

Вдосконалення процесу лазерного різання за рахунок кулькового вигладжування поверхні різів

В.В. Романенко¹ • М.С. Блощицин¹ • М.В. Романенко² • А.С. Кушнеренко¹

Received: 12 March 2024 / Revised: 20 May 2024 / Accepted: 4 June 2024

Анотація. У даній статті була розглянута проблема підвищення якості крайок деталей, вирізаних лазерним випромінюванням, за рахунок нового підходу, який полягає в вигладжуванні поверхні лазерних різів кульковим інструментом. Проведений аналіз показав перспективність покращення характеристик технології лазерного різання деталей з листів різної товщини при застосуванні подальшого кулькового вигладжування поверхні різів. Метою дослідження є всебічний аналіз впливу параметрів вигладжування на експлуатаційні характеристики деталей, отриманих таким комбінованим способом. Для проведення експериментів були використані необхідні методи оцінки шорсткості поверхонь різів, мікротвердості їх крайок та залишкових напружень, що виникають в поверхневому шарі різів. Спираючись на сформульовану гіпотезу про перспективність покращення характеристик крайів різів при їх подальшому вигладжуванні, експериментально встановлено, що має місце помітне зменшення значень параметрів шорсткості після вигладжування поверхні лазерних різів порівняно з їх значеннями для зразків тільки після лазерного різання. Крім того, дослідження показують, що в області краю різів спостерігається зростання мікротвердості поверхні різів на величину до 20 %. Разом з тим, на краю різів з'являються стискаючі напруження, які забезпечують підвищення експлуатаційних характеристик деталей після запропонованої комбінованої обробки. Для реалізації дослідженої технології вигладжування поверхні лазерного різів була запропонована конструкція вигладжувальної голівки. В результаті вивчення запропонованого комбінованого способу отримання деталей лазерним різанням з подальшим вигладжуванням поверхні різів підтверджено, що при невисоких додаткових капітальних затратах є можливість значно покращити експлуатаційні характеристики виготовлених в такий спосіб деталей. Це також доводить перспективність подальшого розвитку представленої комбінованої технології як з використанням кулькового вигладжування, так і при застосуванні інших способів поверхневого зміцнення крайів лазерного різів.

Ключові слова: лазерне різання; покращення характеристик; кулькове вигладжування поверхні; поверхневі структури, комбінований процес.

Вступ

Лазерне різання, особливо тонких листів з вуглецевих сталей, є широко використовуваною технологією в промисловості. Цей процес можна характеризувати як термічний, безконтактний і автоматизований, здатний точно та якісно різати такі матеріали. При різці лазерним випромінюванням метал розплавляється та випаровується в обмеженій зоні. Лазерний промінь рухається вздовж зазначеного контуру та забезпечує

якісний розріз. Він представляє собою потужний інструмент для різання матеріалів, оскільки може сконцентрувати велику кількість енергії на дуже маленькій площі діаметром 0,1...0,2 мм. При цьому потужність в промені може досягати декількох тисяч ватт. Враховуючи, що специфічна густина потужності, необхідна для різання сталей, зазвичай становить 107...108 Вт/см², лазерна різка може виконуватися на досить високих швидкостях [1], [2].

Процес лазерного різання включає в себе використання коаксіального потоку допоміжного газу, що реалізує газолазерне різання (ГЛР). Газ використовується для охолодження місця різання, зменшення теплового впливу та видалення розплавленого шлаку. У випадку використання кисню при ГЛР, енергія лазерного променя посилюється екзотермічним теплом горіння металу в кисневому середовищі [3], [4].

✉ М.С. Блощицин
m.bloshchysyn@gmail.com

¹ КПІ ім. Ігоря Сікорського, Київ, Україна

² "ТРЦ Республіка" ТОВ, Київ, Україна

Після лазерного різання поверхня різку являє собою нерівності у вигляді напівкруглих канавок або рифлень, так званих, борозен. Ці борозни виникають через особливості фокусування лазерного променя, вплив швидкості різання на процес формування різку та характер видалення рідкого металу з порожнини різку. Поверхню різку можна розділити на три зони: верхню з борознами шириною від 0,1 до 0,2 мм, розташовану в області входу лазерного променя, перехідну зону та нижню, що крім борозен містить також відкладення затверділого рідкого металу та шлаку [2], [5]. Загалом, поверхня лазерного різку має характерний рельєфний візерунок з різною висотою мікронерівностей, залежно від розташування їх відносно верхньої поверхні заготовки (рис. 1).

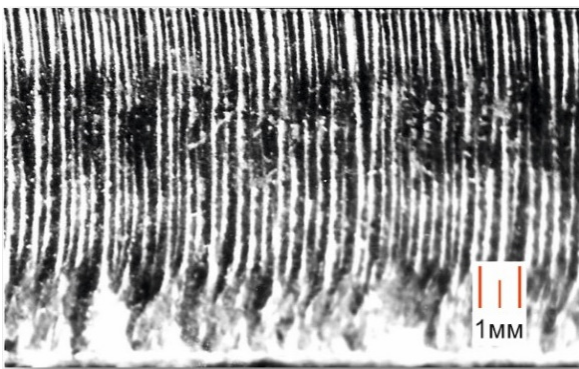


Рис. 1. Вигляд поверхні лазерного різку

В процесі лазерного різання зазнає термічного впливу край вирізаної деталі, що веде до утворення на цьому краї зони термічного впливу (ЗТВ). ЗТВ представляє собою тонкий шар матеріалу зі зміненою мікроструктурою, що надає високу твердість крайку різку. Розмір ЗТВ залежить від параметрів технологічного процесу різання. Висока температура, яка характерна для лазерного різання, не тільки призводить до формування мікроструктури ЗТВ, але й викликає термічні напруження в цій зоні. Прогрівання заготовки до температури різки, за яким слідує швидке охолодження за рахунок відведення тепла в масив деталі механізмом теплопровідності, призводить до різкої зміни об'єму матеріалу, що разом із зміною динаміки фазових переходів призводить до виникнення розтягуючих та стискаючих напружень на крайках різів [6].

Крім того, варто відзначити ще й такі негативні аспекти лазерного різання, як утворення шару шлаків на крайках деталі. Цей шар може ускладнити або навіть унеможливити подальше використання деталі на наступних етапах виробництва, наприклад, при подальшому зварюванні таких деталей. Із-за цього поверхні, вирізані лазером, також буде важко покривати лакофарбовими матеріалами через відшаровування цих матеріалів від поверхні деталі під час експлуатації. Додаткові проблеми виникають внаслідок наявності крапель

затверділого матеріалу у вигляді ґрату на нижніх крайках різку, що потребує додаткової операції очистки [7].

Таким чином, стає очевидним, що поверхні, отримані лазерним різанням, потребують додаткової обробки.

У різних галузях машинобудування протягом кількох десятиліть успішно використовується метод вигладжування кульками. Цей метод дозволяє отримувати поверхні з покращеними властивостями, такими як зміцнений стан, низька шорсткість, втомна міцність та висока стійкість до абразивного зношування. Кулькове вигладжування забезпечує змінення профілю шорсткості поверхні завдяки згладжуванню вершин нерівностей, а також сприяє деформації та термічній пластифікації матеріалу. Останнє призводить до змін мікротвердості та мікроструктури в поверхневому шарі матеріалу. Крім того, кулькове вигладжування створює залишкові стискаючі напруження у поверхневому шарі, що є важливим ефектом [8].

Отже, можна припустити, що кулькове вигладжування поверхонь, отриманих лазерним різанням, може позитивно вплинути на їх властивості. Для підтвердження такої гіпотези була проведена серія експериментів для вивчення впливу вигладжування кульками на характеристики поверхневого шару деталей з вуглецевої сталі, вирізаних лазером. Враховуючи, що така сталь успішно використовується для виготовлення середньо-навантажених деталей машин та обладнання, це може бути перспективною технологією виробництва [9], [10].

Для отримання зразків лазерних різів для подальших експериментів використовувались такі параметри лазерного різання: швидкість різки – 1,0 м/хв, потужність лазерного випромінювання – 2,0 кВт, тиск технологічного газу (кисню) – 0,08 МПа, положення зануреного в порожнину різку фокусу лазерного променя – +1,0 мм.

Отримані різки в вуглецевій сталі піддавалися подальшому вигладжуванню на вертикально-фрезерному верстаті за допомогою спеціального кулькового інструменту. Цей інструмент мав механічний пружинний механізм та складався з корпусу, в якому була встановлена гвинтова пружина, що дозволяла притискувати робочий наконечник до оброблюваної заготовки. Для вигладжування використовувався наконечник з кулькою, діаметром 10 мм, виготовленою із твердого сплаву (рис. 2).

Вигладжувальний інструмент 1 (рис. 2, а) був закріплений у нерухомому шпинделі фрезерного верстата, а вирізана лазером плоска деталь 2 закріплювалась між губками лецат 3, які були розміщені на експериментальному двокоординатному столі 4, що рухався прямолінійно зі швидкістю V , примушуючи кулю для вигладжування котитися по поверхні різку. Це призводило до деформації вершин нерівностей, що утворилися після попередньої лазерної обробки, зменшення

глибини створених мікротріщин (борозен) та підвищення міцності проти втоми поверхні різь (рис. 2, б).

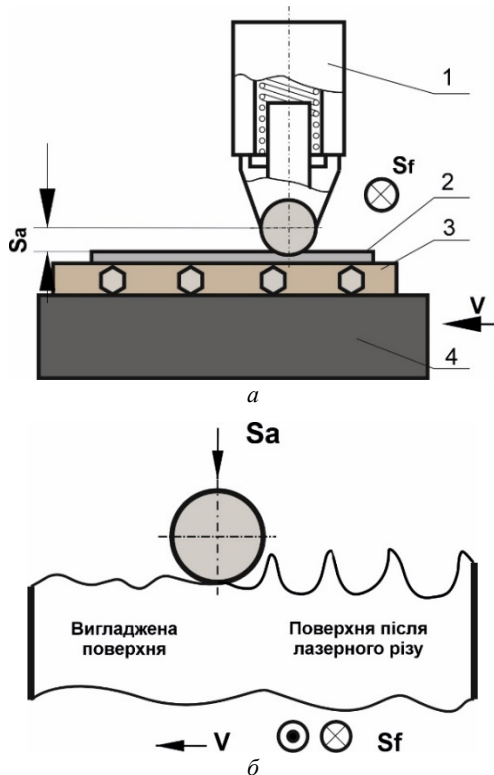


Рис. 2. Схема реалізації експерименту по вигладжуванню кулькою поверхні лазерного різь (а) та принцип вигладжування поверхні (б)

Зусилля притискання (натяг) забезпечувалось за рахунок стиснення пружини при переміщенні кулькового інструменту в напрямку деталі (після торкання кулькою поверхні лазерного різь) з інтервалом Sa в 0,1 мм (від 0,1 до 0,4 мм) та вимірювалось в нашому випадку між торцем тримача кульки та поверхнею різь. При торканні кульки поверхні різь ця відстань становила 4 мм, а для реалізації натягу вона зменшувалась з заданим кроком Sa до 3,6 мм. Крім того, заміри показали, що зміна інтервалу кроку Sa в межах 0,1...0,4 мм відповідала зміні зусилля притискання кульки до поверхні різь в діапазоні від 250 до 950 Н, що забезпечувалось жорсткістю пружини.

Після кожного проходу по поверхні різь експериментальний стіл здійснював поперечний рух на відстань, величина якого відповідала інтервалу кроку поперечного переміщення Sf . Швидкість же руху інструменту V підтримувалась максимально можливою для нашого експериментального столу та складала 10 м/хв. При цьому вигладжування кульками проводилося з використанням мастильно-охолоджувальної рідини.

Експериментальне вивчення процесу вигладжування кульками поверхні різь після лазерного різання дали наступні результати. В першу чергу вивчався вплив натягу (сили вигладжування) на параметри шор-

сткості досліджуємої поверхні. Для оцінки шорсткості поверхні використовували як середнє арифметичне значення відхилення профілю Ra , так і стандартний параметр шорсткості Rz (середня висота нерівностей із десяти замірів). При цьому використовували профілограф-профілометр для вимірювання шорсткості поверхні за параметром Ra та мікроскоп Лінника для вимірювання стандартної шорсткості Rz .

Було виявлено помітне зменшення значень параметрів шорсткості Ra та Rz після вигладжування поверхні лазерних різь порівняно з їхніми значеннями для зразків тільки після лазерного різання (рис. 3).

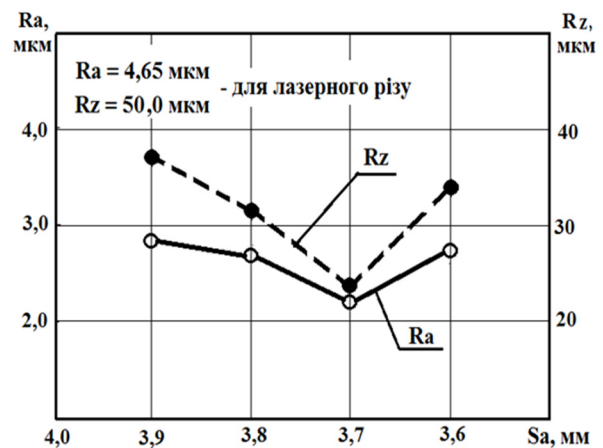


Рис. 3. Вплив величини натягу Sa (сили вигладжування) на шорсткість Ra та Rz для зразків після лазерної різьки та з подальшим кульковим вигладжуванням для інтервалу кроку $Sf = 0,15$ мм

Зміна розміру кроку Sa в межах від 0,1 до 0,3 мм (що відповідає зменшенню відстані між торцем тримача кульки та поверхнею різь з 4 до 3,7 мм) призвело до значного зниження параметрів шорсткості поверхні Ra і Rz . Це пояснюється тим, що при збільшенні натягу (сили вигладжування) кулька може глибше проникати в заготовку і більш ефективно вирівнювати нерівності на поверхнях, вирізаних лазером. Однак зі зростанням натягу від 0,3 до 0,4 мм спостерігалось певне збільшення значень Ra і Rz , що може бути пов'язане з надмірною деформацією поверхні різь.

Подані дані на рис. 4 ілюструють вплив інтервалу кроку поперечної подачі Sf на шорсткість поверхні.

З рис. 4 видно, що початкове збільшення інтервалу кроку призвело до зниження шорсткості різь приблизно на 25 %, тоді як подальше його збільшення вело до зростання значень параметрів шорсткості Ra і Rz . Це пояснюється тим, що при великих значеннях Sf траєкторії інструментів при вигладжуванні віддалялися одна від одної, що призвело до нерівномірного деформування борозчастої структури і, відповідно, до формування більш шорсткої поверхні. Наприклад, збільшення інтервалу кроку в три рази (від 0,15 до 0,45 мм) призвело до зростання параметрів шорсткості майже в півтора рази.

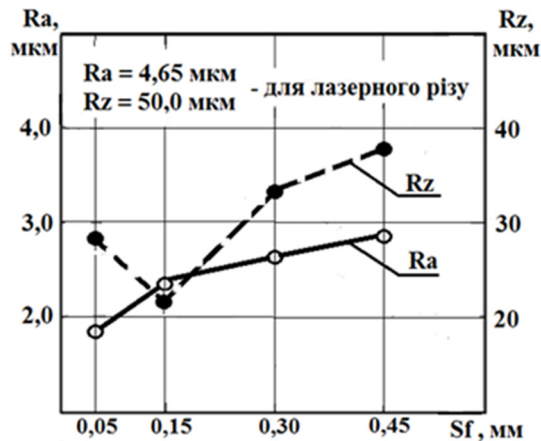


Рис. 4. Вплив інтервалу кроку поперечної подачі S_f на шорсткість R_a і R_z поверхні різки після лазерної різки та з кульковим вигладжуванням при величині натягу $S_a = 0,3$ мм

Оцінка мікроструктури зразків різів проводилася за допомогою металографічного мікроскопа. Вимірювання мікротвердості здійснювали по методу Віккерса. Використовувались металографічні зразки, які були підготовлені відповідно до стандартних процедур. Так, для виконання вимірювань використовувалася мікротвердомір при застосуванні навантаження на індентор у 50 г.

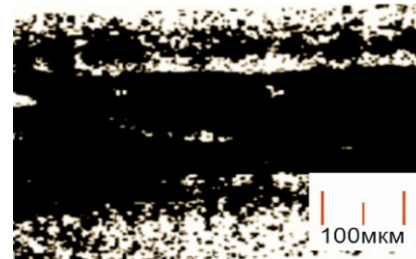
Результати вимірювань дозволяли визначити мікротвердість $HV_{0,05}$ на краяхках лазерних різів, а також виконати заміри приросту мікротвердості ΔHV на лазерних різках після їх вигладжування кульками при різних параметрах вигладжування. Також вивчалася товщина зміцненого шару g_n як для лазерних різів, так і для різів, вигладжених кульками.

Мікроструктурні зміни, в нашому випадку, для вуглецевої сталі можна легко спостерігати на верхній поверхні різки за зміною кольорів мінливості (рис. 5, а). При аналізі структурних змін в області термічного впливу можна виявити мартенситні голки, а також ферит і мартенсит (рис. 5, б). Тривалість нагріву під час лазерного різання відносно коротка, і феритовим зернам бракувало часу для насичення вуглецем. Таким чином, відбувається формування низьковуглецевого мартенситу. З іншого боку, перлітові структури перетворюються в високовуглецевий мартенсит.

У зразках, які були вирізані за допомогою лазера, ширина зони, де відбуваються зміни в мікротвердості, складає приблизно 0,3 мм. Дослідження показують, що в області краю різки спостерігається зростання мікротвердості до рівня приблизно в 330 $HV_{0,05}$ (див. рис. 7). При віддаленні від краю углиб матеріалу мікротвердість поступово зменшується до рівня, характерного серцевині сталі.

У дослідженні інших авторів [11] проведено аналіз мікроструктури вуглецевої сталі після застосування лазерної різки та подальшого кулькового вигладжування. Ми використали результати цього ви-

вчення, які представлені на рис. 6. Вони свідчать про те, що процес вигладжування кульками призводить лише до невеликого підвищення мікротвердості та глибини зміненого шару. Верхній шар матеріалу включає набір пластично деформованих кристалів, що свідчить про структурні зміни та збільшення твердості матеріалу. У самій крайній зоні відбувається розкол мартенситних голок на менші елементи. Іншими словами, взаємодія інструменту з заготовкою викликає процеси, спрямовані на дефрагментацію краєвої області.



а



б

Рис. 5. Видимий слід ЗТВ на краяхках лазерного різки (а) та мікроструктура вуглецевої сталі в цій зоні (б)

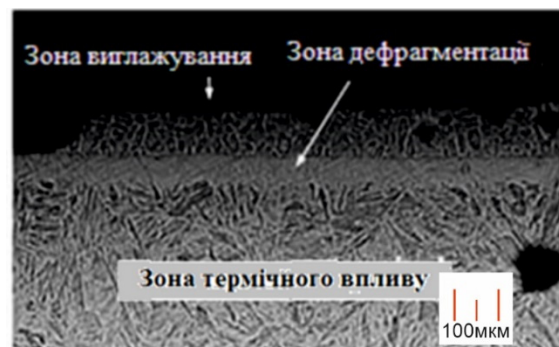


Рис. 6. Мікроструктура вуглецевої сталі після лазерної різки та кулькового вигладжування

Детальніше дослідження впливу різних режимів кулькового вигладжування на зміну мікротвердості поверхні різки і товщини зміцненого шару виявило, що зі зростанням величини натягу S_a , еквівалентного збільшенню сили вигладжування, спостерігається збільшення енергії наклепу. Це, в свою чергу, призводить до підвищення мікротвердості областей, розташованих близько до поверхні заготовки (рис. 7).

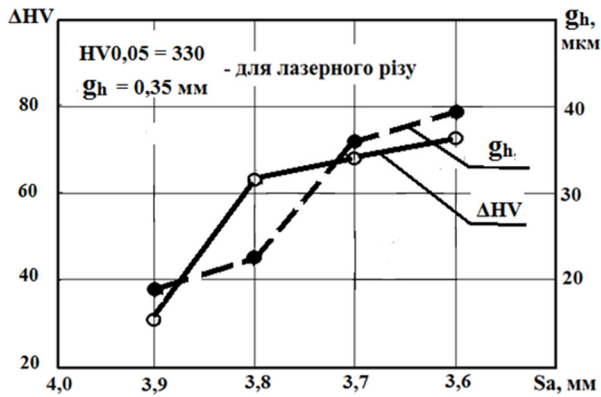


Рис. 7. Вплив величини натягу S_a на приріст мікротвердості ΔHV та товщини зміцненого шару g_h зразків лазерної різки з кульковим вигладжуванням ($S_f = 0,15$ мм)

Найбільший зріст мікротвердості зафіксовано при збільшенні значення натягу S_a у діапазоні від 0,1 до 0,2 мм (при зменшенні відстані між торцем тримача кульки та поверхню різки з 3,9 до 3,8 мм). При напруженнях, що перевищують 0,2 мм, вплив цього параметра на збільшення мікротвердості помітно зменшується, що може бути пов'язано з досягненням стану насичення. Товщина ж зміцненого та деформованого шару коливалась від 19 до 40 мкм і збільшувалась із зростанням величини натягу. При цьому слід врахувати, що при значеннях відстані від торця тримача до поверхні різки у діапазоні від 3,8 до 3,6 мм ($S_a = 0,2 \dots 0,4$ мм) спостерігалось зменшення приросту мікротвердості, а максимальний приріст товщини зміцненого шару мав місце при зміні S_a від 0,2 до 0,3 мм.

При дослідженні впливу інтервалу кроку поперечної подачі S_f на мікротвердість встановлено, що використання великого інтервалу кроку призводить до меншої однорідності структури поверхні матеріалу. Унаслідок цього сліди, залишені кулькою, розташовані далеко один від одного, що призводить до нерівномірної деформації оброблюваної поверхні і, в результаті, до меншого зросту мікротвердості ΔHV та зменшення товщини зміцненого шару g_h (рис. 8). Можливо, невеликий приріст твердості та тонкий шар, в якому відбуваються зміни, також пов'язаний з мартенситною структурою матеріалу в ЗТВ лазерного різки, яка мало піддається наклепу.

Отже, результати виконаних досліджень свідчать, що після застосування процесу вигладжування максимальний приріст мікротвердості поверхні лазерного різки, становить менше 20 %. Важливо відзначити, що процес розплавлення та подальше твердіння рідкого матеріалу на краях лазерного різки, відбувається в умовах нестабільності. Це призводить до утворення залишкових напружень в поверхневому шарі. Встановлено, що після лазерного різання ці напруження мають розтягуючий характер і зафіксовані на глибині приблизно 0,05 мм від поверхні різки. У той же час, коли на поверхні різки відбувається

кулькове вигладжування, у поверхневому шарі виникають стискаючі залишкові напруження, а їх розмір і глибина залежать від технологічних параметрів вигладжування. Такий характер залишкових напружень в поверхневому шарі є ключовим з точки зору функціональних властивостей деталі, зокрема, підвищеної її стійкості до втоми.

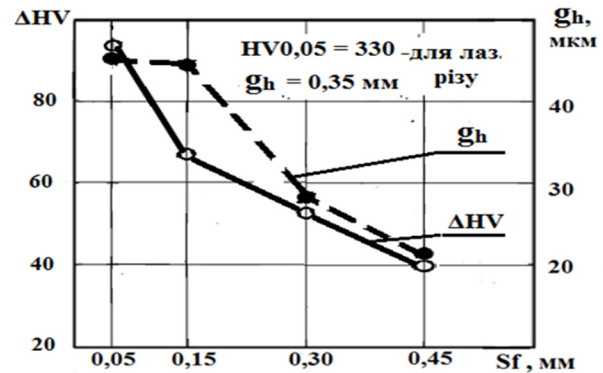


Рис. 8. Вплив величини кроку S_f на приріст мікротвердості ΔHV та товщину зміцненого шару g_h для зразків після лазерної різки та кулькового вигладжування ($S_a = 0,3$ мм)

Для вимірювання залишкових напружень використовувався стандартний механічний метод. Залишкові напруження в поверхневому шарі зразків були визначені на основі деформацій, виявлених при послідовному видаленні шарів металу за допомогою хімічного травлення. Для вимірювання деформації використовувався датчик, що знаходився в контакті з поверхню протравленого зразка. Максимальні залишкові напруження в точці позначалися як σ_{max} , а глибина місця знаходження цієї точки від поверхні зразка позначалася як g_a .

Підвищення сили вигладжування за рахунок збільшення параметра натягу S_a призводить до збільшення абсолютної величини стискаючого залишкового напруження, як показано на рис. 9, за рахунок того, що під час натискання кулі на заготовку із більшою силою, деформовані зони, що розташовані на більшій глибині, еластично стискатимуть області, що знаходяться ближче до поверхні. Найбільш помітні зміни спостерігалися в діапазоні значень натягу S_a від 0,2 до 0,3 мм, що в нашому випадку відповідає зміні відстані від торця тримача кулі до поверхні різки від 3,8 до 3,7 мм. Вплив параметра натягу значно падає на глибині, де має місце максимальне накопичення стискаючих залишкових напружень, і яка становить від 0,28 до 0,33 мм від поверхні. При цьому найбільші стискаючі напруження та максимальна глибина їх накопичення спостерігається для найбільшого натягу, коли $S_a = 0,4$ мм.

На рис. 10 відображено вплив інтервалу кроку S_f на максимальні значення стискаючих залишкових напружень та їх глибину накопичення. Зі збільшенням S_f відбувається збільшення відстані між точками вигладжування, що призводить до зменшення деформації

оброблюваної поверхні та зниження абсолютних максимальних значень стискаючих залишкових напружень у поверхневому шарі вигладженої деталі. Глибина σ_{max} залишається практично незмінною в межах інтервалів кроку Sf від 0,05 до 0,30 мм, тоді як при більших значеннях інтервалу Sf (до 0,45 мм) помітно спостерігається зменшення як максимальних значень σ_{max} , так і глибини g_σ .

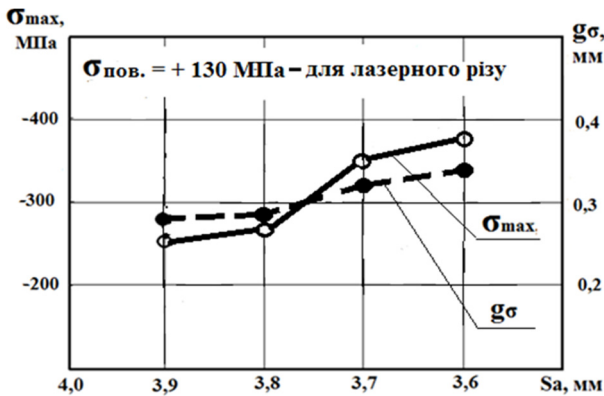


Рис. 9. Вплив величини натягу Sa на величину максимального залишкового напруження σ_{max} та глибину його від поверхні різі g_σ для зразків після лазерної різки та кулькового вигладжування ($Sf = 0,15$ мм)

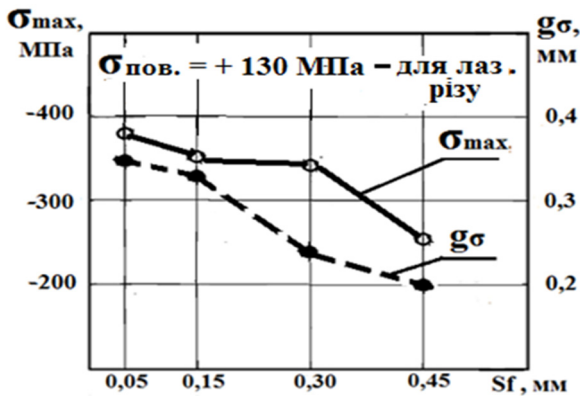


Рис. 10. Вплив величини кроку Sf на величину залишкового напруження σ_{max} та глибину накопичення залишкових напружень g_σ в зразках, вирізаних лазером та вигладжених кульковою ($Sa = 0,3$ мм)

Отже, в результаті експериментів із вигладжуванням кульками різів, виготовлених лазерним методом з вуглецевої сталі, виявлено, що кулькове вигладжування спричинило зменшення параметрів шорсткості поверхні Ra і Rz відповідно на 20 % та 60 % порівняно зі значеннями, що отримані в результаті лише лазерного різання. Кулькове вигладжування також викликало структурні зміни в матеріалі крайок різі, але збільшення мікротвердості поверхневого шару було не

більшим 20 %. Крім того, на поверхні, після вигладжування лазерного різі, виявлено стискаючі залишкові напруження величиною до -350 МПа на глибині до 0,35 мм, що забезпечує гарантовані позитивні результати.

Отримані в дослідженні результати в загальному підтверджуються даними робіт [11], [12], в яких також досліджувались можливості застосування аналогічної технології.

Виконані експериментальні дослідження показали, що ми можемо рекомендувати такі оптимальні режими вигладжування поверхонь різів, отриманих при лазерній різці вуглецевих сталей, кулькою стандартного діаметра 10 мм, як: величина натягу – $Sa = 0,25 \dots 0,30$ мм; величина кроку поперечної подачі – $Sf = 0,15 \dots 0,20$ мм.

Для реалізації дослідженої технології вигладжування поверхні лазерного різі була запропонована конструкція вигладжувальної головки, яка представлена на рис. 11. Ця головка включала в себе шток 1 для закріплення головки в шпинделі, наприклад, фрезерного станка та два підшипники 2 для утримання вигаджувальної кульки 3 та її обертання. Створення потрібної сили натягу в зоні вигладжування відбувалося за рахунок жорсткості обох підшипників. Запобігач від випадання 4 забезпечував утримування кульки 3 в вигладжувальній головці.

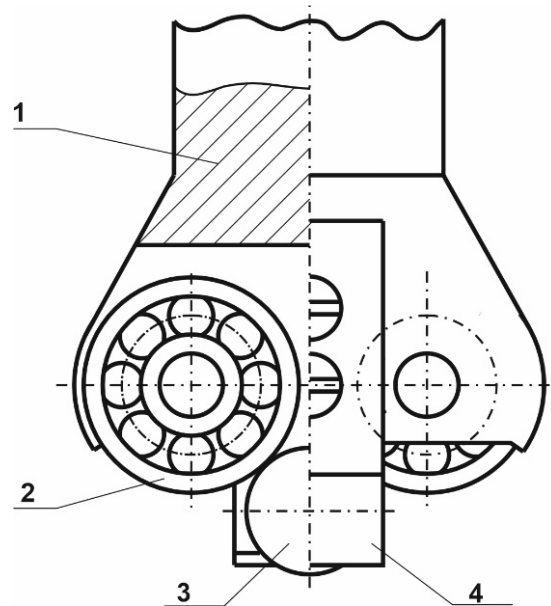


Рис. 11. Робоча частина кулькового вигладжувача: 1 – шток; 2 – підшипники для утримання кульки та створення натягу; 3 – вигладжувальна кулька; 4 – запобігач від випадання кульки

Лазерний різ, приведений на рис. 1, після вигладжування кульковим інструментом, представленим на рис. 11, на запропонованих вище оптимальних режимах вигладжування має наступний вигляд (рис. 12).

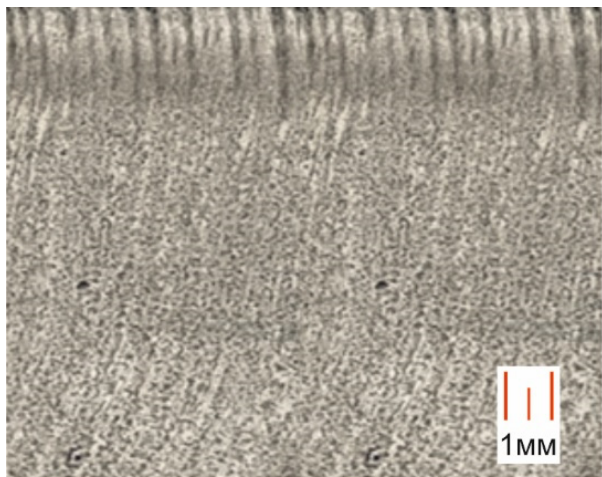


Рис. 12. Вигляд лазерного різку після кулькового вигладжування на запропонованих режимах вигладжування

Висновки

Таким чином, хоча лазерна різка має вагомі переваги порівняно з традиційними методами розділення матеріалів – такі як вузький різ, висока продуктивність, висока якість різів, можливість гнучко налаштувати

режими та автоматизувати процес – поверхні, отримані лазерним різанням, вимагають додаткової доробки.

Разом з тим, дослідження можливості використання методу поверхневого пластичного деформування для підвищення експлуатаційних параметрів обробленої поверхні показало, що цей метод можна використовувати для вигладжування поверхні різів після лазерного різки, що робить його ефективним завершальним кроком у обробці таких деталей. Проведене експериментальне дослідження оптимізації лазерного різання металів за допомогою допоміжного кулькового вигладжування показало, що такий підхід знижує шорсткість поверхні вирізаних деталей порівняно з результатами, отриманими лише лазерним різанням. Кулькове вигладжування також змінює структуру матеріалу крайок різку та створює стискаючі залишкові напруги в поверхневому шарі різку. Це все разом дозволяє отримати деталь з більш “функціональною” поверхнею, порівняно з деталлю, виготовленою лише лазерною різкою.

Як результат, кулькове вигладжування поверхонь різів після вирізання деталей лазерним випромінюванням можна рекомендувати як фінішну операцію лазерної різки, яка при невисоких додаткових капітальних затратах дає можливість значно покращити експлуатаційні характеристики виготовлених в такий спосіб деталей.

References

- [1] L. I. Pupan, *Lazerni tehnologii u mashynobuduvanni*, Harkiv: NTU “HPI”, 2020.
- [2] V. S.Kovalenko, V. V.Romanenko and L. M.Oleshchuk, *Maloothodnue procesu rezky luchom lazera*, Kyiv: Tehnika, 1987.
- [3] V. V. Romanenko, A. S. Kozurev and A. A. Shkurenko, “Teoretycheskoe obosnovanye realizatsyy processa gazolazernoy rezky metallicheskykh zagotovok bolshykh tolshhyn v polygraficheskyykh proyzvodstvah,” *Tehnologija i tehnika druzkarstva: zbirnyk naukovykh prac.*, Vol 1(27), pp. 112–118, 2010.
- [4] N. S. Man, J. Duan and T. M. Yue, “Dynamic characteristics of gas jets from subsonic and supersonic nozzles for high pressure gas laser cutting,” *Optics & Laser Technology*, Vol. 30. pp. 497–509, 2018, doi: 10.1016/S0030-3992(98)00083-8.
- [5] C. Wandera, V. Kujanpaa and A. Salminen, “Laser power requirement for cutting thick-section steel and effects of processing parameters on mild steel cut quality,” *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, Vol. 225, pp. 651–661, 2007, doi: 10.1177/09544054JEM1971.
- [6] M. Harnycharova et al., “Prognozyrovanye ostatochnyh naprjazhenyj u naprjazhenyj techenyja po topografyy poverhnosty, sozdannoj s pomoshhju tehnologyy lazernoy rezky,” *Lazernaja tehnologija*, Vol. 52, pp. 21–29, 2013.
- [7] V. V. Romanenko, “Pidvyshhennja jakosti gazolazernoi rizky metalievych materialiv za rahunok usunennja gratu na kromkah riziv pry vykorystanni v poligrafichnij promyslovosti,” *Tehnologija i tehnika druzkarstva: zbirnyk naukovykh prac.*, Vol. 4(38). pp. 90–94, 2012.
- [8] V. A. Kurylovych, P. P. Melnychuk and V. A. Janovskyy, *Osnovy tehnologij obrobky poverhon' detalej mashyn*, Zhytomyr: Vyd. O.O. Jevenok, 2017, 266 p.
- [9] R. Avilés, J. Albizuri, A. Rodríguez and L. N. López de Lacalle, “Influence of low-plasticity ball burnishing on the high-cycle fatigue strength of medium carbon AISI 1045 steel.,” *Int. J. Fatigue*, Vol. 55, pp. 230–244, 2013, doi: 10.1016/j.ijfatigue.2013.06.024.
- [10] D. Grochała, S. Berczynski, Z. Grządziel, “Stress in the surface layer of objects burnished after milling,” *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, Vol. 72, 1655–1663, 2014, doi: 10.1007/s00170-014-5775-x.
- [11] A. Lewandowski, E. Feldshtein, “Technological heredity when roller burnishing of ductile cast iron,” *J. Sci. Ind. Res.*, Vol. 73, pp. 559–565, 2014.
- [12] A. Skoczylas and K. Zaleski, “Selected Properties of the Surface Layer of C45 Steel Parts Subjected to Laser Cutting and Ball Burnishing,” *Materials*, Vol. 13(15), pp. 1–19, 2020, doi: 10.3390/ma13153429.
- [13] P.J. Withers, H.K.D.H. Bhadeshia, Residual stress. Part 1 - Measurement techniques, *Mater. Sci. Technol.*, Vol. 17, pp. 355–365, 2001. DOI: <https://doi.org/10.1179/026708301101509980>.

Enhancement of laser cutting by using ball smoothing of cut surface

V. Romanenko¹ • M. Bloschchysyn¹ • M. Romanenko² • A. Kushnerenko¹

¹ Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, Kyiv, Ukraine

² “TRC Respublika” LLC: Kyiv, Ukraine

Abstract. This article considered the problem of improving the quality of the edges of parts cut by laser radiation, due to a new approach, which consists in smoothing the surface of laser cuts with a ball tool. The conducted analysis showed the prospects of improving the characteristics of the technology of laser cutting parts from sheets of different thickness when applying subsequent ball smoothing of the cut surface. The purpose of the study is a comprehensive analysis of the effect of smoothing parameters on the operational characteristics of parts obtained by this combined method. The necessary methods of assessing the roughness of the cut surfaces, the microhardness of their edges, and the residual stresses occurring in the surface layer of the cut were used to conduct the experiments. Based on the formulated hypothesis about the prospect of improving the characteristics of the cut edges during their subsequent smoothing, it was experimentally established that there is a noticeable decrease in the values of roughness parameters after smoothing the surface of laser cuts compared to their values for samples only after laser cutting. In addition, studies show that in the region of the edge of the cut, there is an increase in the microhardness of the cut surface by up to 20%. At the same time, compressive stresses appear on the edge of the cut, which ensure an increase in the operational characteristics of the parts after the proposed combined treatment. To implement the researched technology of smoothing the laser cut surface, the design of the smoothing head was proposed. As a result of the study of the proposed combined method of obtaining parts by laser cutting with subsequent smoothing of the surface of the cuts, it was confirmed that with low additional capital costs, it is possible to significantly improve the operational characteristics of the parts produced in this way. This also proves the prospects for further development of the presented combined technology, both with the use of ball smoothing and with the application of other methods of surface strengthening of laser cut edges.

Keywords: laser cutting; improvement of characteristics; ball smoothing of the surface; surface structures, combined process.