

М.В. Романенко¹, О.Д. Кагляк¹, В.В. Романенко¹, А.В. Бернацький²*Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені
Ігоря Сікорського»¹**Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України²***ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ГАЗОЛАЗЕРНОГО РІЗАННЯ
НЕРЖАВІЮЧИХ СТАЛЕЙ ПОТУЖНИМ ЛАЗЕРНИМ ВИПРОМІНЮВАННЯМ**

Розроблено новий методичний підхід для визначення оптимальних швидкостей різання сталевих листів різних товщин. Запропоновано склад, компоновку та конструктивні особливості технологічного обладнання при застосуванні потужного лазерного випромінювання. Досліджено вплив виду та тиску технологічного газу, а також умов фокусування лазерного променя на величину оптимальної швидкості різання нержавіючих сталей для різних діапазонів товщин цих сталей.

Ключові слова: лазер, газолазерне різання, швидкість різання, товщина заготовки, умови фокусування лазерного випромінювання

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

**EXPERIMENTAL RESEARCH OF GAS LASER CUTTING OF STAINLESS STEELS
WITH HIGH-POWER LASER RADIATION**

The main drawback of experimental studies of the technological process of gas laser cutting of stainless steels of various thicknesses is their sporadic nature and the lack of a unified approach to establishing the relationship between cutting modes and maximum process productivity with satisfactory cut quality.

Therefore, this study examines the influence of the main factors of gas laser cutting, such as different ranges of workpiece thicknesses, variable conditions of laser beam focusing and defocusing, as well as the type and pressure of process gases on the optimal cutting speed of stainless steel sheets.

As a result of such research, general recommendations have been formulated for selecting the optimal cutting modes for stainless steels using powerful 20 kW laser radiation for different ranges of workpiece thicknesses, taking into account various conditions for gas laser cutting, which significantly simplify the selection of the necessary modes for this type of processing.

Keywords: laser, gas laser cutting, cutting speed, workpiece thickness, laser radiation focusing conditions

Постановка проблеми. Застосування сфокусованого лазерного випромінювання з високою концентрацією енергії дає змогу розрізати майже всі метали та сплави, незалежно від їхніх теплофізичних характеристик. При цьому можна отримати тонкі розрізи з мінімальною зоною теплового впливу. Лазерне різання є однією з найпоширеніших технологічних операцій, які виконуються за допомогою лазерів — на цю операцію припадає близько 40-45% усіх промислових застосувань лазерних технологій. Це різання використовують майже в усіх галузях промисловості: від авіакосмічної, суднобудівної та автомобільної промисловості до високоточного приладобудування та медицини. Ця технологія однаково ефективна як для різання великих виробів (наприклад, деталей кузовів, будівельних конструкцій або вузлів літаків), так і для отримання мініатюрних деталей з високою точністю (таких як фільтри, прокладки чи медичні імпланти). Процес, під час якого під дією лазерного випромінювання відбувається нагрівання, плавлення та випаровування металу вздовж лінії різу, а продукти руйнування видаляються потоком допоміжного газу називається газолазерним різанням металів (ГЛР). Тому подальше всебічне вивчення процесу ГЛР є актуальною проблемою.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Механізми ГЛР базуються на процесах нагрівання, плавлення, випаровування, хімічних реакціях горіння та видаленні розплавленого матеріалу з області різу. При цьому видалення продуктів руйнування металів з каналу різу полягає в переміщенні рідкої ванни розплаву по товщині матеріалу, тобто уздовж каналу різу, за допомогою динамічного впливу газу [1]. При ГЛР в якості технологічних газів використовується кисень, стиснене повітря, інертний чи нейтральний газ. При газолазерному різанні в залежності від властивостей оброблюваного матеріалу і роду газу, що подається, розрізняють два механізми: хімічний і фізичний.

Хімічний механізм характеризується суттєвим внеском енергії реакції горіння в загальний тепловий баланс. Такий механізм різання зазвичай використовується для матеріалів, схильних до займання і горіння нижче точки плавлення і таких, що утворюють рідкоплинні оксиди. Прикладами можуть бути низьковуглецева сталь і титан. Фізичний механізм полягає в плавленні металу лазерним випромінюванням та видаленні розплаву із зони різання динамічною дією струменю газу. Такий механізм спостерігається зазвичай при обробці металів з малим тепловим ефектом реакції

горіння або металів, що утворюють при горінні тугоплавкі оксиди (леговані, високовуглецеві та нержавіючі сталі, алюміній, мідь та ін.), а також при використанні піддування інертними газами.

При ГЛР металів розрізняють стаціонарний характер руйнування, коли рідка ванна розплаву розташована по всій довжині каналу різку і нестаціонарний, що відрізняється періодичним викидом розплавленого металу із зони обробки. Стаціонарний характер руйнування досягається в тому випадку, коли швидкості плавлення металу в напрямку різки й видалення розплавленого металу в кожному перетині каналу рівні. При менших швидкостях газолазерного різання металів має місце нестаціонарний, тобто несталий, характер руйнування [2, 3].

Використання лазерного різання матеріалів дозволяє розрізати широкий спектр матеріалів, незалежно від їхньої твердості. Лазерне різання майже не чинить механічного впливу на оброблюваний матеріал, що дозволяє працювати з легко деформованими й гнучкими матеріалами. Завдяки цьому немає потреби у жорсткому закріпленні зразка — достатньо розміщення листа, що розрізається, на робочому столі. Висока густина потужності при фокусуванні лазерного випромінювання в зоні різки забезпечує високу продуктивність процесу. Процес легко піддається автоматизації, а застосування координатних систем дозволяє виконувати складні контурні розрізи в двох або навіть трьох вимірах, починаючи різання з будь-якої точки. Можливе багатопозиційне різання, що підвищує гнучкість процесу [4].

До недоліків лазерної різки належать висока вартість обладнання та низький коефіцієнт корисної дії лазерних установок. Однак постійний розвиток конструкцій, нові досягнення в матеріалознавстві, кристалографії, газовому розряді, а також впровадження новітніх оптичних матеріалів дозволяють вважати ці недоліки тимчасовими.

Разом з тим, ГЛР поряд з іншими вуглецевими сталями застосовується для розрізання і нержавіючих сталей. Нержавіюча сталь активно застосовується в будівництві, промисловості та створенні інженерних систем. Вона є основною сировиною для виготовлення таких деталей, як фітинги, фланці, нержавіючі труби тощо. Обробка нержавіючої сталі супроводжується рядом труднощів, зумовлених її властивостями. До основних проблем належать інтенсивне зношування різального інструменту, необхідність безперервного видалення стружки, підвищення щільності матеріалу під час деформації та ін. [5].

Крім високої корозійної стійкості, аустенітна нержавіюча сталь відзначається високою пластичністю, що робить її ідеальним матеріалом для штампованих виробів із глибокою витяжкою та складним рельєфом. Разом з тим, завдяки низькому змісту вуглецю така сталь має поліпшені зварювальні характеристики. Крім того, в такій сталі як 08X18H10T при досить високому вмісті вуглецю для захисту від міжкристалічної корозії застосовується легування титаном, що надає можливість тривалого використання при температурах від 700 до 800 °С. Тому дана сталь активно застосовується в машинобудуванні й нафтохімії [6].

Для виконання операцій із лазерної обробки виробів необхідно створити лазерний технологічний комплекс (ЛТК), який може працювати як самостійно, так і в складі більшого виробничого комплексу. Щоб реалізувати переваги лазерних технологій, зокрема високу швидкість обробки, точність, локалізований вплив на крайках різів, а також забезпечити безпеку роботи, безперебійну експлуатацію, тривалий ресурс та мінімізацію потреби в обслуговуючому персоналі, ЛТК має бути повністю автоматизованим. Якщо ж його застосовують у складі великого виробничого комплексу, він повинен бути ще й роботизованим [7].

До складу автоматизованого ЛТК входять основні системи: технологічний лазер, система транспортування та фокусування лазерного випромінювання, стіл для двох-координатного переміщення заготовки, що розрізається, лазерний технологічний пост, система автоматичного керування [8].

Найбільше застосування в сучасних ЛТК отримали промислові волоконні лазери, які мають незаперечні переваги перед іншими типами лазерів [9]. По-перше, вони не вимагають обслуговування, тому що лазер перебуває в закритому герметичному корпусі, що виключають попадання в них пилу та бруду. По-друге, волоконні лазери є самими надійними серед усіх наявних типів лазерів і мають досить великий ресурс роботи. По-третє, вихідне випромінювання волоконного лазера відрізняється дуже високою якістю й стабільністю параметрів променя. Крім усього перерахованого такий лазер можна використовувати для розкрою матеріалів, що мають високу відбивну здатність для лазерного випромінювання. Це, наприклад, латунь, алюміній, мідь, оцинкована й нержавіюча сталь.

Для ЛТК великої потужності розроблена оптична фокусуюча система, яка піднімає автоматизацію процесу лазерного різання на зовсім новий рівень. Перевагами таких лазерних

оптичних систем, окрім інших, є автоматична установка фокусної відстані, зручне регулювання величини розфокусування, вбудоване спостереження за поверхнею металу, а також автоматичне регулювання положення сопла відносно поверхні заготовки [9].

Визначальним при ГЛР металів є співвідношення товщини розрізуваних листів та швидкості обробки [10-13]. Експериментально досліджувалася також залежності ширини різь, шорсткості його поверхні, а також зона термічного впливу від режимів різання [14-17].

Тим не менш, процеси ГЛР сталевих листів, зокрема нержавіючих сталей, все ще потребують подальших ґрунтовних досліджень в питаннях встановлення оптимальних режимів різки заготовок різних діапазонів товщин при використуванні технологічних газів різних видів та в залежності від тиску, під яким вони подаються в зону різання.

Постановка завдань. При ГЛР нержавіючих сталей лазерним випромінюванням в 20 кВт в плямі фокусування лазерного променя реалізується висока густина потужності, особливо коли енергія, що реалізується в зоні різання ще й доповнюється енергією горіння металу. Потрібне розуміння як керувати цією енергією, щоб при задовільній якості крайок різь, отримати максимальну продуктивність процесу ГЛР.

Тому метою даної роботи є дослідження впливу різних режимів ГЛР на результати обробки та підбір оптимальної швидкості різання нержавіючих сталей різних діапазонів товщин за рахунок реалізації потрібних умов розфокусування лазерного випромінювання та раціонального підбору виду та тиску технологічного (робочого) газу.

Викладення основного матеріалу. Як вказувалось вище, найкращі показники якості поверхні різь можуть бути отримані при різці на максимально можливих швидкостях для листів металу заданої товщини. Таку швидкість будемо вважати оптимальною та позначати – V_{opt} .

В роботі [18] запропонована ступінчата зміна швидкості різання для підбору її оптимального значення для заданої товщини заготовки.

Для знаходження V_{opt} також можна використовувати дві розроблені нами методики. В першому випадку на вибраній заздалегідь швидкості різання V розрізається метал змінної товщини та фіксується глибина різь, коли він ще є наскрізним (рис. 1, а). При цьому робиться висновок, що для даної швидкості різання така товщина металу H_{max} є гранично можливою для отримання наскрізного різь. Таким чином, листи металу товщиною H_{max} для досягнення найбільшої якості та продуктивності ГЛР потрібно різати на заданій швидкості V , і вона є оптимальною (V_{opt}) для цієї товщини (рис. 6, б). Такому підходу слід віддавати перевагу, коли потрібно отримати залежність $H = f(V)$.

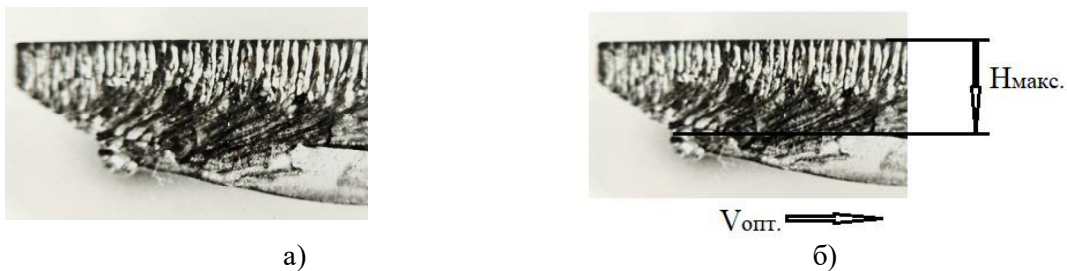


Рис. 1. Запропонована методика визначення максимально можливої глибини різь при заданій швидкості ГЛР: заготовка змінної товщини (а), ця ж заготовка з позначенням оптимальної швидкості різання та максимально допустимої товщини різь для такого різання (б)

При встановленні ж залежності $V = f(H)$ потрібний інший підхід, коли ставиться задача визначення максимального значення швидкості різки V_{max} , при якому гарантовано має місце наскрізний різь в листі металу заданої товщини. Для цього лист металу розрізався на змінній швидкості, починаючи від меншого її значення $V_{поч}$, яке гарантувало повне прорізання листа товщиною H , до його більшого значення – $V_{кінц}$, коли повне прорізання такої заготовки вже не мало місця (рис. 2, а). Зафіксоване значення швидкості різь, коли зникає наскрізне прорізання заготовки, і є її шукане оптимальне значення – V_{opt} (рис. 2, б).

Оскільки в подальших наших експериментах нас цікавила залежність оптимальної швидкості різання в залежності від товщини листа металу, то всі подальші експерименти виконувались по представленій другій методиці.



Рис. 2. Запропонована методика визначення оптимальної швидкості ГЛР металевого листа заданої товщини: заготовка, при різанні зі змінною швидкістю (а), ця ж заготовка з графіком зміни швидкості ГЛР (б)

При використуванні потужного лазерного випромінювання в 20 кВт, густина потужності в фокальній плямі випромінювання досягає величини до $5 \cdot 10^7$ Вт/см². Однак, при різанні металів такі значення густини потужності набагато перевищують необхідні значення в $5 \cdot 10^5 - 10^6$ Вт/см², які достатні для досить якісного розрізання листів металу. Тому дуже важливим фактором при різці сталей потужним лазерним випромінюванням, крім величини фокусної відстані лінзи, стає величина та напрям розфокусування лазерного пучка. Так, після фокусування лазерного випромінювання розмір плями пропорційний фокусній відстані лінзи. При фокусуванні лінзою з короткою фокусною відстанню розмір плями є малим, а густина потужності в точці фокусу висока, що дає можливість більш широкого регулювання нею при розфокусуванні. Однак, при цьому зменшується й глибина фокусу, що зменшує запас регулювання. Застосування короткофокусних лінз більше підходить для високошвидкісного різання тонких металів. Довгофокусні об'єктиви мають більшу довжину Релея (глибину чіткості) та достатню густину потужності, що більше підходить для різання товстих заготовок. При ГЛР потужним лазерним випромінюванням в основному використовуються лінзи з фокусною відстанню в 100, 150 та 200 мм.

В залежності від величини розфокусування є можливість отримати різні значення діаметру лазерного променя на поверхні металу, що різеться. Відповідно буде змінюватися й густина потужності на цій поверхні. Будемо вважати, що підйом точки фокусу в напрямку фокусувальної лінзи є «позитивним» напрямком і будемо позначати його «+», а віддалення від лінзи та заглиблення точки фокусу в порожнину різу – це «негативний» напрямок, що позначається «-» (рис. 3). Положення плями фокусування відносно до поверхні заготовки безпосередньо впливає на шорсткість поверхні різу, його ширину, а також на адгезію розплавленого залишку продуктів руйнування на нижній поверхні металу, який різеться (див. рис. 3). Тож, відносна розташування фокусної точки та поверхні заготовки особливо важливо для забезпечення якості різання нержавіючих сталей. Протягом усього процесу різання забезпечення сталості відносного положення фокуса та заготовки є важливою умовою для отримання стабільної якості різання.

У більшості випадків фокусна позиція знаходиться безпосередньо на поверхні заготовки або трохи нижче поверхні (рис. 3, а). Коли фокус знаходиться в такому положенні, отримуємо різ меншої ширини, а збільшена швидкість різання дає можливість досягти кращих результатів різання. Якщо ж положення плями фокусування занадто заглибити в порожнину різу (рис. 3, б), то це збільшить кількість тепла, що поглинається в області нижньої крайки заготовки. Перегріта нижня поверхня металу гарно змочується, і розплавлений метал буде гарно розтікатися по нижній поверхні в рідкому стані. Після охолодження розплавлений матеріал буде міцно прилипати до цієї нижньої поверхні заготовки у формі куль, створюючи на нижньому краю так званий грат, який значно псує якість отриманої при ГЛР деталі.

Коли ж фокус знаходиться вище поверхні заготовки, то кількість тепла, що виділяється на нижній поверхні розрізаного металу, значно зменшується. Тому метал у порожнині різу не може мати високу рідкоплинність, і грат має вигляд гострих залишків, що прилипають до нижньої поверхні вирізаної деталі (рис. 3, в). Крім того для останньої схеми розфокусування характерно те, що в даному випадку, крім зменшення густини потужності, напряму змінюється час дії лазерного випромінювання в зоні різання. Так, цей час визначається як час проходження лазерним променем діаметру його плями розфокусування зі швидкістю різання. Тобто, при зменшеній густині потужності набагато збільшується час прорізання металу вглиб заготовки, що напряму веде до збільшення товщини листів металу, що розрізаються.

При ГЛР нержавіючих сталей, якщо використовується нейтральний газ, наприклад, азот, газовий струмінь виконує в основному функції з очищення зони різання, а також захисту поверхні

оптичної системи від потрапляння на неї продуктів викиду із зони різання. При використанні ж кисню або стисненого повітря, крім наведених вище функцій, має місце поєднання двох джерел тепла в процесі ГЛР – лазерного випромінювання та екзотермічної реакції горіння металу, що сприяє підвищенню продуктивності обробки [19]. Однак, якість поверхні при різанні великих товщин нержавіючих сталей набагато нижча при використанні кисню, ніж азоту або стисненого повітря за рахунок значного накопичення оксидів та шлаків в нижніх шарах сталі, що веде до значного виділення тепла в цьому місці та, як результат, розширення різів в їх нижній частині.

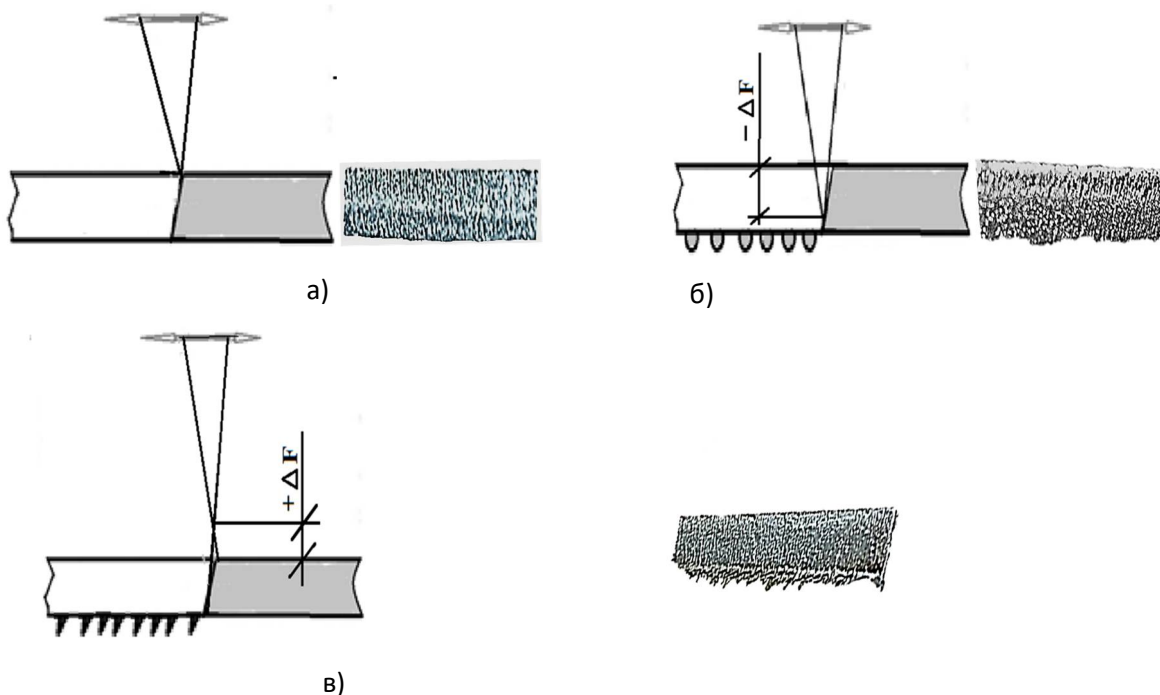


Рис. 3. Умови різання нержавіючих сталей при різних варіантах положення фокусу (зліва) та вигляд поверхні різів в цьому випадку (справа): пляма фокусування на поверхні заготовки або не глибоко всередині порожнини різів (а), розфокусування з заглибленням плями фокусування глибоко всередину порожнини різів (б), розфокусування з розміщенням плями фокусування над поверхнею різів (в)

Разом з тим, застосування стисненого повітря набагато простіше та дешевше у використанні, ніж піддування азоту. При цьому, підвищення тиску азоту до значень, які застосовувалися при використанні стисненого повітря (приблизно до 0,8 – 2,0 МПа) технічно складно, а, головне, набагато дорожче. Однак, при застосуванні азоту крайки різів в нержавіючих сталях мають набагато привабливіший вигляд, ніж при використанні стисненого повітря (рис.4). Тому при виборі робочого газу при ГЛР між азотом та стисненим повітрям звертають основну увагу на те, чи ГЛР – це кінцева операція обробки крайок (тоді застосовують азот), чи після ГЛР крайки будуть підлягати подальшій обробці. Тоді можна використовувати й стиснене повітря. Фото різів в нержавіючій сталі товщиною 5 мм відповідно при використанні азоту та стисненого повітря представлені на рис. 4, а та рис. 4, б.



Рис. 4. Фото поверхні різів в нержавіючій сталі товщиною 5 мм: різ при використанні азоту як робочого газу (а), різ при піддуванні стисненого повітря (б)

Проведені експерименти показали, що є відмінність в призначенні режимів різання нержавіючих сталей товщиною від 1 до 10 мм, від 10 до 20 мм, від 20 до 40 мм та від 40 до 100 мм.

Виконані дослідження показали, що швидкості при різанні товщин $1 - 10$ мм та $10 - 20$ мм при використанні азоту або стисненого повітря майже не відрізняються між собою. Відмінність же якісних характеристик отриманих різів прописана нами вище. При цьому інші параметри режимів різки в цьому випадку мають такі значення: для товщин $1 - 10$ мм (1-ий діапазон) – тиск робочого газу повинен мати величину $0,8$ МПа, а лазерне випромінювання повинно бути сфокусоване на верхній поверхні заготовки або при невеликому заглибленні плями фокусування в її середину, тобто величина розфокусування складає $0 - -1$ мм; для товщин $10 - 20$ мм (2-ий діапазон) – тиск дорівнює $1,0$ МПа, а величина розфокусування складає $-1,5 - -7$ мм. Крім того, для останнього діапазону характерним є те, що збільшення товщини металу на 2 мм потребує додаткового збільшення глибини занурення фокусу на -1 мм. На рис. 5 приведена залежність оптимальної швидкості різання нержавіючих сталей при зміні товщини заготовки для двох приведених вище діапазонів цих товщин.

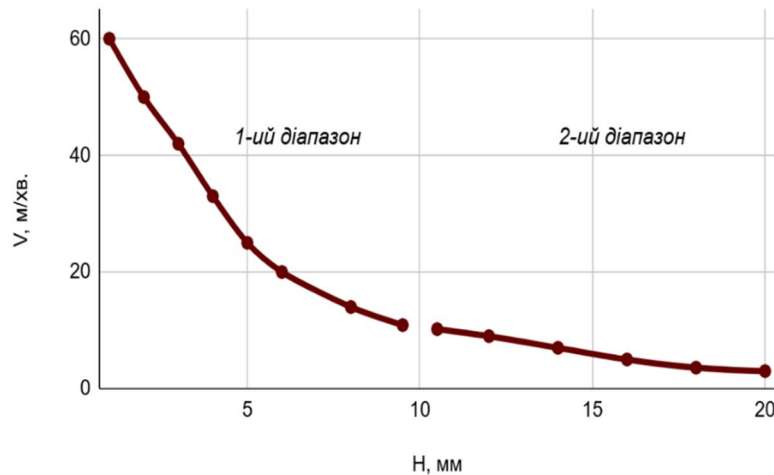


Рис. 5. Залежність оптимального значення швидкості різання нержавіючої сталі від товщини заготовки для перших двох діапазонів режимів при подачі як азоту, так і стисненого повітря

Для великих товщин нержавіючих сталей оптимальні швидкості різання в залежності від товщини заготовки відрізняються для використання стисненого повітря та азоту, а правила занурення фокусу значно змінюються. Так, для товщин $20 - 40$ мм (3-ій діапазон) умови занурення фокусу (як при використанні стисненого повітря так і азоту) такі: загальний діапазон занурення фокусу для таких товщин складає від -10 до -17 мм, а заглиблення потрібно збільшувати на -1 мм при збільшенні товщини заготовки на 5 мм. Тиск піддуваного газу при цьому має оптимальне значення в $1,0$ МПа, не залежно від виду робочого газу.

Для товщин же $40 - 100$ мм необхідно розділяти умови різання при застосуванні стисненого повітря та азоту (4-ий та 5-ий діапазон). Так, оптимальні значення режимів різання для цього діапазону товщин заготовки при використанні стисненого повітря (4-ий діапазон) при його тиску в $1,0$ МПа можуть бути отримані при значному заглибленні плями фокусування в порожнину різу на величину $-16 - -25$ мм, причому діє правило: заглиблення збільшується на -1 мм при збільшенні товщини заготовки на 3 мм. При використанні ж азоту оптимальним є значення тиску в $1,8 - 2,0$ МПа (5-ий діапазон). А ось оптимальними умовами розфокусування є розміщення плями фокусування над верхньою поверхнею заготовки на відстані $+10 - +12$ мм. На таких режимах можливе розрізання заготовок товщиною до 100 мм, тоді як при застосуванні стисненого повітря відносно якісні різі можуть бути отримані в заготовках товщиною не більше 70 мм.

На рис. 6 приведені залежності оптимальних швидкостей різання нержавіючих сталей для великих товщин заготовки в середовищі стисненого повітря та азоту.

В табл.1, для зручності використання, об'єднані всі оптимальні умови реалізації ГЛР нержавіючих сталей різних діапазонів товщин потужним лазерним випромінюванням в 20 кВт.

Таким чином, використовуючи залежності швидкості різання нержавіючих сталей від товщини заготовки, представлені на рис. 5 та 6, а також умови фокусування або розфокусування лазерного випромінювання та оптимальні значення тиску основних типів робочого газу (стиснене повітря та азот), приведені в табл. 1, можна вибрати оптимальні режими ГЛР цих сталей в широкому діапазоні товщин їх листових заготовок.

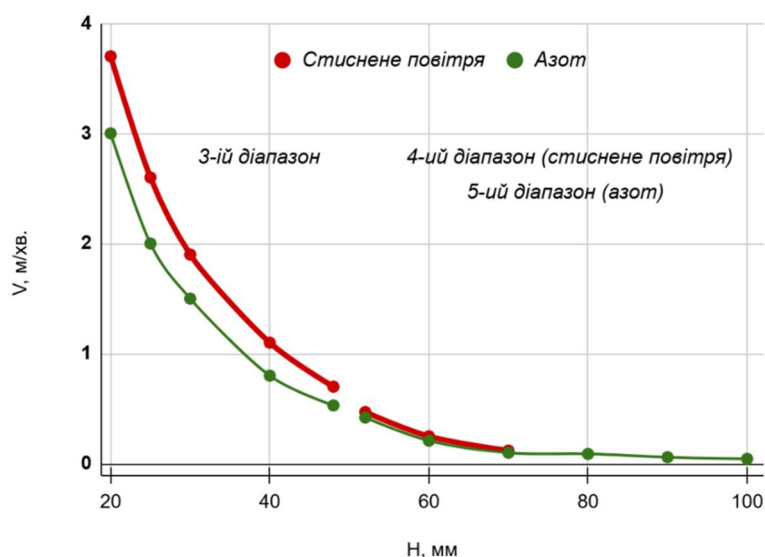


Рис. 6. Залежність оптимальної швидкості різання нержавіючих сталей від товщини заготовки при подачі стисненого повітря та азоту для великих значень товщин заготовок

На рис. 7 приведені фото поверхні різів в нержавіючих сталях для великих товщин заготовок.

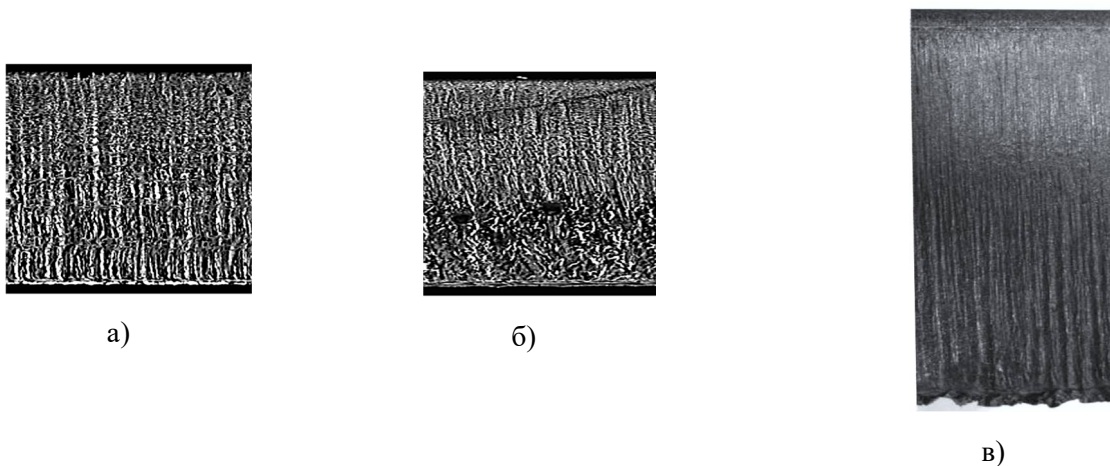


Рис. 7. Фото різів листів нержавіючої сталі великої товщини: різ в сталі товщиною 40 мм при використанні азоту (а) й стисненого повітря (б) та товщиною 80 мм при піддуванні азоту (в)

Висновки. Застосування потужних волоконних лазерів для газолазерного різання металів дає можливість досить високоякісно розрізати сталі, зокрема і нержавіючі, в широкому діапазоні їх товщини при використанні різних умов фокусування лазерного випромінювання та різних видів та тиску технологічних газів. При цьому розроблення оригінальних методик визначення максимально можливих швидкостей різання заготовок потрібної товщини дозволяє отримувати гарантований наскрізний різ в таких заготовках при задовільній якості крайок різів. Представлені фото характерних виглядів лазерних різів для кожного з діапазонів товщин, що показують дієвість та обґрунтованість запропонованої методики отримання оптимальної швидкості різання листів нержавіючих сталей потрібної товщини.

При використанні потужних лазерів для ГЛР важливим фактором стає величина та напрямок розфокусування сфокусованого лазерного випромінювання. Розроблені умови розфокусування потужного лазерного випромінювання при різанні нержавіючих сталей дозволили систематизувати вибір оптимальних режимів ГЛР цих сталей в широкому діапазоні їх товщин. Отримані та проаналізовані залежності оптимальної швидкості різання від товщини заготовки дають можливість, з однієї сторони, розрізати тонкі сталеві листи нержавіючої сталі на швидкостях до 60 м/хв., а, з іншої сторони, збільшити товщину заготовок, що розрізаються, до 80–100 мм.

Табл. 1

Умови вибору оптимальних режимів різання нержавіючих сталей різних діапазонів товщин

Режими різки Діапазон товщин, мм	Вид та тиск робочого газу		Умови фокусування (розфокусування)		
	Тиск стисненого повітря, МПа	Тиск азоту, МПа	Діапазон розфокусування, мм	Правило розфокусування	
				При збільшенні товщини, мм	Приріст величини розфокусування, мм
1 – 10	0,8	0,8	0 – -1	—	—
10 – 20	1,0	1,0	-1,5 – -7	2	-1
20 – 40	1,0	1,0	-10 – -17	5	-1
40 – 70	1,0	—	-16 – -25	—	—
40 – 100	—	1,8 – 2,0	+10 – +12	—	—

Розроблені загальні рекомендації по вибору режимів різання нержавіючих сталей при сумарному використанні графіків залежностей оптимальної швидкості різу від товщини заготовки для різних діапазонів цих товщин та різних умов виконання ГЛР, які зведені в окрему таблицю, що значно спрощують вибір необхідних режимів для ГЛР таких сталей.

Подальші експериментальні дослідження газолазерного різання сталевих листів потужним лазерним випромінюванням дадуть можливість встановити вплив режимів обробки на показники якості крайок отриманих різів.

Список використаних джерел:

1. K. Tamura, R. Ishigami, R. Yamagishi. Laser cutting of thick steel plates and stimulated steel components using a 30 kW fiber laser // J. Nucl. Sci. Technol.— 2016.— Vol. 51. — P. 15-59.
2. J.S. Shin, S.Y. Oh, H. Park, C.M. Chung, S. Seon, T.S. Kim, L. Lee, B.S. Choi, J.K. Moon. High-speed fiber laser cutting of thick stainless steel for dismantling task // Opt Laser. Technol.— 2019.— Vol. 119. — Art.105607.
3. Romanenko V.V. Mechanism of Gas-Assisted Laser Metal Cutting // Laser Technologies in Welding and Materials Processing. — Kiev. — 2003.— Art. — P. 68-70.
4. Sharma A., Yadava V. Experimental analysis of Nd-YAG laser cutting of sheet materials – a review // Opt. Laser Technol. – 2018.— Vol. 98. – P. 264-280.
5. Nagimova A., Perveen A. A review on laser machining of hard to cut materials // Mater Today Proc.— 2019.— Vol. 18. – P. 2440-2447.
6. Rana R.S., Chouksey R., Dhakad K.K., Paliwal D. Optimization of process parameter of Laser beam machining of high strength steels: a review // Mater Today Proc.— 2018.— Vol. 5(9). – P. 191-199.
7. Naresh S., Khatak P. Laser cutting technique: a literature review // Mater Today Proc. – 2022.— Vol. 56(5 SI). – P. 24841-2489.
8. Genna S, Menna E, Rubino G, Tagliaferri V. Experimental investigation of industrial laser cutting: the effect of the material selection and the process parameters on the kerf quality // Appl Sci. – 2020.— Vol. 10(14). – Art. 4956.
9. Основні характеристики лазерного верстата для різання фірми QY Laser. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://ua.qylaser.com>.

10. Anghel C., Gupta K., Jen T.C. Analysis and optimization of surface quality of stainless steel miniature gears manufactured by CO₂ laser cutting // *Optik*. – 20208. – Vol. 203. – Art. 164049.
11. 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. – Vol. 31. – P. 525-538.
12. 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. – Vol. 14. – Art. 2669.
13. Girdu C.C., Gheorghe C., Radulescu C., Cirtina D. Influence of process parameters on cutting width in CO₂ laser processing of hardox 400 steel // *Appl. Sci.* – 2021. – Vol. 11. – Art. 5998.
14. A. Sharma, V. Yadava. Experimental analysis of Nd-YAG laser cutting of sheet materials // *Optics & Laser Technology*. – 2018. – Vol. 98. – P. 264-280.
15. 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. – Vol. 154. – Art. 108332.
16. Magdum V., Kittur J., Kulkarni S. Surface roughness optimization in laser machining of stainless steel 304 using response surface methodology // *Mater Today Proc.* – 2022. – Vol. 59. – P. 540-546.
17. Li M. Evaluation of the effect of process parameters on the cut quality in fiber laser cutting of duplex stainless steel using response surface method (RSM) // *Infrared Phys Technol.* – 2021. – Vol. 118. – P. 1-7.
18. S. Seon, J.S. Shin, S.Y. Oh, H. Park, C.M. Chung, T.S. Kim, L. Lee, J. Lee. Improvement of cutting performance for thick stainless steel plates by step-like cutting speed increase in high-power fiber laser cutting // *Opt. Laser Technol.* – 2022. – Vol. 103. – P. 311-317.
19. Rajesh K, Murali Krishnam Raju VV, Rajesh S, Sudheer Kumar Varma N. Effect of process parameters on machinability characteristics of CO₂ laser process used for cutting SS-304 stainless steels // *Mater Today Proc.* – 2019. – Vol. 1. – P. 2065-2072.

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