

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
Навчально - науковий інститут матеріалознавства і зварювання
ім. Є.О. Патона

Кафедра лазерної техніки і фізико - технічних технологій

«На правах рукопису»

«До захисту допущено»

УДК 621.375.826

Завідувач кафедри

_____ О.Д. Кагляк

« ____ » _____ 2024 р.

Магістерська дисертація

на здобуття освітнього ступеня - магістр професійний

зі спеціальності 131 «Прикладна механіка»

на тему: «Вдосконалення процесу лазерної різки металів за рахунок
фінішної обробки крайок різів»

Виконав: студент II курсу, групи НТ-31мп

Євсюкова Єлизавета Вадимівна

Керівник:

Доцент кафедри ЛТФТ, к.т.н., доц.

Романенко В.В. _____

Рецензент:

Посада, науковий ступінь, вчене звання

Прізвище, ініціали

Засвідчую, що у цій магістерській
дисертації немає запозичень з праць
інших авторів без відповідних
посилань.

Студент _____

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
Навчально - науковий інститут матеріалознавства і зварювання
ім. Є.О. Патона

Кафедра лазерної техніки і фізико - технічних технологій

Рівень освітнього ступеня – **магістр професійний**

Спеціальність – 131 «Прикладна механіка»

Освітньо - професійна програма – «Інжиніринг зварювання, лазерних та споріднених технологій»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

_____ О.Д. Кагляк

«__»_____ 2024 р.

ЗАВДАННЯ

на магістерську дисертацію студенту

Євсюковій Єлизаветі Вадимівні

1. Тема дисертації «Вдосконалення процесу лазерної різки металів за рахунок фінішної обробки крайок різів», науковий керівник дисертації Романенко Віктор Васильович, кандидат технічних наук, доцент, затверджені наказом по університету від «08» 11 2024 р. № 5021– с .

2. Термін подання студентом дисертації – 10.12.2024 р.

3. Об'єкт дослідження – поверхні лазерного різання після додаткової обробки механічним вигладжуванням центробіжним дробоструменевим інструментом.

4. Предмет дослідження – шорсткість, зона термічного впливу та залишкові напруження на поверхні лазерного різу після додаткового механічного вигладжування цієї поверхні.

5. Перелік завдань, які потрібно розробити :

- а) виконати аналіз існуючих способів поверхневого пластичного деформування деталей машин різними способами механічного вигладжування їх поверхні;
- б) розробити спосіб центрифужної дробоструменевої обробки крайок різів, отриманих при лазерному різанні металів;
- в) виконати всебічне вивчення зміни якісних характеристик лазерних різів після додаткової фінішної обробки крайок цих різів.

6. Орієнтовний перелік ілюстративного матеріалу:

- а) презентація, що містить аналіз проблеми, тему і основні завдання дослідження, результати дослідження якісних параметрів лазерних різів після центрифужної дробоструменевої обробки їх крайок різів, висновки.
- б) плакати, що відображають суть роботи.

7. Дата видачі завдання – 05.03. 2024 р.

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання магістерської дисертації	Термін виконання	Примітка
1.	Літературний огляд, постановка мети та завдання дослідження.	05.03 – 09.04.2024	Виконано
2.	Розробка способу центрифужної дробоструменевої обробки крайок різів, отриманих при лазерному різанні металів.	09.04 – 20.06.2024	Виконано
3.	Проведення дослідження та опис обладнання.	02.09 – 14.10.2024	Виконано
4.	Виконання досліджень змін якісних параметрів лазерних різів після фінішної обробки крайок різів.	15.10 – 19.11.2024	Виконано
5.	Оформлення дисертаційної роботи, презентації.	20.11 – 10.12.2024	Виконано

Студент

Науковий керівник дисертації

Є.В. Євсюкова

В.В. Романенко

РЕФЕРАТ

Магістерська дисертація: 96 сторінок, 8 таблиць, 29 рисунків, 11 формул, 34 літературні джерела.

ВИГЛАДЖУВАННЯ ПОВЕРХНІ, ЗАЛИШКОВІ НАПРУЖЕННЯ, ЗОНА ТЕРМІЧНОГО ВПЛИВУ, КОМБІНОВАНА ОБРОБКА, ЛАЗЕР, ЛАЗЕРНЕ РІЗАННЯ, ЦЕНТРОБІЖНА ДРОБОСТРУМЕНЕВА ОБРОБКА, ШОРСТКІСТЬ.

Об'єкт дослідження: поверхні лазерного різання після додаткової обробки механічним вигладжуванням центробіжним дробоструменевим інструментом.

Предмет дослідження: шорсткість, зона термічного впливу та залишкові напруження на поверхні лазерного різу після додаткового механічного вигладжування цієї поверхні.

Мета роботи: дослідження можливості вдосконалення технології лазерної різки з використання поверхневого пластичного деформування як операції фінішного зміцнення поверхні деталей після лазерного різання.

Методи дослідження: вимірювання 3D топографії за допомогою мікроскопа Лінника та пристрою Hommel – Etamic T8000RC 120 –140 (Німеччина); вимірювання мікротвердості методом Віккерса; визначення залишкових напружень шляхом аналізу деформацій, зафіксованих під час послідовного видалення шарів металу хімічним травленням.

Результати роботи: вдосконалення технології лазерної різки металів із застосуванням механічного вигладжування крайок різів сприяє підвищенню експлуатаційних властивостей деталей, отриманих по такій комбінованій технології, ніж у тих, які виготовлені лише методом лазерного різання.

Практичне значення одержаних результатів: результати досліджень можуть бути використані при подальшому впровадженні процесів лазерної різки металів в виробництво для забезпечення підвищення експлуатаційних властивостей таких деталей, що розширює сферу використання лазерної технології.

Публікації за тематикою досліджень: 1. Романенко В.В. Розробка способу газолазерної різки металів з подальшим вигладжуванням поверхні різів. / В. В. Романенко, О. Д. Кагляк, Є. В. Євсюкова // Технічні науки та технології : науковий журнал / Національний університет «Чернігівська політехніка». – Чернігів: НУ «Чернігівська політехніка», 2 (36), 2024. – с. 80–91.

2. Романенко В. В. Розробка технології газолазерної різки з вигладжуванням поверхні різів. / В.В. Романенко, О.Д. Кагляк, Є.В. Євсюкова. // Матеріали ХХІУ міжнародної науково – технічної конференції « Прогресивна техніка, технологія та інженерна освіта», м. Київ, 23 травня – 26 травня 2024, с.41– 44.

ABSTRACT

Master's Thesis: 96 pages, 8 tables, 29 figures, 11 formulas, 34 references.

SURFACE SMOOTHING, RESIDUAL STRESSES, HEAT-AFFECTED ZONE,
COMBINED PROCESSING, LASER, LASER CUTTING, CENTRIFUGAL SHOT
PEENING, ROUGHNESS.

Object of research: laser- cut surfaces after additional treatment using a centrifugal shot peening smoothing tool.

Subject of research: surface roughness, heat-affected zone, and residual stresses on laser-cut surfaces after additional mechanical smoothing.

Objective: to investigate the possibilities of improving laser cutting technology by applying surface plastic deformation as a finishing operation to strengthen the edges of components after laser cutting.

Research methods: 3D topography measurements using a Linnik microscope and Hommel – Etamic T8000RC 120 –140 device (Germany); microhardness measurements by the Vickers method; determination of residual stresses through deformation analysis recorded during sequential metal layer removal via chemical etching.

Results of the research: Improvement of metal laser cutting technology using mechanical edge smoothing contributes to better operational properties of parts produced by such combined technology compared to those manufactured by laser cutting alone.

Practical significance of the obtained results: The research results can be used for further implementation of laser cutting processes in production to improve the operational properties of such parts, expanding the scope of laser technology applications.

Publications on the research topic:

1. Romanenko V.V. Development of a gas – laser metal cutting method with subsequent cut surface smoothing. / V.V. Romanenko, O.D. Kaglyak, Ye.V. Yevsyukova // Technical Sciences and Technologies: Scientific Journal / National University "Chernihiv Polytechnic". – Chernihiv: NU "Chernihiv Polytechnic", 2 (36), 2024. – pp. 80–91.

2. Romanenko V.V. Development of gas–laser cutting technology with smoothing of cut surfaces. / V.V. Romanenko, O.D. Kaglyak, Ye.V. Yevsyukova. // Materials of the 24th International Scientific and Technical Conference "Progressive Equipment, Technology, and Engineering Education", Kyiv, May 23 – 26, 2024, pp. 41– 44.

ЗМІСТ

РЕФЕРАТ	4
ABSTRACT	6
ВСТУП	11
1 ШЛЯХИ ВДОСКОНАЛЕННЯ ПРОЦЕСУ ЛАЗЕРНОЇ РІЗКИ МЕТАЛІВ	12
1.1 Основні характеристики лазерного випромінювання як інструмента для різки матеріалів.....	12
1.2 Можливості інтенсифікації процесу лазерної різки металів при використанні струменю рідини	19
2 ТЕХНОЛОГІЧНІ ПОКАЗНИКІВ ЯКОСТІ ПОВЕРХНІ ДЕТАЛЕЙ МАШИН ТА МОЖЛИВОСТІ ЇХ ПІДВИЩЕННЯ.....	31
2.1 Показники якості поверхневого шару деталей машин	31
2.2 Шорсткість та її вплив на експлуатаційні характеристики деталей машин	32
2.3 Параметри фізико-хімічного стану поверхневого шару і їх вплив на експлуатаційні характеристики деталей машин	33
2.4 Залишкові напруження та їх вплив на експлуатаційні характеристики деталей машин	34
2.5 Методи підвищення експлуатаційних характеристик поверхні деталей пластичним деформуванням поверхні (ПДП).....	35
2.6 Вплив на характеристики поверхні деталей обкочування її поверхні деталі	37
2.7 Можливості вплив на характеристики поверхні деталей технології вібродинамічного накочування.....	40
2.8 Можливості пластичного деформування поверхні при центробіжній дробоструменевій обробці.....	40

3	ВДОСКОНАЛЕННЯ ТЕХНОЛОГІЇ ЛАЗЕРНОГО РІЗАННЯ МЕТАЛІВ ПРИ ВИКОРИСТАННІ ЦЕНТРИФУЖНОЇ ВІДЦЕНТРОВОЇ ДРОБОСТРУМЕНЕВОЇ ОБРОБКИ	43
3.1	Характеристики поверхні різів, отриманих лазерним випромінюванням, та можливості їх покращення при застосуванні відцентрової дробоструменевої обробки.....	43
3.2	Методика експериментальних досліджень впливу центробіжної відцентрової дробоструменевої обробки на поверхні після лазерного різання.....	46
3.3	Результати експериментальних досліджень процесу вигладжування поверхні різів після лазерного різання та центрифужної дробоструменевої обробки.....	51
3.3.1	Вплив параметрів дробоструменевої обробки на шорсткість поверхні лазерних різів.....	51
3.3.2	Залежність мікроструктури та мікротвердості від параметрів дробоструменевої обробки поверхні лазерних різів	59
3.3.3	Вплив на залишкові напруження в ЗТВ параметрів дробоструменевої обробки поверхні лазерних різів	63
4	КОМПОНУВАННЯ, РОЗРАХУНОК ТА ПРОЕКТУВАННЯ ЛАЗЕРНОГО ТЕХНОЛОГІЧНОГО ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ РІЗКИ МЕТАЛІВ	67
4.1	Можливості компоновання лазерного технологічного обладнання....	67
4.2	Розрахунок та проектування фокусуючої системи для газолазерної різки металів.....	76
5	МОЖЛИВОСТІ МОДЕРНІЗАЦІЇ ЛАЗЕРНИХ ТЕХНОЛОГІЧНИХ КОМПЛЕКСІВ ДЛЯ РІЗКИ МЕТАЛІВ ПІД КОМБІНОВАНУ ОБРОБКУ	79
5.1	Особливості підбору лазерного технологічного обладнання для різання металів з подальшою обробкою крайок різів.....	79

5.2 Розробка комбінованого способу лазерної різки металів з подальшою центрифужною дробоструменевою обробкою поверхні різів.....	84
ВИСНОВКИ.....	88
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ	90
Додаток А.....	94
Додаток Б	95

ВСТУП

У сучасному виробництві одним із ключових завдань в різних галузях промисловості є активне впровадження технологічних процесів, що мінімізують утворення відходів. Серед пріоритетних напрямів – розробка ефективних та екологічно безпечних способів різання матеріалів, особливо в машинобудуванні та приладобудуванні, де доводиться працювати зі складно-контурними деталями та матеріалами, які важко піддаються обробці різанням.

Лазерне різання матеріалів є однією з інноваційних технологій, що вигідно відрізняється від класичних методів, таких як кисневе, плазмове чи гідроабразивне різання. Цей метод забезпечує підвищену ефективність, дозволяючи створювати вузькі й точні розрізи високої якості. Як результат, мінімізуються втрати матеріалу, а додаткова обробка країв різку мінімізується.

Різання лазерним випромінюванням має багато переваг, серед яких точне регулювання енергетичних параметрів і положення променя, можливість концентрованого фокусування та безконтактний вплив на матеріал. Окрім того, лазерне різання характеризується високою продуктивністю, високою якістю вирізаних деталей і легкістю в автоматизації процесу.

Подальший розвиток цієї технології та вдосконалення обладнання є ключовим фактором для масового впровадження лазерного різання у виробничі процеси. Одним із головних напрямів модернізації цього методу є створення комбінованих технологій, що передбачають використання додаткових операцій як завершального етапу після основного процесу лазерного різання.

Були проаналізовані існуючі методи підвищення експлуатаційних характеристик деталей пластичним деформуванням їх поверхні. Особливі можливості в якості такої додаткової операції дає використання пластичного деформування поверхні при центробіжній дробоструменевій обробці. Тому актуальною проблемою є дослідження питань вдосконалення технології лазерної різки з використання поверхневого пластичного деформування як операції фінішного зміцнення поверхні деталей після лазерного різання.

1 ШЛЯХИ ВДОСКОНАЛЕННЯ ПРОЦЕСУ ЛАЗЕРНОЇ РІЗКИ МЕТАЛІВ

1.1 Основні характеристики лазерного випромінювання як інструмента для різки матеріалів

Лазери являють собою високотехнологічні системи, розробка яких потребує ґрунтовних знань у галузях точної механіки, оптики та електроніки, а також досвіду роботи з вакуумними системами (особливо для газових лазерів). Окрім цього, створення лазерів вимагає застосування технологій вирощування спеціалізованих кристалів і виготовлення напівпровідникових матеріалів. Завдяки своїй складності, лазери скоріше можна порівняти з невеликим виробничим комплексом, ніж зі звичайним оптичним приладом.

Популярність і успіх лазерних технологій базуються на їх численних перевагах у порівнянні з іншими методами виробництва. Вони дозволяють значно знизити витрати та час завдяки таким особливостям, як легкість автоматизації, висока адаптивність, точність, підвищена продуктивність і величезний потенціал для інновацій [1] .

Для досягнення вищих рівнів автоматизації та ефективності на сучасних виробничих лініях необхідні інструменти, які відповідають найвищим вимогам щодо якості, надійності та економічності. Завдяки своїй компактності та універсальності, лазери легко інтегруються у виробничі процеси за допомогою сучасних стандартизованих інтерфейсів. Однією з ключових переваг лазерних систем є їхня безконтактна робота, що практично виключає зношування у процесі використання.

Водночас спостерігається тенденція до спрощення конструкції лазерних систем, підвищення їх мобільності, розробки офісного лазерного обладнання та зниження його вартості.

Світло, як інструмент, демонструє виняткову універсальність не лише у сфері автоматизації: можливість налаштування параметрів обробки дозволяє працювати

з різноманітними матеріалами, незалежно від їхньої товщини чи форми, без значних затримок [2, 3].

Висока технологічна адаптивність забезпечується, наприклад, лазером, який на одній виробничій станції може виконувати різні завдання, такі як різання, зварювання чи маркування навіть індивідуальних виробів після простої зміни програми.

Окрім цього, лазери відповідають підвищеним вимогам, що обумовлені сучасними тенденціями, такими як мініатюризація, індивідуалізація, підвищення якості та автоматизація. Завдяки їхній надзвичайно високій точності стає можливим створення ультра-малих компонентів із мінімальним тепловим впливом і максимальною точністю відтворення. Чим менші розміри деталі, тим більше лазер демонструє свої переваги [5].

Лазерні установки виготовляють численні провідні компанії з різних країн світу, таких як США, Німеччина, Японія, Китай і Україна. Ціна лазерного обладнання залежить від його потужності, типу активного елемента та інших характеристик.

Середня вартість лазера низької потужності (100–200 Вт) варіюється в межах від 1,5 до 5000 тисяч доларів. При цьому годинна вартість роботи (зокрема, різання) становить від 2 до 10 доларів.

За даними журналу Laser Focus World, обсяг світового ринку лазерів оцінюється приблизно в 8 мільярдів доларів США. Понад 60% цього ринку припадає на діодні лазери, а решта розподіляється між іншими типами лазерних систем.

Сучасні технології активно впроваджують лазерне різання, що використовує енергію лазерного променя для локального нагрівання і руйнування матеріалу по заданій траєкторії. Відмінністю лазерного випромінювання від звичайного світла є його унікальні властивості: висока направленість, монохроматичність і когерентність [6].

Завдяки винятковій направленості лазерний промінь здатний концентрувати енергію на мінімальній площі, оскільки його направленість у тисячі разів перевищує показники традиційних джерел світла.

Монохроматичність лазерного променя, тобто наявність фіксованої довжини хвилі й частоти, дозволяє ефективно фокусувати його за допомогою стандартних оптичних лінз.

Ще однією важливою характеристикою лазера є його висока когерентність — злагодженість хвильових процесів у просторі та часі. Це створює резонанс, що значно підвищує потужність випромінювання.

Завдяки цим особливостям лазерний промінь можна зосередити на дуже невеликій ділянці матеріалу, забезпечуючи високу щільність енергії, достатню для нагрівання й руйнування. Наприклад, у зоні фокусування щільність потужності лазера може досягати 10^8 Вт/см², що дає змогу обробляти практично будь-який метал.

Візуальний приклад лазерного різання металу та поверхні різі представлений на рис. 1.1.



Рисунок 1.1 – Процес лазерного різання

У процесі лазерного різання відбувається складна взаємодія між лазерним випромінюванням і металом, яка охоплює кілька ключових аспектів: відбивання та поглинання світла, перетворення його енергії в теплову, а також передачу

поглиненої енергії через теплопровідність. Властивості матеріалу, що обробляється, також значно впливають на процес.

При потраплянні лазерного променя на метал поверхня нагрівається до температури плавлення, що є першою критичною температурою руйнування. У цей момент метал починає плавитися, і зона розплаву поступово поглиблюється. Лазерне випромінювання продовжує подавати енергію, збільшуючи температуру, доки не досягне другої критичної точки – температури кипіння, при якій метал починає активно випаровуватися.

Для лазерного різання можуть бути реалізовані два основні механізми: плавлення та випаровування. Однак через високі енерговитрати механізм випаровування застосовується здебільшого для обробки дуже тонких металів. У практичних умовах основним методом є різання шляхом плавлення.

Для підвищення ефективності процесу, збільшення швидкості різання та можливості роботи з більш товстими металами використовується допоміжний газ. Він подається в зону різання для видалення залишків розплаву або продуктів випаровування. Зазвичай використовуються кисень, повітря або азот, що забезпечує різання з оптимальними результатами. Такий метод обробки називається газолазерним різанням, приклад якого показаний на рис. 1.2.

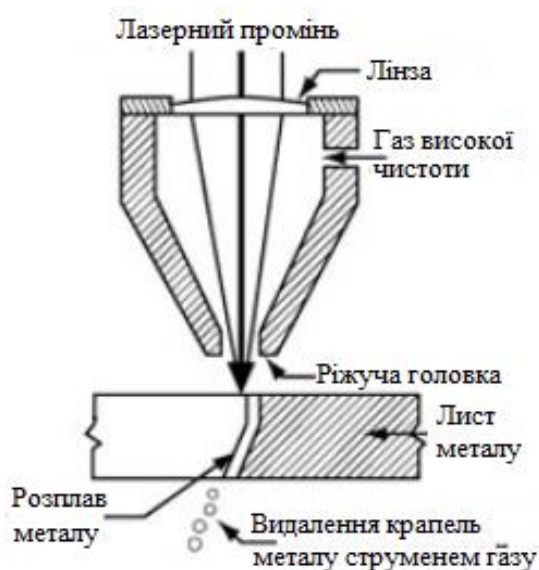


Рисунок 1.2 – Схема газолазерного різання

У газолазерному різанні кисень виконує потрібну функцію:

а) окислення, коли кисень сприяє попередньому окисленню металу, зменшуючи його здатність відбивати лазерне випромінювання. Це дозволяє краще поглинати лазерну енергію металом, покращуючи процес різання;

б) займання та виділення тепла. При цьому метал, який ріжеться, запалюється та горить у струмені кисню, утворюючи додаткове тепло. Це виділення тепла ще більше підсилює ефект лазерного випромінювання, сприяючи швидшому та ефективнішому різанню.

в) видалення матеріалу струменем кисню та винесення розплавленого металу і побічних продуктів згоряння із зони різання. Цей одночасний з дією лазерного випромінювання потік газу допомагає очистити зону різання, запобігаючи накопиченню продуктів руйнування, забезпечуючи більш стабільне різання.

Однак лазерне різання не завжди підходить для матеріалів, таких як текстоліт, скловолокно, гетинакс, пористий поліпропілен, полікарбонат, кераміка або скло. Ці матеріали характеризуються складністю обробки лазером через їхні фізико-хімічні властивості.

При роботі з листовим металом лазерні верстати забезпечують високу точність різання з мінімальними витратами часу на налаштування. Сучасні системи управління та програмування дозволяють швидко виготовляти деталі за заданими кресленнями. Крім того, процес відзначається гнучкістю в оптимізації послідовності операцій, що сприяє швидшому вирішенню питань, пов'язаних із міжопераційною логістикою.

Система лазера включає низку дзеркал для корекції викривлень та формування строго контрольованого хвильового фронту. Центральним елементом є велике параболічне дзеркало, яке фокусує лазерний промінь із діаметром 28 см (11 дюймів) у точку розміром лише 1,1 мікрометра – це приблизно в 50 разів менше, ніж товщина людського волосся. Для відображення та вимірювання відбитого лазерного випромінювання використовується камера та датчик хвильового фронту. За інтенсивністю це випромінювання можна порівняти з фокусуванням усього сонячного світла, що досягає Землі, у точку розміром 10 мікрометрів (рис. 1.3) [7].

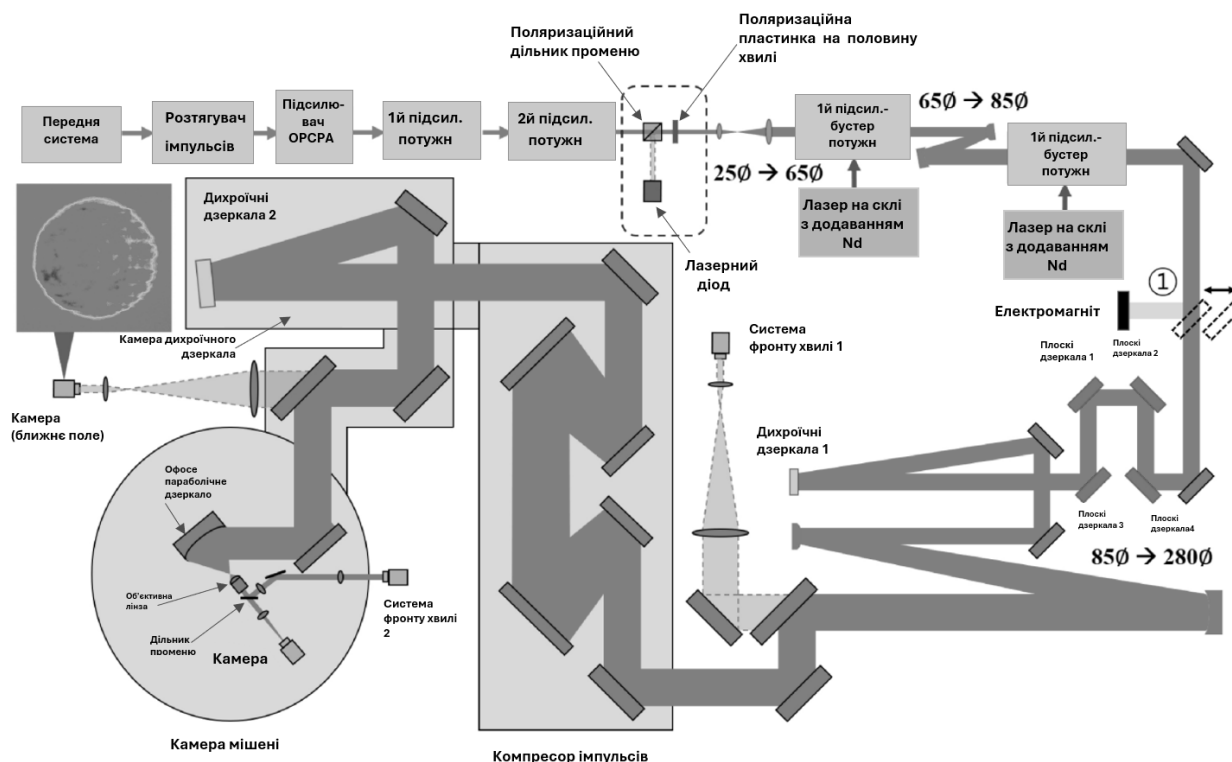


Рисунок 1.3 – Схема оптичної системи для посилення потужності при фокусуванні лазерного променя [7]

Цей надпотужний лазер відкриває нові можливості для вивчення астрофізичних явищ і практичних застосувань у медицині та фізиці. Наприклад, у галузі квантової електродинаміки сильного поля, яка, донедавна, була переважно теоретичною, лазер дозволить проводити експериментальні дослідження. Крім того, лазер має потенціал для використання в онкології, зокрема в променевій терапії раку. Сучасні методи лікування потребують радіаційних екранів, тоді як застосування лазерів може значно знизити шкоду для пацієнтів і зменшити вартість медичних апаратів.

Високоінтенсивний лазер також допоможе глибше зрозуміти астрофізичні процеси й сприятиме розробці нових технологій лікування раку. Зокрема, він може бути використаний для створення систем, що базуються на протонах високої енергії, які забезпечують точніший і менш шкідливий підхід до терапії [8].

У листопаді 2016 року ізраїльські науковці представили інноваційний метод генерування лазерного випромінювання, який базується на взаємодії світла з краплею води. Традиційний спосіб отримання лазера полягає у "накачуванні"

енергії робочого тіла та його подальшому опроміненні фотонами, які спричиняють вимушене випромінювання. Однак підхід, розроблений Леопольдом Мартіном з ізраїльського технологічного інституту Техніон та його командою, суттєво відрізняється.

У цій системі "робочим тілом" слугує невелика крапля води з додаванням октану. Поверхня краплі здійснює мікроскопічні коливання з частотою у тисячі разів за секунду. Хоча ці коливання значно повільніші за частоту електромагнітного випромінювання, науковці використали світловод для направлення світла до краплі. Параметри світлової хвилі були налаштовані так, щоб вона багаторазово циркулювала навколо краплі, що призводило до резонансної взаємодії зі структурними коливаннями краплі. У результаті накопичена енергія вивільнялася у вигляді вимушеного випромінювання, створюючи лазерний ефект.

Цей процес можна порівняти з багаторазовим відлунням у вузькій ущелині. Для забезпечення оптимального руху світла рідина в краплі повинна бути надзвичайно чистою і текучою. Попри те, що цей підхід наразі поступається сучасним напівпровідниковим лазерам за зручністю, надійністю та простотою, його потенційні можливості є значними.

У перспективі метод може мати безліч практичних застосувань. Завдяки тому, що вода легко змінює форму, контроль за розмірами та конфігурацією краплі дозволить створювати лазери зі змінними параметрами випромінювання, що можна буде швидко адаптувати під конкретні потреби досліджень чи технологій [9].

Таким чином, проаналізувавши літературні джерела щодо розвитку лазерних технологій, можна зробити висновок про їх стрімкий прогрес. Лазери є складними пристроями, створення яких вимагає спеціалізованих знань. Через широкий спектр відмінностей лазери класифікують за спільними характеристиками. Актуальність досліджень у цій галузі підтверджується тим, що досягнення у сфері лазерних технологій неодноразово були відзначені Нобелівською премією, що свідчить про важливість цього напрямку науки.

Використання лазерного випромінювання слугує базою для створення новітніх технологій та техніки, які виходять за межі класичних підходів із

використанням дзеркал. Наприклад, сучасні дослідження демонструють можливості застосування хвильових коливань водних крапель для генерування лазерного випромінювання.

1.2 Можливості інтенсифікації процесу лазерної різки металів при використанні струменю рідини

Одним із перспективних методів є лазерно-струминна обробка, яка відносно нова, але має великий потенціал. Цей метод дозволяє обробляти широкий спектр матеріалів, включаючи важкооброблювані, забезпечуючи високу якість поверхонь.

Ідея поєднання світлового потоку зі струменем рідини має давнє коріння. Ще у 1841 році на виставці в Парижі був продемонстрований "світловий фонтан", який довів можливість передачі світлового променя через потік рідини, що наближався до ламінарного. Тоді було показано, як світловий промінь повторює траєкторію потоку рідини, що відкриває нові перспективи для сучасних технологій, зокрема в лазерній обробці.

Фахівці швейцарської компанії Synova Laboratories Ltd успішно реалізували концепцію підведення потужного світлового потоку до зони різання за допомогою рідинного струменя. Цей підхід дозволив виконувати локальне нагрівання поверхні твердих матеріалів, що стало основою для розробки першої технології лазерно-струминної обробки.

Сутність методу полягає в тому, що лазерний промінь фокусується та вводиться в сформований струмінь рідини малого діаметру (приблизно 0,1 мм) через прозоре вікно струминної головки. Струмінь рідини, що подається під тиском до 1,5 МПа, забезпечує не лише транспортування лазерного випромінювання, але й охолодження та очищення зони різання (рис. 1.4) [10].

Ця технологія поєднує високу енергоефективність лазерного випромінювання з точністю та додатковими перевагами, які забезпечує рідина, роблячи процес універсальним і високопродуктивним.

Геометрія водяної камери та насадки була розроблена таким чином, щоб забезпечити точне сполучення лазерного променя зі струменем води та формування ефективного водно-променевого потоку. Струмінь води, виходячи з насадки, спрямовує лазерний промінь до межі «рідина-повітря». Завдяки багаторазовому відбиттю в межах цього середовища, лазерний промінь досягає зони контакту води з оброблюваною поверхнею.

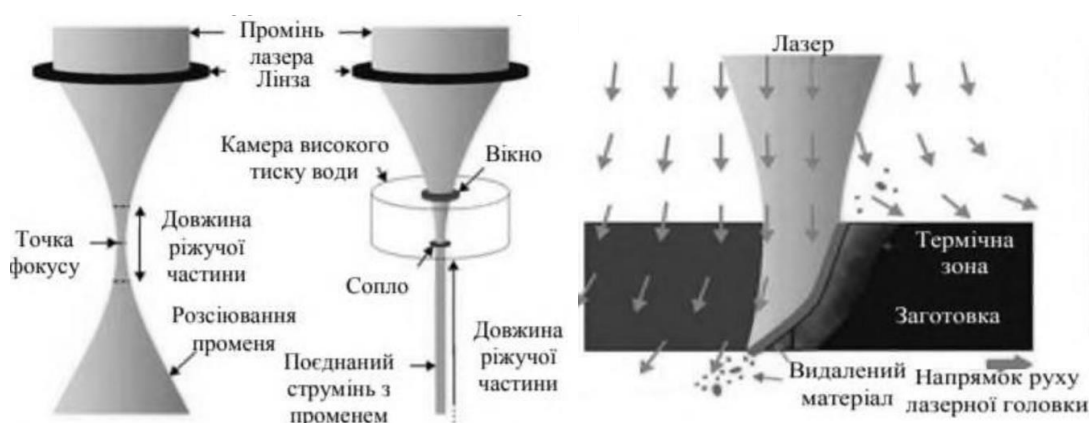


Рисунок 1.4 – Схема вводу лазерного променя в струмінь рідини при його фокусуванні [10]

Цей ефект схожий на принцип роботи скловолокна, де світловий промінь передається за рахунок відбиття. У цьому випадку струмінь води можна розглядати як хвилевід змінної довжини, через який лазерний промінь проходить із мінімальними втратами енергії.

Активне нагрівання оброблюваного матеріалу відбувається виключно в точці контакту. Коли лазерний промінь потрапляє на матеріал, який поглинає випромінювання, температура поверхні підвищується настільки, що виникає плазма. Струмінь рідини забезпечує локалізацію процесу, відокремлюючи матеріал і захищаючи оточуючу зону від перегріву. Плазма, що утворюється, екранує воду, але лазерний промінь проходить через цей екран, концентруючи видалення матеріалу у невеликому об'ємі та забезпечуючи високу швидкість обробки.

При використанні імпульсного лазера з'являються моменти, коли випромінювання не генерується. У цей час струмінь води виконує функцію

охолодження зони різання, що сприяє мінімізації теплового впливу на матеріал та формуванню дуже малої глибини теплового проникнення. Завдяки можливості регулювання тривалості імпульсів і параметрів подачі рідини, можна досягти високої якості обробки крайок і точно контролювати інтенсивність видалення матеріалу.

Ефективна довжина активної частини струменя, де лазерний промінь здатний виконувати обробку, залежить від режимів витікання рідини. Ці режими визначаються взаємодією кількох сил: інерційної сили рідини, сил поверхневого натягу та аеродинамічних сил.

На рис. 1.5 зміну довжини розпаду струменя радіусом 190 мкм, що рухався зі швидкістю 325 м/с. Дослідження підтвердили межі коливань і встановили, що довжина розпаду струменя відповідає поняттю ядра струменя, яке традиційно використовується у вітчизняній практиці [10, 11].

Такий підхід дозволяє оптимізувати параметри лазерно-струминної обробки, забезпечуючи точність і стабільність процесу при мінімальних теплових впливах.

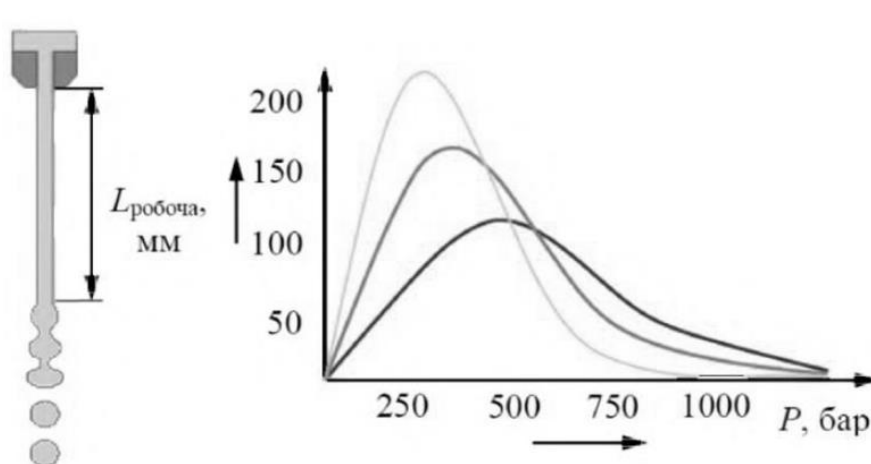


Рисунок 1.5 – Криві розпаду струменю у залежності від отвору сопла [10, 11]

Фізико-хімічні та металургійні процеси, що відбуваються під час наплавлення під водою, проходять у складних і екстремальних умовах, які значно ускладнюють вирішення технологічних завдань. Зміна цих умов суттєво впливає на структуру та механічні властивості наплавленого шару. Процес наплавлення

супроводжується інтенсивними термодеоформаційними впливами на метал, що позначається на його характеристиках.

Водночас у металі відбуваються процеси високо та низькотемпературної пластичної деформації, а також виникає значна хімічна неоднорідність. Ці фактори значною мірою впливають на формування та перерозподіл дефектів кристалічної будови як у зоні шва, так і в зоні термічного впливу.

Розуміння цих явищ є ключовим для оптимізації технології наплавлення та забезпечення високої якості отриманих з'єднань.

Для вирішення зазначеної проблеми перспективним є застосування зовнішнього електромагнітного впливу, ефективність якого була підтверджена попередніми дослідженнями як у процесі наплавлення на повітрі, так і під водою. Застосування такого впливу змінює дислокаційну структуру металу в зварному з'єднанні шляхом перерозподілу дислокацій. Це сприяє диспергуванню структури та загальному зниженню густини дислокацій у структурних складових металу. У результаті знижується рівень локальних внутрішніх напружень і підвищується тріщиностійкість матеріалу.

Керування рухом рідкого металу досягається шляхом вибору оптимальних параметрів зовнішнього електромагнітного впливу. Це дозволяє змінювати умови динамічної рівноваги та впливати на процес формування шва, забезпечуючи його якість.

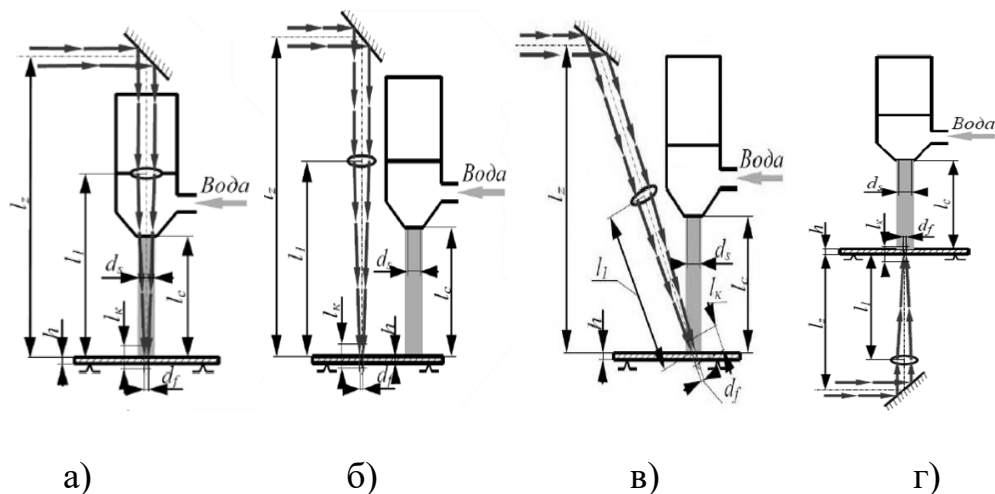
Однак експериментальне вивчення всіх можливих комбінацій технологічних режимів у водному середовищі є складним і трудомістким завданням. Для його вирішення доцільно використовувати математичне моделювання. Розроблені математичні моделі, що враховують вплив зовнішнього електромагнітного поля на рідкий метал під час підводного наплавлення, дозволяють ефективно оцінювати первинні фактори та їхній вплив на процес. Це значно полегшує оптимізацію технологічних параметрів і підвищує ефективність процесу.

Основною розрахунковою характеристикою обладнання, що розробляється для підводного наплавлення, є електродинамічні зусилля. Ці зусилля формуються

під впливом електромагнітного поля та враховують специфіку взаємодії з водним середовищем, а також фізичні процеси, що відбуваються під час наплавлення.

Урахування електродинамічних зусиль є важливим для забезпечення стабільності процесу, контролю руху рідкого металу та формування якісного шва. Розуміння цих характеристик дозволяє оптимізувати параметри роботи обладнання, враховуючи вплив водного середовища на кінетику металургійних процесів.

Існує кілька варіантів введення лазерного променя у швидкоплинний потік рідини, які відрізняються технічними підходами та конструктивними особливостями (рис. 1.6) [10].



а – схема коаксіального введення; б – схема паралельного впливу;
в – схема кутове введення; г – схема побічного впливу

Рисунок 1.6 – Способи введення лазерного променя в швидкоплинний потік рідини [10]

Схеми введення лазерного променя в швидкоплинний потік рідини дозволяють адаптувати процес обробки для різних матеріалів і технологічних умов. Коаксіальна схема використовується в багатьох промислових галузях завдяки можливості точного формування різку за допомогою кільцевих сопел, хоча для її реалізації потрібні високі тиски рідини. Паралельне введення підходить для роботи з квазікрихкими матеріалами, такими як скло чи кераміка, де термонапруження, що

утворюються під впливом лазера, забезпечують розколювання матеріалу по заданій траєкторії. Кутове введення забезпечує більшу гнучкість у налаштуванні процесу, дозволяючи змінювати кут падіння променя та його позицію відносно рідинного потоку, проте воно супроводжується втратами енергії через розсіювання. Побічна схема найскладніша в реалізації, але дозволяє виконувати точну обробку тонких матеріалів.

Під час струменево-лазерного різання на поверхню матеріалу одночасно впливають висока температура від лазерного променя і ударне навантаження від потоку рідини. Така взаємодія створює унікальні термо-гідродинамічні умови, що сприяють ефективному різанню та формуванню якісної обробленої поверхні. Проте ці процеси потребують ретельного контролю, щоб уникнути пошкоджень матеріалу від надмірного навантаження.

Лазерний промінь, потрапляючи на поверхню матеріалу, створює локальний нагрів у зоні опромінення протягом певного часу. Кількість енергії, яка поглинається матеріалом, можна визначити за допомогою математичної моделі розподілу густини енергії [11]. Це описується формулою:

$$q(x) = q_0 \exp\left(-\frac{x^2}{r^2}\right), \quad (1.1)$$

де q_0 – густина потужності випромінювання в центрі зони фокусування, яка залежить від параметрів лазера;

r – радіус лазерного променя, враховуючи розподіл густини випромінювання за законом Гауса;

x – радіальна відстань від центру джерела теплоти, яка визначає віддаленість точки від осі фокусування.

Ця формула дозволяє оцінити, як інтенсивність нагрівання зменшується з віддаленням від центру зони фокусування. Завдяки такій моделі можна прогнозувати тепловий вплив лазера на матеріал і оптимізувати параметри технологічного процесу для забезпечення якісної обробки.

Розподіл тепла на поглинаючій поверхні матеріалу під впливом лазерного випромінювання можна описати рівнянням теплопровідності, яке враховує основні фізичні параметри процесу:

$$T(x, z, t) = \frac{q(x)rx^2}{\lambda} \left(\frac{a}{\pi}\right)^{1/2} \int_0^t \frac{P(t-\tau) \exp\left[\frac{z^2}{4a\tau} - \frac{x^2}{4a\tau}\right]}{\sqrt{\tau}(4a\tau+r^2)} d\tau, \quad (1.2)$$

де λ – коефіцієнт теплопровідності;

a – температуропровідність матеріалу заготовки;

t – час впливу;

x, z – координати;

P – потужність лазерного випромінювання.

Температура на поверхні на півбезмежного тіла в точці за умови переміщення лазерного променя вздовж поверхні з швидкістю v , визначається як:

$$\bar{T} = \frac{16}{\sqrt{\pi}} \int_0^\infty \frac{1}{\sqrt{(c'^2+\tau^2)(b'^2+\bar{\tau}^2)}} \exp\left[-\frac{(2\bar{x}'^2+\bar{v}'\tau)^2}{4(\bar{c}'^2+\bar{\tau}^2)} - \frac{\bar{y}^2}{b^2+\bar{t}^2} - \frac{\bar{z}^2}{\bar{t}^2}\right] d\tau, \quad (1.3)$$

де $\bar{T} = \frac{16\sqrt{\pi K r T}}{P A_0}$; $\bar{v} = \frac{v_r}{2a}$; $\bar{x}' = \frac{x}{r}$; $\bar{y}' = \frac{y}{r}$; $\bar{z}' = \frac{z}{r}$; $\bar{c}' = \frac{c}{r}$; $\bar{b}' = \frac{b}{r}$; $r^2 = cb$;

A_0 – відбивна здатність матеріалу;

P – потужність лазерного випромінювання;

b, c – параметри розподілу густини потужності лазерного випромінювання (за законом Гауса).

Аналізуючи наведене рівняння теплопровідності, можна зробити висновок, що зона термічної деструкції матеріалу на оброблюваній поверхні може бути значною залежно від параметрів процесу.

Для визначення температурного поля при охолодженні заготовки потоком рідини можна скористатися наступним рівнянням:

$$T(x, y, z, t) = \frac{P}{\pi \frac{1}{2} \rho c} \int_0^t \frac{e^{\frac{(x-v(t-z))^2}{4\alpha\tau+A^2} - \frac{y^2}{4\alpha\tau+B^2}}}{[(4\alpha\tau+A^2)(4\alpha\tau+B^2)\alpha\tau]^{1/2}}, \quad (1.4)$$

де x, y, z – координати;

t – час;

η – коефіцієнт тепловіддачі з поверхні заготовки;

α – коефіцієнт теплопровідності;

A – велика пів вісь струминно – лазерного потоку

B – мала пів вісь струминно – лазерного потоку;

$P = \pi q AB$ – потужність лазерного випромінювача.

Потік рідини виконує важливу роль у процесі лазерної обробки, оскільки не лише змінює розподіл випромінювання на поверхні матеріалу через відбиття лазерного променя від оболонки ламінарного потоку, але й активно охолоджує оброблювану поверхню. Це охолодження відбувається завдяки ефективному відведенню теплоти з зони лазерного впливу.

Як наслідок, тепла енергія, що потрапляє на матеріал, локалізується, і поширення деструктивної термічної зони обмежується. Такий підхід дозволяє зменшити ризик структурних пошкоджень і небажаних деформацій матеріалу, забезпечуючи високу точність і якість обробки. Здатність рідини підтримувати стабільний температурний режим особливо важлива для роботи з чутливими матеріалами або при обробці деталей із високими вимогами до геометрії.

Вплив потоку рідини враховується при наступних граничних умовах:

$$c\rho \frac{dT}{dt} - \lambda \Delta T = \frac{(T - R_0)kP}{\pi AB} \exp \times \left[-2 \left(\frac{(x - vt)^2}{a^2} + \left(\frac{y}{b} \right)^2 \right) \right] \times \exp(-kz),$$

$$\lambda \frac{dT}{dz} \Big|_{z=0} = \alpha(T)(T - T_p). \quad (1.5)$$

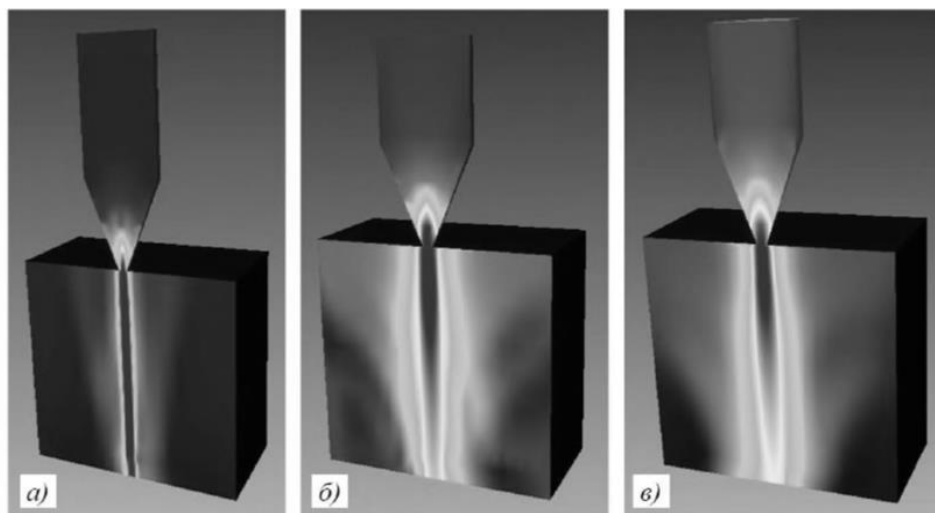
Під час струминно-лазерної обробки руйнування матеріалу здійснюється під впливом циклічного термічного навантаження. Цей процес починається з утворення ванни розплаву, яка далі піддається дії гідродинамічного удару рідинного потоку. Цей удар спричиняє змикання ванни, відведення продуктів руйнування та очищення зони різання.

Розрахунки показали, що інтенсивне охолодження рідинним потоком сприяє зменшенню розповсюдження тепла в матеріалі, локалізуючи його ближче до центру впливу лазера. Унаслідок цього руйнування матеріалу відбувається у вузькій зоні, яка відповідає площі термічного впливу розміром $\leq 0,1 - 0,15$ мм.

Однак рідинний потік створює нерівномірне охолодження, оскільки, натікаючи на перепону (оброблювану поверхню), він починає розтікатися. Це може спричинити певну варіативність температурних градієнтів у зоні обробки, що потребує врахування для оптимізації параметрів процесу. Локалізація тепла і його швидке відведення забезпечують високоточне різання та мінімальний тепловий вплив на навколишній матеріал.

З описаного вище можна зробити висновок, що форма зони нагріву та умови охолодження під час струминно-лазерної обробки значною мірою залежать від динаміки потоку рідини у струмені. Зміна швидкості або напрямку потоку призводить до втрат енергії лазерного променя та до змін його форми і розподілу на поверхні оброблюваного матеріалу. Форма отвору насадки і відстань від торця насадки до оброблюваної площини суттєво впливають на поведінку рідинного потоку. Результати моделювання потоку рідини, виконані в середовищі Flow Vision, показують, що розсіювання потоку рідини може значно відрізнятись від початкової форми отвору сопла (рис.1.7). Це підкреслює важливість оптимізації геометрії насадки та налаштувань процесу для забезпечення стабільності струменя й ефективності обробки [10].

З рисунку видно, що форма потоку на виході суттєво змінюється залежно від параметрів насадки, що слід враховувати при розробці та налаштуванні технологічного обладнання. Подібні аналізи допомагають мінімізувати втрати потужності лазерного променя та покращити точність процесу обробки.



а – круглий отвір; б – квадратний отвір; в – еліптичний отвір

Рисунок 1.7 – Результати моделювання потоку в середовищі Flow Vision.
при витікання рідини з насадки через отвори різної форми [10]

Зони контакту потоку рідини з перешкодою (оброблюваною поверхнею) змінюються залежно від відстані між соплом і контактуючою площиною, а також від форми перетину сопла. Зі збільшенням відстані від сопла зона контакту стає більшою та змінює свою форму. Це явище може призводити до зниження інтенсивності лазерного випромінювання на поверхні матеріалу. У результаті ерозія матеріалу може не відбуватись, що негативно позначається на ефективності обробки.

Результати досліджень свідчать, що оптимальним способом введення лазерного променя в потік рідини є коаксіальне введення. Цей метод є добре вивченим і має широке промислове застосування в різних галузях. Він забезпечує стабільність процесу та високу якість обробки. Зокрема, використання коаксіального введення дозволяє досягти шорсткості крайки зрізу з показниками $R_a = 0,8 - 1,2$ мкм, що є оптимальним для багатьох технологічних операцій.

При використанні лазерно-струминної технології найбільш стабільний потік рідини забезпечується круглим перетином вихідного отвору сопла. Ця особливість відіграє важливу роль у забезпеченні якості обробки та точності керування процесом.

Лазерно-струминна обробка має низку переваг:

- а) кероване термо-гідродинамічне навантаження не лише спричиняє формозміну оброблюваної ділянки через механізми руйнування, а й забезпечує модифікацію структури поверхневого шару, створюючи нові властивості матеріалу;
- б) локалізує вплив на зону обробки точно обмеженими малими об'ємами, що дозволяє уникнути небажаних змін у сусідніх ділянках;
- в) високоенергетичний потік сприяє інтенсивному руйнуванню оброблюваного матеріалу без поширення деструкції за межі зони впливу;
- г) технологія придатна для виконання різних операцій – від різання та прошивання отворів до полірування поверхонь важкооброблюваних матеріалів, одночасно змінюючи структуру і фазовий стан поверхневого шару.

Однак при використанні направленої струменя води для лазерного наплавлення покриттів процес стає значно складнішим. Це ускладнює виробничу технологію і підвищує вартість обробки, що може обмежувати застосування таких методів у відновленні та зміцненні деталей, зокрема ріжучих інструментів і металообробного обладнання. У таких випадках необхідно оцінювати співвідношення між технічними перевагами і виробничими витратами, щоб визначити доцільність використання методу.

Таким чином, проведений аналіз літературних робіт по розгляду основних характеристики лазерного випромінювання як інструмента для різки матеріалів та можливості інтенсифікації процесу лазерної різки металів при використанні струменю рідини дав можливість сформулювати наступні задачі, що постають перед нами:

- а) Проаналізувати технологічні методи підвищення експлуатаційних показників поверхні деталей, що застосовуються в різних галузях машинобудування.
- б) Розробити та всебічно дослідити вдосконалення процесу різки металів з використанням подальшого вигладжування крайок лазерних різів методом центрифужної дробоструминної обробки.

в) Проаналізувати компоновку та складові сучасного лазерного обладнання та на основі такого аналізу створити нові способи комбінованої технології лазерної різки металів з подальшим холодним вигладжуванням поверхні лазерних різів з використанням центрифужної дробоструминної обробки.

2 ТЕХНОЛОГІЧНІ ПОКАЗНИКІВ ЯКОСТІ ПОВЕРХНІ ДЕТАЛЕЙ МАШИН ТА МОЖЛИВОСТІ ЇХ ПІДВИЩЕННЯ

2.1 Показники якості поверхневого шару деталей машин

Поверхневий шар – це частина деталі, яка контактує з навколишнім середовищем або іншими тілами і піддається впливу технологічної обробки. При ідеальній структурі металу кожен атом всередині взаємодіє з сусідніми атомами, перебуваючи в стані стійкої рівноваги. Атоми на поверхні мають зв'язки лише з сусідніми та нижчими атомами, перебувають у стані нестійкої рівноваги та мають запас вільної енергії. Товщина цього активного шару становить 1 – 2 ряди атомів товщиною приблизно 10^{-9} – 10^{-10} м. Поверхнева енергія розподіляється на кінетичну (через зміну режимів коливань атомів) та потенційну (через викривлення нормальної будови решітки).

Через підвищену активність поверхня твердого тіла притягує з навколишнього середовища жири, пари та газу. Процес такого притягування елементів без утворення хімічних сполук називається адсорбцією. Адсорбція знижує поверхневий натяг і енергію поверхневих атомів, що полегшує розвиток деформації поверхневого шару.

Структура поверхневого шару деталей машин зазвичай виглядає так: газу, пари, жири або солі, оксиди, деформована частина металу, основний метал. У випадку абсорбції в сталевих деталях від поверхні вглиб розташовуються оксиди: Fe_2O_3 , Fe_3O_4 , FeO .

Результати експлуатації та досліджень деталей машин показують, що їх руйнування починається з поверхневого шару. Тому основним завданням технології є створення поверхневого шару з певними фізико-механічними властивостями та мікрогеометрією, що ускладнюють розвиток руйнувань, а також вибір технологічних методів, що забезпечують створення поверхневого шару з такими властивостями. Якість поверхневого шару деталей машин оцінюється за такими основними показниками: шорсткість, фізик-хімічний стан та напружений стан поверхневого шару [12, 13].

2.2 Шорсткість та її вплив на експлуатаційні характеристики деталей машин

Ідеально гладка поверхня не може бути досягнута жодним методом обробки. Усі поверхні фізичних тіл мають певні недоліки, ступінь яких залежить від масштабу розгляду.

Існують такі види відхилень від геометрично правильної поверхні:

- а) макрогеометричні відхилення:
 - 1) конусність, овальність, вигнутість ($L/H > 1000$, де L – крок нерівностей, H – висота нерівностей);
 - 2) хвилястість ($L/H = 50\text{--}1000$);
- б) мікрогеометричні відхилення ($1 < L/H < 50$). Вони розглядаються на малих ділянках з довжиною квадрата до 1 мм. Мікрогеометрію поверхні називають шорсткістю;
- в) субмікрогеометричні відхилення ($L/H < 1$). Розглядаються на ділянках поверхні, розміри яких співмірні з міжатомними відстанями.

Шорсткість – це сукупність нерівностей з відносно малими кроками, які формують рельєф поверхні. Поперечна шорсткість (відносно прикладеного навантаження) найбільше впливає на міцність деталей машин. Шорсткість є результатом сліду різального інструменту, зміненого внаслідок пластичної та пружної деформації, а також вібрації технологічної системи.

Основні параметри шорсткості:

- а) Ra – середнє арифметичне відхилення профілю;
- б) Rz – висота нерівностей профілю за десятьма точками;
- в) $R_{\max}$ – максимальна висота профілю;
- г) S_m – середній крок нерівностей;
- д) t_p – відносна опорна довжина профілю на рівні p ;
- е) ρ – радіус вершин;
- ж) ρ' – радіус западин.

На формування шорсткості під час механічної обробки впливають усі режими обробки, матеріал заготовки та інструменту, геометрія інструменту, а також жорсткість технологічної системи.

2.3 Параметри фізико-хімічного стану поверхневого шару і їх вплив на експлуатаційні характеристики деталей машин

Для оцінки фізико-хімічного стану після механічної обробки використовують такі параметри:

а) пластична деформація:

$$\varepsilon = \frac{l-l_0}{l_0} \times 100\%,$$

де l_0 – початкові розміри поверхневого шару,

l – кінцеві розміри.

б) деформаційне зміцнення поверхневого шару:

- 1) ступінь наклепу;
- 2) глибина деформованого шару h_H ;
- 3) градієнт наклепу.

в) параметри структурно-фазового стану:

- 1) фазові характеристики;
- 2) структурні характеристики.

г) хімічний склад поверхневого шару, що визначає профіль концентрації елементів по товщині і вміст елементів у кожній з фаз.

Різне зниження втомної міцності при збільшенні ступеня деформації до 2 – 4% пояснюється утворенням дислокацій та їх вільним переміщенням до поверхні деталі. Подальше підвищення втомних характеристик зі збільшенням ступеня деформації пов'язане з взаємодією дислокацій між собою і неможливістю їх вільного переміщення у поверхневому шарі. Перевищення критичної ступеня деформації призводить до руйнування поверхневого шару навіть при незначних навантаженнях. З підвищенням температури ефект від деформаційного зміцнення знижується, а при температурах $T = 700 - 1000^\circ$ стає негативним фактором.

Збільшення деформаційного зміцнення підвищує зносостійкість до певної межі. Оскільки при терті формується оптимальна мікротвердість, характерна для цих умов експлуатації, необхідно отримувати шар з мікротвердістю, близькою до оптимальної. Це зменшує період припрацювання та нормальний знос поверхні.

Корозійна стійкість знижується зі збільшенням ступеня деформації та наклепу, що пояснюється формуванням дрібнозернистої структури та великою кількістю дислокацій на поверхні (корозія починається переважно по межах блоків та зерен, а також у місцях виходу дислокацій на поверхню).

Фазовий склад значно впливає на втомні характеристики. Найбільш втомно міцним є мартенсит, далі йдуть аустеніт, троостит, сорбіт. Вплив структури або фазового складу на зносостійкість зворотний до їх впливу на втомну міцність.

Хімічний склад поверхневого шару значно впливає на всі види руйнувань. Легування металів деталей, насичення поверхневого шару необхідними елементами або нанесення потрібних покриттів дозволяє протистояти майже всім видам руйнувань.

2.4 Залишкові напруження та їх вплив на експлуатаційні характеристики деталей машин

Залишковими називають напруження, які утворюються в матеріалі без впливу зовнішніх навантажень, врівноважуючись всередині самого тіла.

Залежно від протяжності силового поля, залишкові напруження діляться на:

а) залишкові напруження 1-го роду (макронапруження) – охоплюють об'єми, співмірні з розмірами деталі, і мають орієнтований напрямок. Стиснення є негативними, розтягування – позитивними;

б) залишкові напруження 2-го роду (мікронапруження) – розповсюджуються в межах зерен і блоків, не маючи визначеного напрямку;

в) залишкові напруження 3-го роду (субмікронапруження) – діють на об'єми, розміри яких співмірні з міжатомними відстанями, і також не мають визначеного напрямку.

Для виникнення залишкових напружень необхідний такий вплив на тверде тіло, який спричиняє нерівномірні пластичні деформації, що залишають напруження. Важливу роль в експлуатації відіграють макронапруження, які виникають в деталях через вплив різних технологічних процесів під час їх виготовлення. Залишкові напруження можуть з'являтися внаслідок:

- а) неоднорідної пластичної деформації при обробці заготовок, наприклад: волочінням, прокаткою, ковкою, холодним випрямленням, різанням, поверхневим пластичним деформуванням, нерівномірним нагріванням та охолодженням;
- б) неоднорідної зміни об'єму під час фазових перетворень, таких як, гартування та старіння в твердому стані, нерівномірні фазові переходи з рідкого в тверде стан та навпаки, електричне осадження металів, усадка в ході рекристалізації, перехід з газоподібного в тверде стан та навпаки (газова цементация, азотування, ціанування).

При механічній обробці залишкові напруження формуються під впливом двох факторів: механічного і теплового. Механічний фактор сприяє утворенню напружень стиснення, тоді як тепловий – напружень розтягування.

Напруження стиснення збільшують втому міцність матеріалу, а напруження розтягування – зменшують.

2.5 Методи підвищення експлуатаційних характеристик поверхні деталей пластичним деформуванням поверхні (ПДП)

ПДП є одним з найефективніших і найпростіших методів підвищення якості поверхневого шару. При цьому методі не здійснюється різання металу. Поліпшення якості поверхні досягається шляхом пружної пластичної деформації під впливом інструменту. У порівнянні з різанням і шліфуванням ПДП має наступні переваги:

- а) збереження цілісності волокон поверхневого шару;
- б) формування дрібнозернистої структури у поверхневому шарі;
- в) відсутність забруднення поверхні частками інструменту, що характерно для шліфування;

- г) відсутність термічних дефектів поверхні;
- д) зниження шорсткості в кілька разів за один прохід;
- е) наявність сприятливих стискуючих залишкових напружень у поверхневому шарі;
- ж) плавне та стабільне підвищення мікротвердості поверхневого шару;
- з) висока довговічність і відносна простота конструкції інструменту;
- и) якість поверхневого шару деталі визначається конструкцією інструменту та пристосувань більше, ніж конструкцією обладнання;
- к) можливість механізації та автоматизації процесу обробки.

Недоліками ПДП є те, що більшість методів ПДП не покращують геометричну точність деталі. Крім того, має місце неможливість обробки більшістю методів тонкостінних деталей, а також утворення напливів на торцевих поверхнях деталей, що вимагають додаткової обробки[14, 15].

Методи ПДП застосовуються для підвищення зносостійкості, втомної міцності і контактної жорсткості деталей машин. Ступінь збільшення цих характеристик в середньому становить 20 – 30%.

Під час ПДП відбувається деформація кристалічної решітки матеріалу деталі. У середині кристала виникають і активно переміщуються дислокації. Ця деформація триває до певної межі, після якої будь-яке додаткове підведення енергії призводить до утворення мікротріщин і руйнування. Найбільш схильні до деформації мартенситні сталі, далі йдуть перлітні, трооститні та сорбітні. Леговані сталі менш схильні до деформації, ніж вуглецеві, через викривлення решітки легуючими елементами.

Під час ПДП на поверхні деталі залишається відбиток від інструмента. Пластична деформація визначається глибиною і діаметром цього відбитка, які значною мірою залежать від прикладеної сили. Під час ПДП лише невелика частина підведеної енергії витрачається на пластичне деформування, а основна частина йде на нагрівання. При цьому статичні методи забезпечують нагрів до 150 – 300 °С, при вигладжуванні ж можливі температури 150 – 700 °С, а при ударних методах можуть можливо досягти температур 800 – 1000 °С.

Формування залишкових напружень при ПДП відбувається під дією силових і теплових факторів. Механізм формування виглядає наступним чином. При впливі інструмента на заготовку поверхневий шар під дією сили з урахуванням швидкості і подачі розтягується. Виділена при деформуванні та терті теплота створює термічні напруження стиснення завдяки тому, що нагрітий об'єм металу прагне розширитися, чому перешкоджають холодні навколишні шари. Виникаючі напруження, як правило, значно перевищують межу текучості і міцності матеріалу, що призводить до пластичної деформації і забезпечує формування залишкових напружень після зняття навантаження. При цьому залишкові напруження від дії механічних факторів виявляються стискуючими, оскільки розтягнутий мікрооб'єм стискається нижніми недеформованими шарами при поверненні в початковий стан.

Залишкові напруження від дії температури виявляються розтягуючими через те, що при охолодженні мікрооб'єм прагне зайняти початковий об'єм (стиснутися), чому перешкоджають нижні шари, що залишилися недеформованими. Вплив температури при ПДП зазвичай невеликий.

Серед методів ПДП найбільш поширеними є обкочування поверхні деталі, вібродинамічне накатування та центробіжна дробеструйна обробка [16].

2.6 Вплив на характеристики поверхні деталей обкочування її поверхні деталі

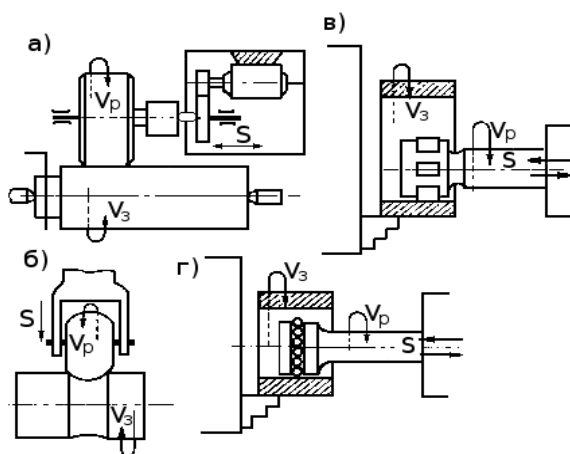
Обкочування – це тип механічної обробки, який спрямований на зміцнення поверхневого шару деталі, підвищення його зносостійкості та досягнення високого рівня точності (8–10 класу).

Процес пластичного деформування роликами або кульками використовується для обробки деталей з різних пластичних матеріалів та сталей твердістю до HRC 35 – 40. Він проходить без зняття стружки, шляхом згладжування шорсткостей, що залишаються після точіння. Цей процес здійснюється завдяки тертю кочення, що відрізняє його від вигладжування, де використовується тертя ковзання.

Під час обточування поверхня деталі зменшується на величину залишкової деформації, що призводить до зміни розміру розкатої деталі [17].

Для зміцнення обточуванням поверхню деталі підготовляють методом чистового точіння. Шорсткість повинна відповідати 5 – 6 класам чистоти. При цьому слід враховувати, що діаметр поверхні під час упрочнювальної обробки може змінюватися на 0,02 – 0,03 мм. Тому зовнішні поверхні деталі повинні бути зроблені за найбільшим граничним розміром, а внутрішні – за найменшим.

При реалізації процесу заготовка, що закріплена в патроні верстата, обертається. Поздовжню подачу обточування забезпечує ходовий вал верстата. Під час обробки використовують велику кількість змащувальних матеріалів, таких як веретенне масло або гас. Завдяки тиску деформуючого елемента на поверхню деталі підвищується твердість і міцність поверхневого шару, гребінці нерівностей та шороховатості згладжуються, заповнюючи западини. Чистота поверхні підвищується на 2 – 3 класи, а точність форми і розмірів або залишається незмінною, або покращується на 10 – 15 %. Щоб збільшити продуктивність, швидкість обточування підвищують до 200 м/хв. Кількість робочих ходів становить 1 – 2 залежно від необхідної чистоти поверхні деталі. На рис. 2.1 представлені можливі схеми обробки при обточуванні поверхонь деталей [18].



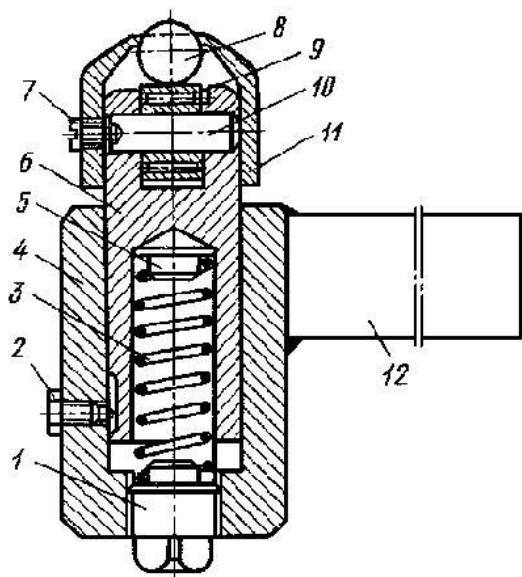
а – роликом - зовнішньої поверхні деталі; б – кулькою - зовнішньої поверхні деталі; в) роликами - внутрішньої поверхні деталі; г – кульками - внутрішньої поверхні деталі

Рисунок 2.1 – Схеми обточування поверхонь деталі [18]

Режими обробки залежать від кількості прикладених навантажень. Це визначає швидкість подачі та кількість робочих ходів.

Обкочування зовнішніх поверхонь і розкочування отворів здійснюються за допомогою роликів і кулькових обкаток та розкаток, а вигладжування виконується алмазними наконечниками. Для обробки зовнішніх циліндричних і конічних поверхонь застосовується обкатка з симетричним розташуванням ролика на двох опорах. Якщо необхідно обробити ступінчасті поверхні, уступи та торці, використовують обкатку з одностороннім розташуванням ролика. Для обкочування уступів і торців ролик розташовують під кутом $5 - 15^\circ$ до оброблюваної поверхні.

Ролики виготовляються з легованих сталей (Х12М, ШХ15, ХВГ, 5ХНМ, 9Х), вуглецевих інструментальних сталей (У10А, У12А), швидкоріжучих сталей (Р6М5, Р9) та твердих сплавів (ВК8). Після цього їх загартовують до твердості HRC 58 – 65. Кулькові обкатки і розкатки обладнані пружиною, яка забезпечує рівномірний тиск кульки на деталь. Необхідний тиск пружини встановлюється регулювальним гвинтом в залежності від властивостей оброблюваного матеріалу. Такі обкатки і розкатки дозволяють ефективно обробляти нестійкі деталі, оскільки кулька, маючи точковий контакт з поверхнею, не потребує сильного притискання. На рис. 2.2 приведений приклад інструменту для обкочування.



- 1) пробка; 2) болт; 3) пружина; 4) корпус; 5) підп'ятник; 6) пінок;
7) стопор; 8) кулька; 9) підшипник; 10) вісь; 11) ковпачок; 12) хвостовик

Рисунок 2.2 – Інструмент для реалізації процесу обкочування деталей [18]

2.7 Можливості вплив на характеристики поверхні деталей технології вібродинамічного накочування

Процес вібродинамічного накочування базується на створенні регулярно розташованих заглиблень шляхом холодного пластичного деформування матеріалу, що обробляється. Основною особливістю цього методу є поєднання розкочуючої дії, властивої більшості способів поверхневого пластичного деформування, з ударною дією. Це призводить до збільшення залишкової деформації, що, за інших рівних умов, забезпечує більш значне зміцнення як за ступенем, так і за глибиною зміцненого шару металу.

Режим ударного вібронакочування визначається такими параметрами: зусиллям ударного вдавлювання інструмента (кульок, бойків сферичної форми), частотою обертання заготовки, подачею деформуючого інструмента, кількістю подвійних ходів деформуючого елемента та його діаметром. Змінюючи ці параметри, можна створювати різні системи заглиблень, які відрізняються кількістю на одиницю площі оброблюваної поверхні, площею, зайнятою заглибленнями відносно номінальної, формою, глибиною заглиблень та їх взаємним розташуванням [17, 18].

Таким чином, керуючи утворенням заглиблень, можна створювати системи з лунками, які не торкаються одна одної або частково перекриваються. Однак односторонній динамічний вплив на заготовку та елементи верстата обмежують можливість використання цієї технології для обробки маложорстких і нерівножорстких деталей, призводить до зниження жорсткості верстатів та появи шуму.

2.8 Можливості пластичного деформування поверхні при центробіжній дробеструменевій обробці

Із всіх існуючих методах ПДП нас буде цікавити центробіжна дробеструменева обробка.

Суть цього методу обробки полягає в послідовному нанесенні ударів по зміцнюваній поверхні робочими тілами, які вільно рухаються в радіальних отворах інструмента під час його обертання. Цей метод застосовується для обробки зовнішніх та внутрішніх поверхонь обертання, а також плоских поверхонь [17, 18].

При обертанні кулі займають крайні положення в отворі, а під час удару вони переміщуються всередину, передаючи енергію, створену центробіжною силою.

Цей метод дозволяє досягти значної деформації. Втомна міцність підвищується в 1,5 – 4 рази. Режими обробки залежать від кількості ударів на 1 мм² поверхні заготовки:

$$C = \frac{Z \times n_u}{\pi d n_d s_o},$$

де Z – кількість куль в інструменті;

n_u – частота обертання інструмента;

d – діаметр заготовки;

n_d – частота обертання деталі;

S_o – осьова подача.

Основні параметри зміцнення при цьому методі ПДП:

- а) швидкість інструмента від 8 до 40 м/с;
- б) швидкість деталі від 0,5 до 5 м/с;
- в) натяг від 0,5 до 1,5 мм/с;
- г) кількість робочих тіл в інструменті – від 4 до 20 шт.;
- д) подача S_o – від 0,02 до 0,2 мм/об.;
- е) діаметр кулі від 5 до 16 мм.

При центробіжній обробці температура оброблюваної поверхні досягає від 250 до 400 °С. Параметр шорсткості покращується більше ніж у 10 разів. Твердість поверхневого шару збільшується на величину від 30 до 60% для різних матеріалів. Глибина зміцненого шару перевищує від 0,6 до 0,8 мм.

Традиційно метод реалізується на універсальних металорізальних верстатах токарної або фрезерної групи, дооснащених приводом інструмента, який

встановлюється на супорті верстата. В нашому випадку ми будемо реалізовувати цей метод на лазерних технологічних комплексах в комбінації зі станками з ЧПУ.

Таким чином, для зміни показників якості поверхні лазерних різів необхідна розробка комбінованої технології, яка включала б додаткові методи підвищення експлуатаційних характеристик поверхні вирізаних лазером деталей пластичним деформуванням поверхні різів. При цьому особливі можливості виникають при використанні для такого пластичного деформування поверхні різання центробіжної дробеструменевої обробки.

3 ВДОСКОНАЛЕННЯ ТЕХНОЛОГІЇ ЛАЗЕРНОГО РІЗАННЯ МЕТАЛІВ ПРИ ВИКОРИСТАННІ ЦЕНТРИФУЖНОЇ ВІДЦЕНТРОВОЇ ДРОБОСТРУМЕНЕВОЇ ОБРОБКИ

3.1 Характеристики поверхні різів, отриманих лазерним випромінюванням, та можливості їх покращення при застосуванні відцентрової дробоструменевої обробки

Лазерне різання – це технологічний процес, у якому лазерний промінь (неперервний або імпульсний) виконує розрізання матеріалу шляхом плавлення, випаровування, горіння в кисні або комбінації цих дій у зоні різу. Цей метод належить до теплових процесів і використовує велику енергію, зосереджену на невеликій ділянці. Разом із лазерним променем коаксіально подається потік газу, який може бути реактивним (кисень, повітря) або інертним (азот, аргон). Реактивні гази викликають екзотермічну реакцію в зоні різання, що підвищує ефективність лазера, дозволяючи обробляти матеріали значної товщини. Інертні гази, у свою чергу, видаляють розплавлений матеріал, охолоджують зону обробки та захищають оптичну систему лазерного пристрою.

Лазерні технології можуть застосовуватися для обробки широкого спектра матеріалів, включаючи нелеговані та нержавіючі сталі, алюмінієві та нікелеві сплави, вуглецево-волокнисті композити та природні матеріали. Зокрема, лазерне різання металів знайшло широке застосування в автомобільній, хімічній, морській та авіаційній промисловості. Переваги цього методу включають високу швидкість різання (у кілька разів більшу, ніж під час механічної обробки), точність геометрії різу, низьку шорсткість поверхні та високий рівень автоматизації.

Однак лазерний процес також може створювати певні дефекти на поверхні різу та його краях. До таких дефектів належать нерівності чи відхилення від заданої форми та розташування. Ці недоліки виникають через сам процес лазерного різання і не враховують наслідки зовнішніх напружень чи деформацій [19].

Якість обробленої поверхні та ефективність різання залежать від багатьох факторів. Серед них: потужність лазера, тип і режим його роботи, положення

фокусу лазерного променя відносно оброблюваної деталі, швидкість різання, а також тип і тиск допоміжного газу. Контроль цих параметрів є ключовим для досягнення високої якості різання та оптимізації технологічного процесу.

Якість країв і поверхонь при лазерному різанні оцінюється кількісно через такі параметри, як шорсткість поверхні, ширина зони теплового впливу, фазові зміни матеріалу, залишкові напруження в зоні різку, а також напливи, що утворюються на нижніх краях різів.

Шорсткість поверхні, яка виникає під час лазерного різання, є результатом поєднаного впливу теплових і гідродинамічних явищ, характерних для цього процесу, а також вібрацій оброблюваної деталі, що виникають через потік газу високого тиску. Зрізану поверхню можна розділити на дві ділянки, що мають різні характеристики: зону входу лазерного променя та зону його виходу. Ці ділянки розділені так званим розділовим шаром. Якість поверхні в зоні виходу лазера зазвичай гірша через вищу шорсткість.

Характерною особливістю лазерного різання є утворення смуг (боріз) на зрізаній поверхні. Вони формуються через динаміку гідродинамічного потоку розплавленого матеріалу, коливання потужності лазера, нестабільність потоку газу та вібрації лазерної головки [5].

Тепло, яке подається в зону різання, створює область зі зміненими властивостями – зону теплового впливу. Вона має невелику товщину, але локально, особливо на краях і кутах, може характеризуватися високою твердістю. Ці відмінності обумовлені нерівномірним розподілом енергії в поперечному перерізі лазерного променя і різною швидкістю тепловідведення [20].

Висока температура в зоні різання також викликає утворення теплових напружень. Процес нагрівання матеріалу, а потім швидке охолодження під дією допоміжного газу, призводить до усадки та фазових перетворень. Ці перетворення, залежно від швидкості охолодження, формують залишкові напруження розтягу. Їх значення та розподіл залежать від теплопровідності матеріалу.

Під час різання нелегованої сталі на поверхні утворюється тонкий шар оксидів заліза (FeO і Fe_3O_4), який надає їй синюватого відтінку. Частинки цього

шару мають розмір близько 50 мкм і часто набувають сферичної форми, утвореної залізом, покритим оксидною плівкою [21].

Наявність дефектів на поверхнях і краях деталей, оброблених лазером, включаючи застигли краплі матеріалу на нижніх краях (грат), вимагає проведення фінішної обробки. Так, окисли та напливи можна усунути за допомогою ручних напилків, дротяних щіток, спеціалізованих машин для видалення задирок та стрічкових шліфувальників. Додатково механічне шліфування та згладжування за допомогою алмазних інструментів дозволяє покращити геометричну якість поверхонь після лазерного різання [22].

Механічне шліфування ефективно зменшує шорсткість поверхні та знижує товщину загартованого шару. Однак цей метод може спричиняти виникнення залишкових напружень розтягу, що підвищує ризик утворення тріщин. Такі дефекти є зонами концентрації напружень, що негативно впливає на несучу здатність поверхні.

Застосування алмазних інструментів для згладжування дозволяє значно зменшити шорсткість поверхні, але супроводжується структурними та фазовими змінами матеріалу. Внаслідок цього залишковий аустеніт перетворюється на мартенсит, а поверхневий шар додатково загартовується. Під час такої обробки виникає ковзне тертя між інструментом і деталлю, що підвищує температуру в зоні обробки. Це призводить до збільшення твердості в крайовій зоні порівняно з лазерним різанням, однак може викликати появу мікротріщин і розривів.

Стан поверхонь і країв деталей після лазерного різання часто ускладнює їх подальшу обробку або використання у виробництві. Крім того, нанесення фарбувальних покриттів може бути проблематичним через їх схильність до відшарування [23, 24].

Центрифужна відцентрова дробоструменева обробка змінює характеристики поверхневого шару деталей, які були попередньо оброблені методами точіння, фрезерування або шліфування. Для фрезерованих поверхонь цей процес створює мікрозаглиблення, які сприяють утриманню додаткового мастила. Використання оптимальних параметрів дробеструменевого оброблення для фінішної обробки

сталевих валів зі сталі С45 і 40Н дозволяє значно знизити шорсткість поверхні Ra . Позитивний вплив дробеструменевої технології на властивості поверхневого шару оброблених деталей доводить доцільність її застосування для модифікації поверхні вирізаних лазером деталей.

Як метод фінішної обробки, дробеструменева обробка формує поверхню з низькою шорсткістю та великою площею опорної поверхні завдяки більш згладженим формам мікронерівностей, що утворюються в процесі. Утворені вдавлення на поверхні виконують функцію резервуарів для мастильних матеріалів, сприяючи формуванню захисного шару, який підвищує стійкість поверхні до абразивного зносу. Також текстура поверхні, що формується під час оброблення, впливає на її енергетичний стан і адгезійні властивості. Серед додаткових переваг – заокруглення країв деталей, що покращує експлуатаційні характеристики.

Відцентрова дробеструменева обробка може бути інтегрована з процесами шліфування за допомогою гібридних інструментів, що дозволяє обробляти важкоріжучі матеріали, зокрема нікелеві та титанові сплави. Під час цього процесу відбувається зміна концентрації дефектів у кристалічній структурі. Це сприяє формуванню стискальних залишкових напружень у поверхневому шарі деталей, що разом із підвищенням мікротвердості значно покращує стійкість матеріалу до абразивного та втомного зносу [25].

Таким чином, необхідність фінішної обробки деталей, вирізаних лазером, відкриває перспективи використання дробеструменевої обробки, відомої своїм позитивним впливом на поверхню шліфованих і механічно оброблених деталей, як перспективного методу для підвищення якості виробів після лазерної різки.

3.2 Методика експериментальних досліджень впливу центробіжної відцентрової дробеструменевої обробки на поверхні після лазерного різання

Метою цього дослідження стало визначення впливу відцентрової дробеструменевої обробки на поверхневий шар деталей зі сталі С45, вирізаних лазером.

Випробування проводились на зразках із сталі С45, яка широко використовується в машинобудуванні для виробництва деталей середнього навантаження, таких як шпинделі, вали, осі та не загартовані зубчасті колеса.

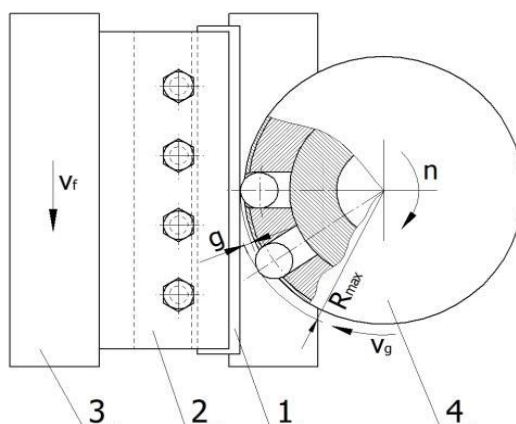
Прямокутні зразки товщиною 5 мм були виготовлені за допомогою лазерного обладнання фірми ТОВ "Алді Естейт" (м.Бориспіль, Київської обл.), яке детально описане в розділі 4 цієї дисертаційної роботи. Для різання використовувався кисень як допоміжний газ, а параметри процесу були такими: швидкість різання $v = 1,50$ м/хв, потужність $P = 6,0$ кВт, тиск газу $p = 0.07$ МПа, та положення фокусу лазера $+2,0$ мм.

Після лазерного різання зразки піддавалися центрифужній дробоструменевій обробці, яка включало ударний вплив дробу на поверхню деталі. Дріб подавали через радіально розташовані отвори в обертовій головці. Під час обертання дріб отримував прискорення завдяки відцентровій силі, а удари дробу викликали пластичну деформацію поверхні матеріалу.

Цей метод значно знижує шорсткість поверхні та зміцнює її верхній шар. Після обробки на поверхні зразків формувались поздовжні та поперечні сліди від дробу, що сприяло отриманню більш рівномірної та гладкої поверхні. Метод дозволяє обробляти деталі симетричні за вісю, плоскі поверхні та складні геометричні форми, а також ефективно працювати з елементами низької жорсткості.

Випробування центрифужної дробоструменевої обробки проводилися на вертикальному фрезерному станку з використанням спеціалізованої оброблювальної головки. Головка мала зовнішній діаметр 70 мм і була оснащена дробовою системою з дванадцятьма ($z_k=12$) симетрично розташованими кульками діаметром $d_k=6.0$ мм (рис. 3.1).

Під час обробки зразок 1 закріплювався у тримачі 2 таким чином, щоб його оброблювана поверхня була паралельна осі шпинделя верстата. Тримач був закріплений у лещатах 3, які були встановлені на рухомому столі верстата, що переміщувався зі швидкістю v_f . Корпус головки мав радіальні отвори для руху кульок, які могли переміщуватися вздовж осьової лінії у направляючій частині.



1– зразок, 2 – тримач, 3 – лещата, 4 – головка дробеструменевої обробки

Рисунок 3.1 – Схема процесу центрифужної дробоструменевої обробки на вертикальному фрезерному станку

На корпусі головки з максимальним радіусом R_{max} було встановлено кільце з радіальними отворами. Діаметр цих отворів був меншим за діаметр кульок, що унеможливило їхнє випадання. Головка 4 оберталася зі швидкістю n і водночас здійснювала рух у напрямку поперечної подачі f_p . Під час обертання головки дробинки вибивалися під дією відцентрової сили, вдаряли по оброблюваній поверхні, а після удару відскакували і поверталися у свої гнізда. Відстань між головою та поверхнею виробу, що являла собою подачу головки до виробу g , забезпечувала належний контроль над оброблювальним процесом.

Центрифужна дробоструменева обробка проводилась із застосуванням охолоджуючого мастила при постійній подачі $g = 0.5$ мм і поперечній подачі $f_p = 0.08$ мм. Кількість проходів становила $i = 1$.

Змінними параметрами експерименту були:

- а) Тангенціальна швидкість головки – від 550 до 1150 м/хв;
- б) Швидкість подачі – від 1,4 до 10,5 мм/хв.

Шорсткість поверхні та тривимірну (3D) топографію вимірювали за допомогою мікроскопа Лінника та за допомогою пристрою Hommel–Etapic T8000RC 120–140 (Німеччина). Шорсткість вимірювалась на відстані, яка дорівнює $1/3$ товщини виробу від верхнього краю різь, якщо товщина перевищувала 2 мм.

Для частин, вирізаних лазером, вимірювання проводили у двох зонах:

а) зона входу лазерного променя – на відстані 1 мм від верхнього краю різь;

б) зона виходу лазера – на відстані 1 мм від нижнього краю різь.

У цьому дослідженні шорсткість визначалась у нижній зоні, оскільки вона характерно має іншу якість поверхні порівняно з верхньою. Схему місць вимірювання шорсткості показано на рисунку 3.2. Аналогічна схема застосовувалась і для визначення шорсткості після дробоструменевої обробки. Цей підхід дозволяє порівнювати результати оброблення зразків до і після дробоструминного впливу.

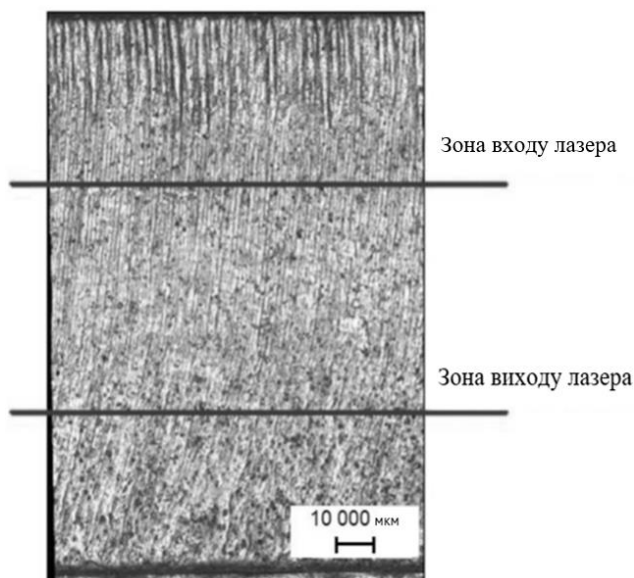


Рисунок 3.2 – Вид поверхні після лазерного різання з позначеним пунктом вимірювання шорсткості.

Структура матеріалу оцінювалась за допомогою металографічного мікроскопа. Мікротвердість визначали методом Віккерса, використовуючи поперечні металографічні зразки, підготовлені стандартним методом. Для вимірювань застосовувався індентор з навантаженням в 50 г (0.05 HV).

Вимірювання проводились за схемою, представленою на Рис. 3.3, з постійним кроком від поверхні зразків після лазерного різання та після лазерного різання в поєднанні з центрифужною дробеструменевою обробкою. Кожне

вимірювання повторювали 10 разів на заданій глибині для забезпечення точності. Максимальна мікротвердість поверхневого шару, що розташована безпосередньо під обробленою поверхнею, визначалась на основі розподілу мікротвердості. Для розрахунку ступеня зміцнення поверхневого шару (e) використовувалось рівняння:

$$e = 100 \times (HV_{max} - HV_0) / HV_0, (\%),$$

де HV_{max} – максимальна мікротвердість поверхневого шару після дробеструменевої обробки;

HV_0 – мікротвердість поверхневого шару до оброблення.

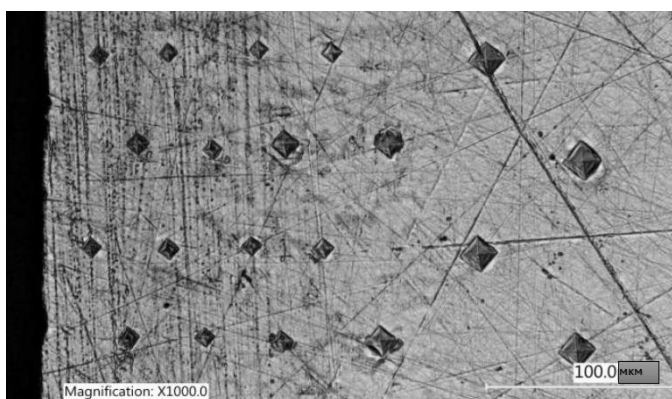


Рисунок 3.3 – Схема вимірювання мікротвердості термічного впливу.

Для аналізу залишкових напружень використовувався стандартний метод. Залишкові напруження в поверхневих шарах зразків, оброблених лазером, а також тих, що пройшли лазерне різання з наступною дробеструменевою обробкою, визначалися шляхом аналізу деформацій, зафіксованих під час послідовного видалення шарів металу, в яких ці напруження виникали. Шари видаляли методом хімічного травлення в 4%-му розчині азотної кислоти за допомогою спеціального стенда. Для фіксації деформацій зразків використовувався цифровий датчик, вимірювальний наконечник якого перебував у контакті з поверхнею травленого зразка.

Деформації фіксувалися на кожному етапі зняття матеріалу, що дозволяло визначити залишкові напруження на різних глибинах поверхневого шару. Такий

підхід забезпечує високу точність у розрахунках і дозволяє оцінити розподіл залишкових напружень у поверхневому шарі після різних етапів обробки.

3.3 Результати експериментальних досліджень процесу вигладжування поверхні різів після лазерного різання та центрифужної дробоструменевої обробки

3.3.1 Вплив параметрів дробоструменевої обробки на шорсткість поверхні лазерних різів

На рис. 3.4 показано топографію поверхні сталі С45 після лазерного різання та після лазерного різання в поєднанні з центрифужною дробоструменевою обробкою. Поверхня після лазерного різання демонструє значні висотні відмінності, із наявністю численних піків і западин.

Лазерне різання (Рис. 3.4, а):

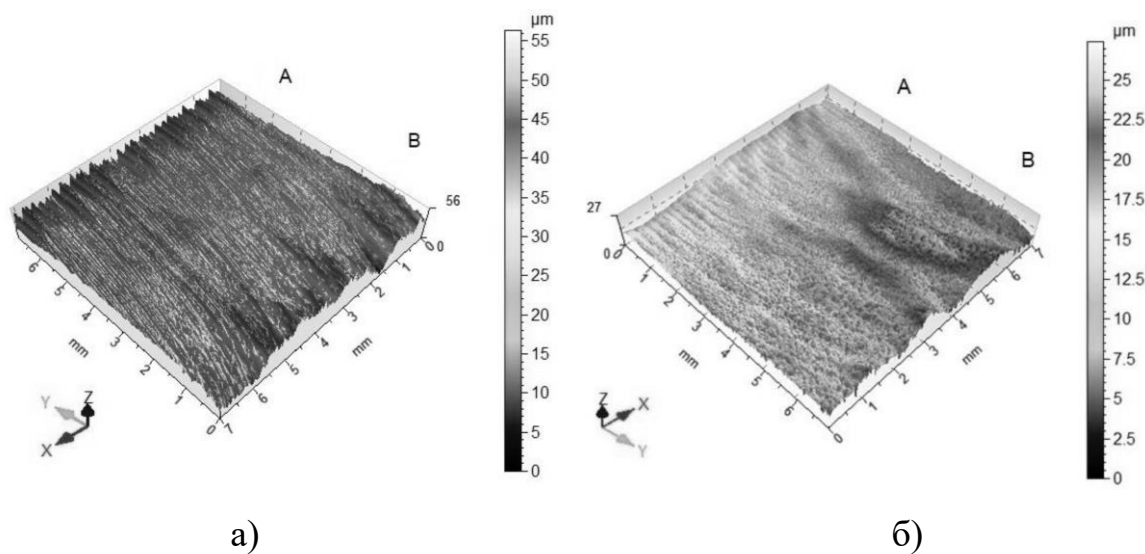
а) у зоні входу лазерного променя (А) поверхня має тонкі, рівномірно розташовані прямі лінії, спричинені процесом руйнування в зоні різки. Параметри шорсткості цієї зони становлять: $R_a=2.49\pm0.12$ мкм; $R_z=15.76\pm1.33$ мкм;

б) у зоні виходу лазерного променя (В) лінії на поверхні різця мають вигнуту форму, що свідчить про виніс матеріалу газовим струменем з прорізу. Шорсткість у цій зоні значно вища: $R_a=5.04\pm0.35$ мкм; $R_z=31.29\pm2.27$ мкм.

Значення шорсткості в зоні виходу майже вдвічі перевищують показники зони входу. Збільшення нерівностей у зоні виходу пояснюється зростанням в'язкості рідкого металу на нижньому краю різку, що спричиняє утворення товстого шару розплаву, який прилипає до поверхні й створює грубі нерівності.

Після центрифужної дробоструменевої обробки (Рис. 3.4, б) геометрична структура поверхні змінюється. Удари кульок спричиняють пластичну деформацію, що згладжує вершини мікронерівностей і знижує висоту ліній тертя. Як результат, різниця у висоті профілів шорсткості між зоною входу (А) та зоною виходу (В) значно зменшується. Цей ефект покращує якість обробленої поверхні та

вирівнює текстуру в обох зонах, що є важливим для подальшого використання деталей.



а – поверхня після лазерного різання; б – поверхня після лазерного різання та центрифужної дробоструменевої обробки

Рисунок 3.4 – Топографія поверхні сталі С45

Зі збільшенням швидкості обертання головки (n) і тангенціальної швидкості (v_g) спостерігається зменшення шорсткості поверхні R_a . Це пояснюється тим, що підвищення енергії ударів кульок під час дробоструминного оброблення сприяє більш інтенсивному згладжуванню мікронерівностей на поверхні, отриманій після лазерного різання (табл. 2.1 та табл. 2.2).

Таблиця 2.1 – Вплив тангенціальної швидкості на шорсткість R_a зразків після лазерної різки та з подальшою дробоструменевою обробкою

Тангенціальна швидкість, м/хв.	550	700	850	1000	1150
Шорсткість, мкм					
R_a , мкм	1,85	1,60	1,30	1,05	0,85

Таблиця 2.2 – Вплив швидкості подачі на шорсткість R_a зразків після лазерної різки та з подальшою дробоструменевою обробкою

Швидкість подачі, м/хв. Шорсткість, мкм	1,4	3,7	6,0	8,2	10,5
R_a , мкм	2,95	2,80	2,35	2,85	4,65

Зниження шорсткості поверхні R_a зразків після лазерної різки та з подальшою дробоструменевою обробкою забезпечило зменшення параметра R_a у чотири рази порівняно з поверхнею після лазерного різання. Цей результат є помітно кращим у порівнянні з вібраційно-обертальною дробоструменевою обробкою зразків з такої ж сталі 45, де параметр R_a зменшувався лише на 30% [27, 28].

Однак, як видно із табл. 2.2, збільшення швидкості подачі знижує кількість ударів дробу на одиницю площі поверхні, що спричиняє підвищення шорсткості. Це свідчить про необхідність оптимізації швидкості подачі для досягнення найкращої якості поверхні.

Зміни параметра R_z профілю шорсткості демонструють схожу тенденцію? що й до зміни параметра R_a в залежності від впливу технологічних параметрів дробоструминної обробки. Аналіз показав, що максимальне зниження R_z після центрифужної дробоструменевої обробки склало від трьох до чотирьох разів, підтверджуючи ефективність цього методу в покращенні якості поверхні після лазерного різання (табл. 2.3 та табл. 2.4).

Таблиця 2.3 – Вплив тангенціальної швидкості на шорсткість R_z зразків після лазерної різки та з подальшою дробоструменевою обробкою

Тангенціальна швидкість, м/хв. Шорсткість, мкм	550	700	850	1000	1150
R_z , мкм	7,25	7,10	6,10	5,95	5,25

Табл. 2.4. – Вплив швидкості подачі на шорсткість R_z зразків після лазерної різки та з подальшою дробоструменевою обробкою

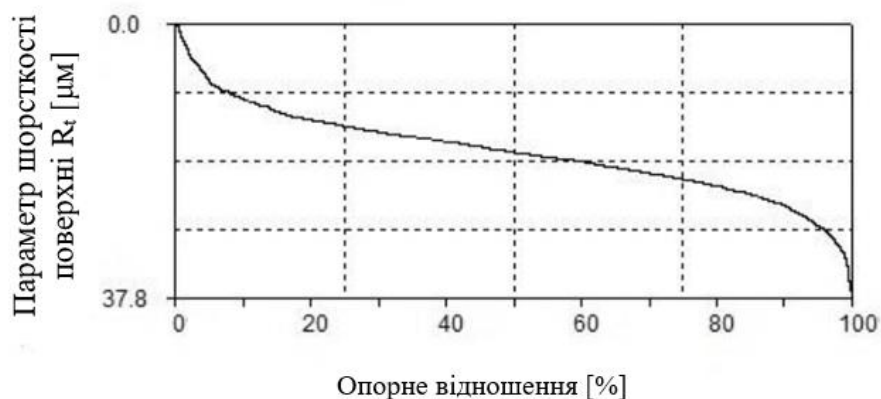
Швидкість подачі, м/хв. Шорсткість, мкм	1,4	3,7	6,0	8,2	10,5
R_z , мкм	9,55	9,20	8,65	8,35	7,90

Взаємодія між двома поверхнями характеризується параметрами кривої Абботта-Файрстоуна, яка відображає опорну площу поверхні й дозволяє аналізувати її текстуру.

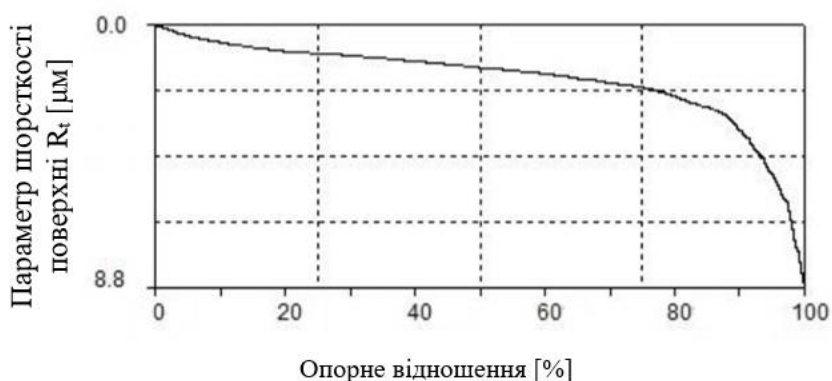
Крива для деталей після лазерного різання (Рис.3.5, а) має дегресивно-прогресивний характер із великим кутом нахилу. Така форма кривої свідчить про наявність гострих вершин мікронерівностей і малу опорну площу поверхні. Такі характеристики роблять поверхню менш стійкою до зношування і менш придатною для подальшого використання без додаткової обробки.

Після дробеструминного оброблення крива (Рис.3.5, б) набуває більш пологого нахилу, що вказує на покращення текстури поверхні. Така поверхня має

більшу опорну площу й більш гладкі мікронерівності, які забезпечують підвищену зносостійкість. Крива описується як прогресивна, із "товстим центром", що є ознакою значного покращення поверхневих характеристик.



а)



б)

а – після лазерного різання; б – після лазерного різання та з відцентровою дробоструменевою обробкою

Рисунок 3.5 – Криві опору матеріалу після лазерної різки та різки з дробоструменевою обробкою

Ці результати свідчать про ефективність центрифужної дробоструменевої обробки у зміні структури поверхні, підвищенні її міцності та довговічності.

Збільшення тангенціальної швидкості V_g суттєво впливає на характеристики поверхні, формуючи більш гладкий профіль за рахунок усунення

мікронерівностей. Такий ефект призводить до зниження основної шорсткості R_k , яка після дробоструминної обробки зменшується в кілька разів, залежно від швидкості обробки. Це покращує несучу здатність поверхні, забезпечуючи кращий контакт із з'єднуваними елементами після періоду припрацювання.

Параметри, що визначають поведінку поверхні в період припрацювання (Rpk), також значно знижуються, демонструючи суттєве зменшення виступів. Водночас глибина западин (Rvk), які відповідають за утримання мастила, зменшується, що вказує на потенційно меншу здатність до утримання мастильних матеріалів. Таким чином, центрифугальна дробоструменева обробка сприяє створенню більш функціонально придатної поверхні, що поєднує знижену шорсткість і підвищену несучу здатність, водночас впливаючи на мастильні характеристики (Рис. 3.6).

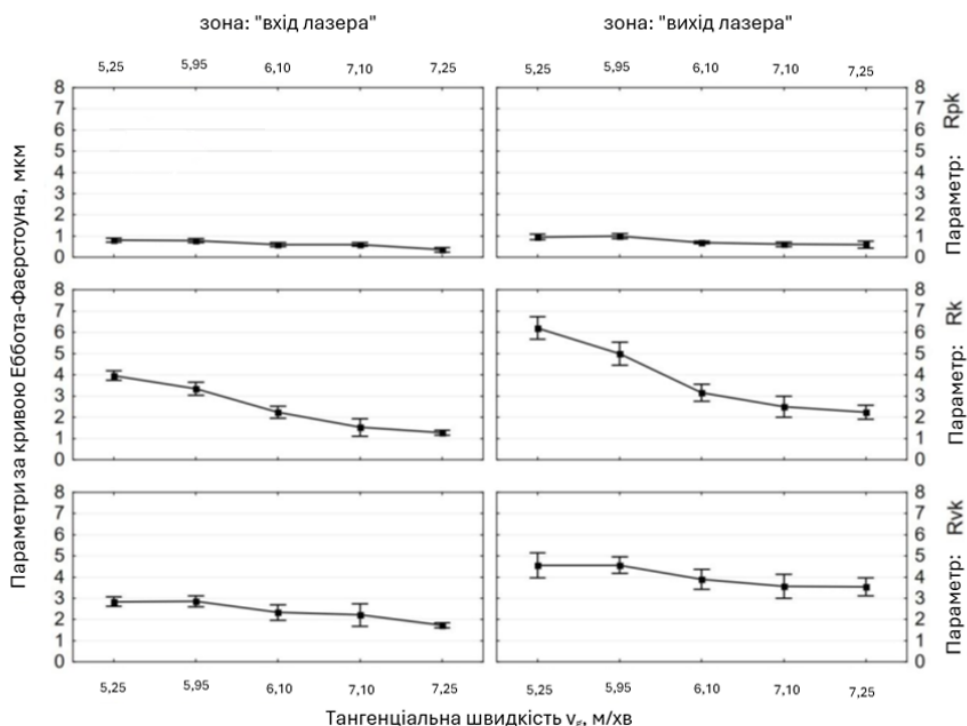


Рисунок 3.6 – Вплив тангенціальної швидкості на параметри кривої Аббота–Файрстоуна зразків після лазерного різання та з подальшою дробоструменевою обробкою

Збільшення швидкості подачі V_f знижувало частку еластично–пластичних деформацій, що, своєю чергою, сприяло підвищенню параметрів кривої опорної

площі. Однак вплив швидкості подачі v_f на параметри кривої Аббота–Файрстоуна був менш значним порівняно з тангенціальною швидкістю v_g . При найменшій швидкості подачі ($v_f = 1,4$ м/хв) значення параметра R_{pk} зменшилось до шести разів у порівнянні зі значеннями після лазерного різання. Для порівняння, найбільша тангенціальна швидкість ($v_g = 1150$ м/хв) призвела до зменшення R_{pk} більш, ніж у вісім разів. Щодо параметра шорсткості R_k , тангенціальна швидкість v_g виявилась більш впливовою, ніж швидкість подачі v_f . Зменшення R_k до п'яти разів порівняно з лазерним різанням демонструє суттєві переваги дробоструменевої обробки.

Параметр R_{vk} , що відображає глибину западин, також показав значне зменшення після дробоструминної обробки (більш ніж удвічі), що відповідає результатам, отриманим при вивченні впливу тангенціальної швидкості v_g . Отримані результати підтверджують покращення функціональних характеристик поверхонь завдяки дробоструменевій обробці (Рис. 3.7).

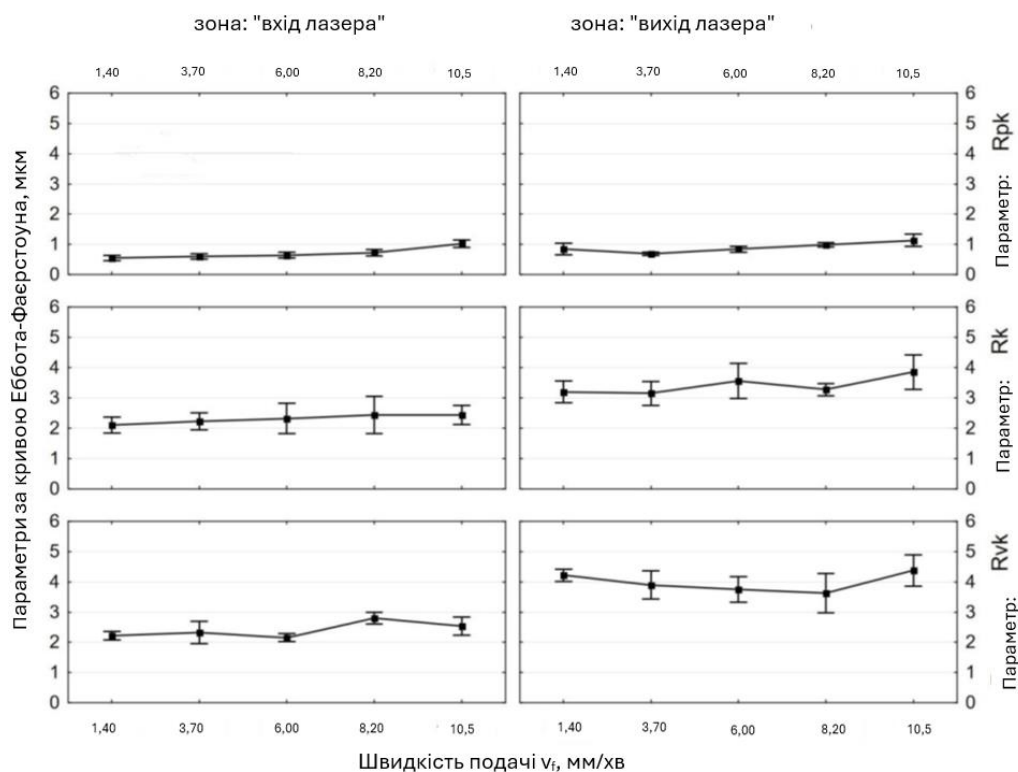


Рисунок 3.7 – Вплив швидкості подачі на параметри кривої Аббота–Файрстоуна зразків після лазерного різання та центрифугальної дробоструменевої обробки

Відносна площа матеріалу поверхні зросла для всіх досліджуваних режимів дробоструменевої обробки у порівнянні з поверхнею після лазерного різання. Так, для деталей після лазерного різання відносна площа матеріалу профілю шорсткості становила $R_{mr} = 6.08\%$. Це вказує на низьку зносостійкість таких поверхонь.

Центрифугальна дробоструменева обробка значно підвищила цей показник, збільшуючи відносну площу матеріалу від 3 до 14 разів залежно від режиму обробки (табл. 3.5 та табл. 3.6). Отримані результати підтверджують, що дробоструменева обробка суттєво покращує зносостійкість поверхні, роблячи її більш придатною для використання в умовах механічного навантаження.

Крім того, під час центрифугальної дробоструменевої обробки кут між вектором нормальної швидкості дробу та оброблюваною поверхнею є значним, що створює умови для інтенсивного тертя. Це тертя спричиняє стирання вершин мікронерівностей, сформованих на твердому матеріалі, знижуючи їхню висоту та утворюючи мікропорожнини на поверхні. Такий процес покращує стереометричні характеристики обробленої поверхні, роблячи її більш стійкою до абразивного зносу.

Таблиця – 3.5. Вплив тангенціальної швидкості на відносну площу матеріалу профілю шорсткості R_{mr} зразків після лазерної різки та різки з подальшою центрифугальною дробоструменевою обробкою

Тангенціальна швидкість, м/хв.	550	700	850	1000	1150
Площа матеріалу профілю, %					
R_{mr}	40,25	70,30	82,70	90,95	95,45

Таблиця – 3.6. Вплив швидкості подачі на відносну площу матеріалу профілю шорсткості R_{mr} зразків після лазерної різки та різки з подальшою центрифугальною дробоструменевою обробкою

Швидкість подачі, м/хв.					
Площа матеріалу профілю, %	1,4	3,7	6,0	8,2	10,5
R_{mr}	74,65	46,40	37,25	20,65	18,50

Вирівнювання мікронерівностей, зумовлене пластичною деформацією, також сприяє зменшенню зон із різною шорсткістю, що позитивно впливає на подальші виробничі етапи. Наприклад, рівномірність поверхні є критичною для якісного нанесення лакофарбових покриттів, забезпечуючи їх кращу адгезію та довговічність. Такі сприятливі зміни підвищують експлуатаційні властивості деталей.

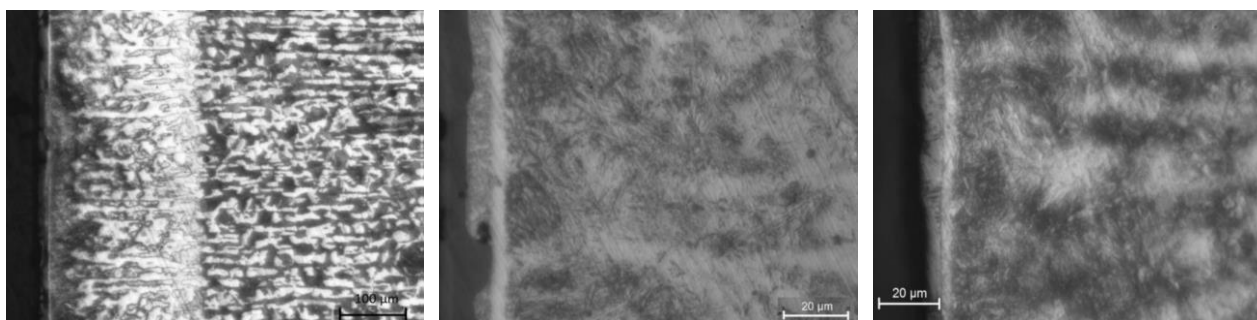
3.3.2 Залежність мікроструктури та мікротвердісті від параметрів дробоструменевої обробки поверхні лазерних різів

До початку лазерного різання зразки сталі С45 мали феритно-перлітну мікроструктуру. Під дією сильного нагрівання лазерним променем та подальшого швидкого охолодження в зоні поблизу краю розрізу відбулося загартування матеріалу, що призвело до утворення зони термічного впливу (ЗТВ). Ця зона характеризується структурними і фазовими відмінностями від основного матеріалу (Рис 3.8, а). У ЗТВ безпосередньо біля краю розрізу можна спостерігати голчастий мартенсит у поєднанні з феритом, тоді як далі від краю переважає мартенсит (Рис. 3. 8, б).

Короткотривалість процесу лазерного різання не дала змоги фериту насититися вуглецем, унаслідок чого утворився низьковуглецевий мартенсит. Водночас перліт повністю перетворився на високовуглецевий мартенсит. Після цього циклічна дробоструменева обробка істотно впливає на структуру матеріалу (Рис. 3. 8, в). Пластична деформація, спричинена ударним обстрілом частинками дробу, зумовлює збільшення густини дислокацій. Ці дислокації, натрапляючи на перешкоди, такі як межі зерен, інші дислокації чи виділення цементиту, уповільнюються або зупиняються, що сприяє зміцненню матеріалу.

Результатом цих змін є утворення структури, яку можна класифікувати як дрібно–голчастий мартенсит. Така структура надає матеріалу підвищених механічних властивостей, роблячи його більш стійким до зносу та деформацій.

У зразках, розрізаних лазером, зона змін мікротвердості охоплює ширину понад 0,3 мм (Рис. 3.9). Максимальна мікротвердість спостерігається в області краю розрізу, де вона перевищує 560 HV0.05, що більш ніж удвічі вище за твердість основи, яка становить близько 200 HV0.05. Поступове зниження мікротвердості від краю розрізу до основи свідчить про наявність градієнта механічних властивостей у зоні термічного впливу.



а)

б)

в)

а – ЗТВ з перехідними зонами аж до основного металу після лазерної різки;
 б – збільшена ЗТВ після лазерної різки; в – збільшена ЗТВ після лазерної різки та дробеструменевої обробки

Рисунок 3.8 – Мікроструктура в ЗТВ сталі 45

Центрифугальна дробоструменева обробка для деталей із твердістю в 200 HV демонструє, що цей метод ефективно працює і для різів, отриманих лазерним випромінюванням. Ця обробка хоч і незначно збільшує твердість і товщину загартованого шару, однак, попри це, навіть невелике збільшення цих показників сприяє підвищенню стійкості оброблених поверхонь до абразивного зносу, що є важливим для їхньої експлуатації.

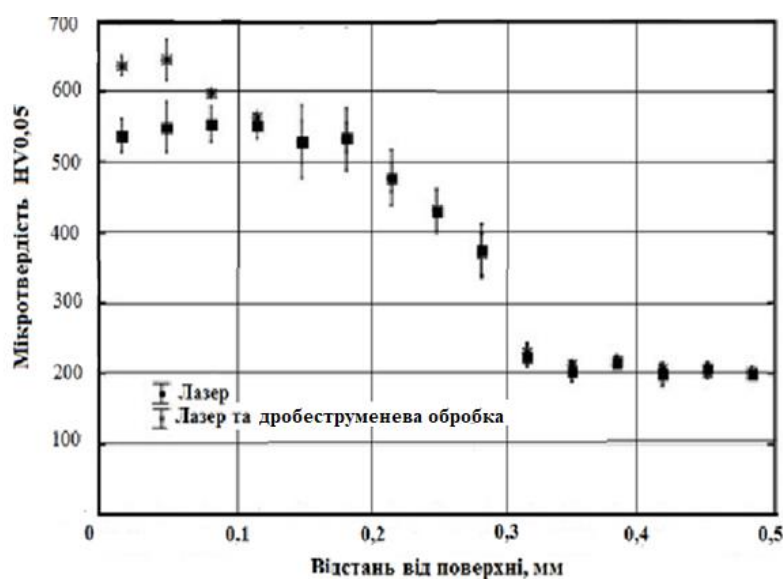


Рисунок 3.9 – Розподіл мікротвердості в поверхневому шарі сталі 45

після лазерної різки та лазерної різки і дробоструменевої обробки

Ступінь зміцнення поверхневого шару сталі С45, що пройшла лазерну і дробоструменеву обробку, визначається технологічними параметрами процесу. Збільшення тангенціальної швидкості v_d підвищує енергію удару частинок дробу та збільшує кількість ударів на одиницю площі поверхні. Це сприяє більш інтенсивному пластично–еластичному деформуванню матеріалу, що, своєю чергою, підвищує ступінь зміцнення поверхневого шару.

Максимальна товщина зміцненого шару (gh) у порівнянні з основою досягала 60 мкм, що було підтверджено статистичним аналізом середніх значень. Найбільші зміни мікротвердості спостерігалися в безпосередній близькості до поверхні, де зерна матеріалу зазнали найбільшої деформації. Залежно від тангенціальної

швидкості V_d ступінь зміцнення збільшувався в діапазоні від приблизно 6% до 15%. Однак у діапазоні швидкостей від 850 до 1000 м/хв темпи приросту ступеня зміцнення суттєво сповільнювалися, що вказує на насичення ефекту зміцнення (табл. 3.7).

Ці результати підкреслюють значення оптимального вибору швидкості дробеструменевої обробки для досягнення необхідних характеристик зміцнення поверхневого шару.

Таблиця 3.7 – Ступінь зміцнення поверхневого шару та товщини зміцненого шару в залежності від тангенціальної швидкості після лазерної різки з подальшою центрифугальною дробеструменевою обробкою

Тангенціальна швидкість, м/хв. Результати обробки	550	700	850	1000	1150
Ступінь зміцнення поверхневого шару, %	5,85	9,70	13,90	14,50	14,65
Товщина зміцненого шару, мкм	21,9	32,3	37,6	49,4	52,5

Збільшення швидкості подачі збільшує відстань між відбитками, залишеними дробом, що визиває нерівномірну деформацію поверхні, що обробляється. Зміни товщини зміцненого шару після центрифугальної дробеструменевої обробки при зміні швидкості подачі (V_f) коливалися від 16 мкм до 56 мкм. Так як при низьких швидкостях подачі кількість ударів на одиницю площі була більшою, то це збільшувало товщину зміцненого шару. Збільшення

мікротвердості для $v_f = 1,4$ м/хв в порівнянні зі значенням, зафіксованим після лазерного різання, становило 16,0% (Табл. 3.8).

Таблиця 3.8 – Ступінь зміцнення поверхневого шару та товщини зміцненого шару в залежності від швидкості подачі після лазерної різки з подальшою центрифугальною дробоструменевою обробкою

Швидкість подачі, м/хв. Результати обробки	1,4	3,7	6,0	8,2	10,5
Ступінь зміцнення поверхневого шару, %	74,65	46,40	37,25	20,65	18,50
Товщина зміцненого шару, мкм	16	25	35	47	56

3.3.3 Вплив на залишкові напруження в ЗТВ параметрів дробоструменевої обробки поверхні лазерних різів

Процес лазерного різання супроводжується повторною кристалізацією розплавленого матеріалу, що відбувається в нестабільних умовах. Це призводить до виникнення залишкових напружень розтягу, які локалізуються на глибині приблизно 0,05 мм від поверхні заготовки (Рис. 3.10). Основною причиною таких напружень є структурні зміни, що відбуваються під час лазерного різання.

Натомість, у процесі центрифугальної дробоструменевої обробки формуються залишкові напруження стиску в поверхневому шарі (Рис. 3.10). Ці напруження значно покращують функціональні властивості матеріалу, зокрема

підвищують його стійкість до втомного зносу. Таким чином, дробоструменева обробка виявляється більш ефективною порівняно зі шліфуванням, яке, навпаки, сприяє утворенню залишкових напружень розтягу в поверхневому шарі [34, 22].

Це підкреслює переваги центрифугальної дробоструменевої обробки для підвищення експлуатаційних характеристик деталей після лазерного різання.

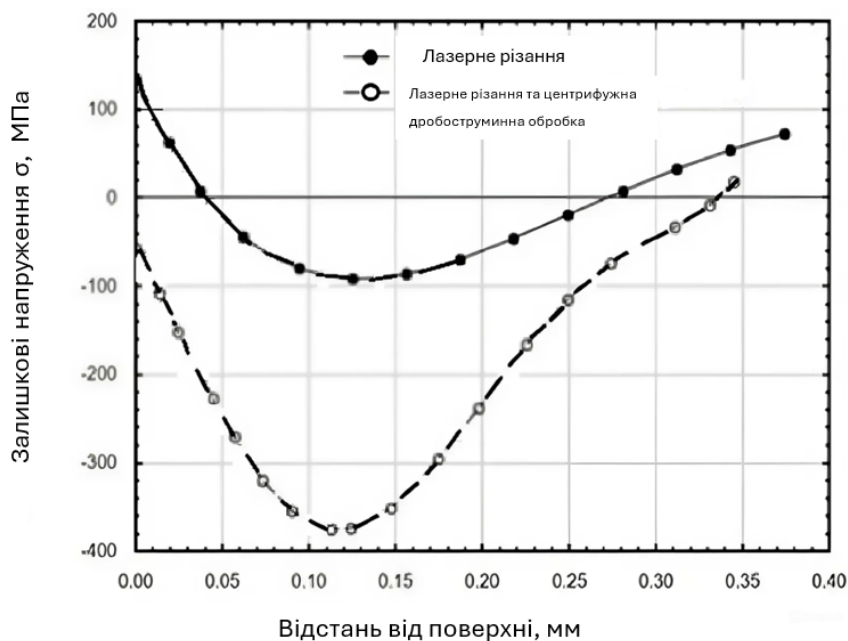


Рисунок 3.10 – Розподіл залишкових напружень в зразках із сталі 45 в залежності від відстані від поверхні після лазерної різки без та з центрифугальною дробоструменевою обробкою

Збільшення тангенціальної швидкості інструменту сприяє збільшенню глибини залишкових напружень стиску та їх абсолютного значення, хоча цей ефект менш виражений, ніж для глибини. Максимальні залишкові напруження стиску були зафіксовані на глибині від 0,1 до 0,15 мм.

З іншого боку, зі збільшенням швидкості подачі спостерігалось зменшення абсолютного максимального значення залишкових напружень стиску в обробленій поверхні, хоча глибина цих напружень залишалася практично незмінною. Найнижче значення залишкових напружень було отримано при тангенціальній швидкості 850 м/хв і швидкості подачі 6,0 м/хв, що відповідає межах технологічних параметрів, використаних в наших дослідженнях.

Отримані результати підкреслюють важливість оптимального вибору технологічних параметрів для досягнення максимального зміцнення поверхневого шару через формування залишкових напружень стиску.

Виконані експерименти та висновки по ним багато в чому збігаються з результатами робіт [26 - 28], в яких також були розглянуті та проаналізовані можливості використання технології відцентрової дробоструменевої обробки для покращення якості крайок вирізаних лазером деталей, але для інших металічних матеріалів.

Таким чином, на основі проведених досліджень впливу центрифугальної дробоструменевої обробки на зразки зі сталі С45 після лазерного різання встановлено, що має місце покращення шорсткості поверхні лазерних різів. Так, дробоструменева обробка зменшила параметри шорсткості Ra та Rz в чотири рази. Вона також зменшила різницю в шорсткості між зонами входу та виходу лазерного променя за параметрами шорсткості. При цьому збільшення тангенціальної швидкості інструменту сприяло зниженню параметрів шорсткості, тоді як збільшення швидкості подачі мало протилежний ефект, підвищуючи параметри шорсткості.

Встановлено також, що така обробка змінила характер кривої зношування поверхні з дегресивно–прогресивної на дегресивну. Це супроводжувалося значним зниженням параметрів Rpk , Rk , та Rvk порівняно з їх значеннями після лазерного різання. Це призводить до зміни коефіцієнт опорної площі. Відносна площа опори профілю збільшилася до 14 разів у порівнянні з поверхнею після лазерного різання. Покращення стереометричних властивостей поверхні підвищує її стійкість до абразивного зносу.

Результати дослідження мікротвердісті показали, що при застосуванні центрифугальної дробоструменевої обробки оброблені деталі мають мікротвердість на 16% вищу за її значення після лазерного різання. Загартований шар досягав глибини від 15 до 60 мкм.

У поверхневому шарі утворилися залишкові напруження стиску з максимальними значеннями до 400 МПа. Ці напруження локалізувалися на глибині

від 0,25 до 0,40 мм залежно від технологічних параметрів дробоструменевої обробки. При цьому збільшення тангенціальної швидкості інструменту призводило до підвищення залишкових напружень стиску та глибини їх накопичення. Подальше збільшення цієї швидкості впливало здебільшого на глибину, а не на величину напружень. Збільшення швидкості подачі зменшувало величину залишкових напружень стиску, але суттєво не впливало на їх глибину [29, 30].

4 КОМПОНУВАННЯ, РОЗРАХУНОК ТА ПРОЕКТУВАННЯ ЛАЗЕРНОГО ТЕХНОЛОГІЧНОГО ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ РІЗКИ МЕТАЛІВ

4.1 Можливості компонування лазерного технологічного обладнання

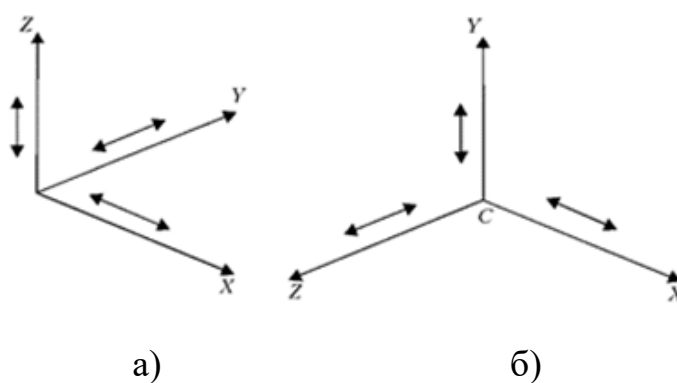
У сучасних машинах і технологічному обладнанні широко використовуються деталі з поверхнями складної геометрії. Найбільш поширеними є алгебраїчні поверхні (розгорнуті й нерозгорнуті, лінійчаті, нелінійчаті та гвинтові), поверхні з числовими відмітками, а також конструктивні поверхні. Геометрична форма оброблюваної деталі визначає характер руху формоутворення, що дає можливість варіювати розподіл елементарних рухів між заготовкою та лазерним пучком. Кінематика обладнання базується на механізмах, які забезпечують обертальні та поступальні рухи. Елементарні формоутворюючі рухи, допоміжні рухи та зв'язки між ними формують кінематичну структуру ЛТО. Ця структура є ключовим елементом при визначенні компоновки ЛТО. Існує логічний зв'язок між геометричною формою поверхні, конструкцією деталі, схемою формоутворення, кінематичною структурою обладнання та його компоновкою, що дозволяє створювати високоефективні технологічні системи [31].

Розробка компоновки є ключовим етапом у проектуванні ЛТО. На цьому етапі визначаються основні технічні характеристики, формуються техніко-економічні показники та створюються умови для підвищення якості обладнання. Компоновка ЛТО зазвичай має блочну структуру, яка складається з одного стаціонарного та кількох рухомих блоків. Залежно від технологічних вимог, блоки компоновки можуть з'єднуватися послідовно, паралельно або послідовно-паралельно. У традиційних ЛТО найчастіше використовується послідовне з'єднання блоків, що забезпечує простоту та надійність роботи системи. Для формалізації процесу створення компоновки та аналізу її ефективності можна застосовувати теорію множин і алгебру логіки. Структурні формули, що описують компоновку, мають математичні властивості, які дозволяють використовувати математичні методи для вибору оптимальної конфігурації обладнання. Такий підхід забезпечує систематичність і ефективність процесу проектування ЛТО.

Теорія координатних і конструкційних компоновок ЛТО має певну схожість із теорією компонування металорізальних верстатів. Однак транспортування лазерного пучка до зони обробки додає специфічні особливості, які впливають на загальний підхід до проектування. На етапі компонування ЛТО визначають кількість, тип та взаємне розташування ступенів рухомості. Вибір кінематичної структури є ключовим, оскільки від нього залежать характеристики обладнання, такі як спосіб передачі випромінювання, форма, розташування і розміри робочих зон лазерного пучка та заготовки. Правильно спроектована кінематична структура забезпечує оптимальну взаємодію між рухомими частинами обладнання, високу точність та ефективність роботи ЛТО.

Для систематизації різноманітних компоновок ЛТО, яке використовується для обробки складних поверхонь, залежно від виду та кількості ступенів рухомості застосовуються різні системи координат. Основними системами координат є прямокутна об'ємна, полярна циліндрична та полярна сферична. У залежності від складності оброблюваних поверхонь поряд із трьох-координатними компоновками можуть використовуватися п'ять-координатні компоновки ЛТО.

Прямокутна об'ємна система координат передбачає наявність трьох ступенів рухомості. Рух здійснюється лінійно вздовж трьох координат: X , Y та Z . При цьому вісь Z завжди орієнтована назустріч лазерному пучку. Залежно від положення осі Z , розрізняють горизонтальні та вертикальні компоновки ЛТО (рис. 4.1). Такі підходи дозволяють забезпечити точність і гнучкість у проектуванні обладнання для різних типів поверхонь, враховуючи геометрію та технологічні вимоги.



а – вертикальна компоновка; б – горизонтальна

Рисунок 4.1 – Схеми рухів в прямокутній об'ємній системі координат [31]

Загальна кількість варіантів структурних компонок ЛТО, яка враховує рухомість щодо випромінювача та фокусуємого пристрою, обчислюється за формулою:

$$Pn = n! + [n! - (n - 1)!], \quad (4.1)$$

де Pn — загальна кількість варіантів структурних компонок;

n — кількість блоків компонок.

Множина блоків, що формують ЛТО у прямокутній об'ємній системі координат, визначається як $M=\{O,X,Y,Z\}$, де O — стаціонарний блок, а X, Y, Z — блоки, які забезпечують лінійні переміщення вздовж відповідних осей координат. Кількість варіантів вертикальних або горизонтальних компонок базується на всіх можливих перестановках цих блоків з урахуванням обмежень щодо їх взаємного розташування.

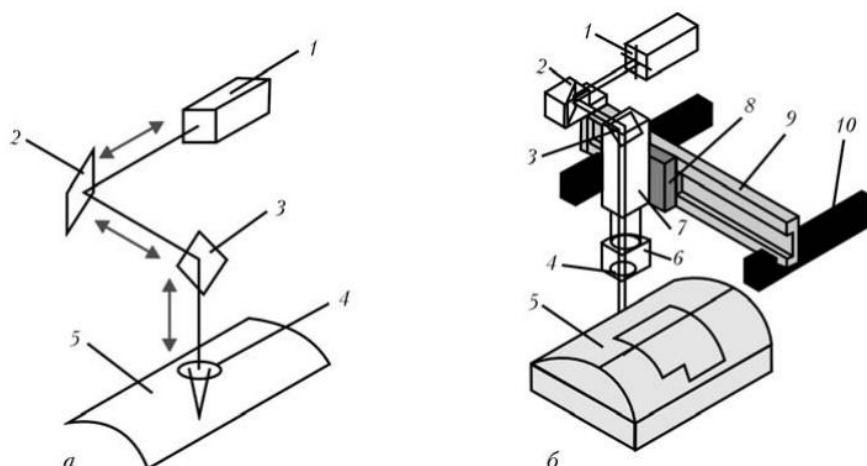
У матриці варіантів вертикальних компонок блоки, що забезпечують лінійні переміщення, позначаються літерами X, Y, Z відповідно до осі переміщення. Ця матриця систематизує можливі конфігурації для різних типів конструкцій ЛТО (табл. 4.1). Вона є важливим інструментом для аналізу та вибору оптимальної компоновки для конкретних технологічних задач [5].

Таблиця 4.1 – Матриця варіантів вертикальних компонок ЛТО [16]

XYZO _{LF} Z _V	XYOZ _{LF} Z _V	XOYZ _{LF} Z _V	XYO _L Z _F Z _V	XO _L YZ _F Z _V	OXYZ _{LF} Z _V	O _L XYZ _F Z _V
YXZO _{LF} Z _V	YXOZ _{LF} Z _V	YOXZ _{LF} Z _V	YXO _L Z _F Z _V	YO _L XZ _F Z _V	OYXZ _{LF} Z _V	O _L YXZ _F Z _V
ZXYO _{LF} Z _V	ZXOY _{LF} Z _V	ZOXY _{LF} Z _V	ZXO _L Y _F Z _V	ZO _L XY _F Z _V	OZXY _{LF} Z _V	O _L ZXY _F Z _V
ZYXO _{LF} Z _V	ZYOX _{LF} Z _V	ZOYX _{LF} Z _V	ZYO _L X _F Z _V	ZO _L YX _F Z _V	OZYX _{LF} Z _V	O _L ZYX _F Z _V
XZYO _{LF} Z _V	XZOY _{LF} Z _V	XOZY _{LF} Z _V	XZO _L Y _F Z _V	XO _L ZY _F Z _V	OXZY _{LF} Z _V	O _L XZY _F Z _V
YZXO _{LF} Z _V	YZOX _{LF} Z _V	YOZX _{LF} Z _V	YZO _L X _F Z _V	YO _L ZX _F Z _V	OYZX _{LF} Z _V	O _L YZX _F Z _V

Стаціонарний блок O відіграє роль розділювача між блоками, які забезпечують переміщення заготовки (розташовані зліва), і блоками, відповідальними за переміщення лазерного пучка як інструмента (розташовані справа). Фокусуєчий пристрій і випромінювач лазера позначаються літерами F і L

відповідно, які додаються як індекси до блоку, на якому вони розташовані. Для позначення вертикальної компоновки використовується символ Z_v . Кількість стовпців у матриці варіантів компоновок визначається кількістю можливих розташувань стаціонарного блоку. Структурні формули в цій матриці, що являють собою послідовність символів для позначення блоків, дозволяють розглядати компоновку як впорядковану множину, яка описує координатну приналежність блоків та спосіб їх послідовного з'єднання. Математична природа структурних формул підтверджується можливістю застосування до них основних алгебраїчних законів, таких як перестановочний, розподільний, сполучний тощо. Наприклад, структурна формула $OLYXZFzv$ описує вертикальну компоновку 3-координатного ЛТО. У цьому варіанті всі рухи здійснюються блоками, які відповідають за переміщення лазерного пучка, тоді як заготовка і випромінювач лазера залишаються нерухомими (рис. 4.2) [32].



а – координатна компоновка; б – конструкційна компоновка

1 – випромінювач лазера; 2, 3 – дзеркала поворотні; 4 – лінза; 5 – заготовка;
6–9 – блоки рухомі; 10 – напрямні

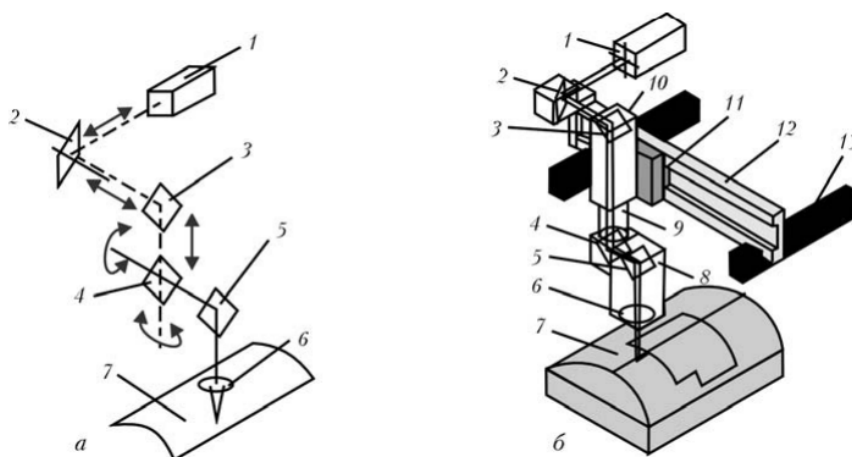
Рисунок 4.2 – Компоновки $OLYXZFzv$ 3-координатного ЛТО [32]

У 5-координатній системі компоновки до множини елементів входять п'ять рухомих блоків і один стаціонарний блок: $M=\{O,X,Y,Z,A,B\}$. У цій системі координат поняття вертикальної або горизонтальної компоновки має умовний характер, оскільки лазерний пучок змінює своє просторове положення в процесі

переміщення. Для цієї множини загальна кількість можливих компоновок, враховуючи перестановки блоків, дорівнює 1320.

Структурні формули, які відображають послідовність розташування блоків у системі, можна подати у вигляді: $YXZCAOLF_{zv}$, $YXZCOALF_{zv}$, $YXZOCALF_{zv}$, $YXOZCALF_{zv}$, $YOXZCALF_{zv}$, $OYXZCALF_{zv}$, $OLYXZCAF_{zv}$, $YOLXZCAF_{zv}$, $YXOLZCAF_{zv}$, $YXZOLCAF_{zv}$, $YXZCOLAF_{zv}$. Ці формули відображають послідовність розташування блоків у компоновці, а також показують, які елементи виконують переміщення і як координатна система впливає на функціонування ЛТО. Використання таких формул дозволяє формалізувати аналіз конструктивних рішень для складних систем і забезпечити оптимальну організацію роботи обладнання.

За структурною формулою $OLYXZCAF_{zv}$ створена координатна і конструкційна вертикальні компоновки 5-координатного лазерного технологічного обладнання (ЛТО). У цій конфігурації всі рухи забезпечуються блоками, що відповідають за переміщення лазерного пучка, тоді як заготовка і випромінювач лазера залишаються нерухомими. Такий підхід дозволяє максимально ефективно використовувати кінематичну структуру ЛТО для виконання високоточних технологічних операцій (рис. 4.3).



а) координатна компоновка; б) конструкційна компоновка

1 – випромінювач лазера; 2 – 5 – поворотні дзеркала; 6 – лінза; 7 – заготовка;
8 – 12 – рухомі блоки; 13 – напрямні

Рис. 4.3 – компоновка $OLYXZCAF_{zv}$ 5-координатного ЛТО [32]

Аналіз методів з'єднання блоків показує, що їхнє розташування у загальному енергетичному потоці від ведучої до веденої кінематичної ланки суттєво впливає на параметри функціонування технологічного обладнання.

До таких параметрів належать точність позиціонування, жорсткість, динамічні характеристики, ККД, матеріаломісткість, енергетичні витрати тощо. У традиційних компоновках з послідовним з'єднанням блоків ці параметри зазвичай нижчі порівняно з компоновками, де використовується паралельне з'єднання.

Це пояснюється тим, що при послідовному з'єднанні загальний ККД системи визначається як добуток ККД окремих механізмів, що може суттєво знижувати ефективність. Водночас у системах із паралельним з'єднанням загальний ККД дорівнює середньому ККД окремих механізмів, що забезпечує вищу ефективність. Через те, що при послідовному з'єднанні загальний ККД завжди менший за мінімальний ККД окремого механізму, доцільно прагнути до спрощення конструкцій і зменшення кількості елементів. Такий підхід дозволяє знизити втрати енергії, підвищити точність і надійність обладнання, а також зменшити витрати на виробництво та експлуатацію.

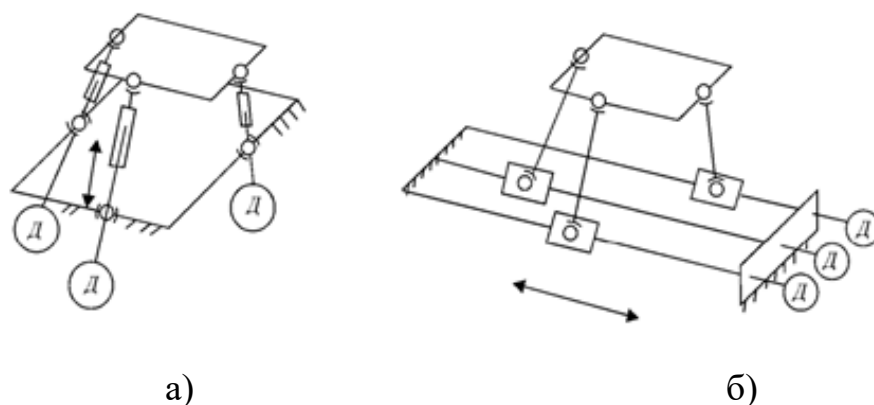
При паралельному з'єднанні механізмів загальний ККД системи в основному визначається ККД того механізму, через який проходить найбільша потужність. Це означає, що низька якість окремих елементів менш критично впливає на загальний ККД машини, ніж у випадку послідовного з'єднання. Для систем із послідовно–паралельним з'єднанням загальний ККД залежить як від кількості механізмів, з'єднаних послідовно в паралельних ланцюгах, так і від загальної кількості паралельних ланцюгів. Це створює можливість комбінування переваг обох підходів, але також ускладнює конструкцію.

Порівняльний аналіз методів з'єднання показує, що механізми з паралельним з'єднанням є найбільш ефективними. Вони забезпечують вищий ККД, зменшують залежність загальної ефективності від якості окремих компонентів і сприяють підвищенню надійності системи [5, 32].

Сучасні досягнення у сфері швидкодіючої обчислювальної техніки, розвиток мехатроніки та впровадження механізмів паралельної структури (МПС) дозволили

суттєво вдосконалити технологічне обладнання. У МПС рухомий блок з'єднаний зі стаціонарним блоком через кінематичні ланцюги, кожен із яких має індивідуальний привід. Ці ланцюги виконані у вигляді просторових ферм із штангами, які оснащені сферичними або карданными шарнірами на кінцях. Ланцюги МПС мають невелику масу, що забезпечує високу динамічність, багатопоточність і паралельність передачі навантажень. Вони працюють виключно на розтягнення або стискання, що значно знижує внутрішні деформації. Замкнутий кінематичний ланцюг додає конструкції жорсткості, зменшує навантаження на кожен привід і підвищує точність позиціонування робочого органу. Паралельні кінематичні ланцюги дозволяють одночасно керувати однією вихідною ланкою по декількох паралельних каналах, забезпечуючи точне управління як положенням, так і швидкістю. Такий підхід створює передумови для суттєвого підвищення ефективності роботи обладнання та його адаптації до складних виробничих завдань.

Механізми паралельної структури (МПС) за своєю будовою поділяються на дві основні категорії: механізми зі штангами змінної довжини і механізми зі штангами постійної довжини (рис. 4.4).



а – МПС зі штангами змінної довжини; б – МПС зі штангами постійної довжини

Рисунок 4.4 – Структурні схеми МПС [32]

Механізми паралельної структури (МПС) зі штангами змінної довжини включають біпод, трипод, пентапод і гексапод. До МПС зі штангами постійної

довжини належать біглайд, триаглайд, ортоглайд, гексаглайд, дельта та ножиці. Управляючи довжиною або положенням штанг постійної довжини, можна орієнтувати рухомий блок у просторі відповідно до заданих координат.

В ЛТО з МПС рухомий блок може бути поєднаний із заготовкою, пристроєм фокусування, сканатором або, в деяких випадках, навіть із випромінювачем технологічного лазера. МПС вирізняються різноманітністю кінематичних схем, методів перетворення рухів, ступенів свободи, а також конструктивних і компоновочних рішень.

У лазерному технологічному обладнанні з МПС виконавчий орган може мати до шести ступенів свободи, що дає змогу формувати складні поверхні деталей. Для кожного технологічного завдання важливо обрати оптимальну кількість маніпуляційних рухів виконавчого органу та необхідну кількість ступенів свободи, які відповідають вимогам обробки. Це дозволяє збалансувати складність конструкції, продуктивність і точність обладнання.

Одним із недоліків ЛТО з механізмами паралельної структури є порівняно невелика робоча зона відносно загальних габаритів обладнання. Це обмеження стає критичним при обробці великогабаритних деталей зі складними поверхнями. Для таких задач доцільно використовувати ЛТО, блоки яких з'єднані між собою за послідовно–паралельною схемою.

Склад такого ЛТО включає технологічний лазер, 2-координатний портальний маніпулятор, МПС, двовісний сканатор, волоконно-оптичну систему передачі лазерного пучка від випромінювача до сканатора, систему керування та систему технічного діагностування. У цій конфігурації портальний маніпулятор забезпечує переміщення МПС по двом координатам, тоді як рухомий блок МПС з'єднаний із двовісним сканатором. Це поєднання дозволяє забезпечити точність і гнучкість обробки великогабаритних деталей, розширюючи можливості ЛТО (рис. 4.5).

Для виконання розмітки конструктивної інформації сканатор переводиться в режим фокусування, а механізм паралельної структури програмно встановлюється в положення, яке забезпечує перпендикулярне спрямування лазерного променя до поверхні розмітки. Портальний маніпулятор здійснює переміщення МПС зі

сканатором по координатах X і Y . Для нанесення символної інформації сканатор переводиться в режим сканування, а порталний механізм переміщує МПС і сканатор до зони нанесення [32].

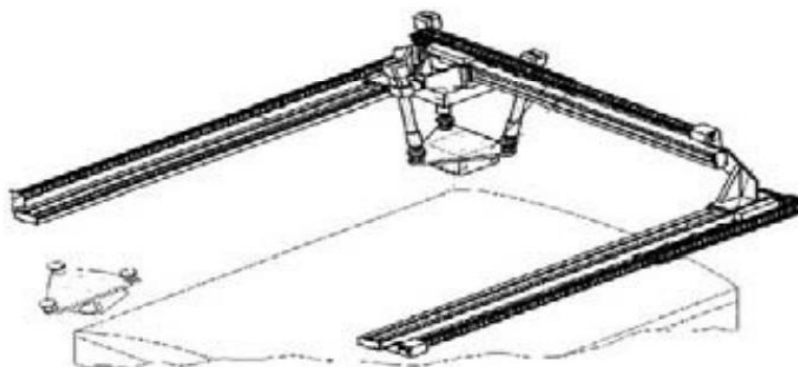
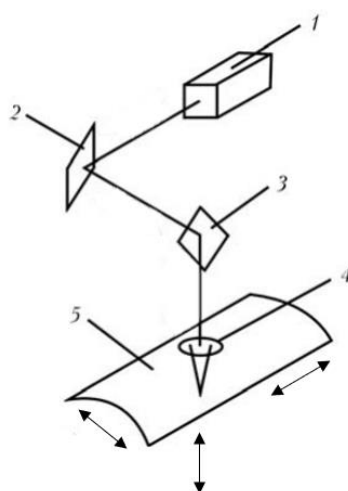


Рисунок 4.5 – ЛТО для розмітки поверхні складної форми [32]

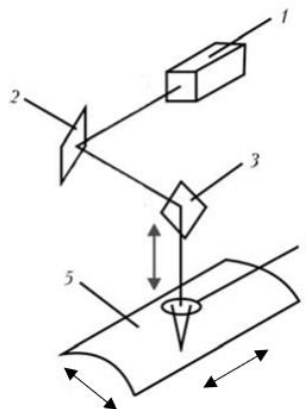
Компоновка $YXZOLFzv$ набула популярності завдяки своїй конструктивній особливості: випромінювач і фокусуючий пристрій закріплені на стаціонарному блоці, тоді як усі координатні переміщення виконуються блоками, що працюють із заготовкою (рис. 4.6). Такий підхід забезпечує ефективність і точність роботи лазерних установок.



1 – випромінювач лазера; 2 – 3 – поворотні дзеркала; 4 – лінза; 5 – заготовка

Рисунок 4.6 – Координатна компоновка $YXZOLFzv$ 3-координатного ЛТО

Компоновки $YFXOLzv$ та $OLXYFzv$, де фокусуючий пристрій є рухомим, широко використовуються для обробки великогабаритних заготовок (рис. 4.7).



1 – випромінювач лазера; 2 – 3 – поворотні дзеркала; 4 – лінза; 5 – заготовка

Рисунок 4.7 – Координатні компоновки $YFXOLzv$ та $OLXYFzv$
З-координатного ЛТО

Очевидно, що компоновка $YXZOLFzv$ є найбільш придатною для реалізації розробленої комбінованої технології лазерної різки. Вона дозволяє ефективно здійснювати як процес лазерного різання, так і подальшу обробку кромek, використовуючи координатний стіл лазерного комплексу для виконання обох операцій. Така організація забезпечує високу точність, спрощення робочого процесу і скорочення часу на переналаштування обладнання.

4.2 Розрахунок та проектування фокусуючої системи для газолазерної різки металів

Серед основних технічних викликів при створенні лінзових систем фокусування лазерного випромінювання є забезпечення оптимальної модової структури пучка, вибір відповідної фокусуючої лінзи та точна локалізація фокусу відносно поверхні заготовки. Для вирішення цих завдань було обрано лазер, який генерує одномодові пучки. Це дозволяє досягти необхідного рівня фокусування

випромінювання, забезпечуючи високу точність і ефективність процесу лазерного різання [33].

Вибір фокусуючої лінзи для лазерних систем залежить від необхідності мінімізувати сумарний радіус плями фокусування, який визначається як

$$r_0 = r_d + r_a = \theta \cdot F + a_{min} \cdot F \left(\frac{d}{F}\right)^3, \quad (4.2)$$

де r_d – радіус, зумовлений дифракцією;

r_a – радіус, викликаний сферичною аберацією;

F – фокусна відстань;

d – діаметр сфокусованого пучка,

a_{min} – мінімальний абераційний коефіцієнт.

Мінімальний абераційний коефіцієнт визначається формулою

$$a_{min} = \frac{n}{256} \frac{4n-1}{(2+n)(n^2-1)}, \quad (4.3)$$

де n – показник заломлення матеріалу лінзи.

Для зменшення сферичної аберації також враховується відношення радіусів кривизни поверхонь лінзи:

$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{(2n^2 - n - 4)}{(2n + 1)}. \quad (4.4)$$

Оптимальне значення фокусної відстані F_{opt} та мінімальний можливий радіус сфокусованого пучка r_{min} визначаються такими формулами:

$$F_{opt} = \left(\frac{2a_{min}}{\theta}\right)^{\frac{1}{3}}, \quad (4.5)$$

$$r_{min} = \frac{3}{2\theta F_{opt}}. \quad (4.6)$$

Для лінзи, виготовленої з оптичного скла крон (КО) з показником заломлення $n=1,47$, яка фокусує пучок діаметром $d=22$ мм з розбіжністю $\theta=1,5$ мрад, оптимальна фокусна відстань складає:

$$a_{min} = 10,134 \cdot 10^{-3};$$

$$F_{opt} = 62,12 \approx 62 \text{ мм.}$$

Мінімальний радіус сфокусованого пучка:

$$r_{min} = 0,1613 \approx 0,16 \text{ мм.}$$

У параметрах технологічного процесу зазначено, що радіус сфокусованого пучка повинен знаходитися в межах від 0,2 до 0,4 мм, залежно від товщини оброблюваної заготовки. Відповідно, фокусна відстань обраної фокусуючої лінзи повинна бути в діапазоні $95,0 \text{ мм} < F < 190,0 \text{ мм}$. В нашому випадку застосовано фокусуючу лінзу з $F = 200,0 \text{ мм}$.

На основі виконаних розрахунків було спроектовано фокусуючу систему для газолазерного різання металів, креслення якої представлено в додатку А. Розроблена фокусуюча система повністю відповідає зазначеним розрахунковим вимогам.

Специфікація до приведенного складального креслення фокусуючої системи для газолазерного різання розміщена в додатку Б.

5 МОЖЛИВОСТІ МОДЕРНІЗАЦІЇ ЛАЗЕРНИХ ТЕХНОЛОГІЧНИХ КОМПЛЕКСІВ ДЛЯ РІЗКИ МЕТАЛІВ ПІД КОМБІНОВАНУ ОБРОБКУ

5.1 Особливості підбору лазерного технологічного обладнання для різання металів з подальшою обробкою крайок різів

Лазерні технологічні комплекси (ЛТК) мають унікальні конструктивні особливості, які відрізняють їх від інших видів обладнання для обробки матеріалів. Основою компоновки ЛТК є кінематична структура, яка визначається сукупністю відносних рухів лазерного променя та оброблюваної заготовки, необхідних для формування заданої поверхні деталі. Також компоновка враховує додаткові рухи та зв'язки між блоками, що впливають на її функціональність.

Структура ЛТК зазвичай має блочний характер і включає один стаціонарний блок і кілька рухомих блоків. Блоки з'єднані лінійними або круговими направляючими й можуть розташовуватися як послідовно, так і паралельно [17].

Ключовими елементами в конструкції ЛТК є фокусуюча система та робочий стіл, на якому розміщується та утримує заготовка. Вони завжди розташовані на крайніх позиціях компоновки. Для створення складних просторових траєкторій ці крайні блоки з'єднуються послідовно, а для забезпечення одночасної роботи кількох фокусуючих систем можливе паралельне підключення.

Компоновки ЛТК можна описувати за допомогою структурних формул. Зазвичай вісь X спрямована вздовж осі випромінювача, вісь Y – перпендикулярно до неї, а вісь Z відповідає напрямку сфокусованого лазерного променя. У формулі компоненти компоновки записуються в послідовності їх розташування. Наприклад, стаціонарний блок (O), що включає випромінювач (L), розділяє рухи заготовки та блоку фокусування (F).

Ці особливості роблять ЛТК універсальними для виконання складних виробничих завдань і забезпечують гнучкість у створенні деталей з різними характеристиками.

Для різання матеріалів найчастіше використовуються двокоординатні лазерні установки, які складаються з двох рухомих блоків та одного стаціонарного,

з'єднаних послідовно [5, 32]. Ці установки оптимізовані для забезпечення ефективного та точного переміщення лазерного променя відносно поверхні оброблюваного матеріалу.

Для більшості розроблених ЛТК зазвичай обирається компонована схема, яка описується формулою $OLXYFzv$ [32]. У цій схемі випромінювач (L) розташовується нерухомо на стаціонарному блоці (O), а фокусуюча система (F) переміщується вздовж осей X та Y , виконуючи рухи над поверхнею заготовки. Вісь Z відповідає спрямуванню сфокусованого променя, а параметр v вказує на змінну швидкість руху.

Одним із прикладів широко застосовуваних ЛТК цієї компоновочної схеми є лазерний технологічний комплекс, зображений на рис. 5.1. Така структура забезпечує високу точність обробки, універсальність у створенні деталей складної геометрії та ефективне використання лазерного випромінювання для обробки різних матеріалів [34].



Рисунок 5.1. – Загальний вигляд комплексу серії MTech FL6020 6000 Вт для різки металів [34]

До одного із основних компонентів даного технологічного комплексу відноситься оптоволоконний лазер MTech FL6020 (Рис. 5.2).

Оптоволоконні лазери сьогодні є надзвичайно популярним і високоефективним обладнанням для різання металів. Вони використовуються для

обробки різних видів металів, таких як нержавіюча сталь, вуглецева сталь, алюмінієві листи, латунь, мідь, оцинковані пластини тощо.

На цей час оптоволоконні лазери широко застосовуються в різних галузях промисловості, зокрема у виробництві кухонного начиння, сталевих меблів, ліфтів і підйомників, автозапчастин, оборонній промисловості та інших сферах.



Рисунок 5.2. – Лазерні випромінювачі компанії Raucus – виробника потужних лазерних джерел [34]

Оптоволоконні лазери славляться своєю неперевершеною надійністю та високою ефективністю. Їхні ключові переваги включають ідеальну якість променю, високу надійність і тривалий експлуатаційний період, який перевищує 100 000 годин. Це робить їх оптимальним вибором для складних і тривалих технологічних процесів, таких як газолазерне різання металів.

Одним із ключових елементів конструкції лазерних технологічних комплексів, необхідним для виконання процесу газолазерного різання, є автоматична лазерна різальна головка з автофокусуванням (рис. 5.3). Вона забезпечує точну фокусну відстань для оптимального різання металів різної товщини, автоматично адаптуючись до змін характеристик оброблюваного матеріалу, що підвищує ефективність і якість процесу.



Рисунок 5.3 – Автоматична лазерна різальна головка з автофокусуванням [34]

Ріжуча головка з автофокусуванням оснащена вбудованим приводним механізмом, який використовує лінійний привід для точного регулювання положення фокусувальної лінзи. Ця лінза здатна автоматично змінювати своє положення в діапазоні 22 мм.

Користувач може легко встановлювати потрібний фокус у безперервному режимі через програмне забезпечення. Це дозволяє адаптувати різання до листів металу різної товщини, забезпечуючи переналаштування точки фокусу відносно товщини листа безпосередньо під час процесу обробки. Така функція значно підвищує точність, ефективність і зручність роботи лазерного обладнання, особливо для складних завдань.

Надійним є і пилонепроникний корпус лазерної різальної головки, що забезпечує її довговічність і здатність витримувати прискорення осей верстата до 50 м/хв, що значно підвищує ефективність процесу різання. Високоякісна оптика, виготовлена з дотриманням суворих стандартів якості, а також точний монтаж системи гарантують оптимальне формування лазерного променя. Це забезпечує його стабільне фокусування навіть за умов високої потужності лазерного випромінювання.

Завдяки автоматичному підтримуванню фокуса відносно поверхні заготовки, що розрізається, система забезпечує точний і миттєвий контроль відстані до оброблюваної поверхні, що критично важливо для досягнення високої точності різання та стабільності процесу. Така конструкція відповідає сучасним вимогам до технологій лазерної обробки, дозволяючи досягати максимальних результатів у виробничих процесах.

Це високопродуктивне обладнання для різання металу забезпечує високу швидкість, ефективність та зниження витрат на обробку. Воно підходить для різання широкого спектра матеріалів, таких як конструкційна та нержавіюча сталь, залізо, алюміній і мідь, у вигляді листів, труб або сталевих рулонів. Це обладнання широко застосовується в автомобільній промисловості, будівництві та інших галузях.

Товщина оброблюваних матеріалів варіюється від 0,5 мм до 50 мм залежно від типу металу та потужності волоконного лазера.

Станки серії MTech FL6020 для різання металу з волоконним лазером мають модульну конструкцію, яка дозволяє розширювати область обробки та зменшувати витрати на транспортування. Вони підтримують індивідуальні формати та контури деталей, які потрібно виготовити, забезпечуючи максимальну гнучкість у виробництві.

Максимальний формат обробки становить $2,5 \times 12,0$ м, а максимальна товщина листа – до 50 мм, що робить ці станки ідеальним вибором для широкого спектра виробничих потреб.

Станки для різання металу з волоконним лазером середньої та високої потужності забезпечують високу ефективність та економічність завдяки унікальним конструктивним рішенням. Зварювальна платформа станка має високу міцність і може розділятися на частини, що дозволяє транспортувати її у стандартних 20- або 40-тонних контейнерах. Це значно знижує витрати на транспортування, які становлять лише третину порівняно з перевезенням аналогічного обладнання.

Роздільна рама стола сприяє зменшенню навантаження на конструкцію станка, знижує розліт відходів під час різання, забезпечує високу точність роботи та дозволяє оптимізувати вагу завантаження. Система руху станка побудована за порталною кінематичною схемою, де лист залишається нерухомим, а рухомі елементи забезпечують точне позиціонування. Поле обробки має варіанти розмірів 2500×1250 мм або 3000×1500 мм, а лінійні приводи для координат X і Y разом із сервоприводом для координати Z гарантують стабільну та точну роботу.

Система ЧПУ, розроблена у США, дозволяє досягти високої точності позиціонування $\pm 0,01$ мм, а максимальна швидкість переміщення до 80 м/хв забезпечує швидку та продуктивну обробку. Така конструкція робить станки універсальними та надійними для виконання широкого спектра завдань.

Автоматична система видалення пилу та диму визначає місце лазерного різання, щоб забезпечити точний збір цих токсичних часток, не перекриваючи при цьому робочу зону. Це забезпечує повний контроль над такими відходами, збільшує всмоктування та максимально їх видаляє.

Замінний вогнестійкий листовий метал, з якого зроблений робочий стіл, зменшує ерозію від удару шлаку по конструкції станка, що підвищує термін служби цієї конструкції.

5.2 Розробка комбінованого способу лазерної різки металів з подальшою центрифужною дробоструменевою обробкою поверхні різів

Експериментальні результати підтвердили перспективність комбінованої технології лазерної різки з подальшою центрифужною дробоструменевою обробкою поверхні різів для впровадження у виробництво. Цей підхід не лише знижує шорсткість крайок різів і покращує їх структуру, але й створює стискаючі залишкові напруження в поверхневому шарі. У сукупності ці фактори суттєво підвищують функціональність деталей, виготовлених за такою технологією.

Для реалізації способу комбінованої обробки нами був запропонований наступний підхід до вирішення поставленої задачі. Процес розпочинається з

лазерного (або газолазерного) різання на технологічному комплексі, який оснащений лазерним випромінювачем, системою передачі лазерного випромінювання в зону різання, системою подачі допоміжного газу та координатним столом. Лазерне різання проводиться відповідно до традиційної технології, починаючи з наперед заданої початкової точки на заготовці. Потім здійснюється вирізання деталі за контуром, запрограмованим у системі керування лазерного верстата (рис. 5.4, а).

Після завершення етапу лазерного різання вирізана деталь встановлюється на координатний стіл станка з ЧПУ так, щоб залишалася на певній відстані від його поверхні. Це дозволяє уникнути обмежень для вільного переміщення вигладжувального інструмента під час обробки. Для забезпечення надійної фіксації деталь закріплюється на столі спеціальним тримачем.

Верстати з ЧПУ, оснащені сучасними системами управління, дозволяють точно спрямовувати інструмент вздовж заданої траєкторії, що забезпечує можливість обробки деталей складної форми.

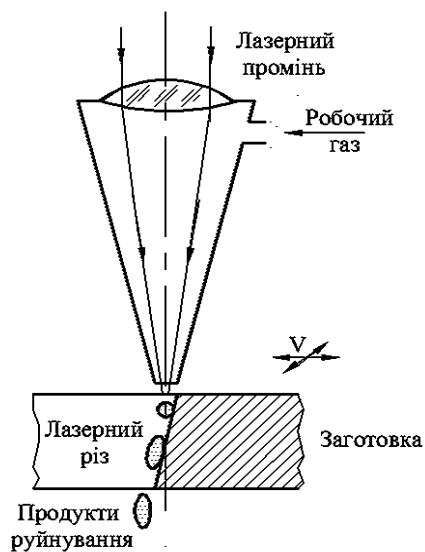
В точку початку контуру вирізаної деталі замість лазерного різача підводиться розроблений центрифужний дробоструменевий інструмент (рис. 5.4, б). Цей інструмент розташовується біля верхньої крайки деталі та притискується до поверхні лазерного різку із заздалегідь визначеним зусиллям вигладжування.

Далі інструмент переміщується по контуру вирізаної лазером деталі, але вже за іншою траєкторією. Ця траєкторія являла собою еквідистанту руху дробоструменевого інструменту, що проходив уздовж усього контуру деталі, забезпечуючи рівномірну обробку поверхні різку. Такий підхід дозволяє ефективно обробляти поверхні складної геометрії та підвищувати якість крайок лазерних різів.

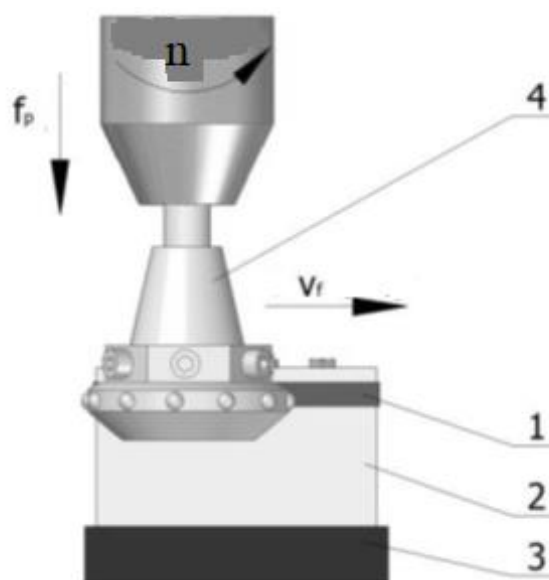
При розрахунку еквідистанти руху центрифужного дробоструменевого інструменту необхідно враховувати зміщення його осі відносно контуру вирізаної деталі. Це зміщення повинно компенсувати деформацію поверхні деталі, що виникає під час процесу вигладжування.

Після завершення одного обходу контуру деталі інструмент у початковій точці переміщувався від поверхні деталі вглиб різку на величину заздалегідь

визначеного покрокового інтервалу. Після цього обхід по еквідистанті повторювався.



а)



б)

а – операція лазерної різки (схема та фото обробки); б – операція вигладжування різку при використанні центрифужного дробеструменевого інструмента
1– вирізана лазером деталь; 2 – тримач цієї деталі; 3 – стіл станка для закріплення тримача з деталлю

Рисунок 5.4 – Комбінований спосіб лазерної різки металів з подальшою центрифужною дробеструменевою обробкою поверхні різів

Кількість таких обходів визначалась необхідністю забезпечення повного вигладжування поверхні різку по всій його глибині. Таким чином, обробка проводилася до досягнення заданої якості поверхні, забезпечуючи рівномірне вигладжування по всій глибині різку.

Результати експериментів із вигладжування поверхні лазерних різів за допомогою центрифугальної дробеструменевої обробки підтвердили можливість успішного застосування цього методу холодної обробки як окремої операції на верстатах з ЧПУ.

Розроблений спосіб комбінованої лазерної різки з подальшим центрифугальним дробеструменевим вигладжуванням поверхні різів дозволив удосконалити технологію лазерного різання. Застосування цього підходу забезпечує значне підвищення експлуатаційних властивостей деталей, вирізаних і оброблених за створеною комбінованою технологією. Це відкриває нові можливості для покращення якості обробки матеріалів і розширення сфер використання деталей, виготовлених за допомогою лазерної технології.

ВИСНОВКИ

1. Огляд основних характеристик лазерного випромінювання як інструмента для різки матеріалів показав, що лазери є складними пристроями, створення яких вимагає спеціалізованих знань. Через широкий спектр відмінностей лазери класифікують за спільними характеристиками. Широко використовуються можливості інтенсифікації процесу лазерної різки металів, наприклад, при використанні струменю рідини. Однак у таких випадках необхідно оцінювати співвідношення між технічними перевагами і виробничими витратами, щоб визначити доцільність використання методу.

2. Вивчення результатів досліджень можливостей методу поверхневого пластичного деформування для зміцнення оброблюваної поверхні виявило, що цей підхід ефективний для згладжування поверхні після лазерного різання. Використання цього методу як завершального етапу обробки дозволяє оптимізувати технологічний процес виготовлення деталей. Комбінування лазерного різання з додатковим застосуванням методу пластичного деформування відкриває перспективи для підвищення якості крайок лазерних різів при використанні центрифугального дробеструменевого вигладжуванням поверхні цих різів.

3. Експериментальне дослідження вдосконалення технології лазерного різання металів із застосуванням центрифугального дробеструменевого обробки поверхні різу показало, що цей додатковий етап сприяє зменшенню шорсткості поверхні в порівнянні з результатами, отриманими лише за допомогою лазера. Крім того, кулькове вигладжування викликає структурні зміни та формує стискаючі залишкові напруги в зоні різу. Усе це дозволяє створити деталі з більш досконалими експлуатаційними властивостями, ніж у тих, які виготовлені лише методом лазерного різання.

4. Проведений аналіз особливостей підбору лазерного технологічного обладнання для різання металів з подальшою обробкою крайок різів вигладжуванням. Розроблено схему вдосконалення лазерних технологічних

комплексів для комбінованої обробки, що включає лазерне різання та подальше вигладжування поверхонь вирізаних деталей. Завдяки модернізації комплексу стало можливим отримувати деталі з більш гладкою та зміцненою бічною поверхнею, що підвищує їхню стійкість до втоми. Вартість такої модернізації є в рази меншою за вартість самого лазерного технологічного комплексу.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Пупань Л. І. Лазерні технології у машинобудуванні : навч. посіб. [для студентів спеціальності «Прикладна механіка»] / Л. І. Пупань. – Харків: НТУ «ХПІ», 2020. – 109с.
2. Бобицький Я. В. Лазерні технології : навч. посіб. / Я. В. Бобицький, Г. Л. Матвійшин. – Львов: Вид-во “Львівська політехніка”, 2015. – 316 с.
3. Москалик В. М., Виборнов Д. О. Лазерні технології у промисловості. / В. М. Москалик // Шлях успіху і перспективи розвитку (до 26 річниці заснування Харківського національного університету внутрішніх справ). – Харків: Точка, 2020.– 353 с.
4. Тихомиров А. В. Технологія та обладнання для газолазерної різки тонколистових сталей /А. В. Тихомиров, Н. В. Евдокушкін, А. Ю. Михеєв. – К.: Зварювальне вир-во, 2009, №11, с.11–13.
5. Parandoush P. and Hossain A. A review of modeling and simulation of laser beam machining / P. Parandoush, A. Hossain. // International Journal of Machine Tools and Manufacture. – 2018, V. 85(1). – P.135–145.
6. Man H. C., Dynamic characteristics of gas jets from subsonic and supersonic nozzles for high pressure gas laser cutting / H. C. Man, J. Duan., T. M. Yue // Optics & Laser Technology. – 2018, V. 30. – P. 497 – 509.
7. Boujelbene M. Influence of the CO₂ laser cutting process parameters on the Quadratic Mean Roughness R_q of the low carbon steel. / M. Boujelbene // Procedia Manuf. – 2018, 20. – p. 259 – 264.
8. Yoon J. W. Realization of laser intensity over 10²³ W/cm² / J. W. Yoon, Y. G. Kim, W. Choi // Optica Vol. – 2021, 8. – P. 630 – 635.
9. Vilar R. Laser cladding. Journal Of Laser Applications / R. Vilar // Proc. Technol. – 1999, 11(2). – p. 64 –79.
10. Kaminski S. Ripplon laser through stimulated emission mediated by water waves / S. Kaminski , L. Martin, S. Maayani // Proc. Technol. – 2016, V.10. – p. 758 – 761.

11. Максимов С.Ю. Підвищення якості зварних з'єднань, виконаних під водою, за рахунок зовнішнього електромагнітного впливу / С. Ю. Максимов., О.М. Берднікова, О. О. Прилипко // Зварювання та технічна діагностика для відновлення економіки України: Тези допов. наук. конф. під ред. О.Т. Зельніченка. – Київ: Міжнародна Асоціація «Зварювання», 2022. – 70 с.
12. . Клименко К.В. Проектування системи для гідро-лазерної обробки / К. В. Клименко, Р. О. Жук, М. І. Анякін // Laser technologies in welding and materials processing: Proceedings of the Ninth International Conference / Edited by Prof. I. V. Krivtsun. - Київ: Міжнародна Асоціація «Зварювання», 2021. – 84 с.
13. Underwater Laser Welding/Cladding for High-performance Repair of Marine Metal Materials: A Review / G. Sun et al. Chinese Journal of Mechanical Engineering. 2022. Vol.35, no.1. URL:<https://doi.org/10.1186/s10033-021-00674-0> (date of access: 10.11.2024).
14. Кирилович В. А. Основи технологій обробки поверхонь деталей машин. / В.А.Кирилович, П.П.Мельничук, В.А.Яновський. – Житомир: Вид. О. О. Євенок, 2017. – 266 с.
15. Горохов В.А. Обробка деталей пластичним деформуванням / В.А. Горохов. – Киев: Техніка, 1978. – 192 с.
16. Бутаков Б.І. Дослідження та розробка технології обкатування кульками деталей сільгосподарської техніки / Б.І. Бутаков, В.Н. Шумілов // Ефективність реалізації наукового ресурсного та промислового потенціалу в сучасних умовах: зб. науков. праць. – К., 2019. – с. 222 – 223.
17. Шнейдер Ю.Г. Технологія фінішної обробки тиском / Ю.Г. Шнейдер. – К.: Техніка, 2008. – 414 с.
18. Бутаков Б.І. Дослідження та розробка технології обкатування кульками деталей сільгосподарської техніки / Б.І. Бутаков, В.Н. Шумілов // Ефективність реалізації наукового ресурсного та промислового потенціалу в сучасних умовах: Зб. науков. праць. – К., 2013. – с. 222 – 223.

19. Jarosz K. Effect of cutting speed on surface quality and , heat-affected zone in laser cutting of 316L stainless steel. / K. Jarosz, P. Löschner, P. Niesłony. – *Procedia Eng.*, 2016, V.149. – p. 155 –162.
20. Leone C , Heat-affected zone extension in pulsed Nd: YAG laser cutting of CFRP./ C. Leone, S. Genna, S. Compos. // Part B. – *Proc. Technol.*, 2018, V. 40. – p. 174 – 182.
21. Patidar D. The effect of CO₂ laser cutting parameter on Mechanical and Microstructural characteristics of high strength steel. / D. Patidar, R. Rana. – *Mater. Today Proc.*, 2018, V. 5.– p.17753–17762.
22. Yilbas, B.S. Laser cutting of thick sheet metals: Effects of cutting parameters on kerf size variations. / B.S. Yilbas / – *J. Mater. Proc. Technol.*, 2008, V. 201. – p. 285 – 290.
23. Richert M. Effect of unconventional methods of cutting on microstructure, topography and microhardness changes in steel. / M. Richert, T. Sak. – *Metall. Foundry Eng.*, 2012, V.38. – p.109 –115.
24. Boujelbene M. Effects of the laser cutting parameters on the micro–hardness and on the heat-affected zone HAZ of the mi–hardened steel. / M. Boujelbene, A. S. Alghamdi. – *J. Adv. Appl. Sci.*, 4, 2017/ – p. 19 – 25.
25. Jarosz K. Effect of cutting speed on surface quality and heat a_ected zone in laser cutting of 316L stainless steel. / K. Jarosz, P. Löschner, P. Niesłony. – *J. Procedia Eng.*, 149, 2016, 149, 2016. – p. 155 –1 62.
26. Koczylas A. Geometric structure of the C45 steel surface after centrifugal burnishing and perpendicular shot peening. / A. Skoczylas. - *Adv. Sci. Technol. Res. J.*, 12, 2018. – p. 20 – 28.
27. Korzynski M. Centreless burnishing and influence of its parameters on machining effects./ M. Korzynski, A.J. Pacana. – *Mater. Process. Technol.*, 210, 2010. – p. 1217–1223.
28. Nadolny K. Reciprocal internal cylindrical grinding integrated with dynamic centrifugal burnishing of hard–to–cut materials. / K. Nadolny, J. Plichta, M. Radowski. – *Proceed. Inst. Mech. Eng.* – 2015, 229. – p. 265–279.

29. Романенко В.В. Розробка способу газолазерної різки металів з подальшим вигладжуванням поверхні різів. / В. В. Романенко, О. Д. Кагляк, Є. В. Євсюкова // Технічні науки та технології : науковий журнал / Національний університет «Чернігівська політехніка». – Чернігів: НУ «Чернігівська політехніка», 2 (36), 2024. – с. 80 – 91.

30. Романенко В. В. Розробка технології газолазерної різки з вигладжуванням поверхні різів. / В.В. Романенко, О.Д. Кагляк, Є.В. Євсюкова. // Матеріали XXIV міжнародної науково– технічної конференції «Прогресивна техніка, технологія та інженерна освіта», м. Київ, 23 травня – 26 травня 2024, с.41 – 44.

31. Залюбовський М.Г. Машини та обладнання підприємства / М.Г. Залюбовський, В.В. Малишев. – К.: Техніка, 2010. – 357 с.

32. Кузнецов Ю.М. Компонівка верстатів з механізмами паралельної структури / Ю.М. Кузнецов, Д.А. Дмитрієв, Г. Ю. Диневич. – Херсон: ПП Вишнемірський В.С., 2009. – 456 с.

33. Основи проектування оптико–механічних вузлів: Методичні вказівки до практичних занять для студентів спеціальності 131 Прикладна механіка освітньо–професійної програми Лазерна техніка та комп'ютеризовані процеси фізико–технічної обробки матеріалів / Уклад. Дубнюк В. Л., – К.: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2019. – 83 стор.

34. Основні характеристики лазерного верстата для різання з волоконним лазером серії MTech FL6020 6000 Вт. URL: <http://abplanalp.ua.html> (дата звернення: 20.11.2024).

Technical drawing of a mechanical device, showing a side view, a top view, and a cross-section A-A.

Dimensions:

- Overall height: 608 max 518 mm
- Top view width: 200
- Top view depth: 168*

Part Numbers and Labels:

- 1, 2, 3, 4, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 28, 29, 30, 31, 32, 33, 34, 35, 36, 37, 38
- 6Φ-2 Гост 12172-74
- M68x2 H6/g6
- M60x15 H6/g6
- M62x15 H6/g6
- φ70 H6/f5
- M10x2 H8/g9
- φ80 H5/p5
- 32x2 H6/g6
- M38x2 H6/g6
- M24x2

Notes:

1. Фокусна відстань 200 мм.
2. Переміщення пристрою по осі z 100 мм.
2. * Розміри для справки

Table:

МДНТЗ1м0103.00.000				МДНТЗ1м0103.00.000	
Лист	Всього	Всього	Лист	Всього	Всього
1	1	1	1	1	1

Signature: МДНТЗ1м0103.00.000

Page: 11

Додаток Б

Специфікація на складальне креслення фокуруючої системи для газолазерної
різки металів

Перв. примен.		Формат	Зона	Поз.	Обозначение	Наименование	Кол.	Примечание
						Документація		
		A1			МДНТЗ1мп01.03.00.000.СК	Складальне креслення	1	
						Деталі		
				1	МДНТЗ1мп01.03.00.001	Корпус	1	
				2	МДНТЗ1мп01.03.00.002	Сопло	1	
				3	МДНТЗ1мп01.03.00.003	Трубка	1	
				4	МДНТЗ1мп01.03.00.004	Фіксатор	1	
				5	МДНТЗ1мп01.03.00.005	Упор	1	
				6	МДНТЗ1мп01.03.00.006	Стакан	1	
				7	МДНТЗ1мп01.03.00.007	Кільце	1	
				8	МДНТЗ1мп01.03.00.008	Кільце	1	
				9	МДНТЗ1мп01.03.00.009	Гайка	1	
				10	МДНТЗ1мп01.03.00.010	Втулка	1	
				11	МДНТЗ1мп01.03.00.011	Фланець	1	
				12	МДНТЗ1мп01.03.00.012	Шайба	1	
				13	МДНТЗ1мп01.03.00.013	Упор	1	
				14	МДНТЗ1мп01.03.00.014	Вісь	2	
				15	МДНТЗ1мп01.03.00.015	Направляюча	2	
				16	МДНТЗ1мп01.03.00.016	Лінза	1	
				17	МДНТЗ1мп01.03.00.017	Кільце	1	
				18	МДНТЗ1мп01.03.00.018	Гайка	1	
				19	МДНТЗ1мп01.03.00.019	Фланець	1	
				20	МДНТЗ1мп01.03.00.020	Упор	1	
		МДНТЗ1мп01.03.00.000.СК.						
		Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата		
		Разраб.	Евсюкова Е.В.					
		Пров.						
		Н.контр.						
		Утв.						
		Фокусуєчий пристрій					Лист	Лист
							1	2
							НТУУ "КПІ", ММІ, каф. ЛТФТТ	
		Копіював					Формат А4	

