижня ширина різу, величина відхилення від перпендикулярності (нахил) поверхні різання. Креслення зразків для досліджень та методики вимірювань ширини різу, шорсткості, відхилення від перпендикулярності наведені в попередній роботі авторів [4].

Результати досліджень.

Основні результати проведеного комплексу експериментальних досліджень, оформлені як технологічні карти параметрів різання низьколегованих сталей в середовищі кисню технологічної інструкції до верстатів моделі AFX-PRO-12000-1530-LD представлені на рис. 3. Як видно з таблиць у процесі досліджень встановлено залежності оптимальної потужності лазерного випромінювання та максимальної швидкості якісного різання від товщини оброблюваного матеріалу.



1 – швидкість різання, мм/хв; 2 – відслідковуваний зазор, мм; 3 – тиск асистуючого газу, Бар; 4 – потужність лазерного променя, Вт; 5 – робочий цикл імпульсу (безперервний чи імпульсний цикл); 6 – робоча частота імпульсів, Гц; 7 – положення фокусу відносно торця сопла, мм.

Рис. 2. Інтерфейс для внесення параметрів різання в програмі Sur CUT на станку AFX-PRO-12000-1530LD

Отримані експериментальні результати були піддані математичній обробці з метою отримання аналітичних залежностей, які можуть бути використані для прогнозування технологічних режимів лазерної обробки (рис. 4, рис. 5). На графіку (рис. 4) представлено залежність оптимальної потужності лазера Q , що забезпечує максимальну швидкість та якість різання, від товщини листа h .

Основні особливості експериментальної залежності:

- при малих товщинах (2–5 мм) потужність майже не змінюється ($\approx 3\text{--}3.6$ кВт);
- при 6–15 мм спостерігається майже лінійне зростання потужності;

при 20–25 мм відбувається насичення потужності (≈ 12 кВт), що пов'язано з обмеженням потужності джерела та інтенсивним зростанням необхідної потужності, що пов'язано зі збільшенням тепловідведення в матеріал та зростанням об'єму металу, який необхідно перевести у рідкий стан. Для опису всієї області товщин найкраще підходить квадратична апроксимація (1).

Як видно з графіка, отримана аналітична залежність (1) добре узгоджується з експериментальними точками та може використовуватися для оцінки оптимальної потужності лазерного випромінювання при різанні низьковуглецевих сталей різної товщини.

Товщина металу, мм	High/Low	Діаметр соплів, мм	Потужність, кВт	Положення фокусу відносно торцю соплів	Тиск, бар	Швидкість подачі мм/хв	Ширина різання (верх/низ), мм	Шорсткість поверхні, Rz/Ra	Відхилення від перпендикулярності, мм
2	Low (№4)	1.2	3300	+7	1	4200	0.43/0.51	Rz(S)=6.3...8.7/ Ra(S)=1.98...2	0.04
	High (№6)	1.2	3300	+7	1	5000	0.49/0.55	Rz(S)=8.34...8.93/ Ra(S)=1.91...2.08	0.03
3	Low (№1)	1.2	3300	+8	0.8	3700	0.39/0.51	Rz(S)=4.15...6.24/ Ra(S)=0.8...1.28	0.06
	High (№5)	1.2	3300	+8	0.8	4200	0.37/0.59	Rz(S)=4.8...7.0/ Ra(S)=1.06...1.13	0.01
4	Low (№1)	1.2	3600	+7	0.6	2800	0.55/0.65	Rz(V)=4.46...7.2/ Ra(V)=0.94...1.18	0.05
	High (№5)	1.2	3600	+7	0.6	3200	0.66/0.78	Rz(S)=7.8...12.2/ Ra(S)=1.2...2.41	
5	High (№4)	1.2	3600	+8	0.7	3200	0.34/0.47	Rz(N)=7.48...10.5/ Ra(N)=1.5...2.35	0.07
	High (№6)	1.2	5400	+7.5	0.8	2800	0.48/0.61	Rz(S)=5.5...11.7/ Ra(S)=1.3...1.8	
8	High (№2)	1.2	5400	+7.5	0.8	2300	0.48/0.7	Rz(N)=7.5/ Ra(N)=1.7	0.11
	High (№2)	1.2	5400	+7.5	0.8	2300	0.48/0.7	Rz(V)=15...18.6/ Ra(V)=2.43...3.0	
10	High (№2)	1.2	6000	+7.5	0.7	2200	0.53/0.81	Rz(S)=25.3...28.3/ Ra(S)=4.72...5.13	0.14
	High (№2)	1.2	6000	+7.5	0.7	2200	0.53/0.81	Rz(N)=29/ Ra(N)=5	
12	High (№2)	1.2	7500	+8	0.7	1900	0.58/0.9	Rz(V)=42.8...57/ Ra(V)=7...11	0.15
	High (№2)	1.2	7500	+8	0.7	1900	0.58/0.9	Rz(S)=50.7...72.7/ Ra(S)=9.57...16.4	
14	High (№8)	1.4	8500	+8	0.7	1600	0.6/0.8	Rz(N)=53.8...73/ Ra(N)=13.84...19.85	0.14
	High (№8)	1.4	8500	+8	0.7	1600	0.6/0.8	Rz(V)=48...49/ Ra(V)=9.44...9.49	
16	High (№1)	1.8	9500	+8.5	0.7	1500	0.7/1.2	Rz(S)=55.3...54.9/ Ra(S)=9.99...10.88	0.28
	High (№1)	1.8	9500	+8.5	0.7	1500	0.7/1.2	Rz(N)=50.4...57/ Ra(N)=14.44...15.5	
20	High (№2)	1.8	12000	+9	0.7	1300	0.8/0.95	Rz(V)=40...47.1/ Ra(V)=7.98...8.97	0.31
	High (№2)	1.8	12000	+9	0.7	1300	0.8/0.95	Rz(S)=35.7...40.3/ Ra(S)=6.72...8.57	
25	High (№8)	1.8	12000	+12	0.7	800	0.9/1.5	Rz(N)=43.5...44.2/ Ra(N)=8.54...8.83	0.34
	High (№8)	1.8	12000	+12	0.7	800	0.9/1.5	Rz(V)=42.8...57/ Ra(V)=7...11	
25	High (№8)	1.8	12000	+12	0.7	800	0.9/1.5	Rz(S)=50.7...72.7/ Ra(S)=9.57...16.4	0.34
	High (№8)	1.8	12000	+12	0.7	800	0.9/1.5	Rz(N)=53.8...73/ Ra(N)=13.84...19.85	
25	High (№8)	1.8	12000	+12	0.7	800	0.9/1.5	Rz(V)=48...49/ Ra(V)=14.44...15.49	0.34
	High (№8)	1.8	12000	+12	0.7	800	0.9/1.5	Rz(S)=55.3...55.9/ Ra(S)=13.99...16.88	
25	High (№8)	1.8	12000	+12	0.7	800	0.9/1.5	Rz(N)=20.4...27/ Ra(N)=14.44...15.5	0.34
	High (№8)	1.8	12000	+12	0.7	800	0.9/1.5	Rz(N)=20.4...27/ Ra(N)=14.44...15.5	

Рис. 3. Технологічна карта параметрів різання сталі ВСтЗсп технологічної інструкції до верстатів моделі AFX-PRO-12000-1530-LD

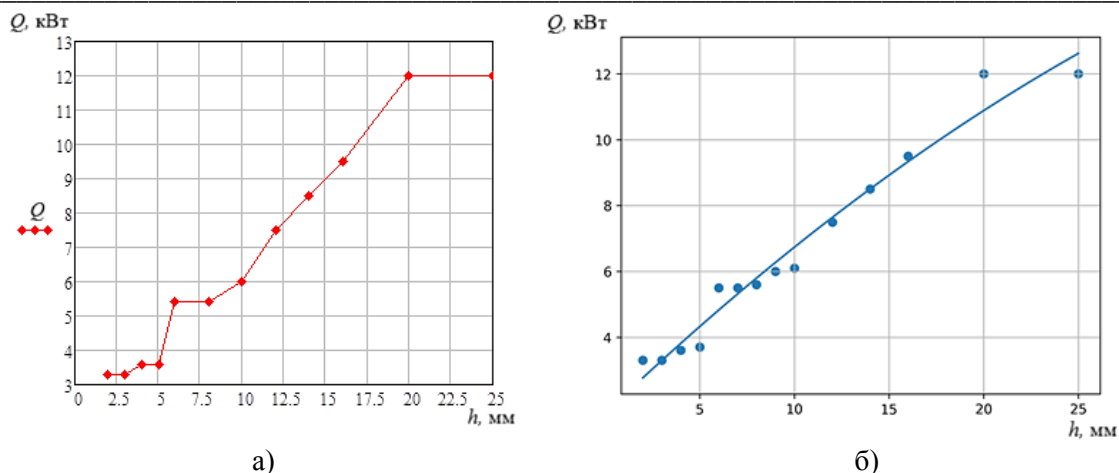


Рис. 4. Залежність величини оптимальної вихідної потужності (Q) оптоволоконного лазера з максимальною вихідною потужністю 12 кВт, що забезпечує максимальну швидкість різання (F) листової сталі ВСтЗсп за умов отримання параметрів якості, що відповідають вимогам стандарту ISO 9013:2017: а) експериментальні дані; б) отримана в середовищі Mathcad апроксимуюча криві

$$Q(h) = -0,0045h^2 + 0,5500h + 1,638 \quad (1)$$

де $Q(h)$ – оптимальна для даної товщини потужність лазера, кВт;
 h – товщина листа, мм.

Значення коефіцієнту детермінації $R^2 = 0.970$.

На графіку (рис. 5) представлено залежність максимальної швидкості різання від товщини матеріалу, оскільки другим важливим параметром технологічного процесу є максимальна швидкість різання, яка забезпечує отримання якісної кромки без утворення дефектів.

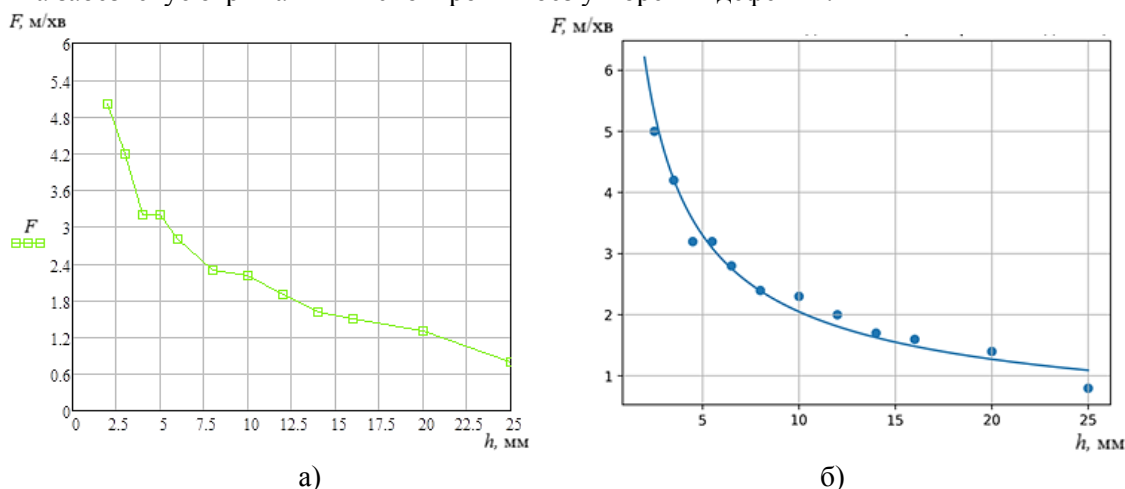


Рис. 5. Залежність максимальної швидкості різання (F) листової сталі ВСтЗсп випромінюванням оптоволоконного лазера з максимальною вихідною потужністю 12 кВт за використання оптимальної вихідної потужності від товщини листа (h) за умов отримання параметрів якості, що відповідають вимогам стандарту ISO 9013:2017: а) експериментальні дані; б) отримана в середовищі Mathcad апроксимуюча криві

Експериментальна тенденція:

- швидкість різко зменшується при переході від тонких до середніх товщин;
- при великих товщинах зниження стає більш плавним;
- характер кривої відповідає степеневій або гіперболічній залежності.

Найкраща апроксимація отримана степеневою функцією (2)

$$F(h) = 10,006 \cdot h^{-0,688} \quad (2)$$

де $F(h)$ – швидкість різання, м/хв;

h – товщина листа, мм.

Значення коефіцієнту детермінації $R^2 = 0.971$.

Фізична інтерпретація:

1. Зі збільшенням товщини:
 - збільшується об'єм розплаву,
 - погіршується видалення продуктів плавлення киснем,
 - зростає тепловідвід у матеріал.
2. Це призводить до степеневого зниження швидкості різання.

Узагальнена технологічна модель процесу різання. Для узагальненого опису процесу лазерного різання була запропонована технологічна модель, яка пов'язує швидкість різання з потужністю лазерного випромінювання та товщиною матеріалу. Отримана емпірична залежність має вигляд

$$F(Q, h) = 8,693Q^{0,1} \cdot h^{-0,705} \tag{3}$$

Значення коефіцієнту детермінації $R^2 = 0.974$. На рис.6 представлена 3D-поверхня запропонованої технологічної моделі.

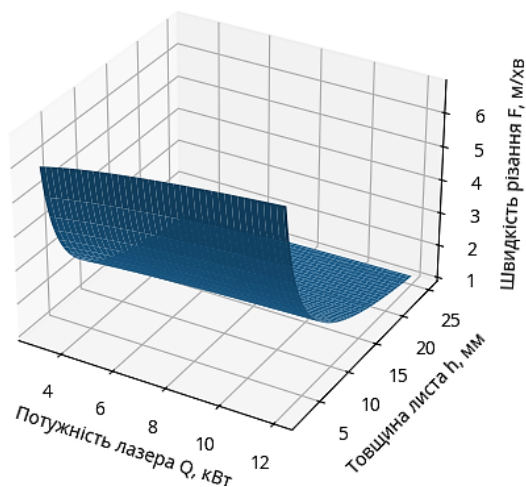


Рис. 6. 3D-модель швидкості лазерного різання $F(Q, h)$

Отримана модель показує:

- плавне зростання швидкості при збільшенні потужності лазера;
- швидке зменшення швидкості при зростанні товщини металу, що відповідає експериментальній фізиці процесу

Невелике значення показника ступені при Q ($a \approx 0,1$) означає, що в дослідженому діапазоні товщин швидкість різання слабо залежить від потужності, оскільки потужність вже близька до оптимальної (1) і процес обмежується гідродинамікою видалення розплаву.

Показник при h ($b \approx -0,705$) свідчить про суттєвий вплив товщини, що добре узгоджується з тепловою теорією балансу різання.

На рис.7 представлені результати перевірки працездатності узагальненої технологічної моделі процесу різання.

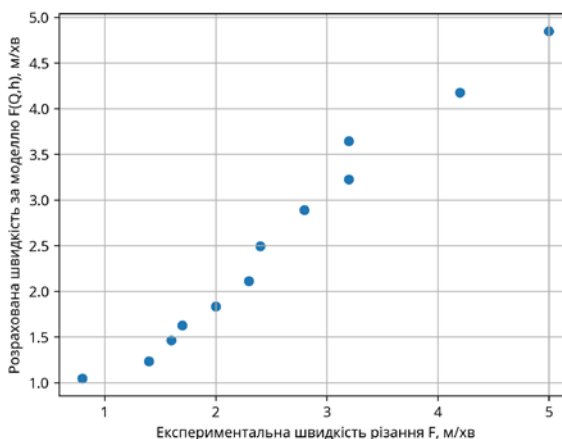


Рис.7. Результати перевірки рівня співпадіння розрахованих за моделлю $F(Q, h)$ та визначених експериментально швидкостей різання

Наведені результати підтверджують задовільну узгодженість розрахункових та експериментальних даних.

Енергетичний аналіз процесу різання. Запропонований енергетичний аналіз базується на співвідношенні між енергією лазера та корисною енергією, що витрачається на нагрів і плавлення металу. Енергоефективність процесу різання оцінювалася за коефіцієнтом корисної дії при використанні енергії лазерного променя, який розраховувався за рівнянням (4).

$$\eta = \frac{\rho \cdot F \cdot b \cdot h \cdot (c \cdot \Delta T + L_m)}{Q} \quad (4)$$

де ρ – густина металу, кг/м³; c – питома теплоємність металу, Дж/кг·град; ΔT – нагрів до температури плавлення, град; L_m – питома теплота плавлення, Дж/кг; b – середня ширина різку, мм; F – швидкість різання, м/с; Q – потужність лазера, Вт.

На рис.8 представлено розраховану за (4) динаміку зміни енергоефективності процесу різання низьковуглецевих сталей в залежності від товщини листа при використанні оптоволоконного лазера з максимальною вихідною потужністю 12 кВт та кисню в якості асистуючого газу.

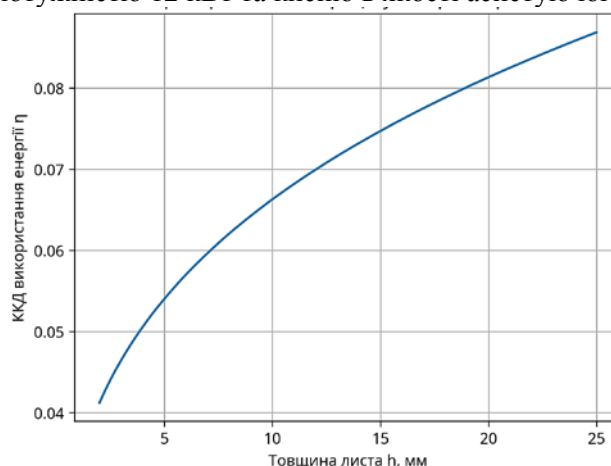


Рис.8. Залежність енергоефективності лазерного різання низьковуглецевих сталей від товщини заготовки

Встановлене стрімке зростання енергоефективності лазерного різання зі збільшенням товщини листа має чітке теплофізичне пояснення зумовлене сукупністю факторів: збільшенням масової продуктивності процесу; зменшенням відносних теплових втрат; зростанням ролі екзотермічного окиснення металу; кращою локалізацією тепла в каналі різку; багаторазовим поглинанням випромінювання в глибокому різі.

Висновки.

1. Проведено комплекс експериментальних досліджень процесу газолазерного різання листової низьковуглецевої сталі ВСтЗсп випромінюванням оптоволоконного лазера потужністю 12 кВт у середовищі кисню із застосуванням методів повнофакторного планування експерименту. Визначено раціональні технологічні режими різання для стандартного ряду товщин листового матеріалу, що забезпечують високу продуктивність процесу та параметри якості різку, які відповідають вимогам стандарту ISO 9013:2017.

2. Встановлено експериментальні залежності оптимальної вихідної потужності лазерного випромінювання та максимальної швидкості якісного різання від товщини оброблюваного матеріалу. Отримані аналітичні апроксимаційні залежності дозволяють здійснювати інженерну оцінку раціональних параметрів технологічного процесу лазерного різання.

3. Запропоновано узагальнену технологічну модель процесу лазерного різання, яка встановлює взаємозв'язок між швидкістю різання, потужністю лазерного випромінювання та товщиною матеріалу. Експериментальна перевірка моделі показала задовільну узгодженість розрахункових та експериментальних результатів, що підтверджує можливість її використання для прогнозування технологічних режимів обробки.

4. Виконано енергетичний аналіз процесу різання, який показав зростання енергоефективності лазерного різання низьковуглецевих сталей зі збільшенням товщини заготовки. Встановлена тенденція пояснюється підвищенням масової продуктивності процесу, зменшенням відносних теплових втрат та зростанням ролі екзотермічної реакції окиснення металу киснем.

5. За результатами проведених досліджень розроблено технологічну карту параметрів газолазерного різання сталі ВСтЗсп для верстатів моделі AFX-PRO-12000-1530-LD, яка може бути використана як практична основа для налаштування режимів різання на промислових лазерних установках.

Список використаних джерел:

1. Badoniya P (2018) CO₂ laser cutting of different materials. A review. *Int Res J Eng Technol* (February):1–12 [Online]. Available: <http://www.irjet.net>. Accessed 22 Oct 2022.
2. Liu Y, Zhang S, Zhao Y, Ren Z (2022) Experiments on the kerf quality characteristic of mild steel while cutting with a high-power fiber laser. *Opt Laser Technol* 154(June):108332. <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2022.108332>.
3. Naresh, Khatak P (2022) Laser cutting technique: a literature review. *Mater Today Proc* 56(5 SI):2484–2489. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.08.250>.
4. В.І. Осипенко. Експериментальне обґрунтування ефективних режимів різання сталей випромінюванням потужного оптоволоконного лазера / В.І. Осипенко, О.П. Плахотний, М.Р. Прусс, С.П. Середюк // Міжвузівський збірник «НАУКОВІ НОТАТКИ». Луцьк, 78/2024 Ст 100-108. DOI 10.36910/775.24153966.2024.78.14.
5. Steen W, Mazumder J (2010) *Laser Cutting, Drilling and Piercing*. In: *Laser Material Processing*. Springer, London. https://doi.org/10.1007/978-1-84996-062-5_4.
6. Bäuerle D (ed) (2013) *Laser Processing and Diagnostics: Proceedings of an International Conference, University of Linz, Austria, Vol 39*. Springer Science & Business Media, 15–19.
7. Dutta Majumdar J, Manna I (2003) Laser processing of materials. *Sadhana* 28:495–562. <https://doi.org/10.1007/BF02706446>.
8. Muhammad Alsaadawy, Montasser Dewidar, Ahmed Said, Ibrahim Maher, Taher A. Shehabeldeen (2024) 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) 130:1039–1074. <https://doi.org/10.1007/s00170-023-12768-1>.
9. V. I. Osypenko, O. P. Plakhotnyi, S. P. Serediuk, M. R. Pruss, O. V. Timchenko, (2023) The influence patterns of nozzle design and technological parameters of gas-assisted laser cutting on the stagnant pressure of assisting gas. *Bulletin of Cherkasy State Technological University*, 28/3, 156-167. <http://vtn.chdtu.edu.ua/article/view/288972>
10. В.І. Осипенко. Вплив внутрішньої структури та розмірів типових сопел на поле ріжучого тиску асистуючого газу при газолазерному різанні / В.І. Осипенко, М.Р. Прусс // Міжвузівський збірник «НАУКОВІ НОТАТКИ». Луцьк, 79/2024 Ст 70-78. DOI 10.36910/775.24153966.2024.79.10