

**Віктор Васильович Романенко<sup>1</sup>, Олексій Дмитрович Кагляк<sup>2</sup>,  
Михайло Сергійович Блощицин<sup>3</sup>, Максим Вікторович Романенко<sup>4</sup>,  
Єлизавета Вадимівна Євсюкова<sup>5</sup>**

<sup>1</sup>кандидат 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>

<sup>2</sup>кандидат технічних наук, доцент кафедри лазерної техніки та фізико-технічних технологій  
Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського» (Київ, Україна)  
E-mail: [kaglyak.olexa@gmail.com](mailto:kaglyak.olexa@gmail.com). ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-5602-543X>

<sup>3</sup>кандидат технічних наук, доцент кафедри лазерної техніки та фізико-технічних технологій  
Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського» (Київ, Україна)  
E-mail: [m.bloshchytyn@gmail.com](mailto:m.bloshchytyn@gmail.com). ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3688-7948>

<sup>4</sup>"ТРІЦ Республіка" ТОВ: Київ, Україна (Київ, Україна)  
E-mail: [romanenkoma.ua@gmail.com](mailto:romanenkoma.ua@gmail.com). ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-8803-2278>

<sup>5</sup>магістр кафедри лазерної техніки та фізико-технічних технологій  
Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського» (Київ, Україна)  
E-mail: [li4zka@gmail.com](mailto:li4zka@gmail.com). ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-4085-0985>

## **РОЗРОБКА СПОСОБУ ГАЗОЛАЗЕРНОЇ РІЗКИ МЕТАЛІВ ІЗ ПОДАЛЬШИМ ВИГЛАДУВАННЯМ ПОВЕРХНІ РІЗІВ**

Наведено аналіз існуючих способів лазерного різання та представлено особливості конструктивного та технологічного вдосконалення процесу за рахунок вигладжування поверхні різів. Експериментальні дослідження, полягали в порівнянні впливу розмірів вигладжувальної кульки на якість обробленої поверхні. Встановлено, що нерівності на поверхнях різів, оброблених кульками різного діаметра, деформуються майже однаково, хоча сліди від лазерного різання скрізь залишаються. Показані результати впливу діаметра кульки на зміну мікротвердості та товщину зміцненого шару, а також величину максимального залишкового напруження на поверхні різів після вигладжування та глибину цих залишкових напружень. Розширення функціональності існуючого на ринку лазерного обладнання полягає у модернізації за рахунок встановлення пристрою для вигладжування на рухомому каретку, де розміщена лазерна фокусуєча головка. При цьому кульковий інструмент при вигладжуванні переміщується по контуру деталі за іншою програмою, ніж при газолазерній різці, так щоб контур руху інструменту був еквідистантним до вирізаної деталі. Конструктивне розташування пристрою для вигладжування вище точки фокусування лазерного випромінювання не буде перешкоджати операціям контурного газолазерного різання.

Представлені технологічні та конструктивні рішення дозволяють знизити вартість виробу за рахунок зниження трудомісткості подальших слюсарних робіт в результаті зниження шорсткості поверхні різів та дають можливість отримати деталі з більшою міцністю їх поверхні проти втоми. Матеріальні затрати на виконання такої модернізації на кілька порядків нижчі вартості самого лазерного обладнання.

**Ключові слова:** лазер, технологічний процес, різка, пластична деформація, схема обробки, модернізація.

Рис.: 9. Бібл.: 12.

**Актуальність теми дослідження.** У сучасному виробництві надзвичайно важливо використовувати маловідходні технологічні процеси в різних галузях промисловості. Одним із ключових таких напрямків є розробка високопродуктивних і екологічно чистих методів різання матеріалів, особливо в машинобудуванні та приладобудуванні, де зустрічаються складні контури деталей із важкооброблюваних матеріалів. Такою технологією є лазерне різання металічних матеріалів. Однак у процесі такого різання зазнає значного термічного впливу край вирізаної деталі, тому досить часто поверхня крайки лазерного різів потребує додаткової обробки. Тому розробка комбінованих технологій, які включають додаткові фінішні операції покращення якості поверхні різання після основного лазерного різання є актуальною задачею.

**Постановка проблеми.** У ролі такої фінішної операції нами запропоновано застосувати кулькове вигладжування поверхні отриманих лазерних різів. Відомо, що в машинобудуванні вже кілька десятиліть успішно застосовується технологія вигладжування оброблюваної по-

верхні кульками, яка дозволяє отримувати ці поверхні з підвищеною міцністю, малою шорсткістю та високою стійкістю до абразивного зношування і втоми. Вигладжування кульками є екологічно безпечним методом обробки, оскільки не утворює стружки, іскор та пилу, а також дозволяє зменшити використання охолоджувальних рідин і мастильних матеріалів. При обробці складнопрофільних деталей інструмент для вигладжування рухається паралельно або перпендикулярно до слідів, залишених після попередньої обробки. Подібні сліди в нашому випадку мають вигляд борозен на поверхні після лазерного різання.

Такий підхід забезпечить покращення якості поверхні крайок різів після основного лазерного різання.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Лазерне різання матеріалів відрізняється від традиційних методів таких, як кисневе, плазмове або гідроабразивне різання. Лазерна технологія забезпечує вищу продуктивність, дозволяючи виконувати розрізи меншої ширини та кращої якості. Завдяки цьому зменшуються втрати матеріалу на заготівельних операціях. Крім того, лазерна різка має численні переваги, такі як висока керованість енергетичними параметрами та просторовим положенням лазерного променя, можливість висококонцентрованого фокусування, а також безконтактної дії випромінювання лазера на заготовку. Це надає гнучкість у переналаштуванні режимів різання, а також забезпечує легку автоматизацію процесу [1].

Лазерне різання здійснюється з використанням коаксіального потоку допоміжного технологічного газу, що відоме як газолазерна різка. Газ подається в зону різання одночасно зі сфокусованим лазерним променем. Він охолоджує різальну ділянку, зменшуючи тепловий вплив на крайки різу, і видаляє розплавлений шлак з різу. Якщо ж використовується кисень як технологічний газ, то енергія лазерного променя підсилюється за рахунок екзотермічного тепла, що виникає при згорянні металу в середовищі кисню [2].

При контурному лазерному різанні металевих листів особливо важлива якість різу. Спеціальні стандарти визначають термінологію, критерії оцінки якості різання, класифікацію за якістю та допустимі відхилення. Стандарт, застосований для лазерного різання матеріалів товщиною від 0,5 до 40 мм, оцінює якість різу за такими параметрами, як геометрія розрізу, якісний стан поверхні різу та характеристики змін властивостей матеріалу на крайках цього різу [3; 4].

Авторами проведені пошукові дослідження впливу додаткової операції вигладжування поверхні лазерних різів на підвищення їхніх якісних характеристик [5].

**Виділення недосліджених частин загальної проблеми.** Подальше дослідження впливу параметрів кулькового вигладжування на якість лазерних різів передбачає вивчення залежності параметрів крайок різів від діаметра цих кульок. Також потрібно провести розробку варіантів конструкторського рішення для реалізації запропонованої комбінованої технології на існуючих промислових лазерних технологічних комплексах

**Метою статті** є визначення можливостей вдосконалення процесу лазерного різання металів з використанням комбінованого процесу лазерного різання і кулькового вигладжування поверхні лазерного різу для підвищення якості отриманих крайок різів та забезпечення підвищення міцності проти втоми при експлуатації таких деталей.

**Виклад основного матеріалу.** Після лазерного різання поверхня набуває певні нерівності (рис. 1). Ці нерівності виглядають як напівкруглі канавки або рифлення (борозни) і виникають внаслідок формування сфокусованого лазерного променя, швидкості різання та особливостей видалення рідкого металу з порожнини різу. При цьому поверхня різу має дві зони: верхню, що знаходиться в області входу лазерного променя в заготовку, з борознами шириною від 0,1 до 0,2 мм, та нижню – з більш грубою поверхнею, що містить відкладення затверділого рідкого металу та шлаку [6]. На нижніх крайках розрізу також може бути присутній грат, тобто задирки у вигляді затверділих напливів розрізаного металу та його оксидів [7].

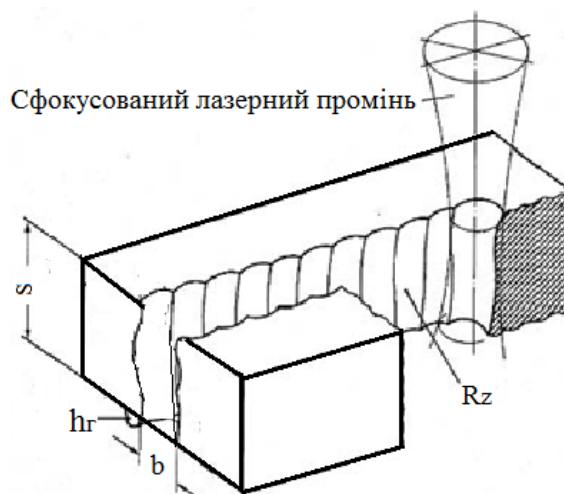


Рис. 1. Основні розмірні та якісні параметри процесу лазерного різання:  
 $S$  – товщина металу, що розрізається;  $b$  – ширина отриманого різну;  
 $R_z$  – шорсткість поверхні різну;  $h_r$  – висота грату

Подальше дослідження впливу технологічних режимів на розмірні та якісні показники процесу лазерного різання, а також розробка нових методів вдосконалення цієї технології та обладнання є важливим для широкого впровадження цієї технології у виробництво. Одним із нових методів вдосконалення процесу лазерного різання є розробка комбінованих технологій, які включають додаткові фінішні операції після основного різання лазером.

Під час обкатування гладка загартована кулька з певним зусиллям притискається до поверхні, деформуючи її. Важливу роль у досягненні потрібної якості поверхневого шару відіграє тиск, який створюється зусиллям притискання кульки до поверхні, забезпечуючи необхідну величину натягу  $Sa$ . Зусилля від такого тиску має бути достатнім для забезпечення необхідних змін поверхні різну, але надмірний тиск або велика кількість проходів інструменту можуть пошкодити поверхню і викликати відшарування окремих її ділянок. Для обробки різів у товстих заготовках використовується такий самий кульковий інструмент, але додатково застосовується поперечний рух з інтервалом подачі  $Sf$ .

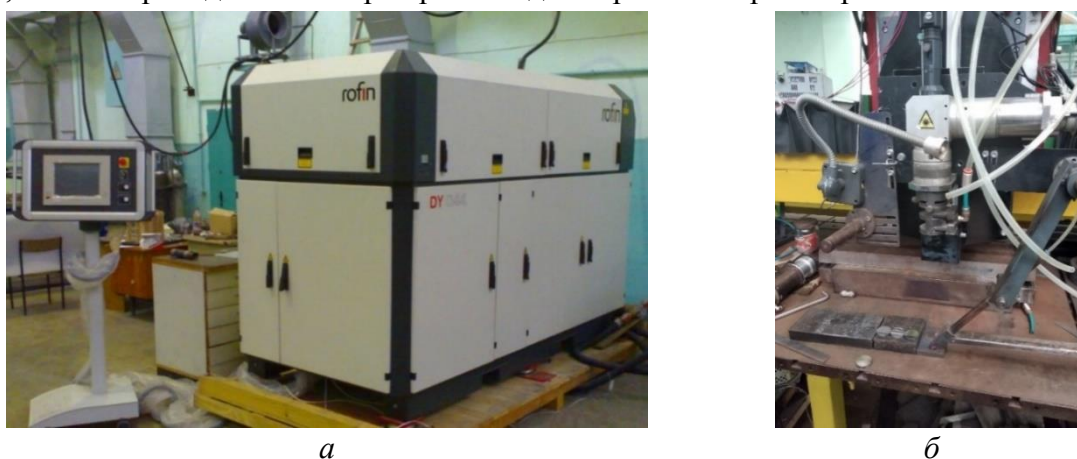
Проте обкатуванням не можна виправити розмірні похибки, що виникли під час попередньої обробки заготовок, тому основна обробка (в нашому випадку контурне лазерне різання) повинно бути точним. Обкатування ж впливає тільки на мікронерівності без зміни розміру деталі. Впровадження вигладжування кульками підвищує "функціональність" обробленої поверхні, яка краще витримує контактне навантаження та має менший трибологічний знос, особливо, у присутності мастила [8; 9].

Вигладжувальні інструменти, які використовують пружні елементи для передачі зусилля, забезпечують стабільні умови обробки в будь-якій точці поверхні та дозволяють регулювати силу вигладжування. У наш час найпоширенішим способом вигладжування є метод вигладжування з пружним і жорстким закріпленням індентора. Такі індентори передбачають створення жорсткого кінематичного зв'язку між цим інструментом і оброблюваною деталлю, що здійснюється втисканням робочої частини індентора в деталь, забезпечуючи силовий вплив і пластичну деформацію матеріалу. Нині є багато пропозицій від різних виробників таких інструментів. На рис. 2 показано приклад збірного індентора [11].



*Рис. 2. Приклад готового до використання збірного вигладжувача з пружним закріпленням індентора*

З огляду на вищезазначений аналіз, нами були проведені експерименти та отримані результати щодо вдосконалення технології різання лазером металів із застосуванням додаткової фінішної операції кулькового вигладжування крайок різів після основного газолазерного різання. У процесі експериментів використовувався Nd:YAG-лазер моделі DY044, вироблений компанією “Rofin-Sinar” (Німеччина), з потужністю випромінювання до 4,4 кВт та довжиною хвилі випромінювання  $\lambda = 1,06$  мкм [11; 12]. На рис. 3 показано загальний вигляд лазерної установки та технологічний модуль з системою фокусування лазерного випромінювання і коаксальною подачею додаткового ріжучого газу, на якій проводилося лазерне різання для отримання зразків різів.



*Рис. 3. Загальний вигляд Nd:YAG-лазера моделі DY044 разом з терміналом керування (а) та технологічний модуль із системою фокусування лазерного випромінювання і коаксальною подачею технологічного газу (б)*

Лазерне різання в цьому експерименті проводилося при наступних параметрах: регульований діапазон потужності - 0,8...4,0 кВт; довжина хвилі випромінювання - 1,06 мкм; безперервний режим роботи лазера; розбіжність променя – менше ніж 4 мрад; модовий склад випромінювання - TEM<sub>00</sub>; кругова поляризація випромінювання.

Для наших цілей було обрано оптимальну потужність лазера на рівні 1500 Вт. Об'єктив системи фокусування мав фокусну відстань - 125 мм. Діаметр сопла для подачі газу становив – 1,5 мм. Матеріалом для експериментів була сталь 45. Подачу робочого газу, яким був кисень, забезпечував різак для газолазерного різання. Умови експерименту включали використання робочого газу при тиску до 0,8 МПа. При цьому лазерний промінь спрямовувався на верхню поверхню пластини без занурення точки фокуса в глибину різі. Різання здійснювалося на зразках товщиною 4 мм при швидкості різання у 2,0 м/хв. На рис. 4 показано вигляд поверхні різі після газолазерного різання за зазначених умов обробки.

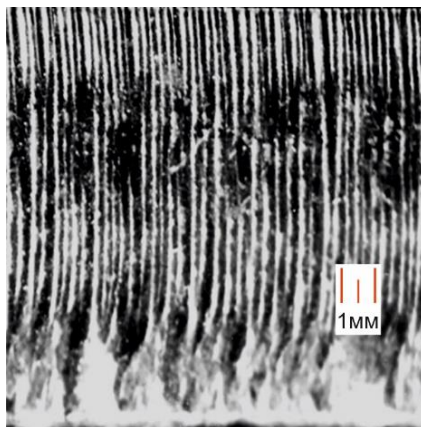


Рис. 4. Вигляд поверхні різку після лазерного різання сталі 45

Шорсткість поверхні оцінювалася шляхом вивчення різів, отриманих у результаті експериментальних досліджень, з використанням стандартного параметра шорсткості  $Rz$  (середня висота нерівностей з десяти вимірів) та середнього арифметичного відхилення профілю  $Ra$ . Вимірювання проводилися на необхідних відстанях від верхньої поверхні заготовки, щоб отримати середнє значення шорсткості поверхні з урахуванням кожної ділянки зрізу. Мікроструктуру зразків досліджували за допомогою металографічного мікроскопа. Вимірювання мікротвердості проводили за методом Віккерса на металографічних зразках, підготовлених згідно зі стандартними процедурами, використовуючи мікротвердомір з навантаженням на індентор 50 г ( $HV0,05$ ). За результатами вимірювань мікротвердості визначали зміни твердості  $HV0,05$  та товщину зміцненого шару  $g_h$ . Залишкові напруження в поверхневому шарі зразків визначалися на основі деформацій, виявлених при знятті послідовних шарів металу за допомогою хімічного травлення у 4 % розчині азотної кислоти на спеціальному стенді. Для вимірювання деформацій зразка використовувався цифровий датчик, вимірювальний наконечник якого був у контакті з поверхнею протравленого зразка. Залишкові напруження в максимальній точці позначалися як  $\sigma_{max}$ , а глибина стискаючо-розтягуючих напружень – як  $g_\sigma$ .

Раніше нами були вивчені та опубліковані залежності впливу зусилля притискання кульки до вигладжуваної поверхні  $Sa$  (сили натягу) та інтервалу поперечної подачі  $Sf$  на шорсткість  $Ra$  та  $Rz$  поверхні газолазерного різку, на зміну мікротвердості  $HV0,05$  та товщини зміцненого шару  $g_h$ , а також на величину максимального від'ємного залишкового напруження  $\sigma_{max}$  та глибину його розташування від поверхні різку  $g_\sigma$ . Проведені експерименти показали, що оптимальні режими кулькового вигладжування поверхонь різів, отриманих при газолазерній різці сталі 45, мають такі значення: величина натягу –  $Sa = 0,25 \dots 0,30$  мм, величина кроку поперечної подачі –  $Sf = 0,15 \dots 0,20$  мм [11].

Продовження експериментального дослідження, представлене в цій статті, полягало в порівнянні впливу розмірів вигладжувальної кульки на якість обробленої поверхні. Для цього порівнювалися поверхні, оброблені кульками різних діаметрів – 6 мм, 10 мм та 15 мм. Встановлено, що нерівності на поверхнях різів, оброблених кульками різного діаметра, деформуються майже однаково, хоча сліди від лазерного різання скрізь залишаються. Наприклад, при використанні кульки діаметром 6 мм спостерігалось значне зменшення різниць у нерівностях між вхідною та вихідною зонами, але вершини нерівностей залишалися лише частково згладженими. Кулька діаметром 10 мм забезпечувала більш суттєве сплюснювання ліній борозен, хоча різниця в шорсткості між зонами входу та виходу лазерного променя все ще була помітна.

Порівняння поверхонь, оброблених кульками діаметрами 6 мм та 15 мм, показало, що максимальна висота профілю поверхні, отриманої за допомогою 6-міліметрової кульки, приблизно на 30 % менша, ніж висота при використанні 15-міліметрової кульки (рис. 5). Поверхня, оброблена кулькою діаметром 6 мм, мала більш інтенсивне згладження між виступами та западинами порівняно з поверхнею, обробленою кулькою діаметром 15 мм. Найбільша висота поверхні після обробки кулькою діаметром 6 мм зменшилася більш ніж на 60 % у порівнянні зі значенням після різання лазером, тоді як обробка кулькою діаметром 15 мм знизила цей показник менш ніж на 50 %.

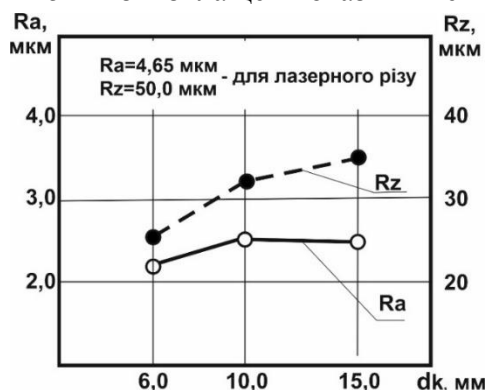


Рис. 5. Вплив діаметра кульки  $d_k$  на шорсткість  $R_a$  та  $R_z$  після газолазерної різки з подальшим кульковим вигладжуванням для  $S_a = 0,25$  мм та  $S_f = 0,20$  мм

На рис. 6 показано результати впливу діаметра кульки  $d_k$  на зміну мікротвердості  $HV_{0,05}$  та товщину зміцненого шару  $g_h$ . Найбільше збільшення мікротвердості спостерігалось для кульок діаметром 6 мм, тоді як максимальна товщина зміцненого шару відповідала кулькам діаметром 15 мм. Зміни в мікротвердості  $HV_{0,05}$  та товщині  $g_h$  зумовлені збільшенням радіуса кривизни кульок із більшим діаметром. Однак слід зазначити, що в розглянутому діапазоні діаметрів кульок зміни  $HV_{0,05}$  та  $g_h$  були незначними. Дослідження показали, що максимальне збільшення мікротвердості для зразків зі сталі 45 становило менше за 20 %.

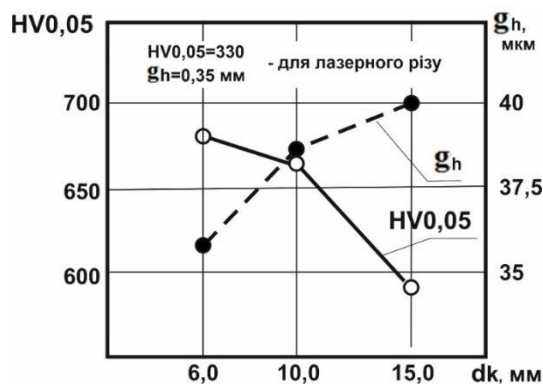


Рис. 6. Вплив діаметра кульки  $d_k$  на зміну мікротвердості  $HV_{0,05}$  та товщини зміцненого шару  $g_h$  для зразків після лазерного різання та з кульковим вигладжуванням при  $S_a = 0,25$  мм та  $S_f = 0,20$  мм

Експериментальні дослідження також показали, що зі збільшенням діаметра кульки абсолютна величина максимальної залишкової напруги  $\sigma_{max}$  зменшується. Це пояснюється збільшенням радіуса кривизни кульки та зниженням тиску на одиницю площі. Одночасно з цим збільшується глибина проникнення стискаючих залишкових напружень  $g_h$  (рис. 7). При використанні кульки діаметром 15 мм глибина проникнення стискаючих залишкових напружень була приблизно на 22 % більшою, а величина цих напружень на ~ 17 % меншою, ніж для кульки діаметром 6 мм.

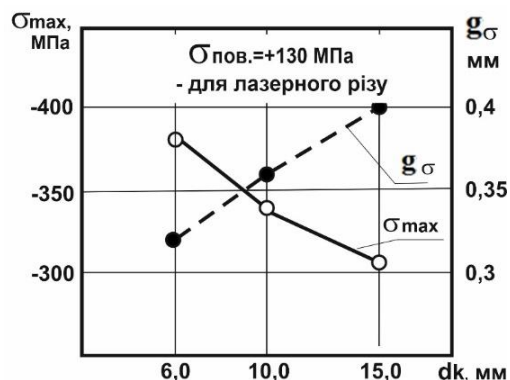


Рис. 7. Вплив діаметра кульки  $d_k$  на величину максимального залишкового напруження  $\sigma_{max}$  та глибину залишкових напружень  $g_{\sigma}$  на поверхню після різання лазером та з подальшим кульковим вигладжуванням для  $S_a = 0,25$  мм та  $S_f = 0,20$  мм

На основі проведених досліджень щодо впливу діаметра кульок на вигладжування поверхонь лазерних різів у сталі 45 можна зробити наступні висновки. Кульки діаметром 6 мм забезпечують найменшу шорсткість поверхні після вигладжування, збільшення мікротвердості поверхні різів та незначне зростання (до 20 %) від'ємних залишкових напружень, що позитивно впливає на зносостійкість деталей з обробленими в такий спосіб крайками різів. Однак не до кінця зрозуміло, чи є незначне зменшення глибини зміцненого шару та залишкових напружень для кульок меншого діаметра позитивним фактором. Для отримання точної відповіді на це питання необхідні додаткові дослідження. Тим не менше, уже зрозуміло, що для процесу лазерного різання середньовуглецевих сталей з додатковим фінішним вигладжуванням поверхні різів найкраще використовувати збірні вигладжувачі (рис. 2) з діаметром кульки 5-7 мм. Поверхня газолазерного різів, оброблена таким інструментом, виглядає, як показано на рис. 8.

Для реалізації комбінованої технології лазерної різки з подальшим вигладжуванням поверхні різання кульками ми розробили два варіанти конструкторського рішення для використання на існуючих промислових лазерних технологічних комплексах (ЛТК).

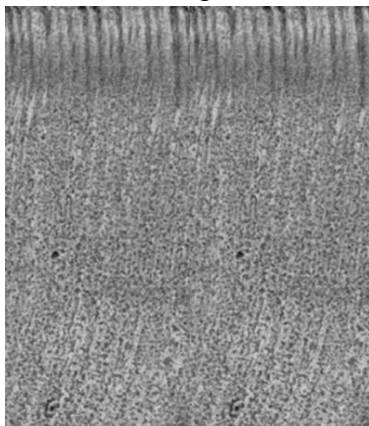


Рис. 8. Вигляд лазерного різів після кулькового вигладжування на підібраних режимах обробки

Суть першого варіанту обробки полягає в наступному. На ЛТК, що складається з лазерного випромінювача, системи передачі лазерного випромінювання в зону різки, системи подачі допоміжного газу та координатного столу, проводиться лазерне різання за традиційною технологією. Програма для переміщення координатного столу визначає початок різки з заданої вихідної точки на заготовці. Після цього відбувається вирізання деталі за запрограмованим у лазерному верстаті контуром (рис. 9, а).

Після завершення лазерного різання вирізана деталь знову встановлюється на координатний стіл на додаткову опору таким чином, щоб деталь була на деякій відстані від поверхні столу. Це необхідно для забезпечення вільного переміщення вигладжувального інструмента. При цьому деталь надійно закріплюється притискачем із зусиллям  $F$ .

Далі в ту ж вихідну точку контуру вирізаної деталі замість лазерного різачка підводиться розроблений нами пристрій для вигладжування з вертикально встановленим кульковим інструментом (рис. 9, б).

У конструкції вигладжувального інструменту був передбачений вал для встановлення на нього кульки з отвором і канал для подачі мастильно-охолоджувальної рідини (МОР) у зону обробки. Кулька мала обертатися на валу вільно, але без люфту.

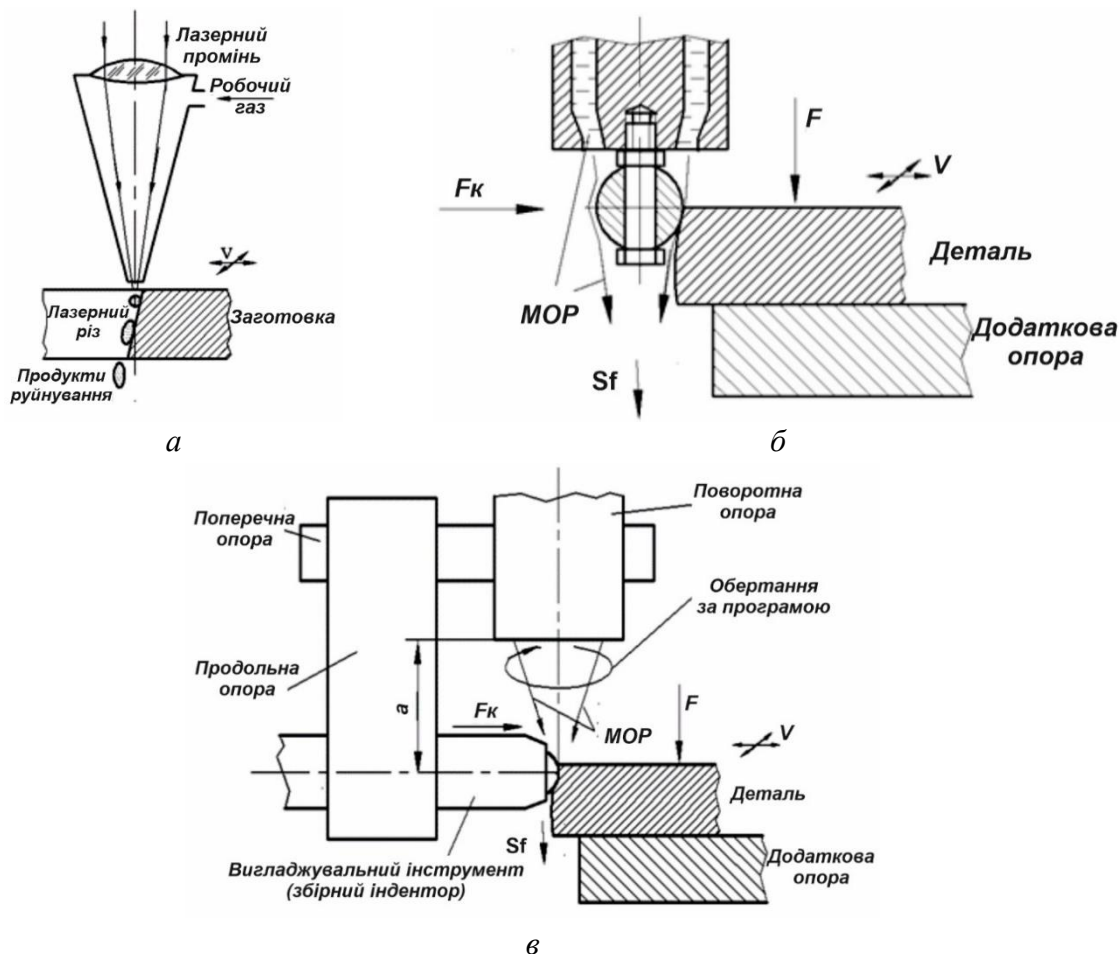


Рис. 9. Комбінований метод лазерного різання металів з подальшим кульковим вигладжуванням поверхні зрізів включає: етап лазерної різки (а), етап вигладжування лазерного різку кулькою з отвором (б) та етап вигладжування різку за допомогою промислового збірного індентора (в)

Вигладжувальний пристрій встановлювався біля верхнього краю деталі і притискався до поверхні лазерного різку з необхідним зусиллям вигладжування  $F_k$ . Для цього в конструкції може бути передбаченим динамометр, який регулював би зусилля притискування у заданому діапазоні як у початковій точці контуру, так і в процесі вигладжування по всьому контуру деталі.

У подальшому кульковий інструмент переміщувався по контуру деталі за іншою програмою, ніж при газолазерній різці, так щоб контур руху інструменту був еквідистантним до вирізаної деталі. Еквідистанта руху повинна враховувати радіус кульки і величину деформації поверхні деталі під час вигладжування.



Після повного обходу контуру деталі кульковий інструмент, який знову знаходиться у початковій точці, переміщується вглиб різу на величину покрокового інтервалу  $S_f$ , і обхід деталі знову повторюється. Цикл потрібно повторювати стільки разів, скільки проходів необхідно для повного вигладжування різу по всій його глибині. Важливо відзначити, що така схема обробки дозволяє вигладжувати як зовнішній, так і внутрішній контур вирізаної деталі.

Оскільки кулька з отвором у центрі не є дуже міцною конструкцією, ми розробили ще одну схему обробки з використанням промислового збірного індентора (див. рис. 2). Конструкція для реалізації цієї схеми включала поворотну опору з можливістю обертання навколо своєї осі, поперечну опору, закріплену перпендикулярно до поворотної опори, поздовжню опору, закріплену паралельно поворотній опорі, і вигладжувальний пристрій (збірний індентор), закріплений у поздовжній опорі (рис. 9, в). Збірний індентор був встановлений так, щоб край його кульки збігався з віссю поворотної опори.

Надалі, як і в першій схемі обробки, вигладжувальний пристрій встановлювався біля верхнього краю деталі та притискався до поверхні лазерного різу з необхідним зусиллям вигладжування  $F_k$ . Відмінності другої схеми полягали також і в застосуванні іншої програми переміщення кулькового інструменту по контуру деталі. У цьому випадку інструмент переміщувався за тією ж програмою, що і при лазерному різанні деталі, але з додатковим обертанням поворотної опори, щоб вигладжувальний пристрій завжди залишався перпендикулярним до контуру вирізаної деталі. Важливо відзначити, що відстань між торцем поворотної опори та віссю вигладжувального інструменту  $a$  повинна забезпечувати обробку деталей заданої товщини.

Усі інші елементи конструкції та послідовність обробки залишалися такими ж, як і в першій схемі. Варто також зауважити, що запропонована друга схема обробки підходить лише для вигладжування зовнішніх контурів деталей.

Отже, модернізація лазерних технологічних комплексів для виконання комбінованої операції лазерного різання металів з подальшим вигладжуванням поверхні різу може полягати в наступному:

1. Пристрій для вигладжування доцільніше встановлювати на рухому каретку, де розміщена лазерна фокусуєча головка, жорстко зв'язавши їх між собою. Оскільки конструктивно пристрій для вигладжування розташований вище точки фокусування лазерного випромінювання, він не буде перешкоджати виконанню операції контурної газолазерної різки.

2. У програмі для виконання вигладжування за першою схемою треба передбачати додаткову програму переміщення вигладжувального інструмента іншу, ніж для контуру газолазерної різки, так щоб контур руху інструменту був еквідистантним до вирізаної деталі.

3. У програмі ж зі стандартним промисловим вигладжувачем потрібно передбачити додаткове обертання поворотної опори, щоб вигладжувальний пристрій завжди залишався перпендикулярним до нормалі контуру деталі, що обробляється.

**Висновки.** У підсумку, запропонований нами метод лазерного різання з подальшим кульковим вигладжуванням поверхні різів дозволяє підвищити експлуатаційні якості деталей, вирізаних на промислових ЛТК за розробленою нами комбінованою технологією.

Крім того, запропонована модернізація лазерного технологічного комплексу дозволила розширити його функціональні можливості за рахунок застосування операції вигладжування поверхні вирізаної лазером деталі. Це, у свою чергу, дало можливість отримати деталі з більш "функціональною" боковою поверхнею порівняно з деталлю, вирізаною тільки лазером. Така деталь має більш згладжену та зміцнену бокову поверхню, що забезпечує підвищення міцності деталей проти втоми у 2...3 рази в порівнянні з деталями, отриманими тільки лазерним різанням.

Враховуючи, що матеріальні затрати на виконання модернізації для використання, розробленої комбінованої технології при випуску промислових ЛТК на кілька порядків нижчі вартості самого ЛТК, а показники якості отриманих в такий спосіб деталей багаторазово компенсують ці затрати, то широке впровадження такої технології при виготовленні сучасних ЛТК має широкі перспективи.

### Список використаних джерел

1. Пупань, Л. І. Лазерні технології у машинобудуванні : навч. посібник для студентів спеціальності «Прикладна механіка» денної, заочної та дистанційної форм навчання / Л. І. Пупань. – Харків : НТУ «ХПІ», 2020. – 109 с.
2. Коваленко, В. С. Малоотходные процессы резки лучом лазера / В. С. Коваленко, В. В. Романенко, Л. М. Олещук. – Київ : Техніка, 1987. – 112 с.
3. Petring, D. Some answers to frequently asked questions and open issues of laser beam cutting / D. Petring, F. Schneider, N. Wolf // Proceedings of the 31st International Congress on Applications of Lasers & Electro-Optics (ICALEO 2012). – Pp. 43-48.
4. Wandera, C. Laser power requirement for cutting thicksection steel and effects of processing parameters on mild steel cut quality / C. Wandera, V. Kujanpaa, A. Salminen // Journal of Engineering Manufacture. – 2011. – № 225. – Pp. 651-661.
5. Вдосконалення процесу лазерної різки за рахунок кулькового вигладжування поверхні різів [Електронний ресурс] / В. В. Романенко, М. С. Блощицин, М. В. Романенко, А. С. Кушнеренко // Mechanics and Advanced Technologies. – 2024. – Vol. 8. – № 2 (101). – Pp. 112-123. – Режим доступу: <https://journal.mmi.kpi.ua/article/view/299709>.
6. Modeling on surface cut quality of CO<sub>2</sub> laser cutting for Austenitic Stainless-steel sheet / A. Parthiban, C. Dhanasekaran, S. Sivaganesan, S. Sathish // Mater. Today Proc. – 2020. – Vol. 21. – Pp. 823–827.
7. Романенко, В. В. Підвищення якості газолазерної різки металевих матеріалів за рахунок усунення грату на кромках різів при використанні в поліграфічній промисловості / В. В. Романенко // Технологія і техніка друкарства : збірник наукових праць. – 2012. – Вип. 4(38). – С. 90–94.
8. Кирилович, В. А. Основи технологій обробки поверхонь деталей машин : підручник / В. А. Кирилович, П. П. Мельничук, В. А. Яновський; за ред. В. А. Кириловича. – Житомир : Видавець О. О. Євенок, 2017. – 266 с.
9. Influence of low-plasticity ball burnishing on the high-cycle fatigue strength of medium carbon AISI 1045 steel / R. Avilés, J. Albizuri, A. Rodríguez, L.N. López de Lacalle // International Journal of Fatigue. – 2013. – Vol. 55. – P. 230-244.
10. Grochala, D. Stress in the surface layer of objects burnished after milling / D. Grochala, S. Berczynski, Z. Grzadzil // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2014. – Vol. 72(9-12). – Pp. 1655–1663. DOI:10.1007/s00170-014-5775-x.
11. Прогнозирование остаточных напряжений и напряжений течения по топографии поверхности, созданной с помощью технологии лазерной резки / М. Харничарова, Дж. Валичек, А. Окснер, Р. Грзнарик, М. Кушнерова, Дж. Нойгебауэр, Д. Козак // Лазерная технология. – 2013. – № 52. – С. 21-29.
12. Застосування лазерного термоцикування для підвищення якості плазмових зносостійких покриттів [Електронний ресурс] / Л. Ф. Головка, О. Д. Кагляк, В. В. Романенко, М. С. Блощицин // Mechanics and Advanced Technologies. – 2022 – Vol. 6 – № 3. – Pp. 328-341. – Режим доступу: <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/55461>.

### References

1. Pupan, L.I. (2020). *Lazerni tekhnolohii u mashynobuduvanni [Laser technologies in mechanical engineering]*. NTU «KhPI».
2. Kovalenko, V.S., Romanenko, V.V., Oleshchuk, L.M. (1987). *Malootkhodnye protsessy rezky лучом лазера [Small-flow processes of laser beam cutting]*. Tekhnika.
3. Petring, D., Schneider, F., Wolf, N. Some answers to frequently asked questions and open issues of laser beam cutting. *Proceedings of the 31st International Congress on Applications of Lasers & Electro-Optics (ICALEO 2012)* (pp. 43-48).
4. Wandera, C., Kujanpaa, V., Salminen, A. (2011). Laser power requirement for cutting thicksection steel and effects of processing parameters on mild steel cut quality. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 225, 651–661.

5. Romanenko, V., Bloschchysyn, M., Romanenko, M., Kushnerenko, A. (2024). Vdoskonalennia protsesu lazernoi rizky za rakhunok kulkovoho vyhladzhuvannia poverkhni riziv [Enhancement of laser cutting by using ball smoothing of cut surface]. *Mechanics and Advanced Technologies*, 8(2(101)). [https://doi.org/10.20535/2521-1943.2024.8.2\(101\).299709](https://doi.org/10.20535/2521-1943.2024.8.2(101).299709).

6. Parthiban, A., Dhanasekaran, C., Sivaganesan, S., Sathish, S. (2020). Modeling on surface cut quality of CO<sub>2</sub> laser cutting for Austenitic Stainless-steel sheet. *Mater. Today Proc.*, 21, 823–827.

7. Romanenko, V.V. (2012). Pidvyshchennia yakosti hazolazernoi rizky metalevykh materialiv za rakhunok usunennia hratu na kromkakh riziv pry vykorystanni v polihrafichnii promyslovosti [Improving the quality of gas laser cutting of metal materials due to the elimination of burr on the edges of cuts when used in the printing industry]. *Tekhnolohiia i tekhnika drukarstva – Printing technology and technology*, 4(38), 90–94.

8. Kyrylovych, V.A., Melnychuk, P.P., Yanovskyi, V.A. (2017). *Osnovy tekhnolohii obrobky poverkhon detalei mashyn [Fundamentals of surface treatment technologies of machine parts]*. Vyd. O.O. Yevenok.

9. Avilés, R., Albizuri, J., Rodríguez, A., López de Lacalle, L.N. (2013). Influence of low-plasticity ball burnishing on the high-cycle fatigue strength of medium carbon AISI 1045 steel. *International Journal of Fatigue*, 55, 230–244.

10. Grochała, D., Berczynski, S., Grządziel, Z. (2014). Stress in the surface layer of objects burnished after milling. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, 72, 1655–1663.

11. Kharnycharova, M., Valychek, Dzh., Oksner, A., Hrnaryk, R., Kushnerova, M., Noihebauer, Dzh., Kozak, D. (2013). Prohnozirovanie ostatochnykh napriazhenii i napriazhenii techeniia po topografii poverkhnosti, sozdannoi s pomoshchiu tekhnologii lazernoi rezki [Prediction of ultimate stress and stress flow on the topography of the surface created with the help of laser cutting technology]. *Lazernaia tekhnolohiia – Laser technology*, 52, 21–29.

12. Golovko, L., Kaglyak, O., Romanenko, V., Bloschchysyn, M. (2022). Application of laser thermocycling to improve the quality of plasma wear-resistant coatings [Application of Laser Thermocycling to Improve the Quality of Plasma Wear-Resistant Coatings]. *Mechanics and Advanced Technologies*, 6(3), 328–341. <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/55461>.

Отримано 03.06.2024

UDC 621.375.826:621

**Victor Romanenko<sup>1</sup>, Oleksii Kaglyak<sup>2</sup>, Mykhaylo Bloschchysyn<sup>3</sup>,  
Maksym Romanenko<sup>4</sup>, Yelyzaveta Yevsiukova<sup>5</sup>**

<sup>1</sup>PhD 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](mailto:romvvv@gmail.com). **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0003-1918-7090>

<sup>2</sup>PhD 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:** [kaglyak.olexa@gmail.com](mailto:kaglyak.olexa@gmail.com). **ORCID:** <http://orcid.org/0000-0002-5602-543X>

<sup>3</sup>PhD 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:** [m.bloschchysyn@gmail.com](mailto:m.bloschchysyn@gmail.com). **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-3688-7948>

<sup>4</sup>“TRC RESPUBLIKA” LLC (Kyiv, Ukraine)

**E-mail:** [romanenkmax.ua@gmail.com](mailto:romanenkmax.ua@gmail.com). **ORCID:** <https://orcid.org/0009-0006-8803-2278>

<sup>5</sup> Master of of the Department of Laser Systems and Physical Technologies  
National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute» (Kyiv, Ukraine)  
**E-mail:** [li4zka@gmail.com](mailto:li4zka@gmail.com). **ORCID:** <https://orcid.org/0009-0002-4085-0985>

## DEVELOPMENT OF A METHOD FOR GAS LASER CUTTING OF METALS WITH SUBSEQUENT FINISHING OF CUT SURFACES

An analysis of the existing methods of laser cutting is given and the features of constructive and manufacturability improvement of the process due to smoothing the surface of the cuts are presented. Experimental studies consisted in comparing the effect of the size of the smoothing ball on the quality of the treated surface. It was established that the irregularities on the surfaces of the cuts processed by balls of different diameters are deformed almost equally, although traces of laser cutting remain everywhere. The results of the impact of the diameter of the ball on the change in microhardness and the thickness of the hardened layer, as well as the value of the maximum residual stress on the surface of the cut after smoothing and the depth of these residual stresses are shown.

*Expanding the functionality of existing laser equipment on the market consists in modernization by installing a smoothing device on a moving carriage, where the laser focusing head is placed. At the same time, for the implementation of the proposed combined technology of laser cutting with subsequent smoothing of the cutting surface, two variants of the design solution to the given task are proposed. The implementation of the first variant of processing provided for the presence of a shaft in the design of the smoothing tool for installing balls with a hole on it and a channel for supplying lubricating and cooling liquid to the processing zone. The ball tool during smoothing moved along the contour of the part according to a different program than during gas laser cutting, so that the contour of the movement of the tool was equidistant to the cut part. The structural location of the smoothing device above the focus point of the laser radiation allowed not to interfere with contour gas laser cutting operations. The second scheme included a rotary support with the ability to rotate around its axis, a transverse support fixed perpendicular to the rotary support, a longitudinal support fixed parallel to the rotary support, and an industrial smoothing device (collectible indenter) fixed in the longitudinal support. The assembled indenter was installed so that the edge of its ball coincided with the axis of the rotary support.*

*The presented technological and constructive solutions allow to reduce the cost of the product by reducing the labor intensity of further metalwork as a result of reducing the roughness of the cut surface and make it possible to obtain parts with greater strength of their surface against fatigue. The material costs of such modernization are several orders of magnitude lower than the cost of the laser equipment itself.*

**Keywords:** laser; technological process; thermal conductivity; cutting; plastic deformation; diagram of treatment.

*Fig.: 9. References: 12.*