

DOI: [https://doi.org/10.25140/2411-5363-2025-3\(41\)-79-90](https://doi.org/10.25140/2411-5363-2025-3(41)-79-90)

УДК 621.375.826:621

**Максим Вікторович Романенко¹, Олексій Дмитрович Кагляк²,
Віктор Васильович Романенко³**

¹аспірант кафедри лазерної техніки та фізико-технічних технологій

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського» (Київ, Україна)

E-mail: romanenkoma.ua@gmail.com. **ORCID:** <https://orcid.org/0009-0006-8803-2278>

²кандидат технічних наук, завідувач кафедрою лазерної техніки та фізико-технічних технологій

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського» (Київ, Україна)

E-mail: kaglyak.olexa@gmail.com. **ORCID:** <http://orcid.org/0000-0002-5602-543X>

³кандидат технічних наук, доцент кафедри лазерної техніки та фізико-технічних технологій

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського» (Київ, Україна)

E-mail: romvvv@gmail.com. **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0003-1918-7090>

ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ ГАЗОЛАЗЕРНОЇ РІЗКИ МАЛОВУГЛЕЦЕВИХ СТАЛЕЙ ПОТУЖНИМ ЛАЗЕРОМ

Розглянуто конструкцію, конфігурацію та склад технологічного обладнання, яке працює з використанням потужного лазерного випромінювання. Створено новий підхід для визначення максимально можливих швидкостей різання заготовок різної товщини із маловуглецевих сталевих листів. Проведено аналіз впливу типу і тиску технологічного газу, а також параметрів фокусування лазерного променя на швидкість різання маловуглецевих сталей у різних товщинних діапазонах. Сформульовано узагальнені рекомендації для призначення оптимальних умов різання сталевих листів в діапазоні товщин від 5 до 80 мм.

Ключові слова: лазер; газолазерне різання; маловуглецева сталь; оптимальна швидкість різання; умови фокусування та розфокусування лазерного випромінювання.

Актуальність теми дослідження

Лазерне різання металів є важливим технологічним процесом, що знайшов широке застосування в різних сферах промисловості, зокрема в автомобільній, авіаційній, суднобудівній галузях, а також у машинобудуванні загального профілю. Суть технології лазерного різання полягає в тому, що вузьконаправлений пучок лазерного випромінювання концентрується у пляму на поверхні металу або поблизу неї, внаслідок чого метал цієї ділянки нагрівається через вплив потужного джерела енергії розплавляється або випаровується. Додатково до лазерного випромінювання в зону обробки подається струмінь технологічного (асистуючого) газу, у ролі якого може бути кисень, стиснене повітря, азот. Цей струмінь газу механічно усуває залишки продуктів руйнування з розрізу. При використанні кисню в зоні обробки процес руйнування доповнюється екзотермічною реакцією горіння металу, що додатково підсилює тепловий ефект та сприяє ефективнішому розрізанню. Цей метод має назву газолазерного різання (ГЛР).

Широкий діапазон товщин металів, які можуть бути розрізані цим способом, та висока якість і точність крайок різку робить цей метод одним із провідних серед сучасних способів металлообробки. Тому подальше всебічне вивчення процесу ГЛР є актуальною проблемою.

Постановка проблеми. У процесі газолазерного різання металів використовуються лазерні випромінювачі різного типу, які відрізняються за принципом дії та параметрами випромінювання. Ключовими характеристиками лазерного променя є його потужність і довжина хвилі. На сьогодні для виконання лазерного різання все більше застосовують випромінювання з потужністю в діапазоні до 20 кВт. Таку значну потужність можуть генерувати волоконні лазери, випромінювання яких на довжині хвилі 1,06 – 1,08 мкм досить задовільно поглинається металами, що сприяє застосуванню таких лазерів для ГЛР. Крім того, волоконні лазери мають досить високий ККД – до 30-40 %, та ці лазери майже не потребують експлуатаційних затрат (крім, затрат на електроенергію).

Для здійснення лазерного розрізання сталевих листів необхідно створити спеціалізований лазерний технологічний комплекс (ЛТК), який може функціонувати як автономно, так і як частина великої виробничої системи. Щоб повною мірою використати переваги лазерної технології різання металів, такі як висока швидкість обробки, точність, локалізована дія теплового джерела на зону різу, а також для гарантування безпеки, надійної роботи, тривалого терміну служби та зниження потреб в обслуговуванні, ЛТК повинен бути максимально автоматизованим. У разі інтеграції ЛТК у структуру складніших виробничих систем його доцільно також роботизувати [1].

До складу автоматизованого ЛТК входять ключові елементи: сам лазерний генератор, система доставки й фокусування лазерного променя (лазерна головка), стіл із можливістю переміщення заготовки по двох координатах X і Y , технологічний лазерний пост та система автоматичного керування. Є і третя, установча координата фокусної відстані Z . Якщо ж головка забезпечена автоматичним контролем фокусної відстані, то переміщення по останній координаті відбувається і в процесі різання [2]. При цьому постає проблема: як найбільш ефективно використовувати потужне лазерне випромінювання для розрізання металевих листів із різних сталей та різних їх товщин, щоб забезпечити більш широке впровадження технології ГЛР у різних галузях машинобудування.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Маловуглецеві сталі широко використовуються при отриманні різних деталей в процесі виготовлення різноманітних машин та приладів. Розглянемо ключові технологічні чинники, що визначають ефективність ГЛР цих сталей за допомогою потужного лазерного випромінювання.

Насамперед нас цікавитиме товщина листового металу, що підлягає розрізанню. Головною метою є забезпечення наскрізного різу заготовки заданої товщини з досягненням потрібної якості крайок різів. При цьому застосування волоконних лазерів потужністю у 20 кВт відкриває можливості для різання таких сталей товщиною до 80 мм при забезпеченні стабільної якості різів.

Різна товщина сталей вимагає індивідуального підбору параметрів режиму ГЛР. З літературних джерел відомо [3; 4], що для тонких сталей (від 1 до 5 мм) характерні високі швидкості різання та невеликий тиск кисню, що дозволяє запобігти перегріванню і термічному викривленню отриманих деталей. У випадку різання сталей товщиною від 10 до 40 мм необхідно досягти оптимального співвідношення між потужністю лазера і швидкістю різання, щоб гарантувати отримання якісного та точного різу. При різанні ж сталевих листів великих товщин (від 40 до 80 мм) потрібно використовувати високі потужності випромінювання, застосовуючи різке зменшення швидкості різання, щоб забезпечити якісне наскрізне прорізання листової сталі. Виконані іншими авторами дослідження вказують на те, що застосування волоконних лазерів потужністю до 20 кВт відкриває можливості для різання сталей завтовшки до 80 мм при забезпеченні стабільної якості отриманого різу [5; 6].

Останнім часом велика кількість наукових праць присвячена оптимізації технологічних режимів ГЛР для отримання необхідної точності та якості виконаних різів за допомогою потужного лазерного випромінювання [7–10]. Крім того, у багатьох роботах описуються різноманітні технічні рішення та пристрої, спрямовані на підвищення ефективності процесу газолазерного різання [11–13]. Також активно проводяться дослідження з візуалізації й моніторингу фізичних явищ у зоні різання з використанням високошвидкісних відеокамер [14–16]. Значну увагу приділяють також питанням вибору складу та тиску технологічного газу, що подається у зону різання [17; 18]. Зазвичай збільшення тиску асистуючого газу сприяє підвищенню швидкості обробки, однак може також призвести до зростання витрат на експлуатацію. Для маловуглецевих сталей характерні такі типові діапазони тиску (з урахуванням вартості застосовуваних газів): кисень – у межах 0,05 – 0,6 МПа; азот або стиснене повітря – 1,0...2,0 МПа.

Важливу роль також відіграє довжина фокусної відстані оптичної системи лазера, а також правильне налаштування положення плями фокусування відносно верхньої поверхні оброблюваної заготовки. Зазвичай фокусну пляму зміщують на більшу або меншу величину вглиб різь. У таких умовах необхідно точно підібрати тиск кисню, щоб запобігти виникненню турбулентних потоків газу всередині каналу різь [3–4].

З урахуванням наведеного вище можна зробити висновок, що, попри велику кількість проведених досліджень, тема ГЛР сталевих листів, зокрема листів маловуглецевих сталей, все ще потребує подальших досліджень у питаннях встановлення оптимальних режимів різання заготовок різних діапазонів товщин випромінюванням у 20 кВт.

Мета дослідження. Метою виконаного нами дослідження є визначення впливу різних параметрів процесу ГЛР на вибір оптимального значення швидкості різання маловуглецевих сталей різної товщини. Це дозволить забезпечити вибір відповідних умов розфокусування лазерного променя, а також правильне визначення типу та тиску технологічного газу, що дасть можливість отримати високу продуктивність ГЛР при забезпеченні достатньої якості крайок виконаних різь.

Викладення основного матеріалу. Всі попередньо виконані дослідження вказують на те, що задовільну якість поверхні різь можна забезпечити при виконанні різання на максимально допустимій швидкості, при якій ще можливе наскрізне прорізання металевих листів заданої товщини. Таку швидкість доцільно вважати оптимальною та позначати як V_{opt} . У роботі [19] була запропонована методика поступової ступінчастої зміни швидкості різання. При цьому швидкість ступінчасто збільшувалась так, щоб зрештою отримати неповний проріз матеріалу заданої товщини. При цьому останнє значення отримання наскрізного різь і вважалось оптимальною швидкістю різання заготовки потрібної товщини.

Нами запропонована інша методика пошуку оптимального значення швидкості різання заготовки конкретної товщини. Враховуючи нові широкі можливості реалізації режимів різання за допомогою сучасного обладнання, було запропоновано розрізати заготовку зі змінною швидкістю: починаючи з мінімального значення, яке забезпечує повне прорізання матеріалу, і поступово та безперервно підвищуючи її до того моменту, коли наскрізне різання вже не відбувається. Швидкість, при якій прорізання перестає бути наскрізним, і вважається оптимальним значенням V_{opt} для цієї товщини заготовки. На рис. 1 наведено алгоритм визначення оптимальної швидкості різання при ГЛР заготовки певної товщини.

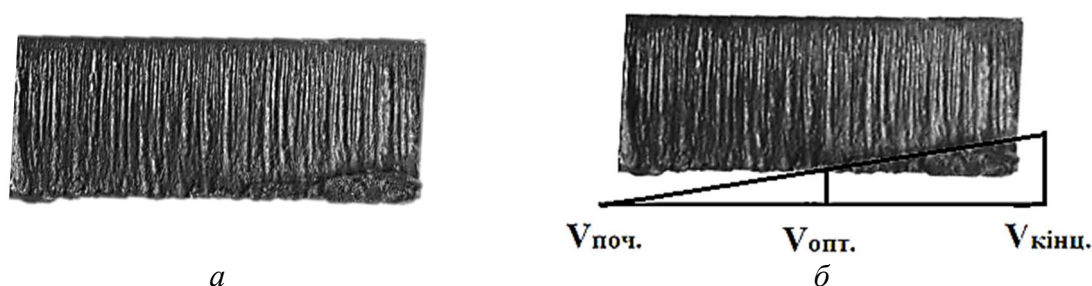


Рис. 1. Запропонована методика визначення оптимальної швидкості ГЛР сталі:

а – заготовка, на якій виконувалась різька зі змінною швидкістю;

б – ця ж заготовка з графіком зміни швидкості ГЛР

Усі наведені в цій статті дослідження здійснювалися згідно із запропонованим нами підходом, тому отримані значення швидкості різання завжди були оптимальними для конкретної товщини маловуглецевої сталі та забезпечували стабільне наскрізне прорізання заготовки.

При проведенні експериментальних досліджень передусім зверталася увага на вибір умов опромінення заготовок. Навіть з урахуванням того, що при ГЛР коефіцієнт поглинання випромінювання в зоні руйнування становить від 30 до 70 %, при використанні лазерного випромінювання потужністю у 20 кВт густина потужності W_P у зоні фокусування може досягати значної величини в $5 \cdot 10^7$ Вт/см². Такі високі рівні W_P забезпечують у зоні дії сфокусованого променя температуру, що перевищує температуру випаровування сталі. При цьому час дії лазерного випромінювання на матеріал, який визначається тривалістю проходження променем відстані, що дорівнює діаметру фокусної плями D_F зі швидкістю різання V , є дуже коротким. Це безпосередньо впливає на глибину прорізу, тобто на максимальну товщину заготовок, що розрізаються. Також варто зазначити, що ефективне різання маловуглецевих сталей можливе навіть за значно нижчих рівнів густини потужності – наприклад, при W_P , що дорівнює $5 \cdot 10^5$ Вт/см². Таке різання теж дає якісний результат.

Саме тому одним із ключових параметрів при різанні сталей потужним лазерним випромінюванням на рівні в 20 кВт є величина та напрямок розфокусування лазерного променя. У системах з потужними лазерами зазвичай використовують стандартну фокусуючу головку, яка забезпечує співвісну подачу лазерному випромінюванню технологічного газу в зону різання та дозволяє налаштовувати як напрям розфокусування, так і його точну величину на виході з різального сопла. Ці налаштування можуть виконуватись як вручну, так і в автоматизованому режимі [2].

Залежно від вибраного значення розфокусування ΔF змінюється діаметр фокусної плями D_F на поверхні оброблюваної сталі, що, в свою чергу, впливає на густину потужності в зоні різання. У табл. 1 наведено залежність діаметра плями фокусування та густини потужності (з урахуванням коефіцієнта поглинання 0,7) від різних ступенів розфокусування ΔF . Як вже прийнято в лазерній техніці, будемо вважати, що зміщення фокуса у бік фокусувальної лінзи є «позитивним» і позначатимемо його знаком «+» перед значенням ΔF . Відповідно, зміщення фокусної точки вглиб заготовки вважатимемо «негативним» напрямком і позначатимемо знаком «-».

Таблиця 1 – Залежність діаметра плями фокусування та густини потужності лазерного випромінювання від величини розфокусування

Параметри, D_F та W_P	Величина, ΔF , мм								
	0	± 2	± 3	± 4	± 6	± 8	± 10	± 12	± 14
Діаметр розфокусування, D_F , мм	0,2	0,33	0,50	0,66	1,00	1,33	1,67	2,0	2,34
Густина потужності, W_P , Вт/см ²	4,5х 10 ⁷	1,6х 10 ⁷	7,2х 10 ⁶	4,0х 10 ⁶	1,8х 10 ⁶	10 ⁶	6,5х 10 ⁵	4,3х 10 ⁵	3,3х 10 ⁵

Проте розфокусування лазерного променя не лише знижує густину потужності, але й безпосередньо впливає на тривалість дії випромінювання в зоні різання. Цей час t_p визначається як відношення діаметра світлової плями, що залежить від ступеня розфокусування, до швидкості різання, тобто: $t_p = D_F/V$. Очевидно, що зі збільшенням часу t_p зростає й товщина металу, яку можна прорізати. Але ж зі збільшенням величини плями розфокусування зменшується і густина потужності в зоні різання, що своєю чергою веде до зменшення швидкості прорізання вглиб різі. Тобто при значному розфокуванні може настати такий момент, коли різання взагалі стає неможливим.

Згідно з теорією руйнування при ГЛР [20], швидкість руйнування V_P , що протікає від верхньої поверхні в глибину металу для потужного випромінювання складає 10-30 м/хв, що і забезпечує розрізання досить великої товщини заготовок. При цьому товщина прорізання H може бути розрахована, як $H = V_P \cdot t_P$. З іншого боку, як наведено вище, $t_p = D_F / V$. Отже, отримуємо просту залежність для визначення швидкості різання – $V = (V_P \cdot D_F) / H$. Оскільки діаметр розфокусування D_F безпосередньо залежить від ступеня розфокусування ΔF , то останній буде досить значно впливати на взаємозалежність товщини сталі та швидкості

її розрізання потужним лазерним випромінюванням. Користуючись наведеними міркуваннями та даними табл. 1, розраховано теоретичну залежність можливої швидкості різання сталі від її товщини при середньому значенні швидкості руйнування ($V_p = 20$ м/хв) для різних умов розфокусування (рис. 2).

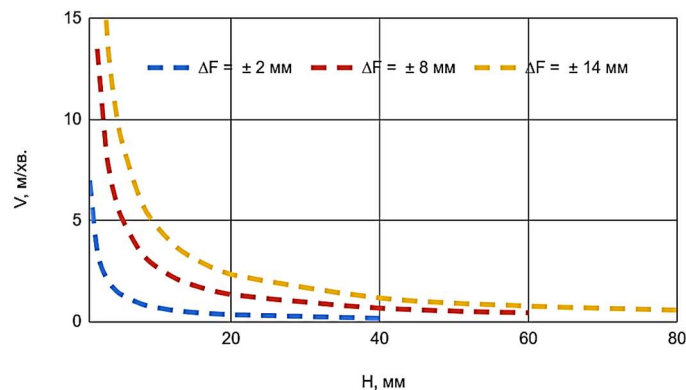


Рис. 2. Теоретична залежність швидкості різання від товщини заготовки за різних умов розфокусування лазерного випромінювання

Отже, теоретичне прогнозування показує, що при ГЛР маловуглецевих сталей потужним лазерним випромінюванням в умовах великих значень розфокусування (± 14 мм) можливим є розрізання заготовок товщиною до 80 мм.

Проведені надалі експериментальні дослідження внесли деякі корегування в теоретичні прогнози. Так, було встановлено, що існують помітні відмінності в особливостях ГЛР маловуглецевих сталей залежно від товщини заготовки. Для тонких листів (5...20 мм), середньої товщини (20-45 мм) та значних товщин (45...80 мм) мають місце відмінності в режимах різання. Зокрема, при розрізанні тонких сталей із використанням азоту або стисненого повітря як технологічного газу досягається набагато вища швидкість їх різання, ніж при застосуванні кисню, інколи в декілька разів. Враховуючи також, що застосування стисненого повітря є доступнішим та економічно вигіднішим у порівнянні з азотом, а результати щодо швидкості різання є майже однаковими, то серію експериментів було проведено саме з подачею стисненого повітря з високим тиском в 1,5...2,0 МПа.

Натомість якщо проводити різання киснем на таких самих швидкостях, то в зоні різ утворюються оксиди й шлаки, які складно видаляються з каналу різ за умов помірного тиску газу (0,15...0,2 МПа). Підвищення ж тиску кисню до рівня, що застосовується для стисненого повітря (1,5...2,0 МПа), є технічно ускладненим і суттєво дорожчим.

Різання металів великої товщини із застосуванням нейтральних газів (зокрема стисненого повітря) є неможливим, оскільки при знижених швидкостях, характерних для такого процесу різання, одного лише лазерного випромінювання недостатньо для підтримки процесу руйнування в зоні різ, а вагому частку в загальному тепловому балансі починає займати теплова енергія, що виділяється внаслідок екзотермічного окиснення металу в кисневому середовищі [20].

Експериментальні дослідження засвідчили також, що як величина, так і напрям зміщення фокусної площини відносно поверхні сталевих листів впливають на товщину металу. Так, для сталевих заготовок завтовшки від 5 до 20 мм оптимальними умовами розфокусування є заглиблення фокуса вглиб різ на величину від 0 до -8 мм. У цьому діапазоні спостерігається така закономірність: кожне збільшення товщини матеріалу на 2 мм вимагає зміщення фокуса вглиб заготовки на додаткові -1 мм.

Для середніх товщин (від 20 до 45 мм) величина ΔF залежно від збільшення товщини заготовки змінюється інакше: на кожні 5 мм приросту товщини потрібно поглиблювати фокус на кожні -1 мм. У цьому випадку сумарний діапазон фокусного заглиблення становить від -10 до -14 мм.

У випадку ГЛР металів завтовшки 45-80 мм ефективніші результати досягаються при розміщенні фокуса вище заготовки: на +13 мм для товщин 45-60 мм і на +14 мм – для товщин 60-80 мм.

На рис. 3, а показано, як змінюється максимальна швидкість різання маловуглецевої сталі залежно від товщини заготовки в межах малих значень товщини (5-20 мм). Різання здійснювалося з використанням стисненого повітря під тиском 0,8-1,0 МПа, при цьому фокус зміщувався в глибину різу в межах від 0 до -8 мм залежно від товщини заготовки згідно з наведеним вище правилом.

Залежність оптимальної швидкості різання від товщини заготовки для середніх значень товщин представлена на рис. 3, б. Як технологічний газ для цього діапазону товщин застосовувався кисень з величиною тиску від 0,1 до 0,16 МПа. Різання відбувалося при заглибленні фокусу з дотриманням встановлених вище умов розфокусування, тобто коли заглиблення фокусної точки становило від -10 до -14 мм.

Також були визначені оптимальні швидкості різання для товщин металу від 15 до 80 мм у середовищі кисню за умови поступового підвищення тиску кисню від 0,07 до 0,18 МПа пропорційно зростання товщини заготовки та при розміщенні точки фокуса вище заготовки згідно з описаними раніше умовами (рис. 3, в).

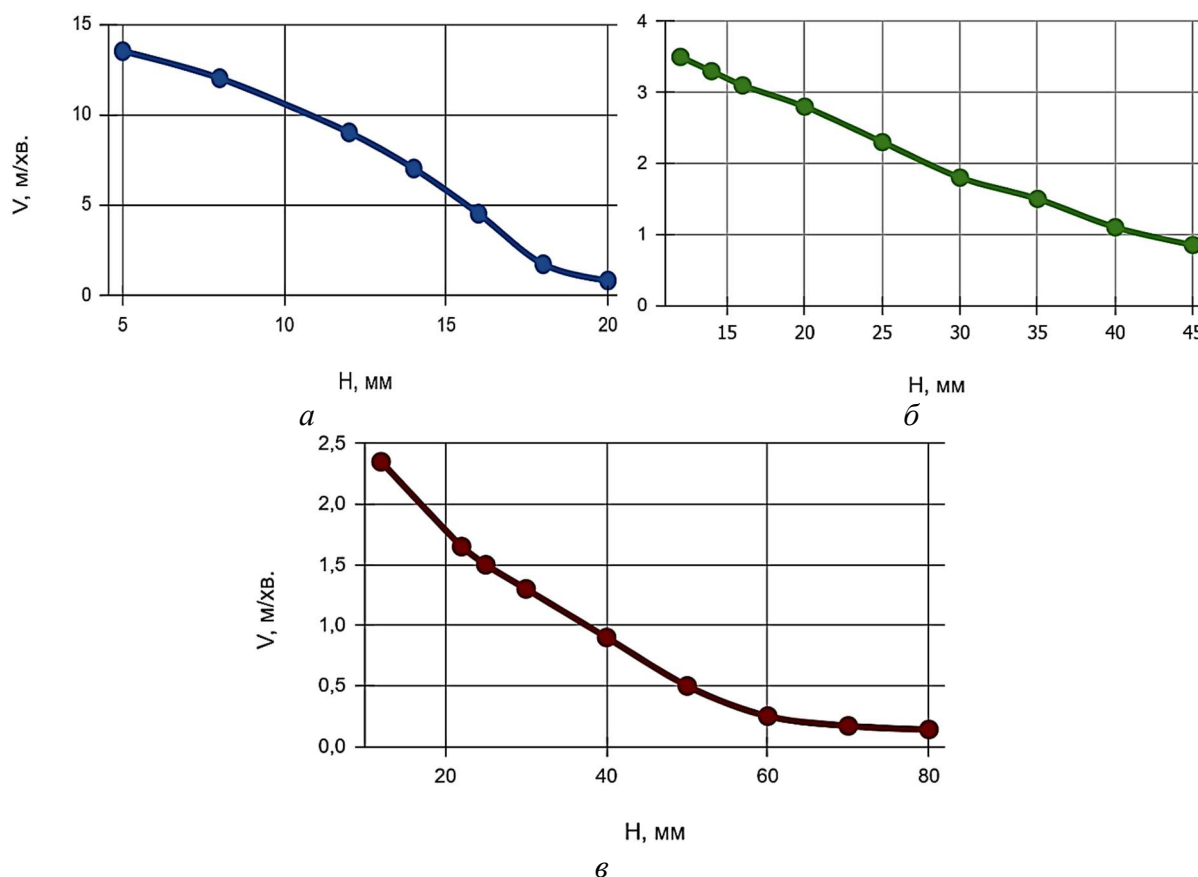


Рис. 3. Залежність швидкості різання маловуглецевих сталей від товщини заготовки для різних діапазонів товщин при застосуванні різноманітних технологічних газів та при різних умовах розфокусування лазерного випромінювання:
а – для незначних товщин заготовки (5...20 мм); б – для середніх значень товщин (15...45 мм); в – для великих товщин заготовок (15...80 мм)

Вигляд поверхонь різів при ГЛР маловуглецевої сталі в заготовках товщиною 18, 40 та 65 мм при відповідних оптимальних умовах різання представлений на рис. 4.

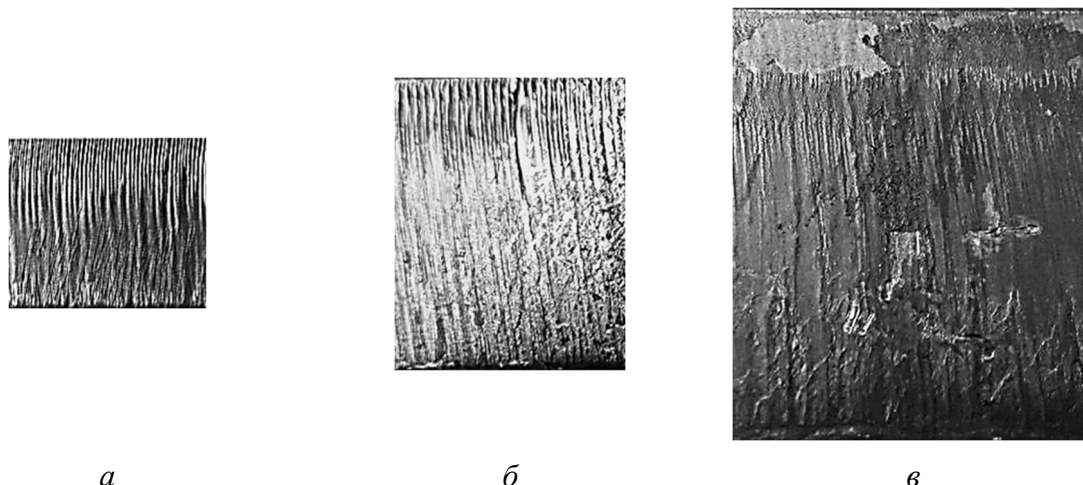


Рис. 4. Фото поверхонь різів у маловуглецевих сталей при встановлених оптимальних умовах різання заготовки завтовшки 18 мм (а); 40 мм (б); 65 мм (в)

З метою формування загальних рекомендацій щодо вибору параметрів різання маловуглецевих сталей результати, отримані для окремих груп (рис. 3, а, б та в), були об'єднані на одному графіку (рис. 5). Аналіз цього узагальненого графіка підтверджує раніше зроблений висновок, що застосування стисненого повітря з високим тиском при обробці тонких заготовок забезпечує суттєве підвищення швидкості різання (крива графіка для 1-го режиму) порівняно із використанням кисню при низькому тиску (2-й режим). Так, із зображеного на рис. 5 сумарного графіка видно, що для сталей товщиною 5, 10 та 15 мм маємо збільшення швидкості при використанні стисненого повітря щодо кисню відповідно в 3,4, 2,6 та 1,4 раза.

Крім того, варто зазначити, що при обробці сталей середньої товщини лазерне різання на режимах із заглибленням точки фокуса променя вглиб від верхньої поверхні (крива графіка для 2-го режиму) забезпечує деяке збільшення швидкості порівняно з режимом, де фокус розташовується вище поверхні заготовки (3-й режим). Зокрема, для товщин 20, 30 і 40 мм швидкість різання при 2-му режимі перевищувала відповідні значення для 3-го режиму на 23, 12 та 6 % відповідно. Ось чому для обробки сталей середньої товщини доцільніше застосовувати 2-й режим, який є більш ефективним. Водночас, як видно з рис. 5, зі зростанням товщини заготовки швидкість різання у 2-му режимі помітно знижується, що обмежує його ефективність при великих товщинах. Натомість 3-й режим забезпечує можливість різання сталей товщиною аж до 80 мм.

Наведена на рис. 5 пунктирна крива теоретичної залежності можливої швидкості різання сталі від її товщини для величини розфокусування $\Delta F = \pm 14$ показує відповідність прогнозованого характеру протікання процесу ГЛР щодо експериментальних результатів. Разом з тим, оптимальний експериментальний вибір режимів різання забезпечує збільшення товщини сталей, що розрізаються, для діапазону їхніх товщин від 5 до 20 мм проти теоретично розрахованих результатів ГЛР.

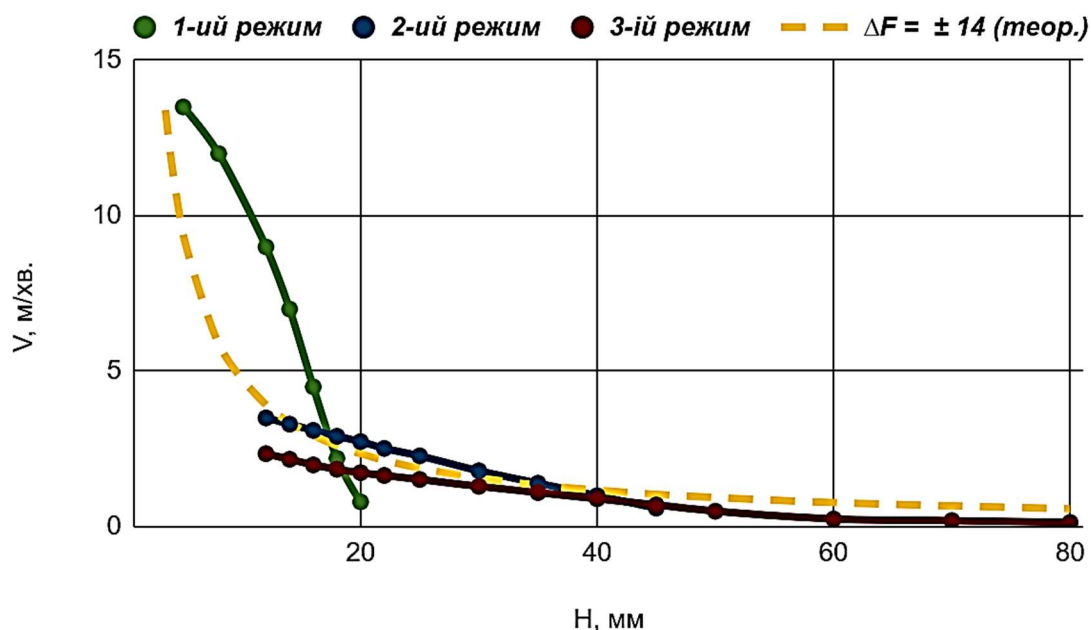


Рис. 5. Експериментально отримані та теоретично розраховані значення швидкості різання маловуглецевих сталей залежно від товщини заготовки у процесі реалізації запропонованих оптимальних режимів різання

Ґрунтуючись на даних, поданих на рис. 5, нами була розроблена номограма (рис. 6), яка дає змогу визначити гранично допустимі швидкості лазерного різання маловуглецевих сталей різної товщини при потужності випромінювання у 20 кВт. Водночас варто зазначити, що процес ГЛР для сталей заданої товщини можливий не лише на граничних швидкостях, які позначені кривою на номограмі, але й у межах усього діапазону швидкостей, що охоплює відповідна кольорова зона.

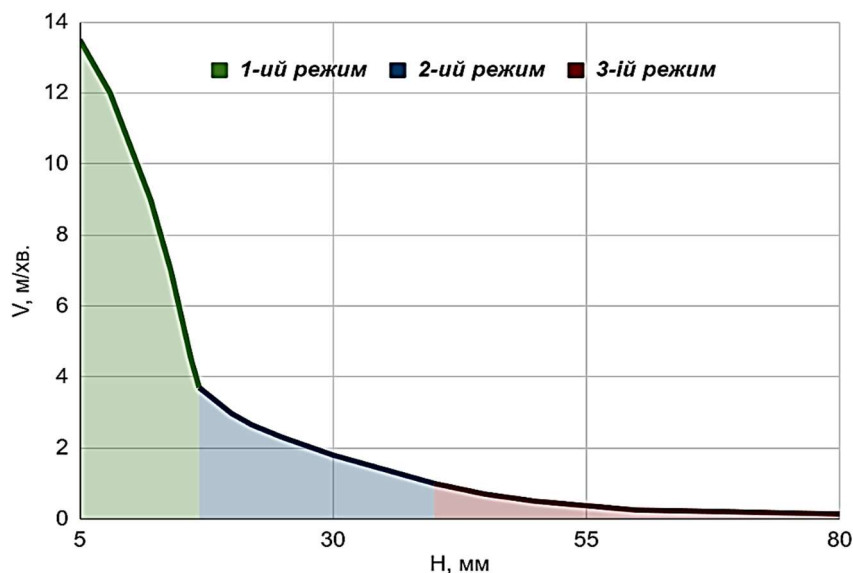


Рис. 6. Номограма для визначення оптимальної швидкості ГЛР маловуглецевих сталей заданої товщини лазерним випромінюванням потужністю у 20 кВт

Використовуючи номограму, обов'язково слід враховувати рекомендації щодо призначення потрібних умов різання, що зведені в табл. 2. Ця таблиця застосовується разом з номограмою для зручності визначення оптимальної швидкості ГЛР маловуглецевих сталей різної товщини потужним лазерним випромінюванням у 20 кВт.

Таблиця 2 – Умови вибору оптимальних режимів ГЛР маловуглецевих сталей

Технологічні параметри різання Діапазон товщин, мм	Вид та тиск робочого газу		Умови фокусування (розфокусування)		
	Тиск стисненого повітря, МПа	Тиск кисню, МПа	Діапазон величини, мм	Правило розфокусування	
				При збільшенні товщини, мм	Приріст величини розфокусування, мм
5 – 20	0,8 – 1,5	—	0 – -8	2	-1
20 – 45	—	0,1 – 0,1	-10 – -14	5	-1
45 – 80	—	0,07 – 0,18	+13 – +14	—	—

Отже, спираючись на залежність оптимальної швидкості лазерного різання маловуглецевих сталей від товщини заготовки, поданої у вигляді номограми на рис. 6, а також враховуючи параметри розфокусування лазерного випромінювання та рекомендовані значення тиску основних робочих газів (кисню або стисненого повітря), наведені в табл. 1, можна визначити найефективніші режими ГЛР для обробки листових заготовок з маловуглецевих сталей в широкому діапазоні товщин від 5 до 80 мм.

Висновки. Використання потужних волоконних лазерів для здійснення ГЛР металів забезпечує ефективне та якісне розділення маловуглецевих сталей у широкому діапазоні їх товщин. Це можливо завдяки варіативності параметрів розфокусування лазерного променя та регулюванню тиску різних видів технологічних газів.

Для досягнення гарантованого наскрізного різ з належною якістю оброблених країв була запропонована оригінальна методика, яка дає змогу визначати гранично допустимі швидкості різання для заготовок заданої товщини. Ефективність такого підходу підтверджена фото типових різів, зроблених у кожній із груп товщин, що демонструють практичну доцільність і надійність запропонованих рішень у підборі оптимальних режимів різання маловуглецевих сталей.

Одним із ключових чинників при роботі з потужним лазерним випромінювання є вибір параметрів розфокусування лазерного променя – як за величиною, так і за напрямком. Завдяки розробленим умовам розфокусування стало можливим впорядкувати вибір раціональних режимів газолазерного різання для широкого діапазону товщин маловуглецевих сталей. Отримані залежності між товщиною заготовки та оптимальною швидкістю різання свідчать про можливість, з одного боку, здійснювати різання тонколистових маловуглецевих сталей на високих швидкостях до 15 м/хв при використанні як робочий газ стисненого повітря, а з іншого – забезпечувати різання масивних заготовок товщиною до 80 мм із застосуванням кисню.

Сформульовано узагальнені рекомендації щодо вибору режимів різання маловуглецевих сталей завдяки об'єднанню даних усіх груп заготовок різної товщини на одному графіку, що значно спрощують процес визначення оптимальних параметрів ГЛР. Розроблено номограму та таблицю рекомендацій для призначення потрібних умов різання, що дозволяє швидко та зручно визначати оптимальні швидкості різання маловуглецевих сталей потрібної товщини в діапазоні їх товщин від 5 до 80 мм.

У подальшому експериментальні дослідження процесу ГЛР маловуглецевих сталей за допомогою потужного лазерного випромінювання дозволять визначити ті параметри різання, які матимуть вплив на якісні характеристики країв різів, отриманих таким способом різання.

Список використаних джерел

1. Naresh, S., & Khatak, P. (2022). Laser cutting technique: A literature review. *Materials Today: Proceedings*, 56(5 SI), 24841-24849.
2. QY Laser. (n.d.). *Основні характеристики лазерного верстата для різання*. <http://ua.qylaser.com>.
3. Tamura, K., & Toyama, S. (2017). Laser cutting performances for thick steel specimens studied by molten metal removal conditions. *Journal of Nuclear Science and Technology*, 54, 1011-1017.

4. Seon, S., Shin, J. S., Oh, S. Y., Park, H., Chung, C.-M., Kim, T.-S., Lee, L., & Lee, J. (2018). Improvement of cutting performance for thick stainless steel plates by step-like cutting speed increase in high-power fiber laser cutting. *Optics & Laser Technology*, 103, 311-317. <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2018.01.054>.
5. Wandera, C., & Kujanpää, V. (2010). Characterization of the melt removal rate in laser cutting of thick-section stainless steel. *Journal of Laser Applications*, 22(2), 62-70. <https://doi.org/10.2351/1.3455824>.
6. Karatas, C., Keles, O., Uslan, I., & Usta, Y. (2006). *Laser cutting of steel sheets: Influence of workpiece thickness and beam waist position on kerf size and stria formation*. *Journal of Materials Processing Technology*, 172(1), 22-29. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2005.08.017>.
7. Guarino, S., Ponticelli, G. S., & Venettacci, S. (2020). Environmental assessment of selective laser melting compared with laser cutting of 316L stainless steel: A case study for flat washers' production. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 31, 525-538. <https://doi.org/10.1016/j.cirpj.2020.08.004>.
8. Mahrle, A., Borkmann, M., & Pfohl, P. (2021). Factorial analysis of fiber laser fusion cutting of AISI 304 stainless steel: Evaluation of effects on process performance, kerf geometry and cut edge roughness. *Materials*, 14(10), Article 2669. <https://doi.org/10.3390/ma14102669>.
9. Sharma, A., & Yadava, V. (2018). Experimental analysis of Nd-YAG laser cutting of sheet materials: A review. *Optics & Laser Technology*, 98, 264-280. <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2017.08.002>.
10. 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. *Optics & Laser Technology*, 154, Article 108332. <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2022.108332>.
11. Rodrigues, G. C., Vorkov, V., & Duflou, J. R. (2018). Optimal laser beam configurations for laser cutting of metal sheets. *Procedia CIRP*, 74, 714-718. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2018.08.026>.
12. Pang, H., & Haecker, T. (2020). Laser cutting with annular intensity distribution. *Procedia CIRP*, 94, 48-54. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2020.09.050>.
13. Yamanashi, T. (2022). Enhancing cutting performance with an oscillating laser beam. *PhotonicsViews*, 19, 84-86.
14. Levichev, N., Staudt, T., Schmidt, M., & Duflou, J. R. (2021). Hyperspectral imaging and trim-cut visualization of laser cutting. *CIRP Annals – Manufacturing Technology*, 70, 207-210. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2021.04.071>.
15. Levichev, N., Costa Rodrigues, G., Vorkov, V., & Duflou, J. R. (2021). Coaxial camera-based monitoring of fiber laser cutting of thick plates. *Optics & Laser Technology*, 136, Article 106743. <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2020.106743>.
16. Levichev, N., Tomás García, A., & Duflou, J. R. (2022). On melt flow visualization in high-power fiber laser cutting. *Proceedings of SPIE*, Article 119940D. <https://doi.org/10.1117/12.2606543>.
17. Chen, S.-L. (1999). The effects of high-pressure assistant-gas flow on high-power CO2 laser cutting. *Journal of Materials Processing Technology*, 88(1-3), 57-66. [https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(98\)00364-3](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(98)00364-3).
18. Riveiro, A., et al. (2019). Laser cutting: A review on the influence of assist gas. *Materials*, 12(2), 1-31. <https://doi.org/10.3390/ma12020254>.
19. Alsaadawy, M., et al. (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*, 30, 1039-1074. <https://doi.org/10.1007/s00170-023-11592-7>.
20. Romanenko, V. V. (2003). Mechanism of gas-assisted laser metal cutting. In *Laser Technologies in Welding and Materials Processing* (pp. 68-70).

References

1. Naresh S., Khatak P. Laser cutting technique: a literature review. *Mater Today Proc.*, 2022, 56(5 SI), 24841-2489.
2. Osnovni kharakterystyky lazernoho verstata dlia rizannia firmy QY Laser [Main characteristics of QY Laser laser cutting machine]. (n.d.). <http://ua.qylaser.com>.
3. Tamura, K., Toyama, S. Laser cutting performances for thick steel specimens studied by molten metal removal conditions. *J. Nucl. Sci. Technol.*, 2017, 54, 1011-1017.
4. Seon S., Shin J.S., Oh S.Y., Park H., Chung C.-M., Kim T.-S., Lee L., Lee J. Improvement of cutting performance for thick stainless steel plates by step-like cutting speed increase in high-power fiber laser cutting. *Opt. Laser Technol.*, 2018, 103, 311-317.

5. Wandera C., Kujanpaa V. Characterization of the melt removal rate in laser cutting of thick-section stainless steel. *J. Laser Appl.*, 2010, 22, 62-70.
6. Karatas C., Keles O., Uslan I., Usta Y. Laser cutting of steel sheets: Influence of workpiece thickness and beam waist position on kerf size and stria formation. *J. Mater. Process. Technol.*, 2006, 172, 22-29.
7. Guarino S., Ponticelli G.S., Venettacci S. Environmental assessment of selective laser melting compared with laser cutting of 316L stainless steel: A case study for flat washers' production. *CIRP J. Manuf. Sci. Technol.* 2020, 31, 525-538.
8. Mahrle A., Borkmann M., Pfohl P. Factorial analysis of fiber laser fusion cutting of AISI 304 stainless steel: Evaluation of effects on process performance, kerf geometry and cut edge roughness. *Materials*, 2021, 14, Art. 2669.
9. A. Sharma, V. Yadava. Experimental analysis of Nd-YAG laser cutting of sheet materials. *Optics & Laser Technology*, 2018, 98, 264-280.
10. Liu Y., Zhang S., Zhao Y., Ren Z. Experiments on the kerf quality characteristic of mild steel while cutting with a highpower fiber laser. *Opt Laser Technol*, 2022, 154, Art. 108332.
11. Rodrigues G.C., Vorkov V., Duflou J. Optimal laser beam configurations for laser cutting of metal sheets. *Procedia CIRP*, 2018, 74, 714-718.
12. Pang H, Haecker T. Laser cutting with annular intensity distribution. *Procedia CIRP*, 2020, 94, 48-54.
13. Yamanashi, T. Enhancing cutting performance with an oscillating laser beam. *PhotonicsViews*, 2022, 19, 84-86.
14. Levichev N, Staudt T, Schmidt M, Duflou JR. Hyperspectral imaging and trim-cut visualization of laser cutting. *CIRP Ann – Manuf Technol.*, 2021, 70, 207-210.
15. Levichev N, Costa Rodrigues G, Vorkov V, Duflou JR. Coaxial camera-based monitoring of fiber laser cutting of thick plates. *Opt Laser Technol.*, 2021, 136, Art. 106743.
16. Levichev N, Tomás García A, Duflou JR. On melt flow visualization in high-power fiber laser cutting. *Proceedings of SPIE*, 2022, Art. 119940D.
17. Chen S.-L. The effects of high-pressure assistant-gas flow on high-power CO₂ laser cutting. *J. Mater. Process. Technol.*, 1999, 88, 57-66.
18. Riveiro A. et al. Laser cutting: A review on the influence of assist gas. *Materials*, 2019, 12, 1-31.
19. 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.
20. Romanenko V.V. (2003). Mechanism of Gas-Assisted Laser Metal Cutting. *Laser Technologies in Welding and Materials Processing* (pp. 68-70).

Отримано 29.07.2025

UDC 621.375.826:621

Maksym Romanenko¹, Oleksii Kaglyak², Victor Romanenko³

¹graduate student of the Department of Laser Systems and Physical Technologies
National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute» (Kyiv, Ukraine)
E-mail: romanenkomax.ua@gmail.com. **ORCID:** <https://orcid.org/0009-0006-8803-2278>

²PhD in Technical Sciences, Head of the Department of Laser Systems and Physical Technologies
National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute» (Kyiv, Ukraine)
E-mail: kaglyak.olexa@gmail.com. **ORCID:** <http://orcid.org/0000-0002-5602-543X>

³PhD in Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Laser Systems and Physical Technologies
National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute» (Kyiv, Ukraine)
E-mail: romvvv@gmail.com. **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0003-1918-7090>

STUDY OF THE PROCESS OF GAS LASER CUTTING OF LOW-CARBON STEELS WITH A HIGH-POWER LASER

The main drawback of existing studies of gas laser cutting of low-carbon steels of various thicknesses is the lack of a unified methodology for establishing a clear dependency between cutting parameters and the achievement of maximum productivity with proper processing quality. In this regard, this paper analyzes the effect of key factors, in particular the range of

thicknesses of the workpieces being processed, the conditions of focusing and defocusing the laser beam, as well as the type and pressure of the process gas, on the achievement of optimal cutting speeds for low-carbon steel sheets.

The right choice of laser beam defocusing parameters—both in value and direction—is one of the key things when working with powerful laser radiation. Thanks to the accumulated defocusing conditions, it was possible to systemize the selection of effective cutting modes for low-carbon steels and determine the dependence of the optimal cutting speed on the metal thickness for a wide range of these thicknesses. It has also been determined that cutting thin-gauge metals gives better results when using compressed air; while for cutting thick workpieces it is preferable to use oxygen.

The research results made it possible to formulate general recommendations for selecting the optimal gas laser cutting modes for low-carbon steels using 20 kW laser radiation for different workpiece thicknesses. As a result, a nomogram and a table with recommendations for selection of the necessary cutting parameters were created, which complements this nomogram, which together make it possible to set the optimal cutting speeds and significantly facilitate the selection of the relevant technological parameters for gas laser cutting of low-carbon steels within the thickness range from 5 to 80 mm.

Keywords: laser; gas laser cutting; low carbon steel; optimal cutting speed; conditions for focusing and defocusing laser radiation.

Fig.: 6. Table: 2. References: 20.