

Черкаський державний технологічний університет

Міністерство освіти і науки України

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

Прусс Максим Романович

УДК 621.9.048.4

ДИСЕРТАЦІЯ

ТЕХНОЛОГІЧНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ МАКСИМАЛЬНОЇ ПРОДУКТИВНОСТІ ГАЗОЛАЗЕРНОГО РІЗАННЯ ЛЕГОВАНИХ СТАЛЕЙ ВИПРОМІНЮВАННЯМ ПОТУЖНИХ ОПТОВОЛОКОННИХ ЛАЗЕРІВ

131 – Прикладна механіка

Подається на здобуття наукового ступеня доктора філософії

Дисертація містить результати власних досліджень.
Використання ідей, результатів і текстів інших авторів
мають посилання на відповідне джерело

_____ М. Р. Прусс

Науковий керівник:

Осипенко Василь Іванович,

доктор технічних наук, професор

Черкаси – 2025

АНОТАЦІЯ

Прусс М.Р. – Технологічне забезпечення максимальної продуктивності газолазерного різання легованих сталей випромінюванням потужних оптоволоконних лазерів – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 131 Прикладна механіка – Черкаський державний технологічний університет Міністерства освіти та науки України, Черкаси, 2025.

Різання нержавіючих сталей різної товщини за допомогою потужних оптоволоконних лазерів сьогодні достатньо широко використовується промисловими підприємствами України. Виробники, які використовують у своєму виробництві дану технологію, особливо зацікавлені в досягненні високої якості різання, щоб можна було виключити повторну обробку відрізаних деталей, високої швидкості різання для максимізації продуктивності та доброї відтворюваності процесу. Таким чином технічні та економічні критерії, що впливають на вибір відповідної лазерної системи для конкретного лазерного різання, зараз набувають великого значення. Підвищення ефективності процесу, якості та гнучкості допомагають зменшити витрати. Провідний виробник лазерних технологічних установок в Україні компанія «Араміс» започаткувала випуск лінійки установок, укомплектованих оптоволоконними лазерами потужністю 12 кВт. Публікацій присвячених дослідженням режимів газолазерного різання нержавіючих сталей з використанням такої потужності відносно небагато. Окрім того принципи та результати наведені в відомих наукових публікаціях не завжди можна визнати достатньо експериментально обґрунтованими. Навіть конкретні технологічні рекомендації надані відомими дослідницькими центрами, за використання підприємствами України, вимагають від українських виробників лазерних технологічних установок суттєвої корекції.

Це стосується як продуктивності процесу так і якості бокової поверхні. Ефективна корекція можлива лише як результат добре спланованих, системних експериментальних досліджень процесу газолазерного різання нержавіючих сталей та встановленням конкретних технологічних умов, що забезпечують високу продуктивність процесу за відповідної вимогам споживача якості бокових поверхонь. Сукупність представлених у дисертації результатів експериментальних та теоретичних досліджень становить нове вирішення актуальної науково-технічної задачі підвищення ефективності технологічного забезпечення процесів розкроювання листової нержавіючої сталі випромінюванням оптоволоконного лазера потужністю 12 кВт, спрямованого на досягнення максимальної продуктивності різання за заданої якості поверхонь отриманих деталей та високого рівня відтворюваності процесу.

У *вступі* представлена загальна характеристика дисертаційної роботи, обґрунтовано її актуальність, сформульовано мету та задачі наукового дослідження, предмет та об'єкт, наведено наукову новизну та практичне значення отриманих результатів.

Перший розділ роботи присвячений розгляду стану проблем та оцінці факторів, що мають вплив на процес та результати газолазерного різання нержавіючих сталей. Проведений детальний аналіз механізмів впливу вихідної потужності та гаусового розподілу інтенсивності випромінювання, хімічного складу найбільш використовуваних в технологіях газолазерного різання легованих сталей, фокусної відстані об'єктива та положення фокусу відносно поверхні деталі, стану поверхні металу, типу асистуючого газу, конструкція сопла та величини зазору між соплом та металом на процеси плавлення та видалення розплаву з зони обробки. Розглянуто відомі підходи до оптимізації локалізації лазерного випромінювання та ширини різання.

У *другому розділі* представлено розроблені та підібрані методики та обладнання для реалізації комплексу експериментальних досліджень процесів газолазерного різання нержавіючих сталей. Наведено оригінальні

конструкції пристрою для точного вимірювання профілю поверхні різку та зонду для реєстрації поля ріжучого тиску асистуючого газу в зоні різання. Запропоновані методики оцінки впливу параметрів факторного простору на продуктивність на якість різання, узгоджені з вимогами стандарту ISO 9013:2017.

Третій розділ присвячений експериментальним дослідженням аеродинамічної взаємодії між струменем асистуючого газу і деталлю, що формує так званий ріжучий тиск, який в основному і обумовлює характер видалення розплаву з зони різання. Представлені результати комплексу системних досліджень дозволили отримати масив експериментальних даних, та виявити закономірності впливу внутрішньої структури та розмірів сопла, манометричного тиску всередині сопла, величини зазору між соплом деталлю на геометрію сформованого струменя асистуючого газу (повітря і азот) та величини ріжучого тиску в довільному його перетині при гальмуванні на поверхні деталі. Вперше отримані точні чисельні дані про параметри полів ріжучого тиску, які формуються найбільш масовими соплами компанії Thermacut. Це дозволило зробити більш точним та ефективним проектування процесів газолазерного різання максимальної продуктивності, за рахунок точного прогнозування величини ріжучого тиску, який створить газовий струмінь обраного сопла в конкретних технологічних умовах. Відповідно створено умови для більш надійного забезпечення продуктивного високоякісного різання та підвищення рівня відтворюваності процесу. Наведені результати експериментальної верифікації підтвердили досить добру кореляцію між ріжучим тиском гальмування асистуючого газового струменя та максимальною швидкістю і якістю газолазерного різання нержавіючої сталі.

В четвертому розділі наведено результати системного комплексу досліджень по встановленню режимів та умов максимальної продуктивності різання нержавіючих сталей без втрати заданої якості обробки за використання в якості асистуючих газів азоту та повітря. Встановлено діапазони

збалансованих параметрів лазерного променю та лазерного процесу при різанні листової нержавіючої сталі стандартного ряду товщин випромінюванням оптоволоконного лазера потужністю 12000 Вт з використанням в якості асистуючих газів азоту та повітря. Обґрунтовані режими забезпечують високу продуктивність та кількісний контроль за параметрами якості різу, які відповідають вимогам стандарту ISO 9013:2017. Виявлено рівень впливу типу асистуючого газу на продуктивність та якість різання. Використовуючи ліцензійний пакет Statistica виконано статистичний аналіз отриманого експериментального матеріалу та розроблено три регресійні моделі, які встановлюють залежність максимальної шорсткості поверхні різання (Y) від базових факторів процесу: тиску асистуючого газу (Z1-азот), положення фокусу відносно поверхні листа (Z2), швидкості різання (Z3) при обробці 12 мм нержавіючої сталі AISI 304. Перевірка отриманих моделей за критеріями Стюдента та Фішера підтвердила їх інформативність та адекватність. Виконане порівняння моделей показало, що найвищі точність і адекватність має регресійна інтелектуальна модель MLP-3-23-1, що створена на основі штучних нейронних мереж, за методом SANN Regression with Deployment. Розрахункова похибка прогнозу за моделлю не перевищує 0,0728 %.

Отримані результати покладені в основу технологічної інструкції до серійних верстатів моделі AFX-PRO-12000-1530LD. Проведена експериментальна верифікація підтвердила добру відтворюваність наданих режимів. Відхилення параметрів якості від табличних значень не перевищувало 5%. Матеріали розділу можуть слугувати підґрунтям для трибологічних досліджень поверхонь, отриманих лазерним різанням з використанням в якості одного з вхідних параметрів кривої коефіцієнта стійкості Еббота-Файрстоуна.

Ключові слова: *оптоволоконний лазер, газолазерне різання, лазерний промінь, положення фокусу, тиск асистуючого газу, сопло, шорсткість поверхні, допуск перпендикулярності, нержавіюча сталь.*

ABSTRACT

Pruss M.R. – Technological provisions for maximum productivity cutting alloyed steels with gas laser by radiation of powerful fiber optic lasers with an electrode – Qualification research work printed as a manuscript.

Dissertation for the degree of Doctor of Philosophy in specialty 131 Applied Mechanics – Cherkasy State Technological University of the Ministry of Education and Science of Ukraine, Cherkasy, 2025.

Cutting stainless steels of varying thicknesses using high-power fiber optic lasers is being widely applied across industrial enterprises in Ukraine. Manufacturers employing this technology are particularly focused on achieving high cutting quality, specifically, eliminating the need for secondary processing of parts along with high cutting speeds to maximize productivity and ensure reliable process reproducibility. Thus, the technical and economic criteria influencing the selection of an appropriate laser system for a specific cutting task have gained significant importance. Enhancements in process efficiency, quality, and flexibility directly contribute to cost reduction. In this context, Aramis, the leading Ukrainian manufacturer of laser processing systems, has launched a series of installations equipped with 12 kW fiber lasers.

Despite the increasing relevance of this technology, relatively few scholarly works have addressed the parameters of gas-assisted laser cutting of stainless steels using lasers of this power level. Furthermore, the principles and findings presented in existing literature often lack sufficient experimental validation. Even specific technological recommendations proposed by recognized research centers require substantial adaptation when applied within the Ukrainian industrial context, particularly concerning process productivity and the quality of the cut side surfaces. Effective adaptation is only feasible through well-planned, systematic experimental investigations into the gas-assisted laser cutting of stainless steels. These studies are essential for identifying precise technological parameters that enable high cutting productivity while ensuring that the quality of the side surfaces

meets the consumers' requirements. The set of experimental and theoretical findings presented in this dissertation offers a novel solution to the current scientific and technical challenge of increasing the technological performance of stainless steel sheet cutting using 12 kW fiber laser radiation. The work is directed toward achieving optimal cutting productivity, surface quality consistent with the requirements, and a high degree of process reproducibility.

The *introduction* presents a general overview of the dissertation, justifies its relevance, formulates the aim and the objectives of the research, its subject and object, and presents the scientific novelty and practical significance of the results obtained.

Chapter 1 outlines the state of the problem and assesses the factors that influence the process and results of gas-assisted laser cutting of stainless steels. The chapter provides a detailed analysis of the mechanisms explaining how the output power and Gaussian radiation intensity distribution, the chemical composition of the most commonly used alloy steels in gas laser cutting technologies, the focal length of the lens and the focus position relative to the part's surface, the condition of the metal surface, the type of assist gas, the nozzle design and the size of the gap between the nozzle and the metal influence the melting processes and removal of the melt from the processing zone. Known approaches to optimizing the localization of laser radiation and the cutting width have been considered.

Chapter 2 describes the methods and equipment developed and selected to conduct a comprehensive series of experimental studies on the gas-assisted laser cutting of stainless steels. The chapter introduces original designs, including a device for high-precision measurement of the cut surface profile and a probe for recording the pressure field of the assist gas within the cutting zone. Additionally, methods are proposed for evaluating the influence of factor space parameters on cutting productivity and quality. These methods are aligned with the requirements of the ISO 9013:2017 standard, ensuring the reliability and standardization of the results.

Chapter 3 focuses on experimental investigations of the aerodynamic interaction between the assist gas jet and the workpiece, which generates the so-called cutting pressure, a key factor influencing the mechanism of molten material removal from the cutting zone. The systematic experimental studies conducted yielded an array of experimental data and revealed patterns governing the effects of nozzle internal geometry and dimensions, internal gauge pressure, and the standoff distance between the nozzle and the workpiece on the shape of the assist gas jet (using air and nitrogen) and the distribution of cutting pressure across arbitrary cross-sections during jet impingement. For the first time, accurate numerical data were obtained on the parameters of cutting pressure fields formed by the most commonly used nozzles manufactured by Thermacut. These findings significantly improve the accuracy and effectiveness of designing high-productivity gas laser cutting processes by enabling precise prediction of the cutting pressure generated by a given nozzle under specific technological conditions. As a result, the reliability of achieving efficient, high-quality cutting and enhanced process reproducibility has been substantially increased. Experimental validation confirmed a fairly strong correlation between the braking-induced cutting pressure of the assist gas jet and the maximum achievable cutting speed and quality in the laser cutting of stainless steel.

Chapter 4 presents the results of a comprehensive and systematic study aimed at identifying the optimal modes and conditions ensuring maximum productivity of cutting stainless steels while maintaining the specified processing quality, using nitrogen and air as assist gases. The study establishes balanced parameter ranges for the laser beam and the overall laser cutting process for standard sheet stainless steel thicknesses, using 12,000W fiber laser radiation. The validated cutting modes ensure both high productivity and quantitative control over quality parameters, in accordance with the ISO 9013:2017 standard. The influence of the assist gas type on cutting productivity and surface quality was also quantitatively assessed. Using the licensed Statistica software package, statistical analysis of the experimental data was carried out, resulting in the development of

three regression models describing the dependence of the maximum surface roughness (Y) on the primary process factors: assist gas pressure (Z1-nitrogen), laser focus position relative to the sheet surface (Z2), and cutting speed (Z3), in the processing of 12 mm AISI 304 stainless steel. Model verification using the Student and Fisher criteria confirmed both their statistical significance and adequacy. Among the models developed, the highest accuracy and predictive performance were achieved by the intelligent regression model MLP-3-23-1, based on artificial neural networks and created using the SANN Regression with Deployment method. The model's estimated prediction error does not exceed 0.0728%.

The results obtained formed the basis for developing technological guidelines for the serial production machines of the AFX-PRO-12000-1530LD model. Experimental validation confirmed a high level of reproducibility of the recommended cutting modes, with deviations in quality parameters from the reference values not exceeding 5%. Additionally, the findings of this study may serve as a foundation for future tribological investigations of laser-cut surfaces, using the Abbott–Firestone bearing area curve as one of the key input parameters for evaluating surface stability.

Keywords: fiber laser, gas-assisted laser cutting, laser beam, focus position, assist gas pressure, nozzle, surface roughness, perpendicularity tolerance, stainless steel.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Статті у наукових виданнях, включених до переліку наукових фахових видань України

1. V. I. Osypenko. The influence patterns of nozzle design and technological parameters of gas-assisted laser cutting on the stagnant pressure of assisting gas / V. I. Osypenko, O. P. Plakhotnyi, S. P. Serediuk, M. R. Pruss, O. V. Timchenko // Bulletin of Cherkasy State Technological University, 3/2023 P 156-167. DOI: 10.24025/2306-4412.3.2023.288972. <http://vtn.chdtu.edu.ua/article/view/288972>

Здобувач виконав підбір і налаштування експериментального обладнання для дослідження процесів газолазерного різання, провів серію вимірювань параметрів тиску асистуючого газу в різних умовах роботи сопел, а також обробив експериментальні дані з використанням сучасних методів статистичного аналізу. Крім того, він брав активну участь у формулюванні висновків дослідження та підготовці графічних матеріалів до публікації.

2. В.І. Осипенко. Експериментальне обґрунтування ефективних режимів різання сталей випромінюванням потужного оптоволоконного лазера / В.І. Осипенко, О.П. Плахотний, М.Р. Прусс, С.П. Середюк // Міжвузівський збірник «НАУКОВІ НОТАТКИ». Луцьк, 78/2024 Ст 100-108. DOI 10.36910/775.24153966.2024.78.14.

https://eforum.lntu.edu.ua/index.php/naukovi_notatky/article/view/1569 .

Здобувач був залучений до розробки програми експериментальних досліджень, зокрема – до вибору основних технологічних параметрів лазерного різання. Він безпосередньо виконував натурні випробування на обладнанні з оптоволоконним лазером, здійснював вимірювання якості оброблених зразків відповідно до стандарту ISO 9013:2017, а також проводив первинну обробку та систематизацію результатів. Крім того, аспірант брав участь у підготовці текстових і графічних матеріалів до публікації.

3. В.І. Осипенко. Вплив внутрішньої структури та розмірів типових сопел на поле ріжучого тиску асистуючого газу при газолазерному різанні / В.І. Осипенко, М.Р. Прусс // Міжвузівський збірник «НАУКОВІ НОТАТКИ». Луцьк, 79/2024 Ст 70-78. DOI 10.36910/775.24153966.2024.79.10

Здобувач проводив експериментальні дослідження на модернізованому стенді, здійснював калібрування вимірювального обладнання, аналізував розподіл тиску по площині різу. Крім того, здобувач долучився до формулювання частини аналітичних висновків дослідження.

4. В.І. Осипенко. «Розробка регресійних моделей для розрахунку ефективних режимів різання 12 мм нержавіючої сталі випромінюванням потужного оптоволоконного лазера» / В.І. Осипенко, М.Р. Прусс // Міжвузівський збірник «НАУКОВІ НОТАТКИ». Луцьк, 81/2025 Ст 85-94. DOI 10.36910/775.24153966.2024.79.10

Здобувач виконав обробку експериментальних даних для побудови регресійних моделей, що описують залежність якості різу та швидкості обробки від основних технологічних параметрів (потужність, швидкість різу, тиск асистуючого газу). Він застосував методи багатofакторного регресійного аналізу з використанням програмного забезпечення Statistica, провів перевірку адекватності моделей та оцінку впливу вхідних змінних. Крім того, здобувач долучився до інтерпретації отриманих результатів та оформлення графіків і таблиць для публікації.

Матеріали й тези конференції

5. В.І. Осипенко «Технологічне забезпечення якісного газолазерного різання 12 мм нержавіючої сталі» / О.П. Плахотний, М.Р. Прусс, С.П. Середюк // XV міжнародна науково-практичної конференція «Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем» Том 1 22 - 23 травня 2025 р. м. Чернігів С.82-83

Здобувач виконав математичну обробку результатів експерименту.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	15
РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ БАЗОВИХ ФАКТОРІВ ПРОЦЕСУ ГАЗОЛАЗЕРНОГО РІЗАННЯ ЛЕГОВАНИХ СТАЛЕЙ ВИПРОМІНЮВАННЯМ ПОТУЖНИХ ОПТОВОЛОКОННИХ ЛАЗЕРІВ	22
1.1 Поглинання випромінювання оптоволоконних лазерів металами.....	22
1.2 Роль асистуючого газу в технологіях газолазерного різання металів.....	25
1.3 Факторний простір, що впливає на продуктивність та якість газолазерного різання металів.....	26
1.3.1 Хімічний склад найбільш використовуваних в технологіях газолазерного різання легованих сталей	30
1.3.2 Вихідна потужність та гаусовий розподіл інтенсивності випромінювання.....	32
1.3.3 Фокусна відстань об'єктива та положення фокусу відносно поверхні деталі.....	36
1.3.4 Стан поверхні металу, конструкція сопла та величина зазору між соплом та металом.....	37
1.4 Підходи до оптимізації локалізації лазерного випромінювання та ширини різання.....	40
1.5 Аналіз умов і результатів газолазерного різання легованих сталей...	43
1.5.1 Основні вимоги до газолазерного різання легованих сталей.....	43
1.5.2 Характерні особливості газолазерного різання легованих сталей.....	46
1.5.3 Оцінка впливу типу асистуючого газу на продуктивність та якість газолазерного різання легованих сталей	52
1.6 Висновки за розділом 1.....	55
РОЗДІЛ 2 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ОБЛАДНАННЯ І МЕТОДИ ПРОВЕДЕННЯ ДОСЛІДЖЕНЬ.....	58

2.1. Експериментальна база досліджень та оцінка достовірності результатів.....	58
2.1.1 Технічні характеристики верстата для різання металів випромінюванням потужного оптоволоконного лазера.....	58
2.1.2 Товщини та хімічний склад зразків легованих сталей, що використовувалися при проведенні досліджень.....	63
2.2 Методики експериментальних досліджень.....	66
2.2.1 Методи оцінки достовірності результатів вимірювань.....	66
2.2.2 Методики експериментальних досліджень параметрів струменя асистуючого газу в зоні різання.....	67
2.2.3 Прилади, пристосування та методики досліджень зразків поверхонь легованих сталей отриманих при різанні випромінюванням потужних оптоволоконних лазерів.....	73
2.2.3.1 Визначення параметрів мікрогеометрії досліджуваних зразків.....	74
2.2.3.2 Методика вимірювання ширини різу.....	76
2.2.3.3 Методика візуальної оцінки параметрів поверхні різання.....	77
2.2.3.4 Засоби та методика визначення відхилення поверхні різу від перпендикулярності.....	79
2.3 Висновки за розділом 2.....	81
РОЗДІЛ 3 ЗАКОНОМІРНОСТІ ВПЛИВУ КОНСТРУКЦІЇ СОПЛА, ТИПУ ГАЗУ ТА ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ГАЗОЛАЗЕРНОГО РІЗАННЯ НА ПАРАМЕТРИ РІЖУЧОГО ТИСКУ АСИСТУЮЧОГО ГАЗУ В ЗОНІ ОБРОБКИ	82
3.1. Результати експериментальних досліджень впливу внутрішньої структури, геометричних розмірів сопла на ріжучий тиск асистуючого газу на вісі струменя.....	82
3.2 Особливості формування розподілу тиску асистуючого газу по поперечному перерізу струменя	89

3.3	Експериментальна верифікація впливу ріжучого тиску на продуктивність та якість газолазерного різання легованої сталі.....	91
3.4	Висновки за розділом 3.....	96
РОЗДІЛ 4	ОБГРУНТУВАННЯ РАЦІОНАЛЬНИХ РЕЖИМІВ ГАЗОЛАЗЕРНОГО РІЗАННЯ ЛЕГОВАНИХ СТАЛЕЙ.....	98
4.1.	Результати повнофакторного експерименту по визначенню рівня вагомості факторів, що обумовлюють продуктивність та якість газолазерного різання нержавіючої сталі.....	98
4.2.	Результати експериментальних досліджень по встановленню режимів та умов максимальної продуктивності різання без втрати заданої якості обробки за використання в якості асистуючого газу повітря.....	102
4.3	Результати експериментальних досліджень по встановленню режимів та умов максимальної продуктивності різання без втрати заданої якості обробки за використання в якості асистуючого газу азоту.....	108
4.4	Математична статистична модель газолазерного різання 12 мм нержавіючої сталі	114
4.5.	Висновки за розділом.....	125
	ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ.....	128
	СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	131

ВСТУП

Актуальність теми. В умовах сьогодення з розвитком сучасних технологій в галузі машинобудування різання нержавіючих сталей різної товщини за допомогою потужних оптоволоконних лазерів достатньо широко використовується промисловими підприємствами України. Накопичена компанією «Араміс» за останні 5 років статистика показує, що досить високі вимоги до продуктивності процесу та шорсткості бокової поверхні є найбільш затребуваним промисловістю сучасної України. Виробники, які використовують у своєму виробництві дану технологію, особливо зацікавлені в досягненні високої якості різання, щоб можна було виключити повторну обробку відрізаних деталей, високої швидкості різання для максимізації продуктивності та доброї відтворюваності процесу. Вимоги по шорсткості, як правило, включають обмеження висоти мікронерівностей та виключення наявності застиглої рідкої фази у вигляді ґрату. В окремих випадках вводяться обмеження на конусність бокових поверхонь та різницю ширини різку в верхній та нижній площинах поперечного перетину поверхні різання відповідно до вимог стандарту ISO 9013:2017.

Таким чином технічні та економічні критерії, що впливають на вибір відповідної лазерної системи для конкретного лазерного різання, зараз набувають великого значення. Підвищення ефективності процесу, якості та гнучкості допомагають зменшити витрати. Провідний виробник лазерних технологічних установок в Україні компанія «Араміс» започаткувала випуск лінійки установок, укомплектованих оптоволоконними лазерами потужністю 12 кВт. Публікацій присвячених дослідженням режимів газолазерного різання нержавіючих сталей з використанням такої потужності відносно небагато. Окрім того принципи та результати наведені в відомих наукових публікаціях не завжди можна визнати достатньо експериментально обґрунтованими. Навіть конкретні технологічні рекомендації надані відомими дослідницькими центрами, за використання підприємствами

України, вимагають від українських виробників лазерних технологічних установок суттєвої корекції. Це стосується як продуктивності процесу так і якості бокової поверхні. Ефективна корекція можлива лише як результат добре спланованих, системних експериментальних досліджень процесу газолазерного різання нержавіючих сталей та встановленням конкретних технологічних умов, що забезпечують високу продуктивність процесу за відповідної вимогам споживача якості бокових поверхонь.

З врахуванням цього, робота присвячена технологічному забезпеченню продуктивного та якісного газолазерного різання нержавіючих сталей на лінійці установок, укомплектованих оптоволоконними лазерами потужністю 12 кВт є актуальною.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Тема дисертаційної роботи відповідає основним цілям проекту Стратегії розвитку промислового комплексу України від 2018 року на період до 2025 року. Зокрема: «Модернізація та зростання промислового виробництва», «Підвищення ресурсоефективності промисловості», «Сприяння цифровізації промисловості».

При формулюванні теми та завдань досліджень було також враховано матеріали підсумкового документу саміту ООН щодо прийняття порядку денного у сфері розвитку на період після 2015 року «Перетворення нашого світу: порядок денний у сфері сталого розвитку до 2030 року». Затверджено 17 Цілей Сталого Розвитку та 169 завдань. Згідно з ціллю 8 «Сприяння безперервному, всеохопному і сталому економічному зростанню, повній і продуктивній зайнятості та гідній праці для всіх», завдання дисертаційного дослідження розроблено з урахуванням галузевої специфіки розвитку України в машинобудівній галузі.

Мета і завдання дослідження. Мета роботи: підвищення ефективності вибору раціональних параметрів технологічних процесів різання нержавіючих сталей на лінійці установок, укомплектованих оптоволоконними лазерами потужністю 12 кВт, які гарантовано, з високим

рівнем відтворюваності, забезпечують максимальну продуктивність процесу та відповідність вимогам замовників до якості деталей.

Для досягнення поставленої мети в дисертаційній роботі вирішуються наступні завдання:

1. Провести аналіз відомих результатів досліджень процесу газолазерного різання нержавіючих сталей випромінюванням потужних оптоволоконних лазерів.

2. Підібрати та розробити комплекс методик, приладів та обладнання для проведення системних експериментальних досліджень газодинамічних процесів в зоні різання та оцінки якості поверхонь різу згідно вимог стандарту ISO 9013:2017.

3. Провести системний комплекс досліджень та отримати достатньо точні експериментальні дані про закономірності зміни діаметра струменя та величини ріжучого тиску асистуючого газу на поверхні деталі за використання конкретного типу сопла, моделі технологічної установки та параметрів процесу газолазерного різання.

4. Експериментально обґрунтувати раціональні параметри режимів різання нержавіючих сталей випромінюванням оптоволоконного лазера потужністю 12 кВт за використання в якості асистуючих газів азоту та повітря, які забезпечують високі рівні продуктивності і відтворюваності процесу та якості отриманих деталей.

5. Виконати аналіз та порівняння отриманих результатів та оцінити рівень впливу типу асистуючого газу на параметри процесу та якість отриманих деталей.

6. Запропонувати підходи та розробити ефективні регресійні моделі для розрахунку параметрів режимів різання нержавіючих сталей випромінюванням оптоволоконного лазера потужністю 12 кВт, які забезпечують високу продуктивність процесу та відповідну якість отриманих деталей.

Об'єкт дослідження. Газодинамічні і технологічні параметри процесу газолазерного різання нержавіючих сталей випромінюванням оптоволоконного лазера потужність 12 кВт.

Предмет дослідження. Закономірності впливу типу асистуючого газу та його тиску, внутрішньої структури і геометричних параметрів сопла, фокусної відстані оптичної головки, положення фокусу відносно поверхні деталі, висоти різання (відслідковуваного зазору), швидкості різання на продуктивність процесу і якість отриманих деталей.

Методи дослідження.

Як теоретична база при постановці та вирішенні поставлених завдань використовуються основні положення теоретичних засад обробки матеріалів концентрованими потоками енергії, положення газодинаміки, методи математичного планування та обробки результатів експерименту. Експериментальні дослідження проводились на спеціалізованому лазерному обладнанні компанії «Араміс» з використанням сучасної реєструючої та вимірювальної апаратури.

Наукова новизна отриманих результатів полягає в наступному:

– Вперше встановлено закономірності впливу внутрішньої структури та розмірів сопла, манометричного тиску всередині сопла, величини зазору між соплом деталлю на геометрію сформованого надзвукового струменя асистуючого газу (повітря і азот) та величини ріжучого тиску який він створює в довільному його перетині при гальмуванні на поверхні деталі.

– Вперше обґрунтовано діапазони збалансованих параметрів лазерного променя та лазерного процесу при різанні листової нержавіючої сталі AISI 304 стандартного ряду товщин випромінюванням оптоволоконного лазера потужністю 12 кВт з використанням в якості асистуючих газів азоту та повітря. Встановлені режими забезпечують високу продуктивність та параметри якості різу, які відповідають вимогам стандарту ISO 9013:2017.

– Отримали подальший розвиток та розширення уявлення про закономірності впливу типу асистуючого газу та його тиску, геометричних

параметрів сопла, фокусної відстані оптичної головки, положення фокусу відносно поверхні деталі, висоти різання (відслідковуваного зазору), швидкості різання на продуктивність процесу і якість отриманих деталей при газолазерному різанні нержавіючої сталі AISI 304.

– Розширено уявлення про рівні адекватності та точності прогнозування за використання різних регресійних моделей для розрахунку параметрів режимів різання нержавіючих сталей випромінюванням оптоволоконного лазера потужністю 12 кВт.

Практичне значення одержаних результатів:

– На практиці використання отриманих результатів дозволяє зробити більш точним та ефективним проектування процесів газолазерного різання максимальної продуктивності, за рахунок точного прогнозування величини ріжучого тиску, який створить газовий струмінь обраного сопла в конкретних технологічних умовах.

– Застосування розробленого обладнання і методики дозволяє відносно просто отримати інформацію про ріжучий тиск створюваний довільним типом сопла, яким комплектується верстат за тих чи інших технологічних умов (отримати газодинамічний «паспорт» сопла). Відповідно створюється умови для більш надійного забезпечення продуктивного високоякісного різання та підвищення рівня відтворюваності процесу.

– Отримані результати використані при розробці технологічної інструкції до серійних верстатів моделі AFX-PRO-12000-1530LD виробництва компанії «Араміс» (з відповідним актом). Проведена експериментальна верифікація підтвердила добру відтворюваність наданих режимів. Відхилення параметрів якості від табличних значень не перевищувало 5%.

– Матеріали роботи можуть слугувати підґрунтям для трибологічних досліджень поверхонь, отриманих лазерним різанням з використанням в якості одного з вхідних параметрів кривої коефіцієнта стійкості Еббота-Файрстоуна.

Особистий внесок здобувача. Основні теоретичні, розрахункові та експериментальні результати отримано здобувачем самостійно. Наукові положення, що виносяться на захист, та висновки дисертаційної роботи належать автору.

У роботах, опублікованих у співавторстві:

– Здійснив підбір і налаштування експериментального обладнання для дослідження процесів газолазерного різання, провів серію вимірювань параметрів тиску асистуючого газу в різних умовах роботи сопел, а також обробив експериментальні дані з використанням сучасних методів статистичного аналізу. Крім того, він брав активну участь у формулюванні висновків дослідження та підготовці графічних матеріалів до публікації. [40].

– Був залучений до розробки програми експериментальних досліджень, зокрема до вибору основних технологічних параметрів лазерного різання. Безпосередньо виконував натурні випробування на обладнанні з оптоволоконним лазером, здійснював вимірювання якості оброблених зразків відповідно до стандарту ISO 9013:2017, а також проводив первинну обробку та систематизацію результатів. Крім того, аспірант брав участь у підготовці текстових і графічних матеріалів до публікації [41].

– Проводив експериментальні дослідження на модернізованому стенді, здійснював калібрування вимірювального обладнання, аналізував розподіл тиску по площині різу. Крім того, здобувач долучився до формулювання частини аналітичних висновків дослідження [42].

– Виконав обробку експериментальних даних для побудови регресійних моделей, що описують залежність якості різу та швидкості обробки від основних технологічних параметрів (потужність, швидкість різу, тиск асистуючого газу). Він застосував методи багатофакторного регресійного аналізу з використанням програмного забезпечення Statistica, провів перевірку адекватності моделей та оцінку впливу вхідних змінних. Крім того, здобувач долучився до інтерпретації отриманих результатів та оформлення графіків і таблиць для публікації [43]..

Апробація результатів дисертації. Основні положення та результати досліджень доповідалися на XV міжнародній науково-практичній конференція «Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем» Том 1 22 - 23 травня 2025 р. м. Чернігів С.82-83

Публікації результатів дисертації. Результати досліджень, що подані в дисертації, опубліковані у 4 наукових працях у наукових фахових виданнях та 1 тезу доповіді в збірнику матеріалів конференції.

Структура та обсяг роботи. Дисертаційна робота складається зі вступу, 4 розділів, висновків, списку використаних джерел та додатків. Загальний обсяг дисертації складає 139 сторінки, з них обсяг основного тексту – 106 сторінок, 43 рисунків, 10 таблиць, список використаних джерел складає 75 найменувань і займає 7 сторінок.

РОЗДІЛ 1

АНАЛІЗ БАЗОВИХ ФАКТОРІВ ПРОЦЕСУ ГАЗОЛАЗЕРНОГО РІЗАННЯ ЛЕГОВАНИХ СТАЛЕЙ ВИПРОМІНЮВАННЯМ ПОТУЖНИХ ОПТОВОЛОКОННИХ ЛАЗЕРІВ

1.1 Поглинання випромінювання оптоволоконних лазерів металами

Перш ніж перейти до розгляду того, які процеси відбуваються під час лазерної обробки металів і чим визначаються її показники, слід нагадати, як відбувається взаємодія лазерного випромінювання з металами.

Задовго до появи лазерів було відомо, що світло в металах поглинається вільними електронами, концентрація яких становить $N = 10^{28} \text{ м}^{-3}$. Після поглинання, через час порядку 10^{-11} – 10^{-12} с, електрони передають енергію кристалічній ґратці. Така взаємодія називається електрон-фононою. Фонони це акустичні хвилі, які передають енергію електронів решітці. Завдяки цьому відбувається нагрівання металу.

Поглинання випромінювання I_r у металі на глибині h описується співвідношенням

$$I_h = I_r (1 - R_{ref}) e^{-\alpha h} \quad (\text{закон Бугера}), \quad (1.1)$$

де R_{ref} - коефіцієнт відбиття,

α - коефіцієнт поглинання

I_r - випромінювання, що діє.

Величина $A = 1 - R_{ref}$ характеризує здатність металу до поглинання й є одним з найважливіших для практики лазерної обробки параметрів.

Глибина проникнення випромінювання, яка інакше називається скін-шаром, залежить від α , і її величина становить порядку 10^{-2} мкм. Електрону, що отримав надлишок теплової енергії внаслідок поглинання кванта світла, часто недостатньо одного зіткнення для передачі цієї енергії. Тому процес релаксації енергії може бути багатостадійним і, відповідно, мати дифузійний

характер. У результаті перерозподілу енергії відбувається не в межах скін-шару, а в шарі глибиною $l_{\alpha} = 10^{-1}$ мкм.. Матеріал цього шару нагрівається, а потім тепло передається вглиб матеріалу за рахунок теплопровідності.

Після того як метал у певному об'ємі з глибиною, що перевищує l_{α} , нагрівається спочатку до температури плавлення, а потім до температури випаровування, починається його видалення. При цьому відбувається також витіснення розплавленого металу.

Це відбувається під дією надлишкового тиску пароутворення. Сумарне видалення матеріалу внаслідок випаровування та витіснення рідкої фази, яке називається абляцією, формує канал оброблюваного отвору або поверхню фронту різки [1].

Для практичного використання цього процесу в металообробці, слід навести таку інформацію. Високий коефіцієнт відбиття міді на довжині хвилі $\lambda = 1,06$ мкм, як відомо з повідомлень закордонних та вітчизняних компаній, що виробляють волоконні лазери, робить різання цього металу небезпечним при їх використанні. Справа в тому, що відбите випромінювання здатне пошкодити сам лазер. Саме тому в багатьох опублікованих джерелах відсутні дані щодо різання міді такими лазерами. Однак графік, показаний на рис. 1.1, підказує, яким чином різання міді може здійснюватися за допомогою волоконного лазера, що генерує випромінювання з $\lambda = 1,06$ мкм, без ризику його пошкодження [2].

Можливість різання міді ґрунтується на тому, що при її нагріванні до температури плавлення коефіцієнт поглинання на $\lambda = 1,06$ мкм зростає приблизно до $\alpha = 0,9$. Звідси випливає, що якщо попередньо якимось чином знайти спосіб нагріти цей метал до температури плавлення, то надалі стане можливим його різання випромінюванням волоконного лазера.

Це відбудеться тому, що згодом температура плавлення на фронті різки підтримуватиметься вже автоматично.

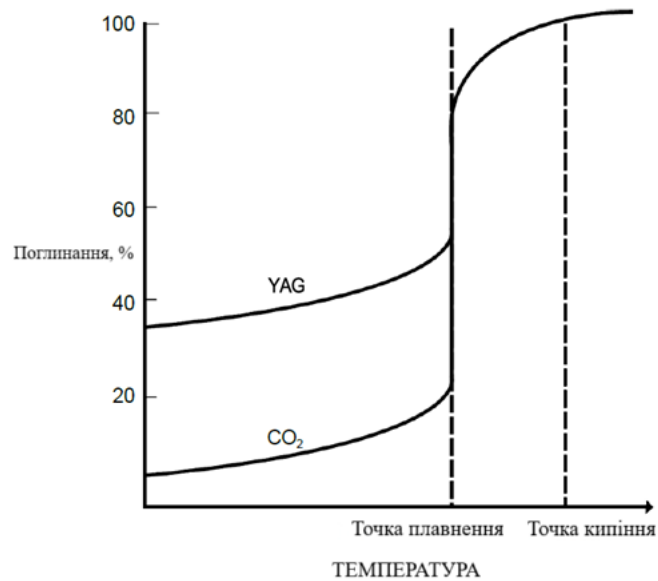


Рисунок 1.1 – Зміна поглинання міді на довжині хвилі випромінювання $\lambda = 1,06$ мкм залежно від температури [2]

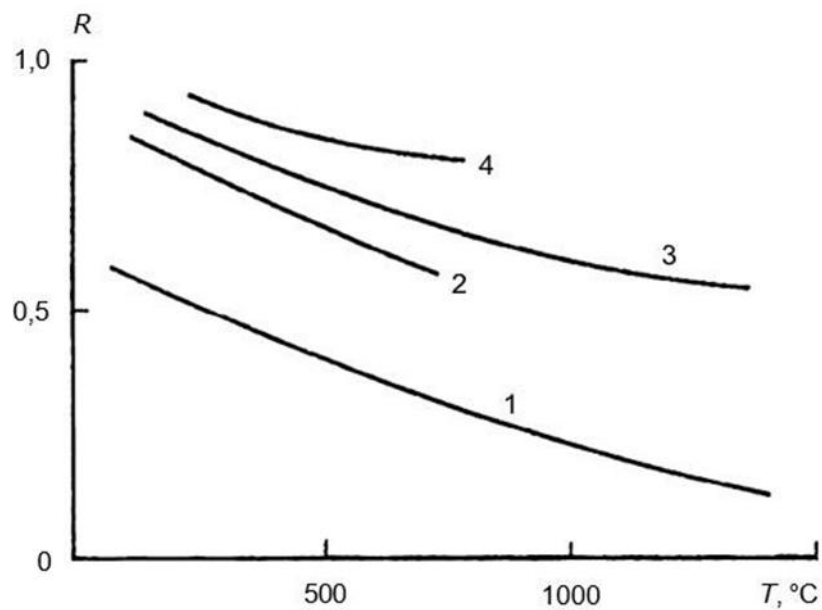


Рисунок 1.2 – Зміна коефіцієнта відбиття алюмінію та заліза в залежності від температури для різних довжин хвиль [2]: 1 – залізо ($\lambda = 1,06$ мкм); 2 – алюміній ($\lambda = 1,06$ мкм); 3 – залізо ($\lambda = 10,6$ мкм); 4 – алюміній ($\lambda = 10,6$ мкм)

Залежність коефіцієнта відбиття від температури має місце не лише у міді, але й у алюмінію та заліза. Цю залежність показано на рис. 1.2 [3].

Наведені на ньому графічні дані підтверджуються прикладами різання нержавіючої сталі та алюмінієвих сплавів.

1.2 Роль асистуючого газу в технологіях газолазерного різання металів

Рідина, що утворюється на поверхні фронту різу, зменшує продуктивність і глибину різання, погіршує чистоту бокової поверхні різу, збільшує глибину зони теплового впливу під нею та призводить до утворення задирок на виході. У зв'язку з цим у всіх лазерних технологічних установках для видалення розплаву на фронт різу через спеціальне сопло подається або стиснене повітря під тиском $P_0 = 8-16$ бар, або інертний газ із максимальним тиском, що, згідно з різними джерелами, становить до $P_0 \approx 20-30$ бар.[4]

Зусилля видалення рідкої фази з елемента (одиниці) площі, яке створюється потоком допоміжного газу, визначається співвідношенням:

$$P_f = 0.5(cf\rho u^2) \quad (1.2)$$

c – коефіцієнт, що характеризує опір потоку газу на бокових поверхнях різу, який є функцією числа Рейнольдса, що дорівнює

$$R = (\rho u b / \mu) \quad (1.3)$$

де

ρ – густина газу,

u – швидкість потоку газу, що проходить у різ,

b – характерний розмір (ширина різу),

μ – в'язкість газу [5].

Отже, швидкість газового потоку має вирішальне значення для того, наскільки ефективно він сприятиме видаленню з неї рідкої фази з бокової поверхні отвору або різу. Звідси зрозуміло, наскільки важливим є забезпечення максимальної величини u . У зв'язку з цим далі в тексті цього підрозділу розглядаються результати теоретичних і експериментальних досліджень, присвячених цій тематиці.

1.3 Факторний простір, що впливає на продуктивність та якість газолазерного різання металів

Схематичне зображення формування подовжньої поверхні фронту різку наведено на рис. 1.3 і 1.4 а, б. Поданий процес розглядається для випадку, коли різання проводиться імпульсним випромінюванням. В принципі, він не відрізняється від варіанта з безперервним випромінюванням, абляція все одно відбувається періодично з певною частотою. Періодичність забезпечується при підборі відповідної швидкості різання (детальніше пояснюється в тому ж підрозділі). Також варто відзначити, що при імпульсному різанні розвиток абляції корелюється зі зміщенням на d_l до нової позиції від попередньої на Δd_l .

На рис. 1.3 і 1.4 а, б показано, що різання на глибину h здійснюється послідовним переміщенням заготовки відносно d_l (або навпаки – d_l відносно заготовки) від імпульсу до імпульсу. Частота імпульсів вибирається так, щоб забезпечити бажане перекриття світлових плям, тобто встановлюється відповідний крок Δd_l . Відзначимо, що при різанні безперервним випромінюванням з фіксованою швидкістю програмно встановлюється значення $\Delta d_l \approx 0,5 d_l$.

На рис. 1.3 зафіксовано форму фронту різку в момент припинення впливу випромінювання. Ця форма характерна для будь-якого матеріалу, коли $\Delta d_l < d_l$. На цьому «стоп-кадрі» вона відповідає такій енергії та тривалості імпульсу, за яких утворення наскрізного фронту відбувається за дії чотирьох послідовних імпульсів.

Аналогічна форма фронту різку утворюється у будь-якому матеріалі, оскільки при виконанні $\Delta d_l < d_l$, глибина Δh_n накопичується дії n імпульсів. Це відбувається як за рахунок прямого потрапляння частини випромінювання останнього імпульсу в дно фронту, так і внаслідок його відбиття назад, що також впливає на декілька вже сформованих фронтів.

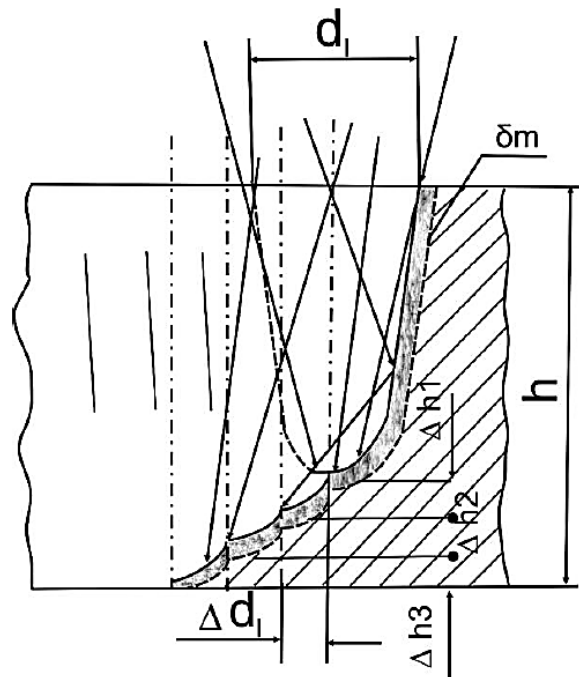


Рисунок 1.3 – Поздовжня форма різу [1]

Чим менше Δd_l , тим більша кількість імпульсів (які викликають абляцію в області Δh_d , показаній штрихуванням на рис. 1.4 а бере участь у заглибленні попередніх фронтів і зоні їх теплового впливу. Це число залежить від об'єму матеріалу, що видаляється ($\Delta S_d \cdot h$), і щільності потужності на Δh_d . Відповідно, при заданих енергії і тривалості імпульсів значення n може варіюватися від 1 до n_i .

Орієнтиром для визначення числа імпульсів n_i та їх параметрів, достатніх для наскрізного різу, служить число імпульсів n_{op} , енергія і тривалість яких забезпечують свердління отвору глибиною h і діаметром, близьким до ширини різу, з максимальною швидкістю. Якщо для утворення наскрізного різу необхідна кількість імпульсів значно перевищує n_{op} , то потрібно збільшити їхню енергію.

Проте в лазерному різанні металів (крім дуже тонких матеріалів) зазвичай $n_i > n_{op}$. Причини цього пояснюють рис. 1.4 а, б. Матеріал на фронті різу видаляється як через випаровування (стрілка V_{ev} в 1.4 а), так і через витіснення рідкої фази (стрілка V_m) з розплавленого шару δ_m на поверхні S_{cut}

під дією надлишкового тиску пари. Цей тиск залежить від усередненої щільності потужності W на S_{cut} – пояснення див. на рис. 1.4 б.

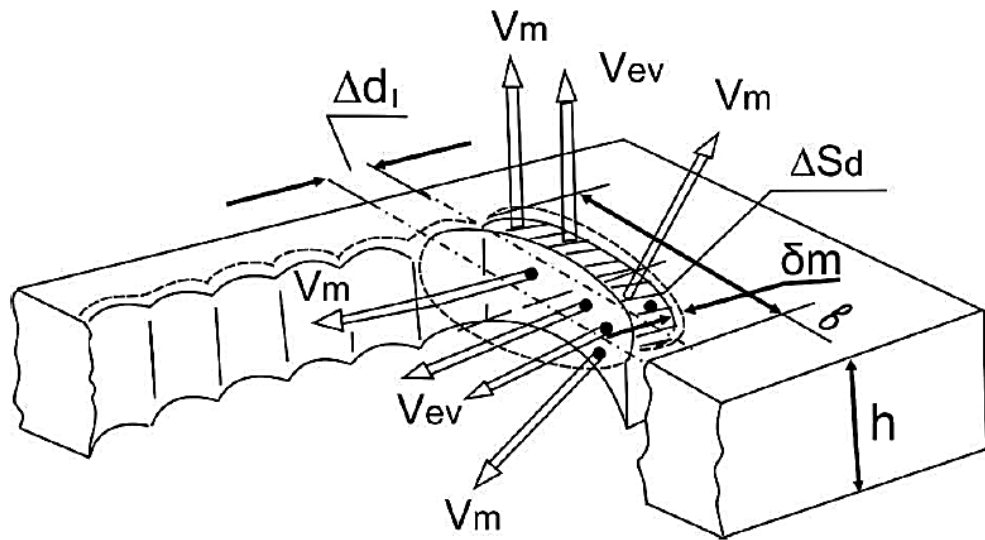


Рис. 1.4 а – Абляція у фронтальній зоні різу [1]

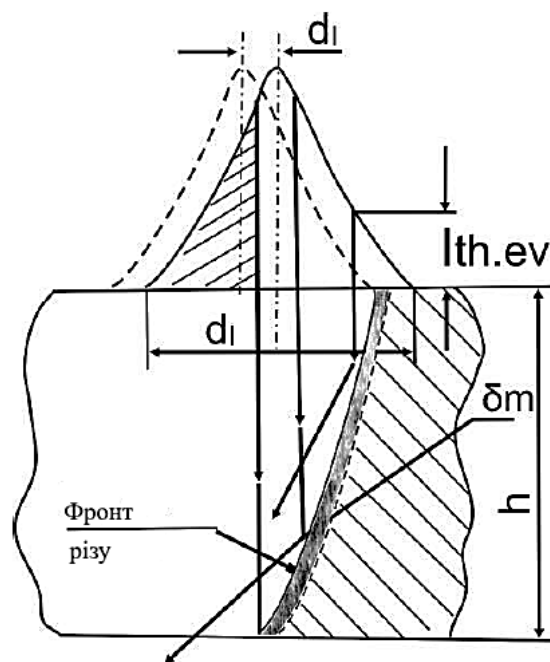


Рис. 1.4 б – Проходження випромінювання по фронту різання [6]

На рис. 1.4 б над верхньою поверхнею різу схематично зображено гаусове розподілення інтенсивності на d_l . Пунктирна крива – до переміщення, суцільна – після. Якщо випромінювання на d_l перевищує поріг випаровування $l_{th.ev}$, воно поширюється також на набагато більшу площу S_{cut} , через що W на S_{cut} менше, ніж у центральній частині d_l . Зі збільшенням глибини h лише це зменшення W призводить до зниження абляції.

Однак W на S_{cut} також залежить від втрат енергії через відбиття, поглинання і екранування рідкою фазою, які зростають із глибиною різу h . До того ж, якщо $\Delta d_1 < d_1$, частина хвильового потоку проходить крізь різ наскрізь і не сприяє абляції на фронті – це особливо вагомо, коли $h \geq d_1$.

Усі ці втрати спричиняють, що товщина розплавленого шару δ_m на S_{cut} неоднорідна по глибині: глибше фронт – більше втрат і товще δ_m . Це і пояснює, чому $n_i > n_{op}$. Окрім того, частина випромінювання, відбита від поверхні фронту, підтримує високу температуру металу в часі. Через тепловідвід рідини температура розширює область теплового впливу під шаром δ_m і на бокові поверхні.

Частина рідкої фази складових витісняється до бокових поверхонь попередніх зон різу, забезпечуючи їх нагрів до температури плавлення. Експерименти показують, що розшарування рідини відбувається в усі напрямки: вгору, вбік і, при наскрізному різі – вниз [7-12].

Це викликає появу зони теплового впливу неприпустимої глибини для багатьох технологічних застосувань лазерного різання – де вона або ефективна, або єдино можлива.

Оскільки при однакових умовах обробки надлишковий тиск випаровування на фронті різу нижчий, ніж усередині свердленого отвору, ефективність видалення рідини з фронту менша. Частина її, що піднімається нагору або вниз, формує задирки на вході/виході різу, які при загартованому металі видаляють механічно.

Чим менший ΔS_d (або Δd_1), тим менший об'єм U_{ab} матеріалу видаляється з S_{cut} . Однак при цьому зростають втрати випромінювання, яке проходить повз фронт обробки, не взаємодіючи з його поверхнею, знижуючи щільність потужності W – отже зменшується надлишковий тиск і ефективність видалення рідини. При цьому під S_{cut} збільшується зона теплового впливу. У цій зоні, а також на розташованій на певній відстані попередній ділянці бічної поверхні різу формуються глибокі шари розплаву

δ_m , під якими виникає зона термонапружень. Наявність розплаву також спричиняє спотворення поперечного профілю різку.

Якщо ΔS_d збільшується, то об'єм U_{ab} стає більшим, і при фіксованій енергії імпульсу швидкість різання змінюється. Щоб зрозуміти напрямок зміни (зростання або падіння) і рівень впливу на якість поверхні, важливо знати, яка частина в гаусовому розподілі інтенсивності призведе до абляції на збільшеній поверхні. Без цього неможливо точно передбачити глибину дефектного шару або зміну продуктивності різання.

Два ключові фактори:

Об'єм рідкої фази залежить від інтенсивності у відповідній частині розподілу по d_l , що припадає на збільшену ΔS_d . Якщо це підвищує тиск пари – ефективність підвищиться, дефектний шар скоротиться, а швидкість зросте.

Відбиття зменшується при збільшенні ΔS_d (менше випромінювання потрапляє в попередні фронти), тому W зростає. Це, потенційно, зменшує товщину δ_m . Проте збільшення ΔS_d обмежує простір для виведення рідини, що може підвищувати екранування. Крім того, на більшу поверхню фронту може налипати більше рідини – це важко спрогнозувати.

1.3.1 Хімічний склад найбільш використовуваних в технологіях газолазерного різання легованих сталей

Вплив хімічного складу нержавіючої сталі на процес лазерного різання:

Хімічний склад нержавіючої сталі, зокрема вміст легувальних елементів (Cr, Ni, Mo, Mn), безпосередньо впливає на процес лазерного різання, а отже – і на вибір асистуючого (супровідного) газу. Основні моменти:

Вміст хрому (Cr):

Хром забезпечує корозійну стійкість, але утворює тугоплавкі оксиди, які можуть ускладнювати процес різання. Для їх ефективного видалення часто використовують кисень (O_2) або азот (N_2) під високим тиском.

Нікель (Ni):

Покращує пластичність і жаростійкість, але також знижує теплопровідність, що може спричиняти перегрів зони різання. Це особливо важливо при виборі інертних газів (наприклад, азоту), які не сприяють додатковому нагріванню.

Тип сталі (аустенітна, феритна, мартенситна):

Для аустенітних сталей (наприклад, 304, 316) переважно використовують азот, щоб уникнути окислення та зберегти чистоту зрізу.

Для конструкційної чи феритної нержавіючих сталей часто застосовують кисень, оскільки він підвищує ефективність різання, хоча й погіршує якість краю через окислення.[13-16]

Товщина матеріалу:

Хімічний склад у поєднанні з товщиною впливає на теплопровідність і швидкість плавлення, тому при обробці товстих листів із високим вмістом легувальних елементів перевагу надають інертним газам, які забезпечують стабільність процесу та кращу якість кромки.

Таблиця 1.1 – Вплив хімічного складу нержавіючої сталі на процес лазерного різання

Тип сталі / марка	Основні елементи в складі	Рекомендований газ	Переваги	Недоліки
AISI 304 (аустенітна)	Fe, ~18% Cr, ~8% Ni	Азот (N ₂)	Чиста кромка, без окалини, не змінюється колір	Нижча швидкість різання, вищий тиск газу
		Кисень (O ₂)	Вища швидкість різання	Окиснення кромки, зниження корозійної стійкості
AISI 316 (аустенітна з Mo)	Fe, Cr, Ni, ~2-3% Mo	Азот (N ₂)	Висока якість зрізу, відсутність окалини	Потрібен високий тиск
AISI 430 (феритна)	Fe, ~16-18% Cr	Кисень (O ₂)	Швидке різання	Окиснення, грат, зниження якості кромки
		Азот (N ₂)	Краще для тонкого листа, чиста кромка	Повільніше різання

Тип сталі / марка	Основні елементи в складі	Рекомендований газ	Переваги	Недоліки
AISI 410 (мартенситна)	Fe, ~11-13% Cr, трохи C	Кисень (O ₂)	Ефективне різання, висока швидкість	Грубіша кромка
Декоративна нержавійка (дзеркальна, шліфована)	Високий Ni, Cr	Азот (N ₂) або Аргон (Ar)	Збереження поверхні, відсутність кольорових змін	Дорожче, нижча продуктивність

1.3.2 Вихідна потужність та гаусовий розподіл інтенсивності випромінювання

Якісне уявлення про гаусів розподіл інтенсивності випромінювання у світловій плямі діаметром d_l , що фокусується на поверхні металу, дозволяє зрозуміти характер впливу енергетичного профілю на процес лазерного різання. Хоча точне чисельне представлення розподілу інтенсивності у фокусі неможливе через відсутність відповідних засобів вимірювання, його роль у формуванні фронту різку можна пояснити на основі фізичних закономірностей і експериментальних спостережень [17].

Оскільки лазерне випромінювання поширюється уздовж фронту різку завдяки численним відбиттям від бокових поверхонь каналу, гаусів характер розподілу інтенсивності зберігається в межах глибини різку до моменту утворення дроселюючого каналу. Випромінювання з центральної зони, де інтенсивність максимальна, проходить на більшу глибину з меншою кількістю відбиттів, а отже, з меншими енергетичними втратами, спричиненими поглинанням.

Максимальний вплив такого випромінювання створює найбільшу абляцію порівняно з периферійними ділянками плями, де інтенсивність нижча. Це пов'язано з тим, що швидкість випаровування та надлишковий тиск парів, які витісняють рідку фазу, пропорційні інтенсивності

випромінювання. В результаті цього поперечна форма фронту різку з самого початку набуває конічної форми.

Гаусів розподіл є визначальним чинником у формуванні дроселюючого каналу на певній глибині від вхідної кромки. Від його геометричних параметрів залежать максимальна глибина різання, швидкість процесу та його якість. У дроселюючому каналі відбувається накопичення рідкої фази, що зумовлює підвищені втрати як енергії випромінювання, так і тиску допоміжного газу до та після цієї зони.

Крім того, гаусів розподіл інтенсивності визначає глибину поширення теплового поля під боковою поверхнею фронту. Периферійна частина пучка, інтенсивність якої менша за поріг плавлення, спричиняє додаткове нагрівання, що призводить до збільшення шару розплавленого металу. У деяких випадках температура у верхній частині фронту може перевищувати межу текучості матеріалу, що сприяє ефективному видаленню речовини за рахунок тиску парів і допоміжного газу.

Однак зі зростанням глибини втрати тиску з боку пари та газу зростають, а ефективність видалення рідкої фази зменшується. Це призводить до її накопичення перед дроселюючим каналом. Уповільнення проходження рідини крізь вузьку зону сприяє подальшому накопиченню, що в окремих випадках може призвести до припинення процесу різання через екранування випромінювання.

Гаусів розподіл також впливає на ширину та чистоту поверхні зони фронту різку, розташованої за дроселюючим каналом. У цій області, де зменшена інтенсивність спричиняє переважання рідкої фази, знижується ефективність її видалення. Це, у свою чергу, визначає ширину різку в цій зоні та шорсткість його бокової поверхні. Залежно від умов різання ширина вихідного отвору може як збільшитися, так і зменшитися, але чистота поверхні у цій зоні, як правило, погіршується, що сприяє утворенню високого грата.

Усереднене значення щільності потужності в зоні фокусування (d_f) як ключовий параметр процесу лазерного різання [18]. Усереднене значення щільності потужності лазерного випромінювання (W) є критично важливим параметром, який кількісно відображає динаміку процесу лазерного різання. Цей показник дає змогу глибше зрозуміти явища, що відбуваються на фронті різання, а також прогнозувати якісні та швидкісні характеристики отриманого різку. Величина W у зоні фокусування (d_f) визначається співвідношенням:

$$W = P / S \quad (1.4)$$

де P – потужність лазерного випромінювання, S – площа фокусування.

Значущість цього параметра полягає в його здатності характеризувати склад абляційного продукту, який формується на фронті різку. Зокрема, значення W дозволяє оцінити, яка фаза – парова чи рідка домінує в зоні дії лазерного випромінювання. Величина і поведінка рідкої фази, тобто розплаву, безпосередньо впливають на швидкість різання, глибину проникнення лазерного променя та загальну ефективність процесу. Утворення значної кількості розплаву може призводити до екранування частини випромінювання, що знижує енергоефективність процесу та ускладнює проходження допоміжного газу в зону різання.

Поперечна форма фронту різання та її розміри також визначають характер накопичення розплаву. За умови зростання щільності потужності фронт набуває циліндричної форми, що сприяє стабільному видаленню рідкої фази. Із підвищенням W відбувається зменшення вмісту розплаву в абляційному потоці, зумовлене підсиленням його виштовхуванням через зростання надлишкового тиску випаровування.

Підвищення W також позитивно впливає на глибину різання. У матеріалах товщиною понад 2 мм це пов'язано з формуванням дроселюючого каналу вище вхідного отвору. Такий канал має збільшений мінімальний діаметр та зменшену довжину, що покращує умови видалення розплаву. У

результаті зменшується висота грата на вихідному краї різу та підвищується якість бокової поверхні.

У виробничих умовах зазвичай використовуються волоконні лазери з потужністю до 3 кВт. У випадку фокусування випромінювання в зону діаметром $d_l = 200\text{--}250$ мкм, середнє значення щільності потужності становить $W = (6\text{--}9) \cdot 10^6$ Вт/см².

Це значення перевищує поріг випаровування таких матеріалів, як конструкційна сталь, нержавіюча сталь і алюмінієві сплави, приблизно у 3–4 рази, що дозволяє ефективно ініціювати абляційні процеси.

Утім, щільність потужності не є сталою величиною по всій глибині фронту різання – вона швидко знижується зі збільшенням глибини проникнення променя. Це призводить до зниження швидкості різання, погіршення чистоти бокової поверхні та зростання висоти грата на виході, особливо при обробці товстих заготовок. Зниження W по глибині обмежує граничну товщину металу, який можна якісно прорізати.

Експериментальні дослідження підтверджують [19], що навіть за умови використання лазера потужністю 1 кВт та фокусування у пляму $d_l = 250$ мкм, тобто при щільності потужності, наближеній до порогової, можливе наскрізне різання конструкційної сталі товщиною до 5 мм. Хоча якість різу при цьому є низькою, сам факт здійснення такого різання має принципове значення. Це стало можливим завдяки гаусівському розподілу інтенсивності випромінювання в зоні d_l , де центральна частина плями має суттєво вищу інтенсивність. Саме ця локальна концентрація енергії забезпечує умови для проходження фронту абляції через усю товщу матеріалу навіть за умов загального зниження W .

1.3.3 Фокусна відстань об'єктива та положення фокусу відносно поверхні деталі

Для забезпечення задовільних показників різання в конкретних умовах необхідно приділити увагу вибору об'єктива для фокусування випромінювання. У технологічних установках іноземного виробництва, призначених для лазерного різання листового металу, зазвичай застосовуються об'єктиви з фокусними відстанями 127 мм, 190 мм і 254 мм.

Об'єктив із фокусною відстанню 127 мм доцільно використовувати для високошвидкісного різання металів товщиною до 3 мм. Це обумовлено тим, що за високої швидкості різання підвищуються якісні характеристики обробки. Разом із тим, для забезпечення високої якості різання необхідно звести до мінімуму розбіжність лазерного променя, що досягається завдяки використанню об'єктивів з більшими фокусними відстанями – 200 мм або 300 мм.

Використання об'єктива з фокусною відстанню 254 мм дозволяє суттєво розширити діапазон товщин оброблюваних матеріалів. Для обґрунтування доцільності такого вибору слід враховувати характеристики лазера (його потужність, фокусну відстань коліматора) та виконати розрахунки розподілу щільності потужності у фокусі.

Також слід зазначити, що провідні європейські та японські виробники лазерного обладнання рекомендують використовувати спеціальну лазерну сталь, яка має поліпшену якість поверхні, знижені внутрішні напруження та високу площинність. Це сприяє кращому поглинанню лазерного випромінювання, що, своєю чергою, підвищує ефективність та якість різання. Для товстолистового прокату використовується додаткове покриття у вигляді окалини з доброю адгезією, що гарантує високу якість різання, недосягну за звичайних умов. В економічних умовах сучасної України реалізувати такий підхід практично неможливо.

У разі обробки сталей товщиною до 3 мм важливим є запобігання утворенню грата на виході різку. Для цього необхідно забезпечити переважання процесу випаровування у загальній абляції, що можливе за щільності потужності понад $W \geq 2 \cdot 10^7$ Вт/см². Досягти такого значення можна за допомогою об'єктива з фокусною відстанню 200–300 мм і правильно підібраного діаметра фокусної плями.

У випадку різання нержавіючої сталі товщиною 4–6 мм доцільним є використання волоконного лазера потужністю 3 кВт у середовищі азоту та об'єктива з фокусною відстанню близько 190 мм. Для товщини 3–5 мм ефективні результати було отримано при використанні лазера потужністю 2 кВт та об'єктива з фокусною відстанню 200 мм [20].

Для різання нержавіючої сталі товщиною 12–14 мм потужність лазера має перевищувати 3 кВт. Вибір оптимального об'єктива залежить від конкретних умов обробки. Проведені розрахунки та експерименти показали, що для таких завдань найпридатнішими є об'єктиви з фокусною відстанню 250–300 мм, які забезпечують необхідну щільність потужності на фронті різку.

Таким чином, вибір об'єктива має базуватись на комплексному урахуванні характеристик лазера, товщини матеріалу, вимог до якості різку та умов обробки. Застосування універсальних рекомендацій без аналізу конкретної ситуації може призвести до зниження ефективності процесу та якості отриманого результату.

1.3.4 Стан поверхні металу, конструкція сопла та величина зазору між соплом та металом

До характеристик поверхні оброблюваного металу належать її шорсткість, наявність подряпин і вторинної окалини (black peeling) з різною товщиною, а також однорідність структури металу, яка залежить від умов його виготовлення. Крім того, на поверхні можуть бути присутніми іржа, забруднення, залишки мастил і фарби. Усі ці чинники негативно впливають

на граничну глибину різання, його швидкість і стабільність. Тому перед початком процесу лазерного різання поверхню металу необхідно ретельно очищати, незважаючи на додаткові витрати, пов'язані з цим етапом.

Проте, підвищення тиску допоміжного газу та очищення поверхні самі по собі не гарантують поліпшення якості різання, якщо не враховуються розташування сопла відносно поверхні металу та його прохідний діаметр.

Щоб вплив цих чинників мав позитивний характер, до теоретичних відомостей доцільно додати практичні рекомендації, розроблені японськими фахівцями. Зокрема, при безокисному різанні, яке виконується з використанням високого тиску нейтрального газу або стисненого повітря, ефективним є мінімальне розташування сопла над поверхнею металу на висоті 0,5–0,7 мм [21].

Під час різання конструкційної сталі в середовищі кисню, що подається до сопла під тиском від 0,6 до 3 бар залежно від товщини металу, оптимальна відстань від сопла до поверхні становить 1 мм і більше. Це пояснюється тим, що зі збільшенням товщини металу необхідно підвищувати тиск кисню. При тиску понад 1,89 атм потік газу набуває надзвукової швидкості, внаслідок чого в зазорі між соплом і поверхнею металу виникає ударна хвиля. Щоб забезпечити достатній потік кисню в зону різу за таких умов, сопло слід розміщувати на більшій висоті [22].

Сопла з одним прохідним отвором діаметром 1,0; 1,2; 2,0; 2,5; 3,0 та 3,5 мм застосовуються для різання більшості металів, за винятком товстолистової конструкційної сталі. Для обробки більш товстих матеріалів використовується сопло з більшим діаметром отвору. Експериментальні дослідження показали, що використання двопотокового сопла з розширеним зовнішнім отвором забезпечує краще охолодження зони навколо фронту різання. Це дозволяє зменшити теплові деформації, що виникають у металі, та відповідно знизити втрати енергії випромінювання і допоміжного газу, а також підвищити ефективність видалення рідкої фази з поверхні різу [23].

Для різання м'якої конструкційної сталі товщиною понад 12 мм рекомендовано використовувати сопло, вихідний отвір якого оточений системою додаткових отворів, через які також подається допоміжний газ – у цьому випадку кисень. Ймовірно, ці отвори можуть також слугувати для подачі води з метою охолодження металу навколо зони різання. Це особливо важливо в умовах підвищеного теплового навантаження, що спричиняє значні термічні деформації.

Застосування таких сопел є особливо ефективним при обробці сталей товщиною понад 10 мм, оскільки воно підвищує якість та стабільність процесу. Незважаючи на відсутність у джерелах конкретної інформації щодо кількості периферійних отворів, їх розміщення та діаметру, практичне значення таких конструкцій є доведеним експериментально [24].

Зокрема, для різання конструкційної сталі товщиною 12–16 мм у середовищі кисню рекомендується використання сопла з діаметром отвору 1,5 мм. Ймовірно, використання двопотокового сопла з аналогічним або дещо більшим діаметром і більшою кількістю периферійних отворів дозволяє якісно різати сталь товщиною до 22 мм. Це пояснюється тим, що збільшення кількості отворів підвищує ефективність охолодження та сприяє стабілізації газового потоку, зменшуючи його розширення [25].

Зазвичай безокисне різання нержавіючих сталей здійснюється з використанням сопел із розширеним прохідним отвором і підвищеним тиском допоміжного газу. Практичні дані свідчать, що оптимальний діаметр сопла залежить від товщини металу та чистоти використовуваного азоту. При цьому прохідний діаметр сопла часто значно перевищує ширину різку на його вході. Це означає, що лише незначна частина потоку газу потрапляє в зону різку, тоді як решта потоку спрямовується на охолодження поверхні металу. Із збільшенням товщини листа значення такого охолодження зростає.

У практиці також важливо враховувати, чому зі збільшенням товщини листа діаметр сопла не зростає необмежено. З одного боку, ширина різку при цьому збільшується, що дозволяє пропускати більший об'єм допоміжного

газу; з іншого боку, занадто великий діаметр отвору спричиняє надмірні втрати газу через бокове розширення потоку, що не компенсується зменшенням термодформацій.

Результати досліджень підтверджують важливість застосування азоту високого ступеня очищення для різання нержавіючої сталі. Наприклад, при товщині металу 1–4 мм недостатню чистоту газу можна компенсувати збільшенням прохідного діаметра сопла до 2,5 мм. Натомість при використанні чистого азоту для різання сталі товщиною 1–3 мм оптимальним є діаметр 1,7 мм [26].

Підсумовуючи викладене, слід зазначити, що аналогічні дані щодо оптимальних діаметрів сопел необхідні також для інших металів. Хоча загальні закономірності залишаються подібними, точні значення слід встановлювати експериментально. Це стосується також різання в середовищі інших газів, зокрема очищеного стисненого повітря, який широко застосовується на практиці.

1.4 Підходи до оптимізації локалізації лазерного випромінювання та ширини різання

Щоб зрозуміти, чому ширина різку належить до базових параметрів процесу розрізання різних металів, необхідно насамперед звернутися до наступного важливого аспекту. Саме від ширини різку залежать швидкісні та якісні характеристики результатів розрізання. Зокрема, вітчизняні споживачі лазерних технологічних установок насамперед вимагають відсутності задир (грату) на вихідному краї різку або, принаймні, мінімізації їх висоти.

Розмір ширини різку, за якого досягаються найкращі показники цього процесу, відрізняється для різних металів. Для того щоб з'ясувати можливість оптимізації ширини різку при обробці конкретного металу, слід розуміти, від яких сталих характеристик матеріалів і умов проведення процесу залежить ця величина. До таких умов належать [27]:

- теплопровідність і температуропровідність металу, а також вміст у ньому легувальних елементів;
- потужність лазера, щільність потужності у світловій плямі локалізації випромінювання (d_1);
- розбіжність лазерного випромінювання і фокусна відстань об'єктива, що формує розмір діаметра d_1 ;
- гаусівський розподіл інтенсивності випромінювання по поверхні d_1 ;
- положення оброблюваної поверхні відносно вузла фокусування (каустики), тобто величина дефокусування (Δf);
- швидкість різання, яка має бути приблизно на 10 % меншою за максимально можливу;
- акумуляція тепла по контуру різу.

Необхідно коротко пояснити, чому ширина різу залежить від зазначених факторів. Почати слід з того, що теплопровідність і температуропровідність металу визначають розміри і температуру зони нагріву, яка формується й змінюється у часі навколо фронту різу при переміщенні d_1 вздовж траєкторії обробки. Виникаючі в цій зоні термодформації впливають на поперечні розміри фронту по всій його висоті.

Від потужності лазера, щільності потужності в зоні d_1 та гаусівського розподілу інтенсивності випромінювання залежить кількість рідкої фази, яка утворюється на боковій поверхні різу, а також ефективність її видалення за рахунок надлишкового тиску пари. Різання при зменшеній на $\sim 10\%$ від максимальної швидкості, з урахуванням її змін через наростання теплового навантаження, також сприяє як зменшенню кількості рідкої фази, так і стабільності проведення процесу.

Розташування металевої поверхні щодо вузла фокусування та вміст у металі присадок впливають на проходження випромінювання по фронту різання. Величина Δf визначає ефективність видалення рідкої фази як за допомогою надлишкового тиску пари, так і завдяки дії асистуючого

технологічного газу на бокову поверхню різку, це також істотно впливає на ширину різку. Зокрема, ширина різку на вхідній і вихідній частинах залежить від правильно обраної величини Δf .

Величина ширини різку змінюється також залежно від коефіцієнтів відбиття та поглинання металу на бокових поверхнях фронту різку. За інших однакових умов проведення процесу, ширина різку також залежить від товщини оброблюваного металу. При правильно підібраній величині Δf на ширину різку впливають швидкість та якість процесу. Це особливо виражено при різанні відносно тонких металів (1–3 мм). У таких випадках поверхню металу доцільно розташовувати вище фокуса (перетяжки каустики) на відстані, яка відповідає $\Delta f = -1$ мм [28].

Для металів товщиною до 3 мм ширина різку, залежно від щільності потужності (W) в зоні d_1 , може мати як позитивний, так і негативний вплив на якісний показник – висоту грата на вихідному краї різку. При надто малій W висота грата може досягати неприйнятних значень [29].

Той факт, що не завжди доцільно виконувати різання з мінімально можливою шириною різку на вході, підтверджується експериментом з вирізання квадратів зі стороною 10 мм у сталі марки Ст3 товщиною 1,5 мм у режимі in-fly. Максимальна швидкість процесу становила 14 м/хв, що повністю запобігало термічній деформації заготовки. Однак при такій швидкості в окремих кутах квадратів через похибки координат залишалися непрорізані ділянки шириною до 0,5 мм. Повне вирізання квадратів забезпечувалося лише при швидкості 7,5 м/хв, тобто за умов, коли ширина різку не була мінімальною. Водночас деформацій заготовки не спостерігалося завдяки охолодженню її водяними струменями зі спеціального пристрою [30].

При різанні нержавіючої сталі товщиною понад 3 мм найменша висота грата досягається при розташуванні поверхні металу вище фокуса ($\Delta f = -3$ мм) [31].

1.5 Аналіз умов і результатів газолазерного різання легованих сталей

Різання нержавіючих сталей користується значним попитом на вітчизняних виробництвах. Найбільш актуальним є різання цих металів у діапазоні товщини від 1 до 5 мм. Раніше у достатньо рідкісних випадках виникала необхідність обробки нержавіючих сталей товщиною 10 мм і вище.

Основними вимогами, що висувуються до процесу лазерної обробки нержавіючих сталей, є відсутність задирок на виході різу або, принаймні, їхнє мінімальне утворення, а також продуктивність різання, що відповідає потребам споживачів. У даному підрозділі розглянуто, якою мірою і за допомогою яких технічних засобів можливо забезпечити відповідність цим вимогам.

1.5.1 Основні вимоги до газолазерного різання легованих сталей

Газолазерне різання є одним з найбільш прогресивних методів обробки матеріалів, що використовує поєднання лазерного випромінювання та потоку газу для здійснення процесу різання. Ця технологія широко застосовується для обробки різних металів, зокрема легованих сталей, завдяки своїй високій точності, ефективності та можливості отримання якісного різу. Однак для досягнення бажаного результату необхідно враховувати низку технічних та технологічних аспектів, які визначають ефективність і якість процесу газолазерного різання.

Технічні характеристики лазера

Одним з найважливіших параметрів при газолазерному різанні є потужність лазера. Вибір оптимальної потужності залежить від товщини оброблюваного матеріалу та типу сталі. Раніше для різання легованих сталей в основному застосовувалися лазери з потужністю від 2 до 10 кВт. Чим більша потужність, тим швидше відбувається процес різання, однак це також вимагає точного налаштування всіх інших параметрів.

Тип лазера є ще одним важливим фактором. Для обробки легованих сталей можуть використовуватися різні види лазерів, серед яких найбільш

популярними є волоконні та CO₂-лазери. Волоконні лазери мають високу ефективність і точність, а також забезпечують високу якість різку на матеріалах з високою теплоємністю [32].

Параметри газу

Ключову роль у процесі газолазерного різання відіграють гази, що використовуються для підтримки процесу різання та охолодження. Зазвичай використовуються кисень, азот, повітря та інші технічні гази, в залежності від вимог до якості різку та швидкості процесу.

- Кисень сприяє більш швидкому та ефективному процесу різання, проте може призвести до окислення матеріалу на краях різку, що є недоліком для багатьох застосувань. Проте для матеріалів, де допустимо окислення, кисень є найбільш ефективним газом.
- Азот використовується для забезпечення чистоти поверхні різку, оскільки він не вступає в реакцію з матеріалом. Це особливо важливо для виробництва деталей, де необхідна висока точність і чистота країв, зокрема при обробці нержавіючих сталей.
- Повітря є більш економічним варіантом, оскільки складається з азоту та кисню в природних пропорціях. Використання повітря дозволяє значно знизити витрати на технічні гази, проте це може призвести до меншої точності та наявності окалин на краях різку. Однак для деяких застосувань, де не вимагається бездоганно чиста поверхня, повітря може бути прийнятним вибором. Крім того, цей газ доступний у будь-яких умовах і не потребує додаткових витрат на спеціальні балони чи установки.

Тиск газу має значний вплив на швидкість та якість різання. Високий тиск дозволяє підвищити швидкість обробки, але надмірно високий тиск може призвести до дефектів у вигляді задирок чи нерівномірних країв різку.

Тип і склад легованої сталі

Леговані сталі мають різноманітний хімічний склад, що визначає їх фізичні та механічні властивості. Наприклад, сталі, що містять великий вміст

хрому, нікелю або молібдену, можуть вимагати спеціальних налаштувань параметрів газолазерного різання. Вміст вуглецю також значно впливає на процес різання: сталі з високим вмістом вуглецю більш схильні до термічних тріщин і деформацій, що вимагає застосування оптимальних режимів обробки.

Залежно від товщини матеріалу вибирається відповідна потужність лазера та швидкість різання. Для більш товстих матеріалів необхідно використовувати лазери з більшою потужністю та повільнішу швидкість різання, що дозволяє забезпечити кращу якість та точність обробки.

Швидкість і точність різання

Оптимальна швидкість різання є критичним параметром, оскільки надмірно висока швидкість може призвести до неякісного різу, а надмірно низька – до збільшення витрат енергії та часу. Залежно від матеріалу та його товщини, необхідно точно налаштувати швидкість руху лазерного променя для досягнення бажаного результату.

Точність різу є важливою вимогою, оскільки в багатьох випадках важливо досягти високої геометричної точності та мінімальних відхилень від заданих розмірів. Для цього важливо налаштувати параметри лазера, фокусування променя та використання відповідних газів.

Теплові характеристики

Газолазерне різання включає великі теплові навантаження на матеріал, оскільки лазерний промінь здатен досягати дуже високих температур. Надмірне нагрівання може призвести до деформацій матеріалу, утворення тріщин або змін в його структурі. Для запобігання цьому необхідно використовувати точне регулювання потужності лазера та швидкості різання.

Якість різу

Якість різу є однією з головних вимог до газолазерного різання. Поверхня різу повинна бути гладкою, без задир, окалин чи інших дефектів. Крім того, важлива точність геометрії різу, оскільки багато виробів потребують мінімальних допусків на розміри.

Економічні аспекти

Економічна ефективність газолазерного різання залежить від ряду факторів, таких як потужність лазера, швидкість обробки та витрати на енергію. Зазначено, що хоча цей метод може бути дорогим на етапі інвестицій в обладнання, він забезпечує високу швидкість виробництва та мінімальні витрати на матеріали, що компенсує початкові витрати.

Безпека

Оскільки процес газолазерного різання включає роботу з високими температурами та лазерним випромінюванням, дотримання стандартів безпеки є критично важливим. Для забезпечення безпеки персоналу необхідно використовувати захисне обладнання, таке як лазерні окуляри, а також забезпечити належну вентиляцію робочих приміщень для запобігання надмірному нагріванню та утворенню шкідливих газів.

Газолазерне різання легованих сталей є складним технологічним процесом, що вимагає точного налаштування параметрів лазера та газу для досягнення високої якості та ефективності. Вибір типу газу, потужності лазера та інших параметрів обробки має безпосередній вплив на кінцевий результат. Надання уваги всім цим аспектам дозволяє досягти високої точності різки, збереження структурних властивостей матеріалу та економічної ефективності виробництва.

1.5.2 Характерні особливості газолазерного різання легованих сталей

Для розуміння закономірностей, характерних для подальших результатів лазерного різання нержавіючих сталей із використанням волоконних лазерів потужністю 1, 1,5 та 2 кВт, необхідно врахувати вплив хімічного складу оброблюваних матеріалів. Зокрема, негативний вплив на показники різання справляє наявність у сталі легувальних домішок — вуглецю, марганцю та кремнію, які підвищують в'язкість розплаву. Чим вищим є їхній відсотковий вміст, тим гіршими є результати обробки.

Результати досліджень лазерного різання нержавіючих сталей двох різних марок свідчать, що на швидкість та якість процесу істотно впливає і вміст хрому. Цей елемент також сприяє збільшенню в'язкості розплаву, що ускладнює його видалення із зони різання. Відповідно, за збільшення вмісту хрому показники якості різання погіршуються [33].

Дослідження проводилися на прикладі різання складнопрофільних деталей, виготовлених із нержавіючих сталей таких марок:

сталь 95X18 товщиною 4 мм, що містить 0,9 % вуглецю, 17–18 % хрому, 0,8 % марганцю, 0,8 % кремнію, без нікелю; основним компонентом є залізо;

сталь 40X13 товщиною 5 мм, що містить 0,4 % вуглецю, 12–12,5 % хрому, до 0,6 % марганцю, до 0,6 % кремнію, до 0,6 % нікелю; решта – залізо та незначна кількість домішок.

Уже на основі наведеного складу можна стверджувати, що за однакових умов обробки результати різання сталі марки 95X18 будуть гіршими через підвищену в'язкість розплаву, що ускладнює його ефективне видалення з фронту різання. Різання сталі 40X13 товщиною 5 мм здійснювалося як у середовищі стисненого повітря, так і в середовищі азоту, які подавались у двоструменеве сопло типу NK15x15 під тиском 16 бар. Сталь 95X18 товщиною 4 мм оброблялася лише в середовищі стисненого повітря за тих самих параметрів. Використання стисненого повітря як допоміжного газу дозволяє наочно продемонструвати залежність результатів різання від хімічного складу сталі та від середовища обробки.

Вибір зазначених марок і товщин сталей було обумовлено технічним завданням замовника. Проте виявлені закономірності є характерними і для інших марок нержавіючих сталей та товщин до 10 мм.

Для виконання різання використовувався волоконний лазер потужністю 2 кВт з розбіжністю випромінювання близько 1,2 мрад, сфокусований об'єктивом з фокусною відстанню $f = 145$ мм. Поверхня зразків розташовувалась нижче точки фокусування на $\Delta f = 2$ мм або 3 мм залежно від

товщини сталі. Відповідно, діаметр плями фокусування становив $d_1 = 200$ мкм при $\Delta f = 2$ мм та $d_1 = 300$ мкм при $\Delta f = 3$ мм. Щільність потужності випромінювання в зоні фокусування досягала $W = 6,7 \cdot 10^6$ Вт/см² та $W = 3 \cdot 10^6$ Вт/см² відповідно.

За вищої щільності потужності у процесі абляції переважає рідка фаза, а за нижчої – розвивається випаровування, що запускається центральною зоною розподілу інтенсивності. Отримані результати підтверджують, що за зазначених значень щільності потужності якості обробки нержавіючих сталей виявляється незадовільною, що підтверджується виглядом бокових поверхонь різь.

Експериментальні підтвердження ефективності лазерного різання нержавіючих сталей товщиною 10 мм. Факт технічної реалізованості такого різання підтверджується роботами [34]. Дослідження виконувалися з використанням волоконного лазера потужністю 4 кВт у середовищі азоту та стисненого повітря, що подавалися через сопло типу 3.0S під тиском 16 атм і 8 атм відповідно.

Фокусування випромінювання здійснювалося за допомогою об'єктива з фокусною відстанню $f = 200$ мм. Узгодження об'єктива з $f = 200$ мм із коліматором лазера з $f = 100$ мм було таким, що сприяло зменшенню втрат випромінювання у придонній області фронту різання завдяки підвищеному відбиттю від його бічних поверхонь.

Разом з тим, за такої оптичної конфігурації не виключалося формування подовженого дроселюючого каналу, що потенційно могло би погіршити параметри різь. Проте подальший аналіз дозволив припустити, що вплив такого подовження є не критичним. Це припущення ґрунтується на тому, що при застосуванні об'єктива з $f = 200$ мм та розфокусуванні $\Delta f = 2$ мм діаметр світлової плями локалізації випромінювання становив $d_1 = 200$ мкм, що забезпечувало достатню щільність потужності для реалізації процесу наскрізного різання. Усереднене значення щільності потужності в зоні фокусування становило $W = 6.7 \cdot 10^6$ Вт/см². Такий рівень енергетичного

навантаження дозволяв обґрунтовано очікувати, що навіть за умови утворення подовженого дроселюючого каналу якість бокової поверхні різь, виконаного в середовищі азоту, залишиться прийнятною для промислового використання.

Експериментальні результати підтвердили це припущення. На фотографії (рис. 1.5) зображено стан бокової поверхні різь нержавіючої сталі товщиною 10 мм, здійсненого в середовищі азоту. Для порівняння на рис. 1.6 представлено аналогічний зріз, виготовлений у тій же сталі, але в середовищі стисненого повітря. Проведення порівняльного аналізу дає змогу глибше зрозуміти відмінності у фізико-хімічних процесах, які розвиваються під час різання в обох середовищах.

Насамперед впадає в око суттєва різниця в структурі бокових поверхонь. На різі, виконаному в середовищі азоту з швидкістю 0,8 м/хв (рис. 1.5), чітко простежуються три зони з різними характеристиками. У верхній зоні, глибиною близько 0,8 мм, спостерігається найвища чистота поверхні, що свідчить про домінування випаровування у механізмі абляції.

У середній зоні, заввишки приблизно 1,1 мм, візуально помітні ознаки формування дроселюючого каналу, а також викривлення ребер у нижній його частині. Сам канал утворився на глибині 3,5 мм від поверхні заготовки. Його незначна довжина підтверджується відсутністю акумульованої рідкої фази – вона майже повністю пройшла крізь канал у третю, нижню зону.

У третій зоні фіксується утворення ребер, виступ яких становить близько 20 мкм. Їхня понижена частота свідчить про стабільне видалення розплаву. Між ребрами чітко видно застигли струмені рідкої фази, що залишилися після її проходження через канал.



Рисунок 1.5 – Бічна поверхня різу в нержавіючій сталі товщиною 10 мм, отриманого за використання в якості асистуючого газу азоту

На завершення обговорення результатів лазерного різання нержавіючої сталі у середовищі азоту варто нагадати, що поліпшення якості процесу досягається за таких умов: використання волоконного лазера потужністю 4 кВт з низькою розбіжністю променя (до 0,5 мрад) та заглиблення положення фокусу в тіло деталі на рівні $\Delta f = -5$ мм. Також було встановлено, що поліпшення якості різання та підвищення його швидкості за низької розбіжності променя досягається шляхом використання фокусуючого об'єктива з фокусною відстанню 300 мм.

На боковій поверхні різі, отриманого в середовищі стисненого повітря (як видно на фотографії, представлений на рис. 1.6), чітко виділяються три зони. У верхній зоні, висота якої становить приблизно 3,3 мм, сформувалися невисокі виступи – ребра, що помітно підносяться над поверхнею різі. Це відбулося через домінування процесу випаровування в абляції на цій ділянці, тиск якого ефективно витісняє рідку фазу. Комбінований вплив цього явища та наявність нижче розташованого дроселюючого каналу сприяли утворенню таких ребер.

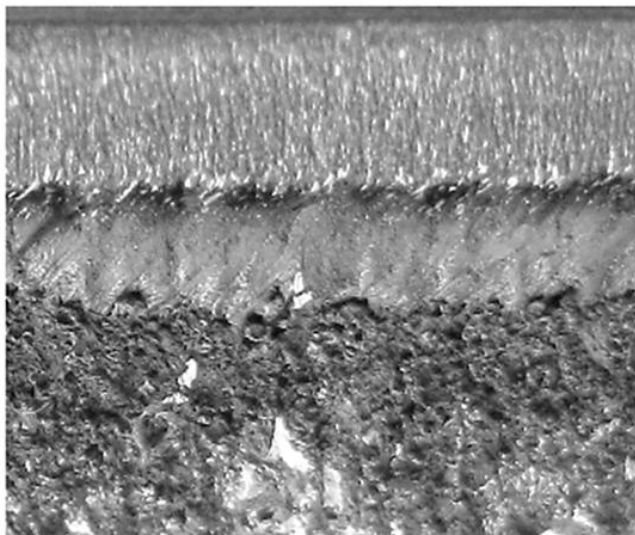


Рисунок 1.6 – Бічна поверхня різ у нержавіючій сталі товщиною 10 мм, отриманого за використання в якості асистуючого газу повітря

Сірувато-темне забарвлення поверхні верхньої зони вказує на те, що в цій області періодично й на короткий час виникала екзотермічна реакція. Її періодичний і короткотривалий характер пояснюється тим, що тонкий шар рідкої фази, що залишався на фронті різ, циклічно покривався тугоплавкою оксидною плівкою Cr_2O_3 . Проте сукупна дія випаровування та процесу горіння призвела до збільшення глибини першої зони до 3,3 мм.

Після верхньої зони спостерігається накопичення рідкої фази, спричинене утворенням у цій області дроселюючого каналу. Оскільки в цю зону продовжує надходити стиснене повітря з ще відносно невисоким рівнем зниження тиску, вміст кисню в ньому (близько 20 %) сприяє розвитку тут екзотермічної реакції.

У зоні нижче дроселюючого каналу на смузі шириною приблизно 1,5 мм відбувається згоряння розплаву. Це зумовлює відносну гладкість поверхні в цій ділянці. Крім того, вона вкрита сірувато-темною оксидною плівкою, як зазначено у джерелі [35].

Факт наявності процесу горіння підтверджується також наявністю виразного заглиблення в межах цієї смуги. Інакше кажучи, у цій точці знімання металу відбувається вглиб каналу. Це пов'язано з тим, що

накопичена в цій області рідка фаза нагрівається за рахунок додаткової енергії, яка виділяється під час горіння. Внаслідок теплопровідності зона матеріалу, товщина якої відповідає глибині заглиблення, прогрівається до температури плавлення. На поверхні впадини чітко видно залишкові потоки застиглої рідкої фази, із розрізняваними шириною та висотою. При цьому частота їх повного видалення зменшується, що виявляється в утворенні похилих мікровпадин на дні заглиблення. Це пояснюється тим, що видалення розплаву в цій зоні відбувається не тільки внаслідок горіння, а й через зменшений сумарний тиск випаровування та асистуючого газу.

Нижче дроселюючого каналу тиск стисненого повітря різко знижується, тому швидкість горіння рідкої фази зменшується. Цей висновок підтверджується тим, що поверхня різку в цій ділянці вкрита вже не тонкою оксидною плівкою, як це спостерігається вище, а відносно великими частками згорілого металу. Їхня поверхня також оксидована, що надає їм чорного кольору.

Підсумовуючи можливо констатувати, що у процесі різання як у середовищі азоту, так і в середовищі стисненого повітря спостерігається зменшення ширини різку до приблизно 100–150 мкм. Таке звуження різку погіршує ефективність видалення рідкої фази з підвищеною в'язкістю. У результаті, зі зростанням глибини фронту різання, щільність потужності в його придонній зоні знижується. Під час різання у середовищі стисненого повітря, навіть при подачі його до сопла під тиском до 16 атм, наявність тугоплавкої плівки Cr_2O_3 на поверхні фронту все одно ускладнює видалення розплаву

1.5.3 Оцінка впливу типу асистуючого газу на продуктивність та якість газолазерного різання легованих сталей

Газолазерне різання є високоточним процесом, що поєднує використання лазерного променя і асистуючого газу для забезпечення

ефективного та швидкого розрізання матеріалів. Вибір асистуючого газу відіграє ключову роль у забезпеченні якості різку, а також в загальній продуктивності процесу. Тип газу впливає на кілька факторів, таких як швидкість різання, чистота поверхні, а також можливі зміни в хімічному складі та структурі матеріалу на межі різку.

Вплив типу асистуючого газу на швидкість різання та ефективність. Швидкість і ефективність газолазерного різання значною мірою залежать від типу асистуючого газу. У загальному випадку використовуються такі типи газів:

- **Кисень:** Використання кисню дозволяє підвищити швидкість різання, оскільки кисень активно взаємодіє з матеріалом і підтримує процес окислення на межі різку. Це збільшує швидкість абляції матеріалу та підвищує ефективність процесу. Проте при цьому можуть виникати оксиди на поверхні різку, що знижує якість, особливо для матеріалів, чутливих до окислення, таких як нержавіючі сталі або сплави з високим вмістом легуючих елементів.
- **Азот:** Азот не взаємодіє хімічно з матеріалом і не сприяє утворенню оксидів, тому він забезпечує чисту поверхню без забруднень. Хоча швидкість різання з азотом може бути нижчою, ніж з киснем, цей газ забезпечує кращу якість країв та відсутність окалин. Азот часто використовується для різання матеріалів, що вимагають високої точності, таких як тонкі листи з нержавіючої сталі чи титану.
- **Повітря:** Повітря є більш економічним варіантом, оскільки складається з природних компонентів – азоту та кисню. Для деяких застосувань, де не критична висока чистота поверхні, повітря може бути прийнятним варіантом. Використання повітря призводить до присутності окислення на межі різку, що знижує якість, однак для великих серій та менш вимогливих матеріалів це може бути достатньо ефективно та економічно вигідно.

Вплив асистуючого газу на якість поверхні та точність різку:

Тип газу має значний вплив на якість поверхні різь, що є критично важливим для багатьох застосувань, де точність і чистота країв є вирішальними.

- **Кисень:** Використання кисню призводить до утворення оксидної плівки на поверхні матеріалу, що може знижувати його корозійну стійкість. Для матеріалів, таких як вуглецева сталь, це може бути допустимим, оскільки окислення легко видаляється в подальших етапах обробки. Однак для нержавіючих сталей або алюмінієвих сплавів утворення оксидів може бути небажаним, оскільки це впливає на їх естетичні характеристики та фізико-хімічні властивості.

- **Азот:** Азот, у свою чергу, дозволяє отримати чисті краї без окислення, що є важливим для матеріалів, чутливих до змін на поверхні, таких як нержавіюча сталь чи титанові сплави. Завдяки відсутності хімічних реакцій з матеріалом, азот забезпечує кращу точність та відсутність дефектів на межі різь.

- **Повітря:** Використання повітря призводить до присутності незначної кількості оксидів на межі різь, що може погіршити естетичні характеристики та корозійну стійкість матеріалу. Однак для деяких застосувань, де це не є критичним, цей газ може бути прийнятним через свою економічність.

Вплив газу на структуру матеріалу:

Процес газолазерного різання здатен змінювати мікроструктуру матеріалу в прифронтальній зоні різь, що, у свою чергу, може впливати на його механічні властивості. Вибір асистуючого газу визначає характер теплових процесів у зоні різання та суттєво впливає на структурно-фазовий стан матеріалу в зоні зрізь

- **Кисень:** Використання кисню може призвести до збільшення температури на межі різь, що в свою чергу може сприяти більшій глибокій зміні структури матеріалу, що зазвичай проявляється у збільшенні твердості або утворенні окисів.

- **Азот:** Азот не змінює структуру матеріалу так сильно, оскільки не реагує з матеріалом. Однак під час різання можуть виникати термічні напруження, що впливають на точність різу, проте це не так сильно, як при використанні кисню.

Тип асистуючого газу є важливим фактором, що визначає продуктивність та якість газолазерного різання легованих сталей. Використання кисню дозволяє досягнути високої швидкості різання, але знижує якість країв через утворення оксидів. Азот забезпечує чистіші краї та точніші результати, проте його використання може знижувати швидкість процесу. Повітря є економічним варіантом, але може призвести до утворення незначних оксидів на межі різу, що може бути непридатним для деяких матеріалів.[36].

1.6 Висновки за розділом 1

1. Проведено детальний аналіз відомих результатів досліджень процесу газолазерного різання нержавіючих сталей випромінюванням потужних оптоволоконних лазерів.

2. Розглянуто вплив базових параметрів факторного простору на продуктивність та якість газолазерного різання металів.

3. Виконана загальна оцінка ролі і місця різних типів асистуючих газів на процес та результати газолазерного різання.

Аналіз літературних джерел показав, що потенціал сучасних потужних (6 кВт – 12 кВт) оптоволоконних лазерів далеко не завжди використовується в повній мірі через недостатнє експериментальне обґрунтування збалансованості базових параметрів процесу, включаючи потужність лазера, фокусну відстань оптичної головки, положення фокусу відносно поверхні заготовки, типу та тиску допоміжного газу, внутрішню структуру та діаметр сопла, відстанню від сопла до поверхні заготовки.

Виходячи з наведеного сформульовано мету, об'єкт, предмет і основні завдання дослідження.

Мета і завдання дослідження. Мета роботи: підвищення ефективності вибору раціональних параметрів технологічних процесів різання нержавіючих сталей на лінійці установок, укомплектованих оптоволоконними лазерами потужністю 12 кВт, які гарантовано, з високим рівнем відтворюваності, забезпечують максимальну продуктивність процесу та відповідність вимогам замовників до якості деталей.

Для досягнення поставленої мети в дисертаційній роботі вирішуються наступні завдання:

1. Провести аналіз відомих результатів досліджень процесу газолазерного різання нержавіючих сталей випромінюванням потужних оптоволоконних лазерів.

2. Підібрати та розробити комплекс методик, приладів та обладнання для проведення системних експериментальних досліджень газодинамічних процесів в зоні різання та оцінки якості поверхонь різі згідно вимог стандарту ISO 9013:2017.

3. Провести системний комплекс досліджень та отримати достатньо точні експериментальні дані про закономірності зміни діаметра струменя та величини ріжучого тиску асистуючого газу на поверхні деталі за використання конкретного типу сопла, моделі технологічної установки та параметрів процесу газолазерного різання.

4. Експериментально обґрунтувати раціональні параметри режимів різання нержавіючих сталей випромінюванням оптоволоконного лазера потужністю 12 кВт за використання в якості асистуючих газів азоту та повітря, які забезпечують високі рівні продуктивності і відтворюваності процесу та якості отриманих деталей.

5. Виконати аналіз та порівняння отриманих результатів та оцінити рівень впливу типу асистуючого газу на параметри процесу та якість отриманих деталей.

6. Запропонувати підходи та розробити ефективні регресійні моделі для розрахунку параметрів режимів різання нержавіючих сталей

випромінюванням оптоволоконного лазера потужністю 12 кВт, які забезпечують високу продуктивність процесу та відповідну якість отриманих деталей.

Об'єкт дослідження. Газодинамічні і технологічні параметри процесу газолазерного різання нержавіючих сталей випромінюванням оптоволоконного лазера потужність 12 кВт.

Предмет дослідження. Закономірності впливу типу асистуючого газу та його тиску, внутрішньої структури і геометричних параметрів сопла, фокусної відстані оптичної головки, положення фокусу відносно поверхні деталі, висоти різання (відслідковуваного зазору), швидкості різання на продуктивність процесу і якість отриманих деталей.

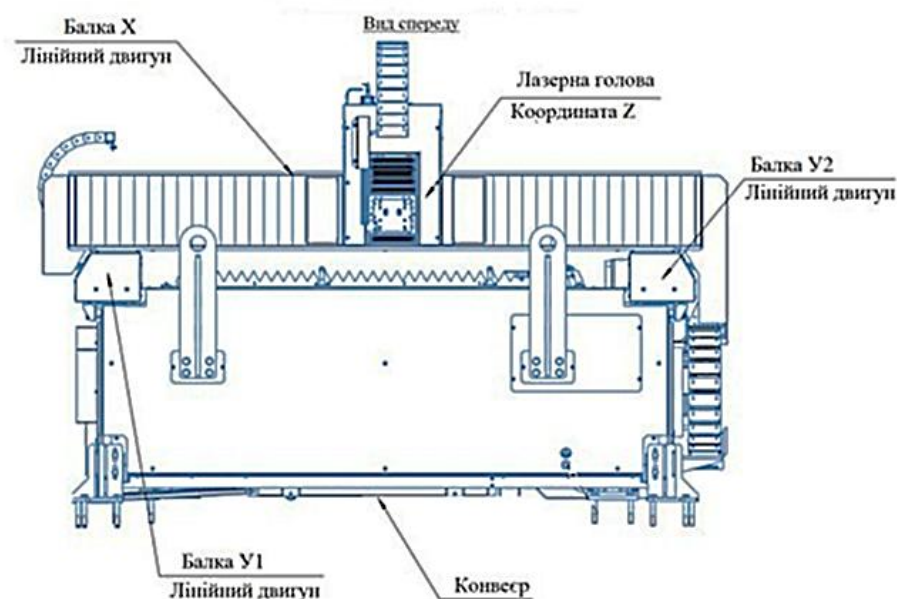
РОЗДІЛ 2 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ОБЛАДНАННЯ І МЕТОДИ ПРОВЕДЕННЯ ДОСЛІДЖЕНЬ

2.1 Експериментальна база досліджень та оцінка достовірності результатів

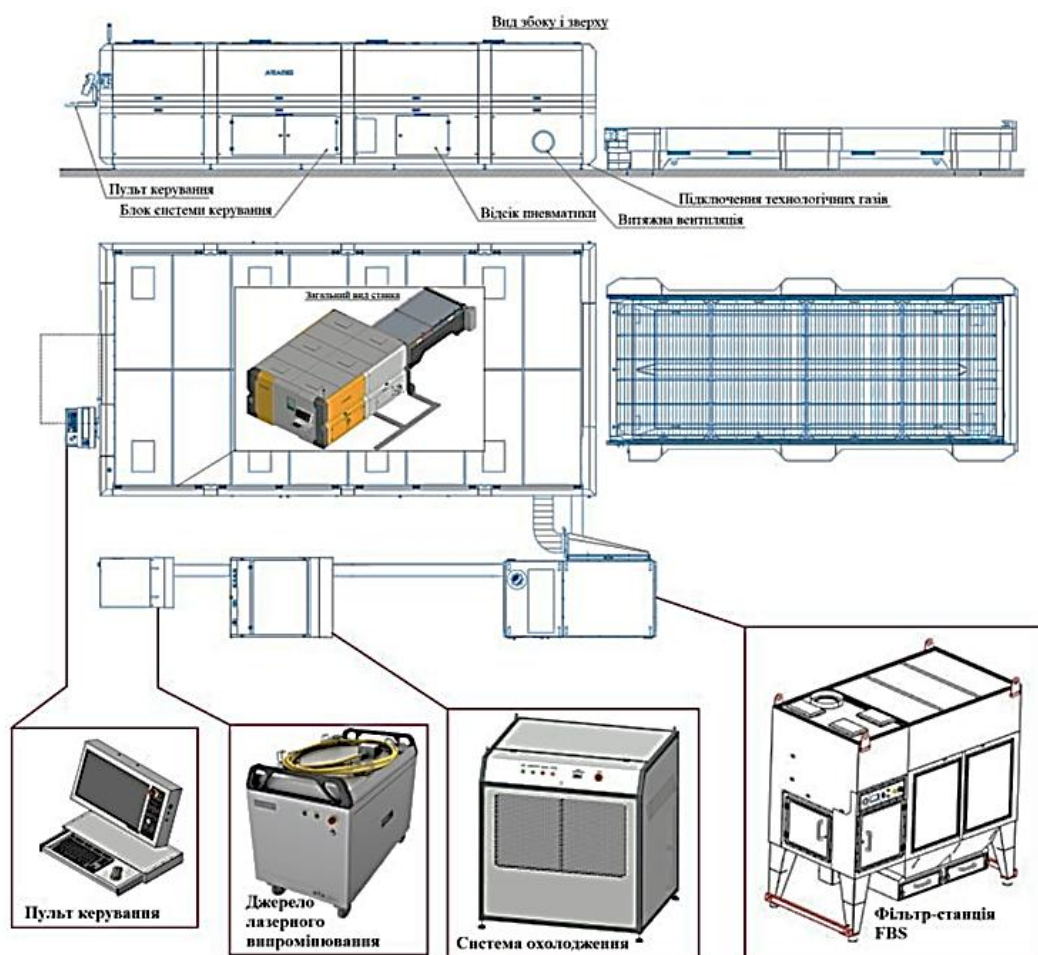
2.1.1 Технічні характеристики верстата для різання металів випромінюванням потужного оптоволоконного лазера

Для проведення досліджень було використано лазерний технологічний комплекс нової лінійки AFX-PRO-12000-1530LD, який вперше для серії AFX комплектується ітербієвим волоконним лазером вихідною потужністю 12000W та характеризується високою точністю та надійністю під час виконання технологічних операцій. Загальна структура комплексу AFX-PRO-12000-1530LD представлена на рис. 2.1. Він складається з 5 базових систем:

- система руху (вісі X, Y, Z);
- блок системи керування (ЧПК-сервер + ПЗ CutConrol);
- оптична система (джерело лазерного випромінювання, оптичне волокно, оптичний конектор, оптична головка);
- система подачі асистуючих технологічних газів (O_2 , N_2 , AIR);
- система охолодження (чіллер).



а)



б)

Рисунок 2.1 – Загальна структура лазерного технологічного комплексу AFX-PRO-12000-1530LD: а) – компоновка приводів системи руху; б) – план розміщення базових технологічних систем

Основні паспортні дані комплексу наведені в табл. 2.1.

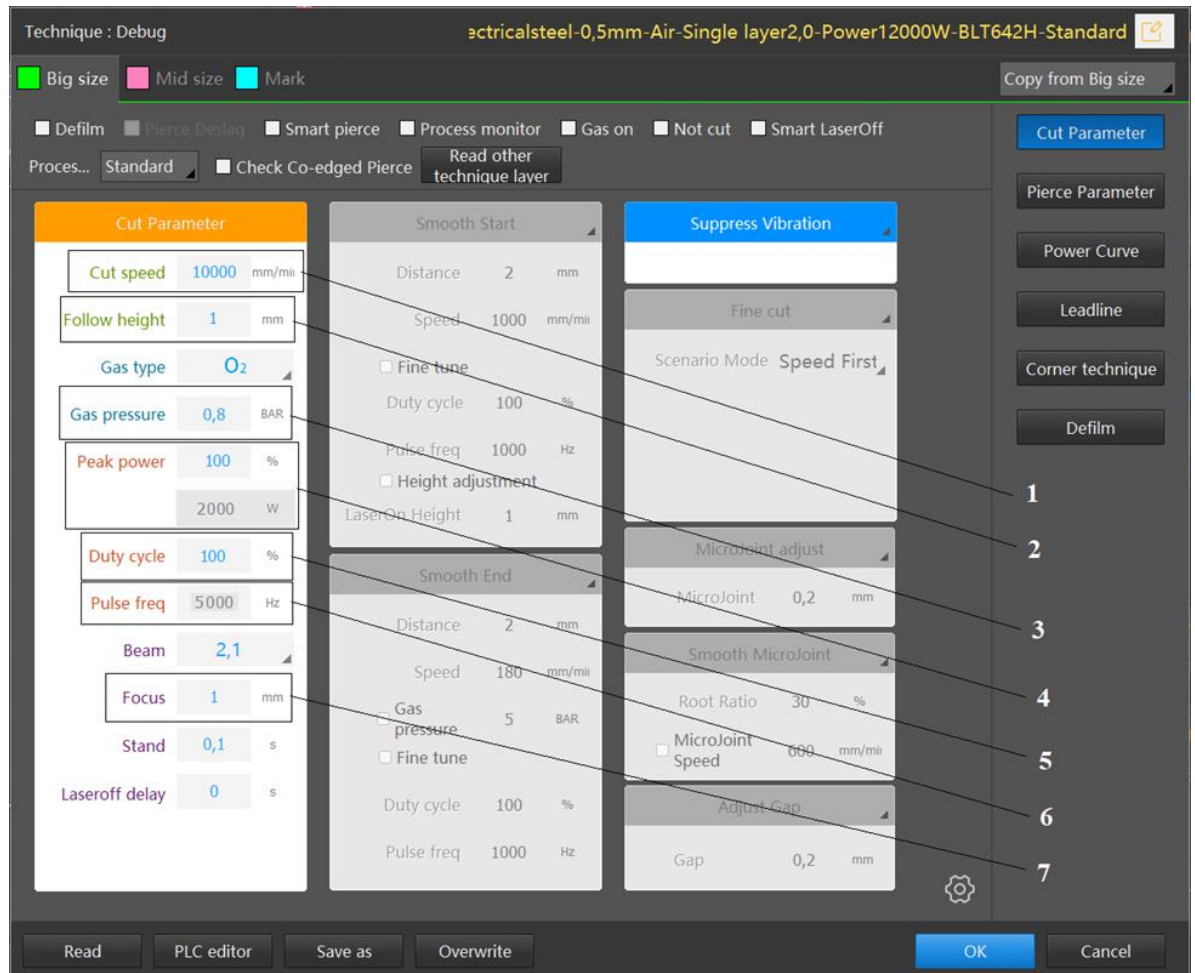
Таблиця 2.1 – Технічні характеристики лазерного технологічного комплексу AFX-PRO-12000-1530LD

Технічні характеристики лазерного технологічного комплексу AFX-PRO-12000-1530LD	
Лазерне джерело	
Тип лазера	ітербієвий волоконний 12000W
Передача променю	через оптоволокну
Режими випромінювання/різу	імпульсний, безперервний
Довжина хвилі лазерного випромінювання	1064-1070 нм

Оптична головка	
Система зміни захисного скла	картриджна
Система фокусування	автоматична
Система підтримки фокусу	безконтактна, автоматична
Характеристики точності	
Точність позиціонування по координатам X, Y,	± 0.01 мм
Дискретність завдання положення	1 мкм
Характеристики розкрою	
Ширина різу (в залежності від товщини матеріалу)	0,08-0,2 мм
Застосовувані технологічні гази	кисень, азот, аргон, стиснене повітря
Перемикання ріжучого газу	автоматичне
Система руху	
Кінематична схема	портальна, лист нерухомий
Привід	лінійний, прямий
Двигуни	синхронні безколекторні лінійні двигуни
Максимальна векторна швидкість переміщень XY	180 м/хв
Розмір поля обробки	1500x3000 мм
Стіл	двопалетний автоматизований човниковий стіл
Час зміни столів	18 сек
Система видалення відходів	піддони
Хід координати Z	100 мм
Лінійний привід на координатах	X, Y, Z
Програмне забезпечення	
Система ЧПК	ARAMIS CNC
Розкладка деталей на віртуальному столі	автоматична/ручна
Формати даних	DXF, DWG, G-code
Можливі методи завантаження	інтернет, локальна мережа, USB -

даних	флеш- накопичувач
Можливість установки мікропереминок в контурі розкрою	+
Розкрій методом «FlyCut» - різка нальоту	+
Автоматичний облік еквідистанти	+
Можливість блокувати подальші правки оператором	+
База режимів розкрою	+
Можливість змінювати / додавати режими	+
Розкрій загальним різом в автоматичному режимі, враховуючи ширину різу	+
Оптимізація холостого ходу	+
Заборона проходу ріжучої головки над вирізаними деталями	+
Облік заготовок, одержуваних деталей і ділових відходів	+
Візуалізація процесу роботи верстата	+
Створення звітів і завдань оператору	+
Дистанційна діагностика верстата	+
Загальні характеристики	
Напруга електромережі	380, $\pm 10\%$, 50Гц, 3 фази

Портальні лазерні комплекси серії AFX забезпечують автоматизацію виробничих процесів із поступовим розширенням функціональних можливостей у кожній наступній моделі. На рис. 2.2 наведено інтерфейс програми Nur CUT, який слугує для внесення і коригування параметрів процесу різання, які автоматично підтримуються і контролюються системою числового програмного керування ARAMIS CNC.[38]



1 – швидкість різання, мм/хв; 2 – відслідковуваний зазор, мм; 3 – тиск асистуючого газу, Бар; 4 – потужність лазерного променя, Вт; 5 – робочий цикл імпульсу (безперервний чи імпульсний цикл); 6 – робоча частота імпульсів, Гц; 7 – положення фокусу відносно торця сопла, мм;

Рисунок 2.2 – Інтерфейс для внесення параметрів різання в програмі Нур CUT на станку AFX-PRO-12000-1530LD

Впровадження роботизованих систем та оптимізація повторюваних технологічних операцій є не лише актуальною тенденцією в сучасній промисловості, але й важливим кроком до підвищення якості продукції та задоволення зростаючих вимог споживачів. Комплекси цієї серії становлять високопродуктивне рішення, орієнтоване на потреби середніх і великих підприємств.

2.1.2 Товщини та хімічний склад зразків легованих сталей, що використовувалися при проведенні досліджень

У сучасних умовах значної популярності на ринку набуває американська нержавіюча сталь **AISI 304**. аналог нержавіючої сталі марки **08X18H10**, близький до неї за хімічним складом і фізико-механічними властивостями.

Для проведення експериментальних досліджень було обрано саме сталь **AISI 304**, оскільки вона є однією з найпоширеніших аустенітних нержавіючих сталей, яка поєднує високі експлуатаційні характеристики з доступною вартістю. На ТОВ «Араміс», де виконувалися дослідження, найчастіше використовуються листові заготовки товщиною 0,8 мм, 1,5 мм, 2 мм, 6 мм, 10 мм та 12 мм. Використання оптоволоконного лазера вихідною потужністю 12000 Вт при раціональному виборі параметрів процесу дозволяє з прийнятною якістю різати наступний стандартний набір товщин 14 мм, 16 мм, 18 мм, 20 мм, 25 мм.

AISI 304 це хромонікелева аустенітна сталь, яка містить приблизно 18 % хрому та 8–10 % нікелю. Завдяки вмісту нікелю аустенітна фаза стабілізується в широкому температурному діапазоні – від понижених температур до приблизно 1050 °C. Основними перевагами цієї сталі є висока корозійна стійкість, хороша пластичність і міцність, а також відмінна технологічність, що забезпечує її широке застосування як конструкційного матеріалу в різних галузях промисловості.[39]

У відпаленому стані AISI 304 є немагнітною, однак під час холодної деформації або зварювання в структурі можуть утворюватися мартенситні або феритні включення, що зумовлює часткову намагніченість матеріалу. Основні експлуатаційні характеристики обраної для досліджень сталі наведені в табл. 2.2.

Таблиця 2.2 – Експлуатаційні характеристики нержавіючої сталі AISI 304

Корозійна стійкість	Сталь 304 містить хром (18%) і нікель (8%), що забезпечує високу стійкість до корозії. Це робить її ідеальною для використання в умовах вологи та агресивних середовищ.
Температурна стабільність	Цей сплав здатний витримувати високі температури без значної зміни своїх механічних властивостей, що робить його придатним для застосувань в умовах підвищених температур.
Оброблюваність	304 сталь легко піддається обробці: її можна різати, зварювати та формувати, що полегшує виготовлення складних форм та конструкцій.
Гігієнічність	Завдяки своїй гладкій поверхні та відсутності пор, сталь 304 є гігієнічною, що робить її популярною у харчовій, медичній та фармацевтичній промисловості.
Естетика	Нержавіюча сталь 304 має привабливий зовнішній вигляд, що робить її популярною у дизайні інтер'єрів, кухонь та різних декоративних елементах.
Довговічність	Цей матеріал характеризується високою міцністю та тривалим терміном служби, що знижує витрати на обслуговування та заміну.
Універсальність	Сталь 304 може використовуватися в широкому спектрі застосувань: від побутових приладів до промислових машин і конструкцій.

Цю марку нержавіючої сталі застосовують практично у всіх сферах життєдіяльності людини: хімічна, харчова та целюлозно-паперова промисловість. Її активно використовують в електроенергетиці, захисті навколишнього середовища, транспорті та автомобільній промисловості. Домашній побут: виготовлення ложок, виделок, сковорід, каструль та іншого кухонного начиння, у тому числі внутрішні частини високоякісних посудомийних та пральних машин та висококласних м'ясорубок. Також користується величезною популярністю у будівництві, архітектурі та дизайні. Широко використовується в елементах конструкцій, що експлуатуються за умов високої вологості або під інтенсивним навантаженням

Основні механічні та фізичні характеристики AISI 304:

- межа плинності – близько 310 МПа;
- тимчасовий опір розриву – від 515 до 600 МПа;
- твердість за Брінеллем (НВ) – приблизно 170;
- густина – 7,74 г/см³.

AISI 304 демонструє високу механічну міцність, відмінну стійкість до корозії, термічних коливань і впливу агресивних середовищ. Вона добре піддається зварюванню, глибокій витяжці, формуванню та обробці ручним і механізованим інструментом. Цей сплав зберігає свої властивості в широкому температурному діапазоні – від -190°C до $+600^{\circ}\text{C}$, що дозволяє його застосування в умовах екстремальних температур та агресивних середовищ.

Стандартний хімічний склад AISI 304:

Основними елементами у складі сплаву є:

- залізо (близько 69 %),
- хром (17–19 %),
- нікель (9–11 %).

Допоміжні елементи: марганець, кремній, вуглець, мідь, титан, у невеликих концентраціях. Вміст шкідливих домішок, таких як фосфор і сірка, не перевищує 0,03 %.

Додатковим аргументом для вибору даної сталі є існування низки міжнародних аналогів сталі AISI 304, які мають подібні експлуатаційні властивості та технічні характеристики. Незначні відмінності у хімічному складі окремих марок дозволяють адаптувати матеріал під специфічні вимоги окремих виробничих процесів та не можуть суттєво впливати на отримані раціональні параметри газолазерного різання, отримані для AISI 304. Основні марки аналогів наведені в табл. 2.3.

Таблиця 2.3 – Зарубіжні аналоги марки сталі AISI 304 (аналог 08X18H10)

Зарубіжні аналоги марки сталі AISI 304 (аналог 08X18H10)	
США	AISI 304, 304H, S30400
Німеччина	1.4301, 1.5301, X5CrNi18-10, X5CrNi18-9, X6CrNi18-9
Японія	SUS304
Франція	304F00, X5CrNi18-10, Z4CN19-10FF, Z5CN17-08, Z6CN18-09, Z7CN18-09
Англія	304S11, 304S15, 304S16, 304S17, 304S18, 304S25, 304S31
Євросоюз	1.4301, X5CrNi18-10, X6CrNi18-10
Італія	X3CrNi18-10, X5CrNi18-10
Іспанія	F.3504, F.3551, X5CrNi18-10
Китай	0Cr19Ni9, 0Cr18Ni9
Швеція	2332, 2333
Польща	0H18N9
Чехія	17240
Австрія	X5CrNi18-10OS

2.2 Методики експериментальних досліджень

2.2.1 Методи оцінки достовірності результатів вимірювань

З огляду на нормальний розподіл результатів вимірювань, доцільно застосовувати метод визначення похибки за критерієм Стьюдента. При обробці результатів досліджень виконують наступні операції:

- Визначають середнє з n вимірювань:

$$\langle x \rangle = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i . \quad (2.1)$$

- Обчислюють середньоквадратичну похибку середнього арифметичного:

$$S = \sqrt{\sum_{i=1}^n \frac{(\langle x \rangle - x_i)^2}{n(n-1)}} . \quad (2.2)$$

– Задають надійну ймовірність a і визначають з табличних даних коефіцієнт Стюдента $t_{a,n}$. Для надійної ймовірності $a=0.95$ і кількості виконаних вимірювань $n=5$, коефіцієнт Стюдента становить $t_{a,n}=2.776$.

– Визначають напівширину надійної ймовірності (абсолютна похибка результату вимірювань):

$$\Delta x = \sqrt{\Delta x_{\text{сист}}^2 + \Delta x_{\text{вун}}^2}, \text{ де } \Delta x_{\text{вун}} = t_{a,n} S. \quad (2.3)$$

– Оцінюють відносну похибку результату вимірювань

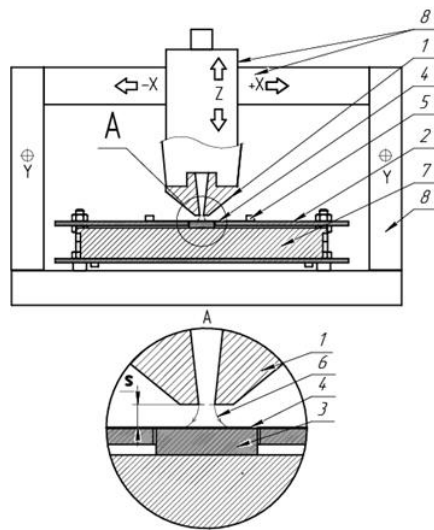
$$\delta = \frac{\Delta x}{\langle x \rangle}. \quad (2.4)$$

2.2.2 Методики експериментальних досліджень параметрів струменя асистуючого газу в зоні різання

Виходячи з наведеного, було поставлено задачу створити установку та відповідну методику, які дають можливість отримати достатньо точні експериментальні дані про закономірності зміни діаметра струменя та величини асистуючого тиску на поверхні деталі за використання конкретного типу сопла, моделі технологічної установки та параметрів процесу газолазерного різання.

Загальна схема та фотографія установки для проведення досліджень представлена на рис. 2.3. Запропонована методика вимірювання діаметра струменя та тиску асистуючого газу на поверхню деталі ґрунтується на використанні конструкції спеціально розробленої установки (рис. 2.3 б). Установка фіксується на робочому столі верстата (рис. 2.3 а). Оператор за допомогою юстувального лазера та приводів подачі встановлює сопло оптичної головки 1 так, щоб центральні вісі сопла та циліндра передачі зусилля 3 (конструктивно розміщений безступінчасто по відношенню до верхньої пластини 2) співпадали. Потім блок відслідковування зазору

визначає координату вісі Z при торканні торцем сопла поверхні циліндра 3, приймаючи її за нульову координату відліку. Високочутлива копівувальна



а)



б)

1 – одноканальне та двоканальне сопла компанії Thermacut з вихідним діаметром 1,5 мм; 2 – верхня пластина установки реєстрації зусилля тиску асистуючого газу; 3 – циліндр передачі зусилля від дії струменя асистуючого газу на вимірювач; 4 – копівувальна плівка реєстрації діаметра струменя; 5 – магнітні стійки фіксації плівки; 6 – струмінь асистуючого газу; 7 – датчик зусилля; 8 – приводи координатних переміщень серійного верстата LTS-PRO-6000-1530-LD фірми Араміс; s – контрольований зазор між соплом та циліндром 3.

Рисунок 2.3 – Загальна схема вимірювання діаметра струменя та тиску асистуючого газу (а), фотографія установки для реєстрації діаметра струменя та тиску асистуючого газу (б) плівка товщиною 0,01 мм фіксується на поверхні пластини 2 магнітними стійками 5. Манометричний тиск задається пневмосистемою верстата та додатково контролюється за допомогою зовнішнього манометра. Датчик 7 забезпечує вимірювання зусилля від дії струменя 6 з похибкою, що не перевищує ± 0.00981 Н. Відбитки від дії тиску струменя на копівувальну плівку фотографувалися та оброблялися в

середовищі САПР. Завдяки цьому похибка визначення діаметра струменя асистуючого газу на поверхні деталі не перевищувала $\pm 0,01$ мм.

На рис. 2.4 представлено зразок результатів вимірювання діаметрів струменя після одного з експериментів. В якості еталона для визначення діаметрів плями було використано оптоволокно діаметром 0,5 мм. Паспортне відхилення розмірів оптоволокна від номінального значення не перевищує 1 мкм. Усереднений тиск гальмування асистуючого струменя розраховувався діленням виміряного зусилля на площу плями.



Рисунок 2.4 – Результати визначення величини діаметра струменя асистуючого газу в середовищі САПР

В оптичній головці верстата встановлювалися серійні одноканальне та двоканальне сопла компанії Thermacut з вихідним діаметром центрального отвору 1,5 мм. В експериментах в якості асистуючого газу використовували повітря з манометричним тиском на вході в сопло 0,5 МПа та 1 МПа.

Величина зазору s між зрізом сопла та циліндром передачі зусилля 4 системи реєстрації встановлювалася та контролювалася системою

відслідковування зазору верстата LTS-PRO-12000-1530-LD з похибкою $\pm 0,01$ мм.

Була проведена серія експериментів по визначенню закономірності впливу конструкції сопла, зазору між соплом і деталлю та манометричного тиску на вході в сопло на розміри і характер зміни діаметра струменя асистуючого газу та величину ріжучого тиску, який ним створюється на поверхні деталі. Типовий результат вимірювань представлено на рис.2.5 [40]. Всі експерименти повторювалися тричі. Максимальний розкид отриманих значень не перевищував 3 %.

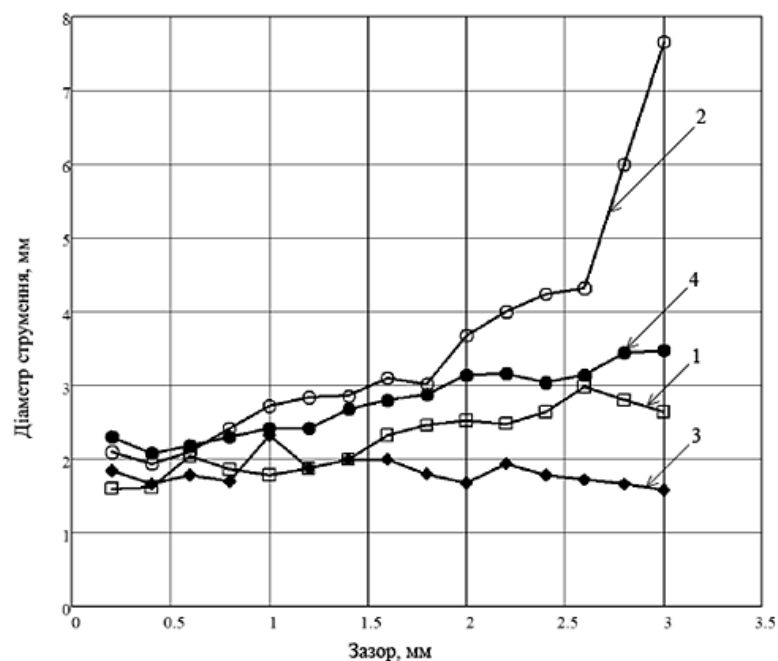
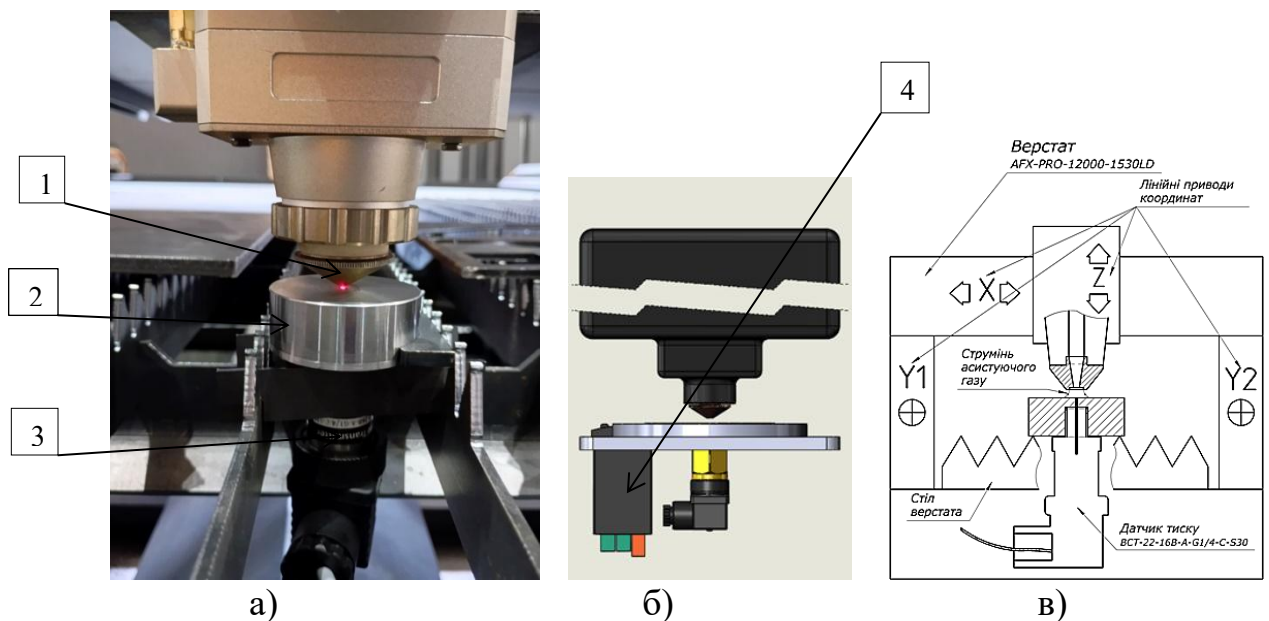


Рисунок 2.5 – Зміна діаметра струменя в зоні контакту з поверхнею деталі в залежності від зазору між соплом та деталлю

1 – одноканальне сопло, манометричний тиск $P_n = 0,5$ МПа; 2 – одноканальне сопло, манометричний тиск $P_n = 1$ МПа; 3 – двоканальне сопло, манометричний тиск $P_n = 0,5$ МПа; 4 – двоканальне сопло, манометричний тиск $P_n = 1$ МПа;

Однак при цьому використане обладнання дозволяло реєструвати лише середні значення тиску в зоні гальмування асистуючого газового струменя, що по суті є певним недоліком, так як не дозволяє отримати точні локальні значення тиску в зоні різання. З урахуванням отриманої інформації від

першого методу було розроблено та реалізовано нову установку. Вона дозволяє з високою точністю локально реєструвати ріжучий тиск (тиск гальмування) вимірювальним перетворювачем тиску в зоні отвору діаметром 0.4 мм в металічному диску, що моделює заготовку. Дослідження виконувалися на експериментальному лазерному технологічному комплексі AFX-PRO-12000-1530LD компанії «Арамис», провідного виробника лазерних технологічних установок в Україні (основна інформація про верстат наведена на рис. 2.2 – 2.3 та в табл. 2.1). В початковий момент співвісність вісей дискового зонду та сопла, вмонтованого в оптичну головку верстата, встановлювалася за допомогою юстувального лазера та відео-оптичної системи верстата (рис 2.6).



1 – сопло оптичної головки верстата; 2 – дисковий зонд; 3 – п'єзорезистивний датчик тиску моделі BCT110; 4 – контролер ERA100;

Рисунок 2.6 – Загальний вигляд дискового зонда з вимірювальним перетворювачем тиску (п'єзорезистивний датчик тиску моделі BCT110) при виставленні співвісності сопла оптичної головки верстата та приймального отвору дискового зонда (а); 3d модель дискового зонда (б); конструктивна схема установки для проведення досліджень (в)

На рис. 2.6 б наведена 3d модель дискового зонда. Конструктивна схема установки для проведення досліджень полів ріжучого тиску асистуючого газу в робочій зоні верстата наведена на 2.6 в. Сканування дискового зонда вздовж вісей X та Y газового струменя виконувалося за рахунок покрокового зміщення сопла оптичної головки приводом відповідної координати верстата відносно центра приймального отвору (крок 0,2 мм). Блок відслідковування зазору верстата визначає координату вісі Z при торканні торцем сопла 1 поверхні дискового зонда 2, приймаючи її за нульову координату відліку (рис. 2.6 а). Всі три лінійних приводи координат експериментального верстата забезпечували похибку позиціювання, що не перевищувала $\pm 0,01$ мм. В якості вимірювального перетворювача дискового зонда було використано п'єзорезистивний датчик тиску моделі ВСТ110 (рис. 2.7). Технічні характеристики датчика наведено в таблиці 2.4.



Рисунок 2.7 – Загальний вигляд п'єзорезистивного датчика тиску моделі ВСТ110 підключеного до контролера EPA100 та персонального комп'ютера

При проведенні досліджень використовувалися 5 типів найбільш вживаних у верстатах компанії «Арамис» сопел компанії Thermacut.

Таблиця 2.4 – Технічні характеристики п'єзорезистивного датчика тиску моделі ВСТ110

Діапазон	Від 0 bar до 16 bar
Вихідний сигнал	4...20mA (2 провід), 0...10VDC (3 провід)
Підключення до процесу	G1,G1/2,G1/4

Живлення	+12...30VDC
Клас точності	%0.5
Ступінь захисту	IP65
Робоча температура	-20С...- +85С

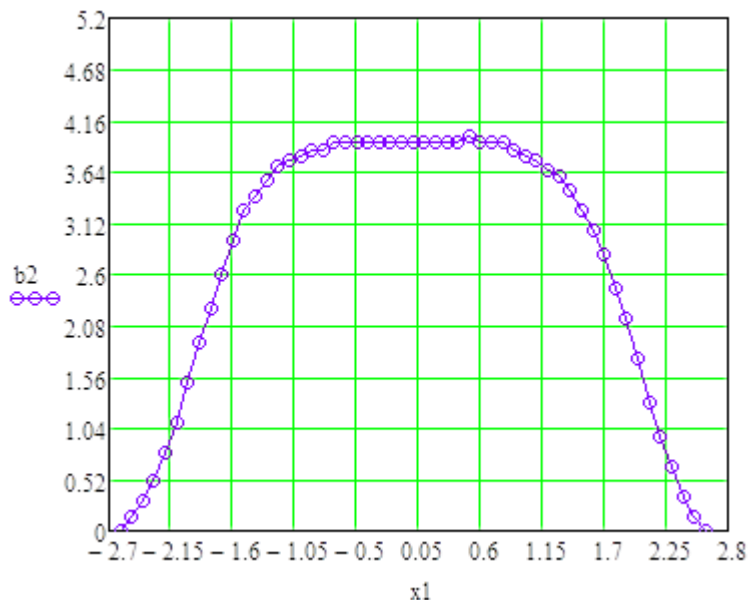


Рисунок 2.8 – Отриманий розподіл ріжучого тиску асистуючого газу по поперечному перетину струменя

В якості асистуючих газів використовувалися повітря та азот. Повний манометричний тиск всередині сопла задавався та контролювався системою числового програмного керування верстатом і паралельно зовнішнім датчиком для підвищення достовірності вимірів. Типова крива отриманого розподілу ріжучого тиску асистуючого газу представлена на рис. 2.8.[41]

2.2.3 Прилади, пристосування та методики досліджень зразків поверхонь легованих сталей отриманих при різанні випромінюванням потужних оптоволоконних лазерів

Дослідження поверхонь легованих сталей, отриманих при різанні потужними оптоволоконними лазерами, вимагає використання сучасних методів та приладів для оцінки якості обробки та визначення структурних змін. Критичний огляд публікацій показав, що по відношенню до параметрів

якості поверхні найбільш досліджуваним параметром є шорсткість. Другим в переліку досліджуваних параметрів є ширина різь. Вона має два параметри, які є ширинами різь на верхній та нижній частинах поперечного перетину поверхні різання. Допуск перпендикулярності або нахилу є третім в переліку досліджуваних параметрів. Пріоритет вимог до якості оброблених поверхонь обумовлений тим, що параметри якості є визначальними при вирішенні питання потребує отримана деталь подальшої обробки чи ні. А це наряду зі швидкістю різання по суті визначає економічну ефективність технології.

2.2.3.1 Визначення параметрів мікрогеометрії досліджуваних зразків

Зразки для досліджень вирізалися за кресленням представленим на рис.

2.9

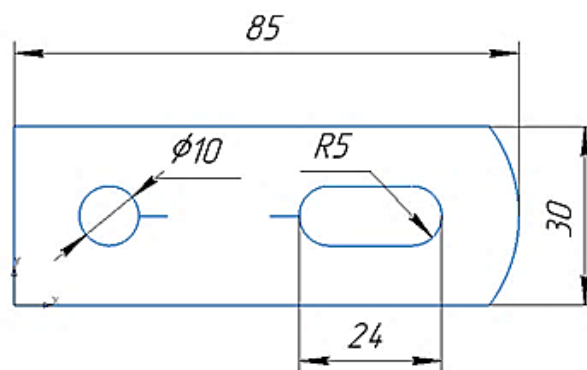
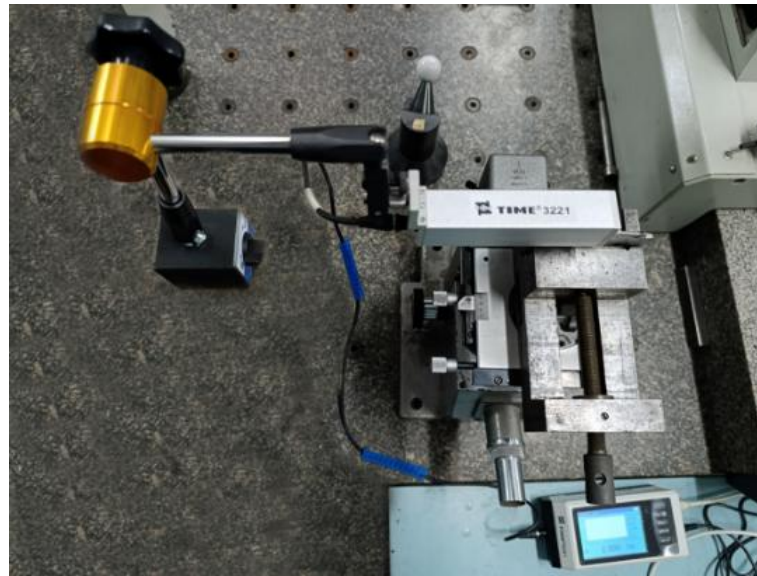


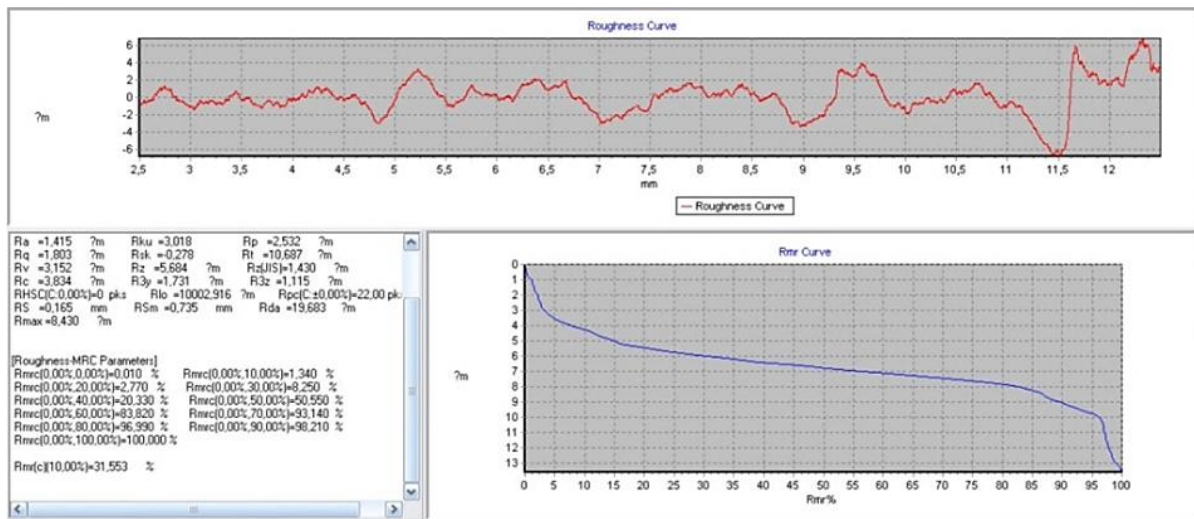
Рисунок 2.9 – Геометричні параметри зразків для досліджень

Профілографи поверхні лазерного різь дослідних зразків отримували за допомогою профілографа TIME 3221 (рис. 2.10, а). Програмне забезпечення дало змогу проводити багатопараметричний аналіз мікрогеометрії поверхні (рис. 2.10, б). Базова довжина вимірювання вибиралася згідно з табл. 2.5. За один прохід можливо виконати реєстрацію профілю від 1 до 5 базових довжин, результат вимірювання осереднюється. В зразках товщиною до 2 мм розділення поверхні різання на зони практично не виявлено. В решті зразків

виконувалося тризонне вимірювання параметрів шорсткості (верх, середина, низ поверхні різання).



а)



б)

Рисунок 2.10 – Загальний вигляд стану з профілометром TIME 3221 (а); отримана профілограма поверхні різку та результати її аналізу у з використанням програмного забезпечення DataView TIME3R Series (б)

Таблиця 2.5 – Рекомендована виробником величина базової довжини в залежності від значень параметрів шорсткості, що вимірюються

Базова довжина	Ra	Rz
0,08 мм	$Ra \leq 0,02 \text{ мкм}$	$Rz \leq 0,1 \text{ мкм}$
0,25 мм	$0,02 \leq Ra \leq 0,1 \text{ мкм}$	$0,1 \leq Rz \leq 0,5 \text{ мкм}$
0,8 мм	$0,1 \leq Ra \leq 2,0 \text{ мкм}$	$0,5 \leq Rz \leq 10 \text{ мкм}$
2,5 мм	$2,0 \leq Ra \leq 10 \text{ мкм}$	$10 \leq Rz \leq 50 \text{ мкм}$

В загальному випадку розраховуються 45 параметрів відповідно до стандартів ISO 1997, ANSI і JIS2001. Застосовуються методи фільтрування 2RC, GAUSS. На основі параметра Rmr – відносної опорної довжини профілю отримана крива Еббота-Файрстоуна, яку називають ще кривою коефіцієнта стійкості до зношення поверхні і яка свідчить про рівень гостровершинності профілю поверхні. Згідно вимог ISO 9013:2017 як критерій оцінки якості поверхні аналізувався параметр шорсткості Rz . Як додатковий параметр, за вимогою замовників лазерних технологічних комплексів фірми «Арамис», шорсткість отриманих поверхонь оцінювалася за параметром Ra . [42]

2.2.3.2 Методика вимірювання ширини різь

Для більш детального опису процесу вимірювання ширини різь за допомогою САПР можна додати наступне:

Першим етапом є підготовка деталі для зйомки під мікроскопом (використовували мікроскоп Ну-500m). Для цього зразок деталі розташовують під об'єктивом мікроскопа, а поруч кладуть еталонний предмет для подальшого коректного масштабування зображення. У даному випадку як еталонний предмет використовується відрізок оптоволокна діаметром 0,5 мм. Це необхідно для того, щоб мати об'єкт з відомими розмірами, що дозволить коректно налаштувати масштаб на етапі обробки зображень.

Наступним кроком є фотографування деталі та еталонного предмета. Отримане зображення експортується до програми САПР для подальшої обробки. За допомогою інструменту "Масштабування" в САПР зображення коригується таким чином, щоб розмір еталонного предмета (оптоволокна діаметром 0,5 мм) на екрані відповідав його реальному розміру. Це дозволяє забезпечити точність вимірювань у програмі.

Після масштабування користувач переходить до вимірювання ширини різь. Для цього використовуються основні функції вимірювання у САПР, такі як інструмент для вимірювання відстаней між двома точками. Визначивши краї різь на зображенні, оператор фіксує їх і вимірює відстань між цими точками (рис. 2.11).

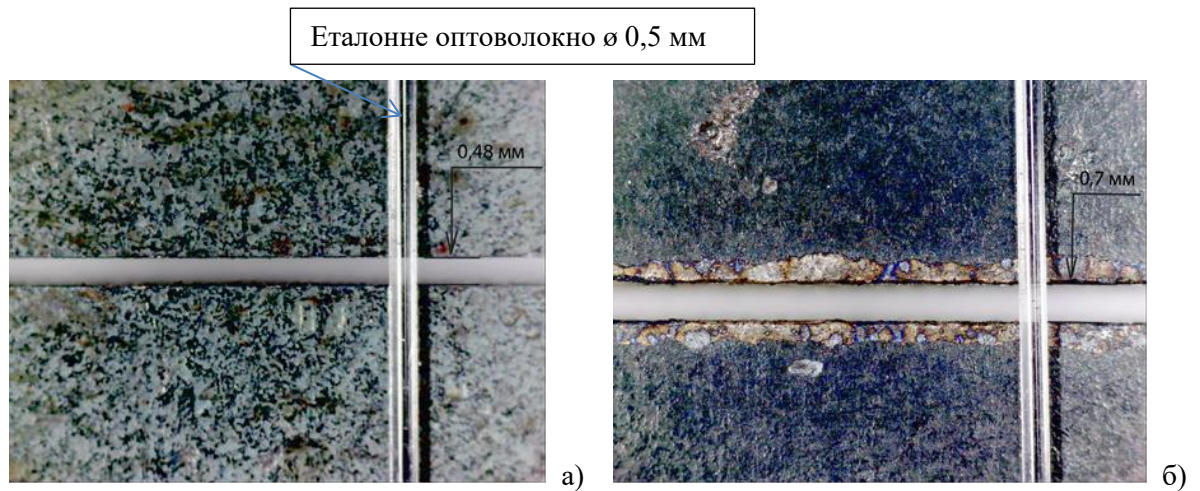


Рисунок 2.11 – Оброблені в середовищі системи автоматизованого проектування фотографії прорізаних пазів: а) верхній; б) нижній

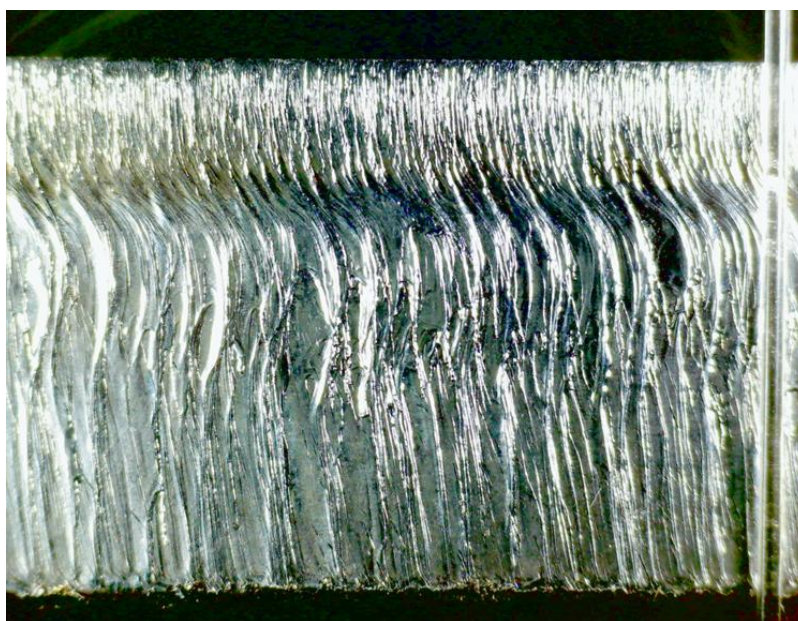
Таким чином, можна отримати дані про ширину різь з високою точністю, що є важливим для аналізу якості обробки матеріалу.[42]

2.2.3.3 Методика візуальної оцінки параметрів поверхні різання

Як і попередньому випадку для візуальної оцінки параметрів поверхні різання використовувалася технологія фотографування поверхонь різь з використанням мікроскопа Nu-500m. Масштабування знімків обиралося з міркувань чіткого виявлення структури поверхні, необхідної для подальшого аналізу. Даний аналіз за формою та кольорами застиглої на поверхні рідкої фази дозволяє отримати уявлення про розміри зони термічного впливу, характер теплового руйнування металу (плавлення і випаровування), можливі хімічні реакції та газогідродинамічні процеси видалення розплаву з зони різання (рис. 2.12).



а)



б)

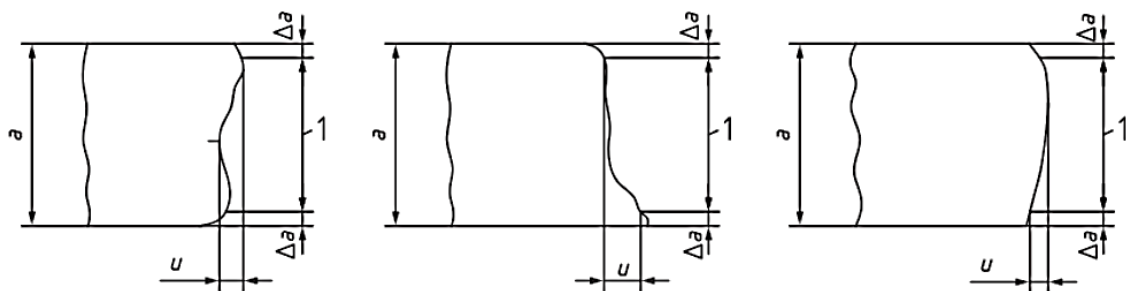


в)

Рисунок 2.12 – Фотографії зразків поверхонь різу: а) наявність окалини на поверхні різу; б) характер газогідродинаміки видалення розплаву з зони різання; в) оцінка розмірів зони термічного впливу

2.2.3.4 Засоби та методика визначення відхилення поверхні різь від перпендикулярності

Допуск перпендикулярності або нахилу u (perpendicularity or angularity tolerance): Відстань між двома паралельними прямими лініями (дотичними), між якими вписаний профіль поверхні різь в межах кута нахилу (наприклад, 90° у разі вертикальних різів) [44].



1 – відстань до розрахунку площі визначення допуску перпендикулярності чи нахилу; a – товщина деталі; Δa – зменшення товщини; 1 – товщина різь; u – допуск перпендикулярності або нахилу;

Рисунок 2.13 – Схема визначення допуску перпендикулярності вертикального різь за ISO 9013:2017

Для реєстрації параметрів профілю поверхні різь та точного визначення перпендикулярності (нахилу) поверхні різання відповідно до ISO 9013:2017, розроблено та виготовлено вимірювальний пристрій (рис. 2.14 а). Підпружинений щуп опускається до контакту з поверхнею різь за допомогою електромагнітного приводу. Переміщення щупа контролюється лазерним тріангуляційним вимірювачем (рис. 2.14 б). Робота вимірювача ґрунтується принципі оптичної тріангуляції. Промінь напівпровідникового лазера 1 фокусується об'єктивом 2 на поверхні досліджуваної деталі 6. Розсіяне на деталі випромінювання об'єктивом 3 збирається на CMOS-лінійці 4. Переміщення об'єкта 6 - 6' спричиняє відповідне зміщення зображення.

Процесор 5 обчислює відстань до точки поверхні різку відповідно до положення отриманої світлової плями на лінійці 4.

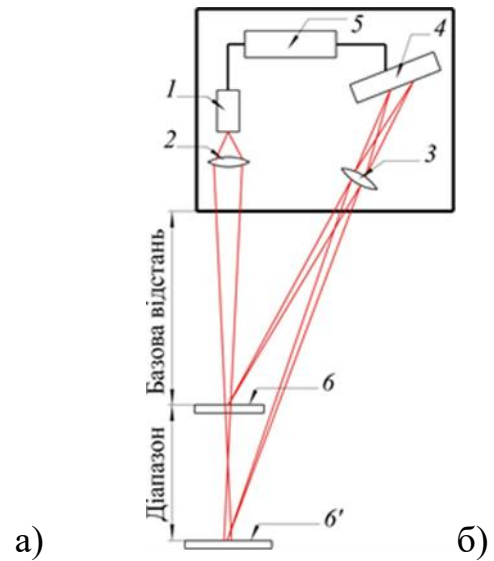


Рисунок 2.14 – Установка для визначення профілю бокової поверхні різку: а) пристрій для фіксації координат; б) схема лазерного триангуляційного вимірювача RIFTEK

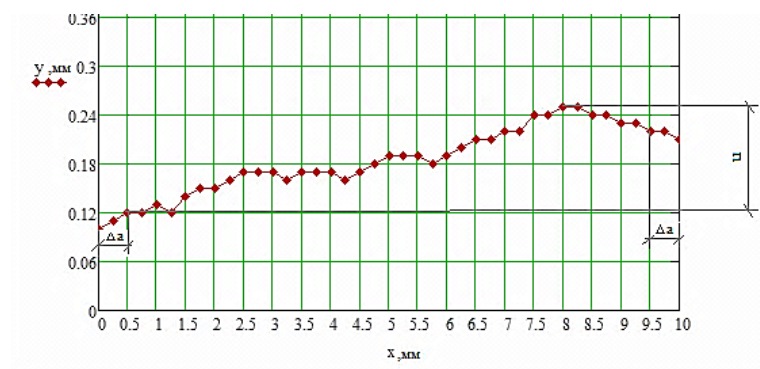


Рисунок 2.15 – Профіль бокової поверхні різку де: x – товщина деталі; Δa – зменшення товщини виміру; u – допуск перпендикулярності (згідно з вимогами ISO 9013:2017)

Застосовуючи координатний стіл під керуванням комп'ютера, реєструвалися координати рельєфу поверхні різку. Отриманий профіль бокової поверхні різку наведено на рис. 2.15.

2.3 Висновки за розділом 2

1. Запропонована загальна концепція проведення комплексу експериментальних досліджень для обґрунтування збалансованих параметрів лазерного променя та технологічного процесу при різанні нержавіючих сталей на лінійці установок, укомплектованих оптоволоконними лазерами потужністю 12 кВт, які забезпечують високу продуктивність та відповідну якість виготовлених деталей.

2. Розроблені оригінальна конструкція дискового зонда та методика для високоточної реєстрації величини ріжучого тиску утвореного гальмуванням струменя асистуючого газу, сформованого соплом оптичної головки на поверхні деталі, в будь-якій точці перетину струменя в технологічних умовах газолазерного різання.

3. Розроблено та підібрано методики та обладнання для коректного визначення показників якості бокової поверхні різку.

РОЗДІЛ 3

ЗАКОНОМІРНОСТІ ВПЛИВУ КОНСТРУКЦІЇ СОПЛА, ТИПУ ГАЗУ ТА ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ГАЗОЛАЗЕРНОГО РІЗАННЯ НА ПАРАМЕТРИ РІЖУЧОГО ТИСКУ АСИСТУЮЧОГО ГАЗУ В ЗОНІ ОБРОБКИ

3.1 Результати експериментальних досліджень впливу внутрішньої структури, геометричних розмірів сопла на ріжучий тиск асистуючого газу на вісі струменя

Асистуючий газ відіграє центральну роль у технологіях газолазерного різання металів. Аеродинамічна взаємодія між струменем асистуючого газу і деталлю формує так званий ріжучий тиск, який в основному і обумовлює характер видалення розплаву з зони різання. Зрозуміло, що за будь якої потужності лазерного випромінювання, об'єми плавлення матеріалу не можуть перевищувати об'єми його видалення [51]. Відомо, що динаміка гальмування потоку асистуючого газу визначається тиском в системі подачі газу, внутрішньою структурою і розмірами сопла, величиною зазору між торцем сопла та деталлю і є ключовим фактором, який впливає на об'єми видаленого матеріалу і, відповідно, на швидкість і якість різання. Через важливість даного фактора існує багато робіт присвячених різним аспектам впливу асистуючого газу на процес газолазерного різання металів [51, 52, 53, 54].

В роботі [55] виконано цикл досліджень по встановленню ролі конструкції сопел у формуванні параметрів струменів асистуючого газу. Однак їх результати важко використовувати українським виробникам верстатів для газолазерного різання через велику номенклатуру сопел різної внутрішньої структури та розмірів, які пропонує насичений ринок. Тому багато дослідників відзначають, що потенціал сучасних потужних (6 кВт – 12 кВт) оптоволоконних лазерів далеко не завжди використовується в повній мірі через неефективне видалення розплавленого матеріалу струменем асистуючого газу [56]. Звідси стає зрозумілим, що вкрай важливою є

інформація про реальний ріжучий тиск в зоні обробки, яке створює сопло відомої внутрішньої структури та розмірів в конкретних технологічних умовах. Це дозволяє більш адекватно обирати як тип сопла так і параметри лазерного процесу при проектуванні ефективних технологій. Враховуючи сказане ідентифікація полів ріжучого тиску є засадою надійного, високоякісного і продуктивного різання з високим рівнем відтворюваності процесів на конкретній лазерній технологічній установці. Розглянемо проблему детальніше.

Ріжучий тиск на поверхні заготовки прямо обумовлений тиском гальмування потоку струменя, створюваного соплом конкретної внутрішньої структури та розмірів. Різниця даних параметрів навіть за однакового тиску на вході в сопло призводить до варіацій швидкості та діаметра потоку по довжині струменя. Додатковим фактором варіативності є утворення ударних хвиль, яке призводить до додаткових коливань ріжучого тиску на поверхні деталі в зоні обробки [57,58]. Дана варіативність безпосередньо впливає на швидкість видалення утвореного розплаву і, як наслідок, на продуктивність і якість різання та відповідно погіршує рівень відтворюваності процесу.

В роботі [59] пропонується розраховувати відстань від торцю сопла до першого диску Маха за наступним емпіричним рівнянням:

$$\frac{x_m}{d} = 0,67 \sqrt{\frac{P_0}{P_a}} \quad (3.1)$$

де x_m – відстань від зрізу сопла до першого диску Маха;

d – вихідний діаметр сопла;

P_0 – повний манометричний тиск всередині сопла;

P_a – атмосферний тиск.

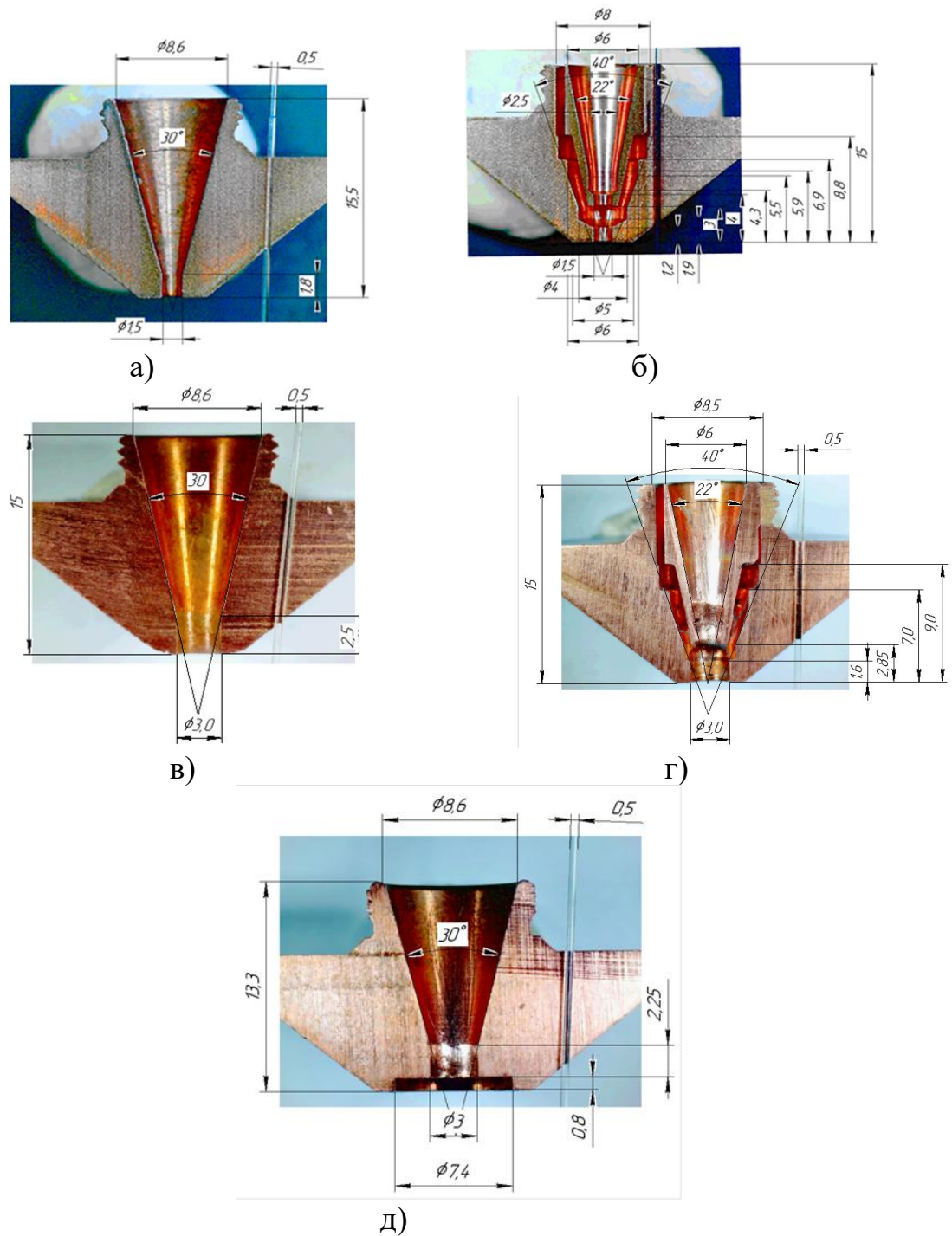
Точність наведеного рівняння є сумнівною через те, що воно не враховує теплофізичні параметри газу та того факту, що за реальних умов газолазерного різання струмінь гальмується на поверхні деталі, тобто не є вільним. Є цілий ряд спроб розробки математичних моделей процесів газолазерного різання, але в результаті використаних спрощень і допущень

вони недостатньо адекватно відтворюють реальні фізичні процеси [60,61]. Однак наведені матеріали дають чітке розуміння того, що зміни співвідношення P_0/P_a , внутрішньої структури та розмірів сопла, величини зазору між торцем сопла та поверхнею деталі призводять до варіативності в структурі струменя і, відповідно, в появі невизначеності значень величини ріжучого тиску асистуючого газу. Дана невизначеність понижує точність проєктування режимів високої продуктивності та погіршує рівень відтворюваності процесу навіть при незначних змінах даних параметрів. Відповідно вкрай важливим є отримання точних експериментальних даних про параметри полів ріжучого тиску, що формуються соплами з відомими внутрішньою структурою та розмірами і здатні забезпечити ефективне видалення розплавленого матеріалу та, відповідно, підвищити швидкість і якість різання на вироблених в Україні сучасних промислових верстатах укомплектованих новими лазерними джерела високої потужності.

Методики та обладнання для проведення досліджень детально наведені в пункті 2.2.2. При проведенні досліджень використовувалися 5 типів найбільш вживаних у верстатах компанії «Араміс» сопел компанії Thermacut. Внутрішня структура та розміри сопел наведені на рис. 3.1. В якості асистуючих газів використовувалися повітря та азот. Повний манометричний тиск всередині сопла задавався та контролювався системою числового програмного керування верстатом і паралельно зовнішнім датчиком для підвищення достовірності вимірів. Використовуючи розроблену установку було виконано комплекс експериментальних досліджень впливу внутрішньої структури і геометричних розмірів сопла (рис. 3.1), повного манометричного тиску всередині сопла та зазору між соплом та деталлю на ріжучий тиск на вісі струменя.

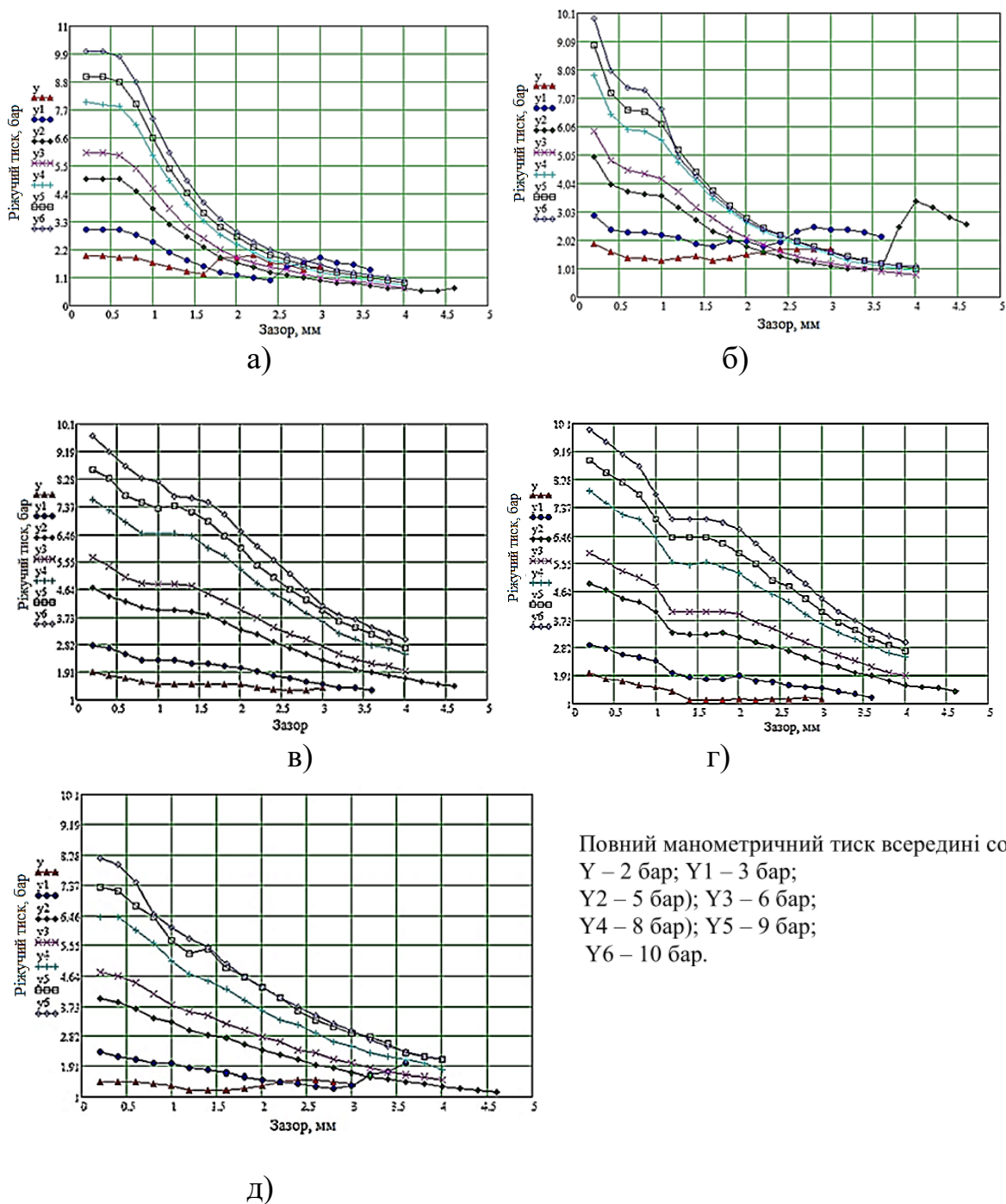
Відразу варто констатувати, що вже перші результати досліджень показали, що ріжучі тиски створювані струменями повітря і азоту за однакових вхідних умов практично відрізняються лише в межах похибки

експерименту (їх вплив на сам процес плавлення та формування структури поверхневих шарів деталей в межах даного експерименту не розглядався).



а – одноканальне з вихідним діаметром 1,5 мм; б – двоканальне з діаметром центрального отвору 1,5 мм; в – одноканальне з вихідним діаметром 3 мм; г – двоканальне з діаметром центрального отвору 3 мм; д – одноканальне з вихідним діаметром 3 мм та бустеризацією вихідного отвору.

Рисунок 3.1 – Внутрішня структура та розміри сопел компанії Thermacut, використаних в експериментах



а – одноканальне з вихідним діаметром 1.5 мм; б – двоканальне з діаметром центрального отвору 1.5 мм; в – одноканальне з вихідним діаметром 3 мм; г – двоканальне з діаметром центрального отвору 3 мм; д – одноканальне з вихідним діаметром 3 мм та бустеризацією вихідного отвору;

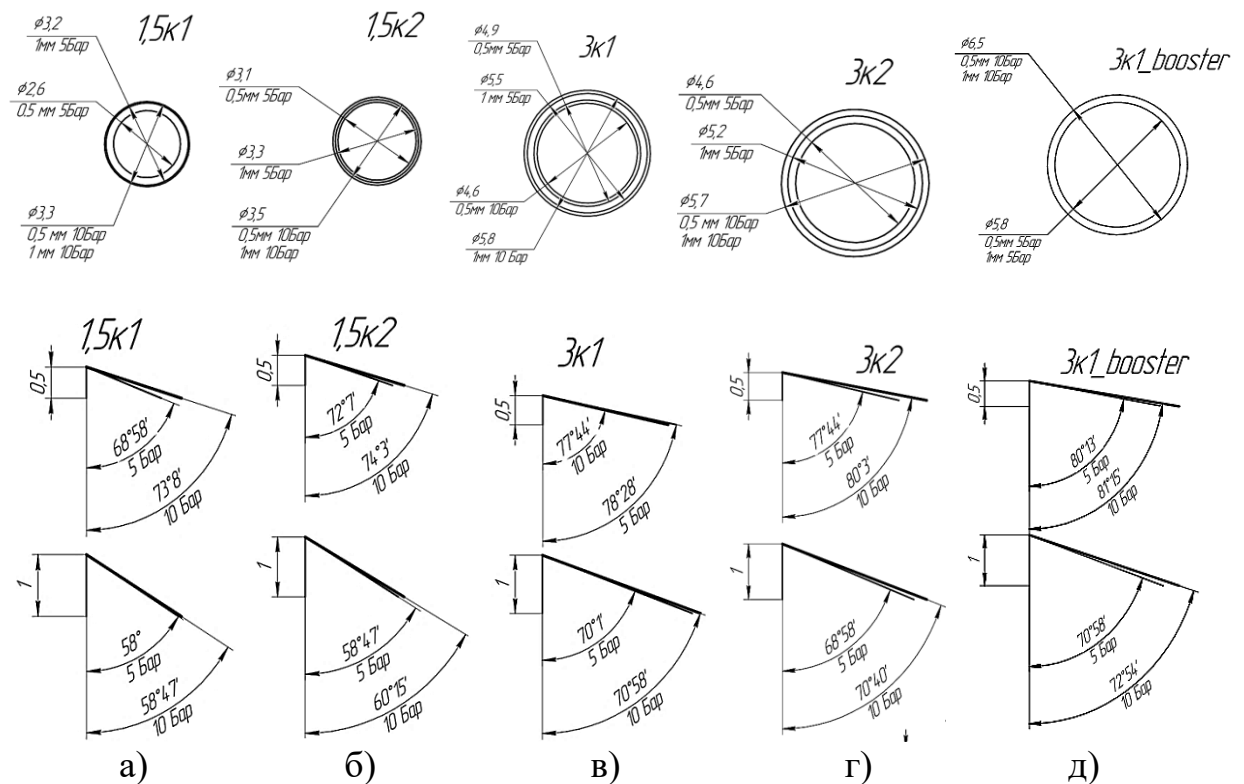
Рисунок 3.2 – Зміна ріжучого тиску по вісі струменя залежно від повного манометричного тиску всередині сопла та зазору між соплом і деталлю

Це можливо пояснити близькими теплофізичними характеристиками обох газів (78,09 об'єму повітря складає азот). Тому, враховуючи мету роботи і вартість балонного азоту, було ухвалено рішення в подальших дослідженнях в якості асистуючого газу використовувати повітря. Отримані графіки зміни ріжучого тиску по вісі струменя для всіх розглянутих типів сопел представлені на рис. 3.2.

За використання одноканального та двоканального сопел з вихідним діаметром 1,5 мм при різанні на малих зазорах 0,5 мм – 1 мм (менші зазори як правило не використовуються через високий ризик пошкодження оптичної головки) одноканальне сопло за величиною ріжучого тиску у всьому діапазоні зміни повного манометричного тиску має очевидні переваги, які з тенденцією до зменшення зберігаються до зазору 2,5 мм (рис. 3.2 а, б). Обидва типи сопла при зростанні зазорів мають зони відносно незмінних ріжучих тисків. Для одноканального це діапазон зазорів 0,2 мм – 0,6 мм, двоканального 0,6 мм – 1 мм. Зі зростанням зазору спостерігається чітка тенденція до нівелювання впливу повного манометричного тиску на ріжучий тиск на вісі струменя. Так для одноканального сопла при зміні повного манометричного тиску від 10 бар до 8 бар різниця тисків різання практично нівелюється на зазорах $\geq 2,2$ мм, для двоканального вже $\geq 1,4$ мм. Одноканальне сопло в зоні малих робочих зазорів (0,5 мм – 1 мм) формує менші діаметри та кути розходження струменя порівняно з двоканальним (рис. 3.3 а, б). Таким чином результати експериментів показують, що двоканальне сопло наведеної структури та розмірів (рис. 3.1 б) не забезпечує виконання свого основного завдання – обмеження розширення струменя. Враховуючи суттєво вищу вартість таких сопел порівняно з одноканальними, доцільність їх застосування при використанні в якості асистуючих газів повітря та азоту є вкрай сумнівною.

Одноканальне та двоканальне сопла з вихідним діаметром 3 мм (рис. 3.2 в, г) на зазорах до 0,8 мм формують дещо менші ріжучі тиски в порівнянні з соплами з вихідним діаметром 1,5 мм. Зі зростанням зазорів

перевага в формуванні ріжучих тисків переходить до сопел з вихідним діаметром 3 мм. Так за повного манометричного тиску 10 бар одноканальне сопло з вихідним діаметром 1,5 мм на зазорі 1 мм формує ріжучий тиск 7.4 бар, а сопло з вихідним діаметром 3 мм – 8.28 бар. Це очевидно обумовлено тим, що збільшені вихідні діаметри при зростанні зазорів від 0,8 мм забезпечують значно менші як швидкість падіння ріжучого тиску так і рівень нівелювання впливу повного манометричного тиску всередині сопла. Як і в попередньому випадку сопла з вихідним діаметром 3 мм при зростанні зазорів мають зони відносно незмінних ріжучих тисків.



а – одноканальне з вихідним діаметром 1.5 мм; б – двоканальне з діаметром центрального отвору 1.5 мм; в – одноканальне з вихідним діаметром 3 мм; г – двоканальне з діаметром центрального отвору 3 мм.

Рисунок 3.3 – Результати розрахунків діаметрів та кутів розходження струменів залежно від повного манометричного тиску всередині сопла (5 бар, 10 бар) та зазору між соплом і деталлю (0.5 мм, 1 мм)

Для одноканального це діапазон зазорів 1 мм – 1,4 мм, двоканального 1,2 мм – 1,8 мм. В цілому ці сопла з різною внутрішньою структурою та

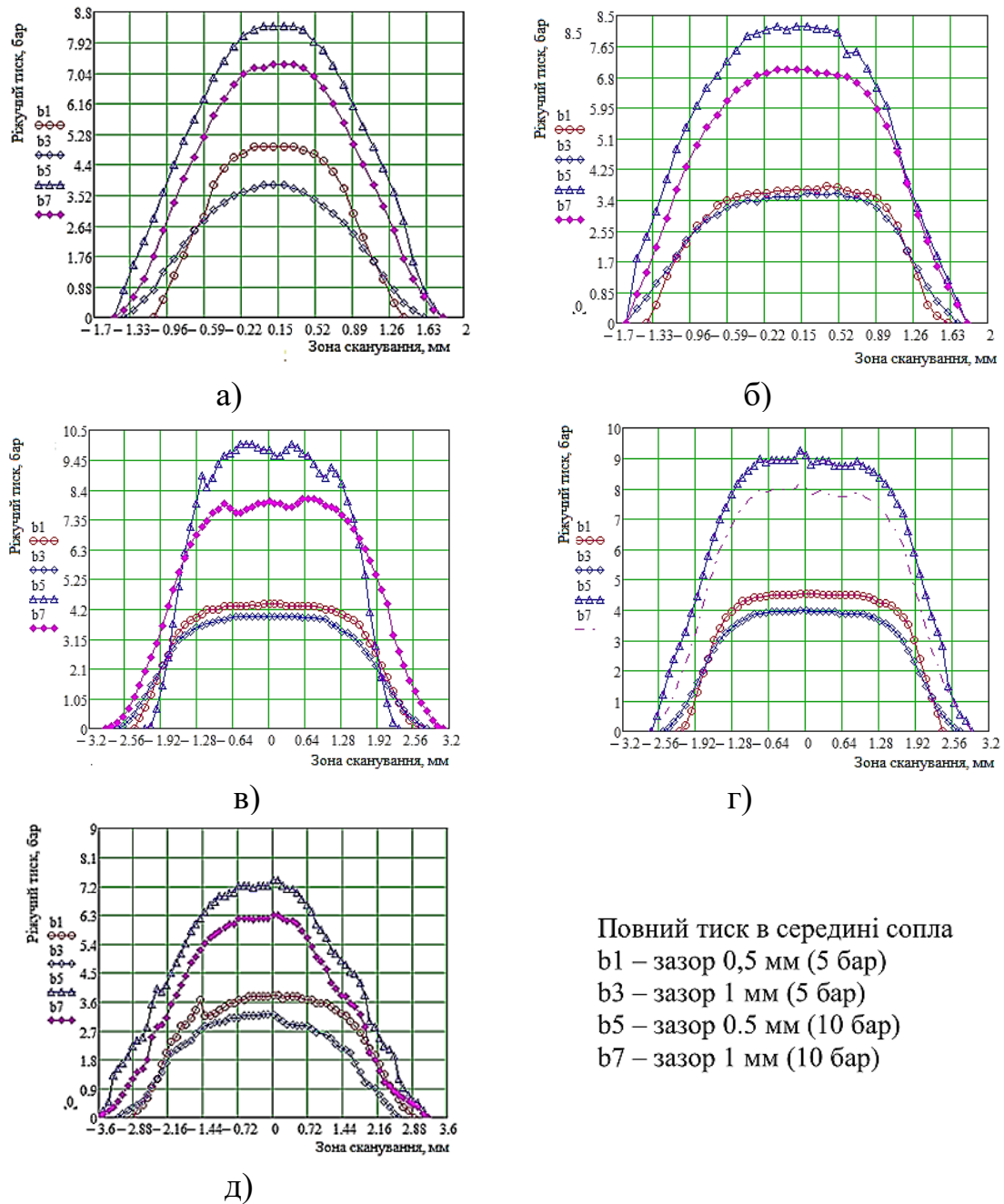
однаковим вихідним діаметром виявили достатньо близькі характеристики як за параметрами формування ріжучого тиску, так і діаметрів та кутів розходження струменя (рис. 3.3 в, г). Це знову ставить питання про доцільність застосування дорогих двоканальних сопел в технологічних умовах різання, що близькі до умов проведення експериментів.

Результати отримані за використання в експериментах одноканального сопла з вихідним діаметром 3 мм та бустеризацією вихідного отвору (рис. 3.1 д) наведені на рис. 3.2 д. Внутрішня структура бустеризованого сопла відрізняється від типового одноканального (рис. 3.1 г) наявністю в торці кільцевої канавки (так званого бустера) діаметром 7,4 мм та глибиною 0,8 мм. В цілому, як видно з графіків, наявність бустера призводить до зниження ріжучих тисків практично у всьому досліджуваному діапазоні. Тобто з точки зору ефективності видалення розплаву з зони різання тиском асистуючого газу наявність бустера лише погіршує ситуацію. Однак їх використання саме в установках укомплектованих потужними оптоволоконними лазерами (як правило 10 кВт – 12 кВт) може бути пояснено термодинамікою процесу. Наявність бустера призводить до збільшення площ контакту асистуючого газу з поверхнями сопла та матеріалу деталі безпосередньо в зоні різання, що дозволяє покращувати їх охолодження і тим самим може впливати як на ресурс сопла так і на якість різання.

3.2 Особливості формування розподілу тиску асистуючого газу по поперечному перерізу струменя

Ріжучий тиск в центрі струменя (діаметр приймального отвору дискового зонда обрано з міркувань близькості до середньої величини ширини різку $\approx 0,4$ мм) в основному обумовлює характер видалення розплаву з зони різання і відповідно суттєво впливає на максимально можливу продуктивність різання. Діаметр струменя і характер розподілу тиску по його поперечному перетину є факторами, що впливають на винесення тепла з зони

різання і тим самим можуть впливати на термонапруги в матеріалі деталі, шорсткість отриманих поверхонь, структуру та глибину зони термічного впливу і відповідно на якість технології.



а – одноканальне з вихідним діаметром 1.5 мм; б – двоканальне з діаметром центрального отвору 1.5 мм; в – одноканальне з вихідним діаметром 3 мм; г – двоканальне з діаметром центрального отвору 3 мм; д – одноканальне з вихідним діаметром 3 мм та бустеризацією вихідного отвору;

Рисунок 3.4 – Результати сканування розподілу поля тиску в зоні гальмування струменя

На рис. 3.4 представлені результати сканування поля ріжучого тиску по поперечному перетину струменя на зазорах найбільш часто використовуваних при різанні випромінюванням потужних оптоволоконних лазерів 0,5 мм та 1 мм за повного манометричного тиску всередині сопла 5 бар та 10 бар. Різниця результатів сканування вздовж вісей X та Y знаходилися в межах похибки експерименту, тому на рис. 3.4 наведено графіки розподілу тиску вздовж вісі Y. Це є додатковим підтвердженням високої точності виставлення співвісності центральних отворів сопел та приймального отвору дискового зонда і, відповідно, адекватності отриманих результатів. Аналіз отриманих розподілів представлених на рис. 3.4 та виконаних за ними розрахунків (рис 3.3) показали очевидну залежність кута розходження струменя від величини зазору між торцем сопла та поверхнею деталі. Для всіх досліджених діаметрів та структур сопел збільшення зазору від 0,5 мм до 1 мм призводить до зменшення кута розходження струменя.

З цієї точки зору, аналіз отриманих розподілів показує, що двоканальні сопла (особливо за діаметра центрального отвору 1,5 мм) мають більші зони постійно високого тиску) і, можливо, це є вагомим чинником впливу на термодинамічні процеси в зоні різання. Зрозуміло, що дане питання потребує подальших комплексних системних досліджень.

3.3 Експериментальна верифікація впливу ріжучого тиску на продуктивність та якість газолазерного різання легованої сталі

Для експериментальної верифікації результатів експериментальних досліджень впливу ріжучого тиску на процес та результати газолазерного різання були вирізані зразки зі нержавіючої сталі AISI 304 товщиною 6 мм на однакових режимах з використанням трьох типів сопел з різною структурою: одноканальне з вихідним діаметром 3 мм (3к1); двоканальне з діаметром центрального отвору 3 мм (3к2); одноканальне з вихідним діаметром 3 мм та бустерізацією вихідного отвору (3к1b).

Таблиця 3.1 – Технологічна карта параметрів різання при визначенні впливу внутрішньої структури сопла на параметри якості бокової поверхні різу



Тел: +38 (067) 522-42-21; +380 (472) 56-69-59,
Факс: +380 (472) 65-13-61
e-mail: laser@aramis.com.ua Сайт:
www.aramis.com.ua

Випробовування виконував: Максим Прусс,
Станіслав СЕРЕДІЮК
[П]

Технологічна карта параметрів різання для нержавіючих сталей

1. **Застосування:** Дослідне різання.
2. **Замовник:** АРАМІС.
3. **Мета:** визначення впливу типу сопла на якість бокових поверхонь різу
4. **Обладнання:**

Верстат	AFX-PRO-12000-1530-LD
Модель лазера, Ø оптоволока	MAX Photonics 12 кВт, оптоволокну Ø 100 мкм
Модель оптичної головки, коліматор	BOCI BLT621
Дослідна потужність	12000 Вт

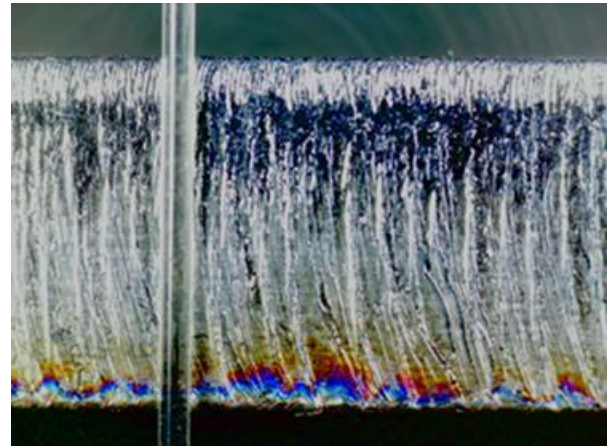
5. **Швидкість холостого переміщення:** 170000 [мм/хв]
6. **Матеріал:** нержавіюча сталь AISI 304
7. **Допоміжний газ:** азот [N₂]

8. Режими різання та параметри якості поверхонь різання

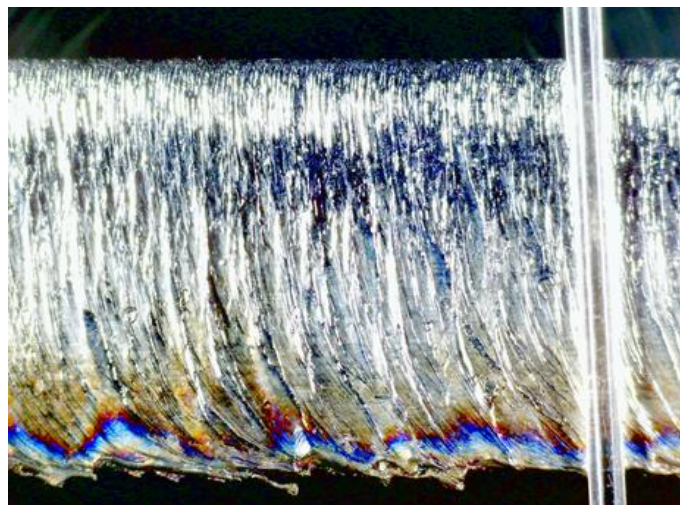
Товщина металу, мм	Діаметр сопла, мм	Висота різання (відслідковуваний зазор), мм	Потужність, кВт	Положення фокусу відносно торцю сопла мм	Тиск, бар	Швидкість подачі мм/хв	Ширина різання (верх/низ), мм	Шорсткість поверхні, Rz /Ra	Відхилення від перпендикулярності, мм
6	3к1	0,5	12	-3	9	12000	0,32/ 0,43	Rz(V)=14,72/ Ra(V)=3,34	0,045
								Rz(N)=38,89/ Ra(N)=7,73	
6	3к2	0,5	12	-3	9	12000	0,4/ 0,51	Rz(V)=19,83/ Ra(V)=4,05	0,051
								Rz(N)=45,68/ Ra(N)=8,95	
6	3к1b	0,5	12	-3	9	12000	0,39/ 0,55	Rz(V)=25,49/ Ra(V)=5,11	0,074
								Rz(N)=51,63/ Ra(N)=10,57	



а)



в)



г)

Рисунок 3.5 – Бокові поверхні різку в нержавіючій сталі AISI 304 товщиною 6 мм отримані за використанням сопел різної внутрішньої структури: а – одноканальне з вихідним діаметром 3 мм (3к1); б – двоканальне з діаметром центрального отвору 3 мм (3к2); в – одноканальне з вихідним діаметром 3 мм та бустерізацією вихідного отвору (3к1б)

Технологічна карта експерименту наведена в табл. 3.1. На рис. 3.5 – фотографії бокових поверхонь різку. Очевидно що за параметрами якості поверхонь різку одноканальне сопло має незаперечні переваги за всіма трьома показниками якості (найменша ширина різку як на верхній, так і на нижній поверхнях, більш низькі шорсткості в обох перетинах, найменше відхилення від перпендикулярності). Порівняльний аналіз представлених на рис. 3.5

фотографій бокових поверхонь різь дозволяє отримати уявлення про відмінності в процесах, що відбуваються при різанні за використання того чи іншого типу сопла.

Відзначаємо, що на всіх бокових поверхнях різь можна виділити три зони, хоча за розмірами і структурою вони мають суттєві відмінності. В верхніх зонах з відсутністю ребер та покращеною шорсткістю в абляції домінує випаровування. Висота даної зони за використання сопел 3к1 та 3к2 становить 0,85мм – 0,9 мм. Сопло 3к1b дає більш широку зону в 1,1мм – 1,15 мм. Однак шорсткість поверхні верхньої зони за використання даного сопла є суттєво вищою (див. табл. 3.1). Відразу за верхньою зоною вже починають утворюватися ребра з відносно малою висотою. Це свідчить про перехід домінування в абляції від випаровування до плавлення і саме ріжучий тиск асистуючого газу на вході в дроселюючий канал визначає швидкість видалення розплаву з даної зони і відповідно її глибину та мікрогеометрію поверхні різь. За використання сопла 3к1 висота зони становить 2мм – 2,2мм, 3к2 вже має вузку зону 1,7мм – 1,85мм, сопло 3к1b всього 1,2мм – 1,4мм.

В третій (найширшій) зоні спостерігається формування ребер підвищеної висоти. На це впливають дві причини. Сюди приходить випромінювання з пониженою через втрати енергією, та зі зростанням глибини знижується тиск в потоці асистуючого газу. Величина падіння тиску за глибиною різь знову ж визначається тиском гальмування на вході в дроселюючий канал. Цей факт чітко демонструють наведені на рис. 3.5 фотографії. Використання сопла 3к1 забезпечує найменші глибини і шорсткість поверхні зони. Утворені розплавом ребра мають незначне відхилення від вертикальності, найнижчу отриману в експерименті шорсткість, на виході з різь практично відсутня зона перегріву, що свідчить про мінімальну товщину рідкої фази та відсутність її накопичення на виході з пазу.

Сопло 3к2 дає вже вищу шорсткість зони, наявні вигин утворених ребер в сторону переміщення, на виході з пазу є сліди перегріву. Тобто

наявне певне накопичення рідкої фази через зниження ефективності її видалення.

Сопло 3к1b дало найвищу в експерименті шорсткість зони, значні вигини утворених ребер в сторону переміщення, на виході з різку є значні сліди перегріву. Вихідна кромка є рваною з наявністю окремих невеликих крапель грату. Це свідчить про низьку швидкість видалення рідкої фази з нижньої зони різку, яка в основному обумовлена параметрами ріжучого тиску асистуючого газу сформованого даним соплом.

Таким чином отримані результати показали досить добру кореляцію між ріжучим тиском гальмування асистуючого газового струменя (рис. 3.2) і якістю лазерного різання. Підтверджена певна сумнівність використання дорогих двоканальних та бустеризованих сопел в установках укомплектованих оптоволоконними лазерами високої потужності. В подальших дослідженнях параметрів газолазерного різання нержавіючих сталей на AFX-PRO-12000-1530-LD було використано сопла 3к1.

По суті можна констатувати, що отримано Тобто наявне певне накопичення рідкої фази через зниження ефективності її видалення.

Висновки за розділом 3

1. Вперше отримані точні чисельні дані про параметри полів ріжучого тиску, які формуються найбільш масовими соплами компанії Thermacut. Отриманий масив експериментальних даних, дозволив виявити закономірності впливу внутрішньої структури та розмірів сопла, манометричного тиску всередині сопла, величини зазору між соплом деталлю на геометрію сформованого струменя асистуючого газу (повітря і азот) та величини ріжучого тиску в довільному його перетині при гальмуванні на поверхні деталі.

2. Використання отриманих результатів дозволило зробити більш точним та ефективним проєктування процесів газолазерного різання

максимальної продуктивності, за рахунок обґрунтування вибору типу сопла точного прогнозування величини ріжучого тиску, який створить газовий струмінь обраного сопла в конкретних технологічних умовах.

3. В більш широкому сенсі, запропонований підхід дозволяє відносно просто отримати інформацію про ріжучий тиск створюваний довільним типом сопла, яким комплектується верстат за тих чи інших технологічних умов (отримати газодинамічний «паспорт» сопла). Відповідно створюється умови для більш надійного забезпечення продуктивного високоякісного різання та підвищення рівня відтворюваності процесу.

РОЗДІЛ 4

ОБГРУНТУВАННЯ РАЦІОНАЛЬНИХ РЕЖИМІВ ГАЗОЛАЗЕРНОГО РІЗАННЯ ЛЕГОВАНИХ СТАЛЕЙ

4.1 Результати повнофакторного експерименту по визначенню рівня вагомості факторів, що обумовлюють продуктивність та якість газолазерного різання нержавіючої сталі

Різання нержавіючих сталей різної товщини за допомогою потужних оптоволоконних лазерів сьогодні достатньо широко використовується промисловими підприємствами України. Виробники, які використовують у своєму виробництві дану технологію, особливо зацікавлені в досягненні високої якості різання, щоб можна було виключити повторну обробку відрізаних деталей, високої швидкості різання для максимізації продуктивності та доброї відтворюваності процесу. Таким чином технічні та економічні критерії, що впливають на вибір відповідної лазерної системи для конкретного лазерного різання, зараз набувають великого значення. Підвищення ефективності процесу, якості та гнучкості допомагають зменшити витрати. Провідний виробник лазерних технологічних установок в Україні компанія «Араміс» започаткувала випуск лінійки установок, укомплектованих оптоволоконними лазерами потужністю 12 кВт. Таку потужність економічно доцільно використовувати при різанні нержавіючих сталей товщиною 10 мм – 25 мм. Однак споживачі вважають за необхідне мати ефективні режими різання і більш тонких сталей з використанням максимальної потужності установки.

Вплив температури від взаємодії променя лазера з матеріалом заготовки забезпечує потужність, необхідну для плавки матеріалу з необхідною швидкістю за відповідної товщини різання. Залежність швидкості різання від товщини матеріалу не є лінійною. По мірі зростання товщини матеріалу швидкість різання знижується [63]. Вхідні параметри

лазерного різання прийнято поділяти на дві основні групи: параметри променя та процесу [64, 65, 66]. Параметри променя описують властивості лазерного променя, які складаються з величини та характеру розподілу густини потужності в плямі, довжини хвилі, розміру плями, імпульсної потужності, режиму променя. Параметри лазерного процесу – це положення фокусу, геометричні параметри сопла, тип асистуючого газу та його тиск, висота різання (відслідковуваний зазор), швидкість різання. Більшість дослідників вважають за краще контролювати потужність лазерного променя, швидкість різання та тиск допоміжного газу, оскільки ними можна легко керувати, і вони є найбільш ефективними параметрами впливу для більшості вимірюваних результатів якості поверхні [66]. Асистуючий газ служить для здування рідкого матеріалу із зони різання. Щоб забезпечити нормальне різання, необхідно дотримуватися балансу тиску асистуючого газу і швидкості різання. Такий баланс в кожному конкретному технологічному випадку встановлюють експериментально [65]. Фокусне положення променя лазера також значною мірою впливає на процес різання [64]. Якщо фокус знаходиться надто близько до поверхні, розріз стає занадто вузьким, і тому стає неможливим нормальне протікання допоміжного газу через розріз для видалення рідкого матеріалу. Окрім того, таке положення фокусу може призвести до надмірного випаровування рідкого металу, що також призведе до зміни потоків газу та рідини та порушення правильного балансу між тиском допоміжного газу та швидкістю різання. Якщо фокус знаходиться надто далеко до поверхні, розріз стає занадто широким, і для підтримки бажаної швидкості різання недостатньо потужності. Відносна важливість цих факторів збільшується зі збільшенням товщини листа. Виконаний в роботі [67] критичний огляд публікацій показав, що по відношенню до параметрів якості поверхні найбільш досліджуваним параметром є шорсткість. Другим в переліку досліджуваних параметрів є ширина різку. Вона має два параметри, які є ширинами різку на верхній та нижній частинах поперечного перетину поверхні різання.

Допуск перпендикулярності або нахилу є третім в переліку досліджуваних параметрів. Пріоритет даних параметрів обумовлений тим, що вони є визначальними при вирішенні питання потребує отримана деталь подальшої обробки чи ні. А це наряду зі швидкістю різання по суті визначає економічну ефективність технології. Наведенні дані показують нагальну потребу комплексних експериментальних досліджень газолазерного різання нержавіючих сталей випромінюванням потужних оптоволоконних лазерів. Для цього визначити факторний простір та розробити план проведення експериментів. Відповідно до розробленого плану провести комплекс експериментів та аналіз їх результатів та обґрунтувати ефективні режими газолазерного різання нержавіючих сталей випромінюванням оптоволоконного лазера потужністю 12 кВт з використанням в якості асистуючих газів азоту та повітря.

Багато дослідників відзначають, все ж відносно низьку якість бічної поверхні, отриманої під час лазерного різання товстого перерізу нержавіючої сталі (10 мм – 25 мм) з використанням інертного газу за допомогою потужних оптоволоконних лазерів, яку пов'язують зі складнощами отримання повного викиду розплаву через вузькі пропили товстих перерізів [68, 63, 64]. Максимально досяжна швидкість різання та кінцева якість різаної поверхні визначаються параметрами процесу, включаючи потужність лазера, фокусну відстань оптичної головки, положення фокусу відносно поверхні заготовки, тиском допоміжного газу, внутрішньою структурою та діаметром сопла, відстанню від сопла до поверхні заготовки. Положення фокусу вимірюється в міліметрах, у додатних значеннях, якщо вона знаходиться над верхньою поверхнею металевго листа, або у від'ємних значеннях, якщо вона нижче верхньої поверхні металевго листа. Перш ніж приступити до лазерного різання, дуже важливо перевірити положення лазерного променя та відрегулювати його по центру сопла. Недотримання цієї вимоги може призвести до втрати якості різу або пошкодження деталей оптоволоконного лазера [65, 66]. Таким чином підбір раціональних

параметрів процесу покращує видалення розплаву з розпилу, запобігає небажаному налипанню окалини на нижній кромці різку або навіть неповному проникненню лазерного променя в заготовку, коли інтенсивність випромінювання є недостатньою для даної товщини металу.

Оброблялася листова нержавіюча сталь AISI 304 стандартного ряду товщин (мм) 0,8; 2; 6; 10; 12; 16; 25. Спираючись на матеріали попередніх досліджень в оптичній головці верстата встановлювалося серійне одноканальне сопло з вихідним діаметром 3 мм (3к1) компанії Thermacut. В кожному експерименті висота різання (відслідковуваний зазор) величиною 0,5 мм залишався незмінним (за виключенням різання товщини 0,8 мм). Діаметр лазерної плями в фокальній площині становив 210 мкм. В якості асистуючих газів використовувалися азот з чистотою не менше 99,99% та повітря. Така висока чистота азоту запобігає зміні кольору нарізаних листів. Потужність лазерного променя, тиск газу, швидкість подачі, відслідковуваний зазор, положення фокусу задавалися і контролювалися системою числового програмного керування (ЧПК) з точністю, яка відповідає паспортним даним верстата.

В якості варійованого факторного простору було обрано 3 параметри: швидкість подачі F , мм/хв (cut speed); тиск асистуючого газу P , Бар (gas pressure); положення фокусу відносно торця сопла S , мм (focus). Потужність лазерного променя W , Ват (peak power), відповідно до вимог виробника та споживачів нових лазерних технологічних комплексів, залишалася незмінною і становила 12 кВт. Кожний фактор варіювався на трьох рівнях (нульовий, верхній, нижній). Відповідно до матриці планування експериментів було вирізано $3^3 = 27$ зразків для досліджень і аналізу по кожній товщині (7 стандартних товщин). Зразки з наявністю ґрат відбраковувалися і не досліджувалися, так як ґрат є очевидною ознакою незадовільного результату досліду. При детальному дослідженні прийнятних зразків за наведеними методиками, визначалися режими з максимальними швидкостями різання за умови відповідності вимогам стандарту ISO

9013:2017 та замовників даного типу верстатів щодо шорсткості бокових поверхонь (за Ra та Rz), верхньою та нижньою шириною різку, величиною отриманого допуску перпендикулярності поверхні різання. Отримані результати та їх аналіз подані в наступних розділах.

4.2 Результати експериментальних досліджень по встановленню режимів та умов максимальної продуктивності різання без втрати заданої якості обробки за використання в якості асистуючого газу повітря

Основні експериментальні дані наведено в табл. 4.1 та на рис. 4.1 і 4.2.

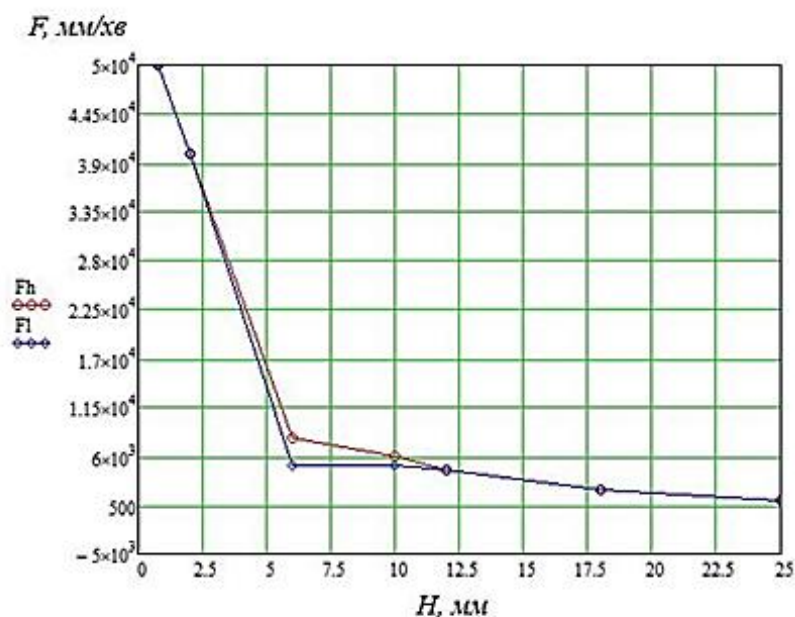


Рисунок 4.1 – Результати визначення залежності швидкості різання листової нержавіючої сталі AISI 304 від товщини листа за умов отримання параметрів якості, що відповідають вимогам стандарту ISO 9013:2017 (асистуючий газ – повітря)



Рисунок 4.2 – Бокова поверхня листової нержавіючої сталі AISI 304 товщиною 12 мм при різанні з використанням в якості асистуючого газу повітря (режим Low – табл. 4.1)

Аналіз результатів серії експериментів дозволив встановити наступне.

Швидкість різання. При різанні товщин 0,8 мм та 2 мм відносно незначне зростання швидкості різання (2000 мм/хв для 0,8 мм та 1000 мм/хв) за високої якості бокової поверхні різку досягаються за рахунок зростання тиску повітря з 4 бар до 13 бар для товщини 0,8 мм та з 6 бар до 8 бар на товщині 2 мм. Варто відзначити, що з міркувань підвищеного ризику пошкодження головки різання товщини 0,8 мм виконувалося на висоті різання 1 мм. На товщині 6 мм спостерігається варіативність набору параметрів факторного простору, які дозволяють за незначного погіршення показників якості (в окремих випадках навіть з покращенням) отримувати більш високі швидкості різання (відповідна стандарту якість отримана на

Таблиця 4.1 – Карта параметрів різання нержавіючої сталі AISI 304 технологічної інструкції до верстатів моделі AFX-PRO-12000-1530-LD (асистуючий газ – повітря)

Товщина металу, мм	Діаметр сопла, мм	Висота різання (відслідковуваний зазор), мм	Потужність, кВт	Положення фокусу відносно торцю сопла мм	Тиск, бар	Швидкість подачі мм/хв	Ширина різання (верх/низ), мм	Шорсткість поверхні, Rz /Ra	Відхилення від перпендикулярності, мм
0,8 High/Low	3к1	1	12	0	13	52000	0,26/ 0,31	Rz(S)=11,6/ Ra(S)=2,06	0,06
	3к1	0.5	12	0	4	50000	0,38/ 0,3	Rz(S)=10,6/ Ra(S)=1,77	0,04
2 High/Low	3к1	0,5	12	0	8	41000	0,43/ 0,31	Rz(V)=17,91/ Ra(V)=2,71	0,06
	3к1	0.5	12	0	6	40000	0,42/ 0,32	Rz(N)=16,11/ Ra(N)=2,75	0,05
6 Low/High	3к1	0,5	12	-3	6	5000	0,75/ 0,54	Rz(V)=26,85/ Ra(V)=4,57	0,11
								Rz(N)=73,22/ Ra(N)=12,79	
	3к1	0,5	12	0	8	8000	0,53/ 1,0	Rz(V)= 29,74 Ra(V)= 4,75	0,24
								Rz(N)= 49,16 Ra(N)= 10,78	
10 Low/High	3к1	0,5	12	-4	4	5000	0,75/ 0,45	Rz(V)=83,9 Ra(V)=15,46	0,15
								Rz(S)=63,42 Ra(S)=10,37	
								Rz(N)=53,64 Ra(N)=8,46	
	3к1	0,5	12	-4	6	6000	0,69/ 0,6	Rz(V)= 47,82 Ra(V)= 6,75	0,05
								Rz(S)= 67,54 Ra(S)= 11,2	
								Rz(N)= 57,47 Ra(N)= 11,64	

12 Low/High	3к1	0,5	12	-5.5	6	4500	0,79/ 0,71	Rz(V)= 60,95 Ra(V)= 10,7	0,04
								Rz(S)= 55,98 Ra(S)= 9,152	
								Rz(N)= 48,66 Ra(N)= 8,12	
	3к1	0,5	12	-5.5	8	4550	0,83/ 0,75	Rz(V)= 70,98 Ra(V)= 13,87	0,08
								Rz(S)= 51,75 Ra(S)= 8,98	
								Rz(N)= 50,32 Ra(N)= 8,29	
18 Low/High	3к1	0,5	12	-12	6	2100	0,89/ 0,81	Rz(V)= 59,95 Ra(V)= 9,7	0,04
								Rz(S)= 54,98 Ra(S)= 8,152	
								Rz(N)= 47,66 Ra(N)= 8,12	
	3к1	0,5	12	-12	8	2200	0,93/ 0,85	Rz(V)= 69,98 Ra(V)= 12,87	0,08
								Rz(S)= 52,75 Ra(S)= 9,98	
								Rz(N)= 48,32 Ra(N)= 6,29	
25 Low/High	3к1	0,5	12	-20	6	950	0,99/ 0,91	Rz(V)= 61,95 Ra(V)= 11,7	0,04
								Rz(S)= 56,98 Ra(S)= 10,152	
								Rz(N)= 49,66 Ra(N)= 11,12	
	3к1	0,5	12	-20	8	1000	1,03/ 0,95	Rz(V)= 71,98 Ra(V)= 14,87	0,08
								Rz(S)= 50,75 Ra(S)= 7,98	
								Rz(N)= 52,32 Ra(N)= 10,29	

режимах зі швидкістю різання 5000 мм/хв та 8000 мм/хв). Зі зростанням товщини металу від 0,8 мм до 6 мм природнє падіння швидкості різання близьке до лінійного з достатньо високим коефіцієнтом нахилу. За подальшого зростання товщини металу падіння швидкості зберігає характер близький до лінійного але вже зі значно меншим коефіцієнтом нахилу. Діапазон варіативності має місце до товщини 10 мм (5000 мм/хв та 6000 мм/хв) і за товщин більше 10 мм стає мінімальним. Тобто різниця між Low та High для товщин 12, 18 та 25 мм є незначною. По суті в рамках матриці планування експериментів в даному діапазоні товщин виявлено лише один узгоджений набір факторів які забезпечують швидкість різання за якої досягаються відповідні стандарту параметри якості поверхні різку. Незначне зростання максимальної швидкості різання отримано лише за зростання тиску асистуючого газу від 6 бар до 8 бар. Спроби подальшого підвищення тиску не дали жодного прийняттого результату досліду.

Параметри шорсткості. Дані показники суттєво впливають на те, потребує отримана поверхня додаткової обробки чи ні. На товщині 0,8 мм на відносно понижений швидкості різання (50000 мм/хв) отримано найкращі показники шорсткості ($R_z(S)10,6$; $R_a(S)1,77$), що є близьким до показників чистової механічної обробки (точіння, фрезерування). Варто відзначити що на товщинах 0,8 та 2 мм структура поверхні різку є однорідною, тобто практично відсутній поділ висоти різання на зони. Це обумовлено тим, що по всій висоті різку в механізмі абляції домінує випаровування, яке забезпечує мінімум розплаву на поверхні різку і як наслідок низьку шорсткість. На товщині 6 мм на поверхні різку вже добре видно поділ висоти різку на три зони (рис. 3.5). Зі зростанням товщини деталі спостерігається до певної міри коливальна (залежно від зони – верх (V), середина (S), низ (N)) але очевидна тенденція до погіршення показників якості отриманих поверхонь. Більш явною стає зміна шорсткості по висоті різку (зональність поверхні). Причому якщо до товщини 10 мм мінімальна шорсткість спостерігалася в верхній зоні де в абляції домінує випаровування, то починаючи з 10 мм мінімум

шорсткості виявлено в середніх та навіть нижній зонах де в абляції вже домінує плавлення. Так на товщині 12 мм верх – $Rz(V)60,95 / Ra(V)10,7$; середина – $Rz(S)55,98 / Ra(S)9,52$; низ – $Rz(N)48,66 / Ra(N)8,12$. Оскільки в дані зони проходить під тиском повітря, в якому міститься 20% кисню то в зоні де зменшується випаровування починає розвиватися екзотермічна реакція. Локальні сіруваті кольори (рис.4.2) в середній і нижній зонах свідчать про певну нестабільність розвитку екзотермічної реакції, яка призводить до появи на поверхні різь тугоплавкої плівки Cr_2O_3 . Тим не менше спільна дія променю і горіння призводять до зростання температури розплаву і відповідно підвищення ефективності його видалення. За рахунок цього товщина розплаву на стінках пазу зменшується, мікрогеометрія поверхні отримує меншу шорсткість.

В цілому всі результати по параметрам шорсткості наведені в таблиці 4.1 відповідають вимогам 1-2 діапазонів ISO 9013:2017. В залежності від призначення деталей, що виготовляються за технологією лазерного різання вимоги до параметрів шорсткості можуть суттєво різнитися. Тому не можна виключати в окремих випадках їх механічного доопрацювання.

Верхня та нижня ширина різь, величина відхилення поверхні різання від перпендикулярності (нахил). Дані параметри безпосередньо впливають на точність отриманих деталей. Без їх врахування практично неможлива розробка керуючих програм. Як і варто було очікувати за використання максимальної потужності лазерного променю на ширину різь найбільший вплив мають положення фокусу, швидкість різання та товщина листа. В загальному, за деякої коливальності значень даних величин з ростом товщини природньо збільшуються як верхня і нижня ширина різь. Причому, як правило, ширина верхнього різь перевищує ширину нижнього. Лише на товщині 6 мм (режим High) при зростанні тиску асистуючого повітря з 5 бар до 8 бар ширина нижнього різь перевищила ширину верхнього (0,53/1,0), завдяки чому отримано найбільшу конусність у всій серії експериментів (0,24 мм). Пояснити даний факт можливо лише розміщенням положення фокусу на

торці сопла (0) та значним розвитком екзотермічної реакції на виході з різу при суттєвому зростанні тиску асистуючого повітря. Відхилення від перпендикулярності не має чітко вираженої тенденції і носить коливальний характер. На максимальній товщині різання 25 мм за рахунок збалансованого підбору параметрів вдалося отримати відхилення від перпендикулярності, що не перевищує 0,04 мм.. Будучи важливим чинником впливу на точність різання, величина ширини різу не регламентується ISO 9013:2017. За відхиленням від перпендикулярності отримані результати не перевищують вимог 1-2 діапазонів даного стандарту.

4.3 Результати експериментальних досліджень по встановленню режимів та умов максимальної продуктивності різання без втрати заданої якості обробки за використання в якості асистуючого газу азоту

Основні експериментальні дані наведено в табл. 4.2 та на рис. 4.3 і 4.4.

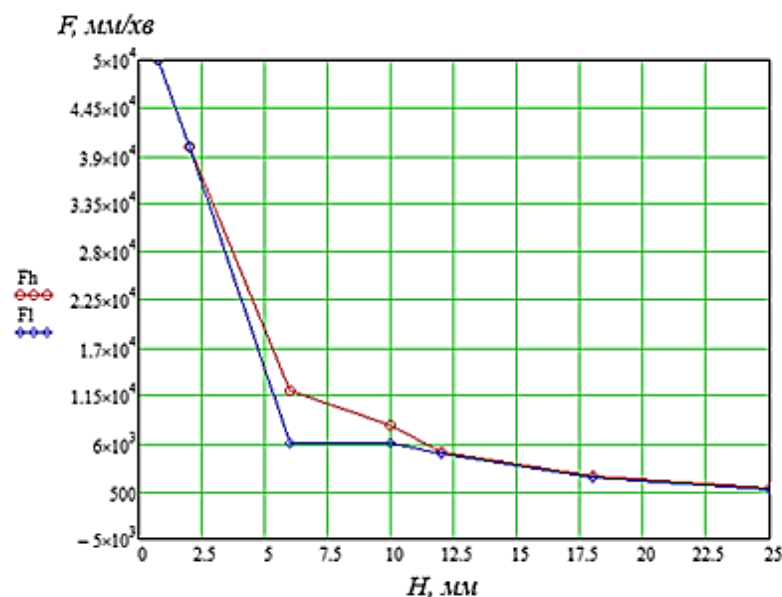


Рисунок 4.3 – Результати визначення залежності швидкості різання листової нержавіючої сталі AISI 304 від товщини листа за умов отримання параметрів якості, що відповідають вимогам стандарту ISO 9013:2017 (асистуючий газ – азот)

Аналіз результатів серії експериментів дозволив встановити наступне.



Рисунок 4.4 – Бокова поверхня листової нержавіючої сталі AISI 304 товщиною 12 мм при різанні з використанням в якості асистуючого газу азоту (режим High – табл. 4.2)

Швидкість різання. При різанні товщин 0,8 мм та 2 мм якісної варіативності отримати не вдалося. На кожній товщині виявлено лише один набір збалансованих параметрів процесу, які забезпечили необхідну високу якість поверхні різі. Як і при різанні в середовищі повітря з міркувань підвищеного ризику пошкодження головки різання товщини 0,8 мм виконувалося на висоті різання 1 мм. На товщині 6 мм спостерігається варіативність набору параметрів факторного простору, які дозволяють отримувати більш високі швидкості різання (відповідна стандарту якість отримана на режимах зі швидкістю різання 6000 мм/хв та 12000 мм/хв) і при цьому отримувати кращі показники якості (табл. 4.2) . Зростання в два рази швидкості різання досягнуто заглибленням положення фокусу відносно поверхні різі на 3 мм, що ще раз демонструє високу чутливість процесу до даного параметру.

Таблиця 4.2 – Карта параметрів різання нержавіючої сталі AISI 304 технологічної інструкції до верстатів моделі AFX-PRO-12000-1530-LD (асистуючий газ – азот)

Товщина металу, мм	Діаметр сопла, мм	Висота різання (відслідковуваний зазор), мм	Потужність, кВт	Положення фокусу відносно торцю сопла, мм	Тиск, бар	Швидкість подачі мм/хв	Ширина різання (верх/низ), мм	Шорсткість поверхні, Rz /Ra	Відхилення від перпендикулярності, мм
0,8	3к1	1	2.4	0	13	50000	0,18/ 0,14	Rz=10,24/ Ra=1,69	0,02
2	3к1	0,5	12	-1	8	40000	0,24/ 0,21	Rz=13,04/ Ra=2,07	0,02
6 High/Low	3к1	0,5	12	-3	9	12000	0,32/ 0,43	Rz(V)=14,72/ Ra(V)=3,34	0,045
								Rz(N)=38,89/ Ra(N)=7,73	
	3к1	0,5	12	0	9	6000	1,11/ 0,9	Rz(V)=20,36/ Ra(V)=3,51	0,11
								Rz(N)=49,33/ Ra(N)=9,24	
10 High/Low	3к1	0,5	12	-4	6	8000	0,54/ 0,56	Rz(V)=20,77/ Ra(V)=3,98	0,01
								Rz(S)=55,97 Ra(S)=10,55	
								Rz(N)=42,1/ Ra(N)=8,06	
	3к1	0,5	12	-2	6	6000	0,58/ 0,5	Rz(V)=49,22/ Ra(V)=10,28	0,04
								Rz(S)=66,14 Ra(S)=10,8	
								Rz(N)=46,33/ Ra(N)=8,91	
12 High/Low	3к1	0,5	12	-4.5	7	5000	0,33/ 0,72	Rz(V)=22,24/ Ra(V)=4,03	0,2
								Rz(S)=52,19 Ra(S)=10,4	
								Rz(N)=55,95/ Ra(N)=11,52	
	3к1	0,5	12	-3.5	7	4800	0,56/	Rz(V)=49,6/	0,05

							0,65	Ra(V)=10,93 Rz(S)=55,39 Ra(S)=10,71 Rz(N)=55,74/ Ra(N)=11,74	
18 High/Low	3k1	0,5	12	-12	7	2150	0,43/ 0,82	Rz(V)=24,24/ Ra(V)=6,03 Rz(S)=53,19 Ra(S)=12,4 Rz(N)=54,95/ Ra(N)=10,52	0,2
	3k1	0,5	12	-11	7	2100	0,66/ 0,75	Rz(V)=51,6/ Ra(V)=11,93 Rz(S)=56,39 Ra(S)=11,71 Rz(N)=57,74/ Ra(N)=12,74	0,05
25	3k1	0,5	12	-20	7	800	0,43/ 0,92	Rz(V)=22,24/ Ra(V)=5,03 Rz(S)=52,19 Ra(S)=11,4 Rz(N)=56,95/ Ra(N)=12,52	0,2
	3k1	0,5	12	-18	7	700	0,56/ 0,95	Rz(V)=51,6/ Ra(V)=11,93 Rz(S)=54,39 Ra(S)=9,71 Rz(N)=57,74/ Ra(N)=12,74	0,05

Зі зростанням товщини металу від 0,8 мм до 6 мм природне падіння швидкості різання близьке до лінійного з достатньо високим коефіцієнтом нахилу.

За подальшого зростання товщини металу падіння швидкості зберігає характер близький до лінійного але вже зі значно меншим коефіцієнтом нахилу. Діапазон варіативності на товщині 10 мм все ще є досить значним (6000 мм/хв – 8000 мм/хв). В подальшому різниця між Low та High для товщин 12, 18 та 25 мм стає незначною (рис.4.3). Як і за використання в якості асистуючого газу повітря в рамках матриці планування експериментів в даному діапазоні товщин виявлено лише один узгоджений набір факторів які забезпечують швидкість різання за якої досягаються відповідні стандарту параметри якості поверхні різку. Але на відміну від повітря незначне зростання максимальної швидкості різання отримано шляхом зміни положення фокусу відносно поверхні деталі.

Параметри шорсткості. На товщині 0,8 мм на відносно понижений швидкості різання (50000 мм/хв) отримано найкращі показники шорсткості ($R_z(S)10,24$; $R_a(S)1,69$, які практично не відрізняються від показників отриманих на повітрі. На товщинах 0,8 мм та 2 мм також відсутній поділ висоти різку на зони (рис. 4.5). Поділ на зони також починається з товщини 6 мм. З подальшим зростанням товщини деталі спостерігається до певної міри коливальна, але знову очевидна тенденція до погіршення показників якості отриманих поверхонь. На відміну від використання повітря найнижча шорсткість завжди спостерігається в верхній зоні де в механізмі абляції домінує випаровування. В другій та третій зонах значення шорсткості є досить близькими, але в 2 – 2,5 перевищують шорсткість в першій зоні. Відразу за першою зоною починається формування ребер, висота яких і визначає шорсткість в даних зонах. Як і варто було очікувати в середньому на всіх досліджених товщинах використання азоту замість повітря в якості асистуючого газу забезпечує зниження шорсткості від 5% до 50% залежно

від товщини металу. Раціональний вибір параметрів сопла та тиску асистуючого азоту формує «чисту» поверхню різу без слідів окислення.

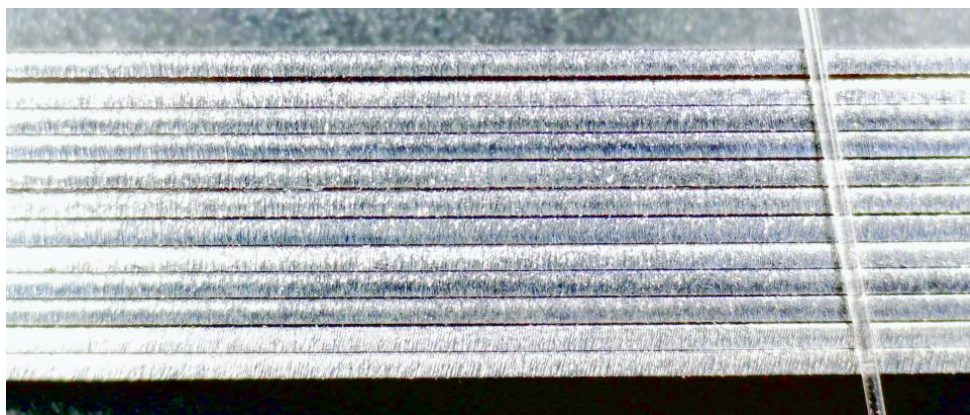


Рисунок 4.5 – Бокова поверхня зразків листової нержавіючої сталі AISI 304 товщиною 0,8 мм при різанні з використанням в якості асистуючого газу азоту

В цілому всі результати по параметрам шорсткості наведені в таблиці 4.2 відповідають вимогам 1-2 діапазонів ISO 9013:2017.

Верхня та нижня ширина різу, величина відхилення поверхні різання від перпендикулярності (нахил). В загальному, за деякої коливальності значень даних величин з ростом товщини природньо збільшуються як верхня і нижня ширина різу. Співвідношення між ширинами носить коливальний характер і змінюється залежно від товщини та обраних параметрів процесу. В середньому заміна повітря на азот призводить до зменшення ширини як верхнього так і нижнього різів. Даний факт обумовлений повною відсутністю екзотермічних реакцій по всій висоті різу.

Відхилення від перпендикулярності також не має чітко вираженої тенденції і носить коливальний характер. На товщині різання 10 мм зафіксовано відхилення від перпендикулярності, що не перевищує 0,01 мм, що є найкращим результатом у всій серії проведених експериментів. Як і при використанні повітря за відхиленням від перпендикулярності отримані результати не перевищують вимог 1-2 діапазонів даного стандарту.

4.4 Математична статистична модель газолазерного різання 12 мм нержавіючої сталі

Розробка регресійних моделей для розрахунку параметрів режимів різання є вкрай важливим компонентом для підвищення ефективності проектування режимів газолазерного різання металів. Для дослідження можливостей регресійних моделей для прогнозування результатів різання було розроблено три регресійних моделі для розрахунку параметрів режимів різання 12 мм нержавіючої сталі AISI 304 випромінюванням оптоволоконного лазера потужністю 12 кВт з використанням в якості асистуючого технологічного газу азоту [69]. Для досягнення поставленої мети необхідне було вирішення таких задач:

- 1) провести серію пошукових експериментів та визначити факторний простір і найбільш інформативну функцію відгуку;
- 2) розробити матрицю планування повнофакторного експерименту;
- 3) відповідно до розробленої матриці провести комплекс експериментів по газолазерному різанню 12 мм нержавіючої сталі AISI 304 випромінюванням оптоволоконного лазера з вихідною потужністю 12 кВт;
- 4) отримати математичні статистичні моделі та встановити залежності якості отриманих деталей від обраних параметрів процесу газолазерного різання 12 мм нержавіючої сталі AISI 304.

Різання листа з нержавіючої сталі AISI 304 товщиною 12 мм з типовим хімічним складом проводилось за допомогою лазера потужністю 12 кВт. Дослідження виконувалися на експериментальному верстаті компанії «Араміс» (рис. 4.6), основна інформація про верстат наведена в таблиці 4.3.

Параметри процесу (факторний простір), які досліджувалися в цій роботі, включали тиск асистуючого газу ($Z1$ – бар, азот з чистотою 99,99%), положення фокусу відносно поверхні листа ($Z2$ – \pm мм), швидкість різання ($Z3$ – мм/хв), Різання виконували на максимальній потужності лазера 12 кВт.

Діаметр лазерної плями в фокальній площині становив 210 мкм. Дані параметри задавалися і контролювалися системою числового програмного керування (ЧПК) з точністю, яка відповідає паспортним даним верстата.

Таблиця 4.3 – Моделі основних систем верстата для проведення досліджень

Верстат	AFX-PRO-12000-1530LD
Модель лазера, діаметр оптоволоконна	MAX Photonics 12 kWt, оптоволоконно 100 мкм
Модель оптичної головки, коліматор	BLT9120MA Product Manual, f 250 мм

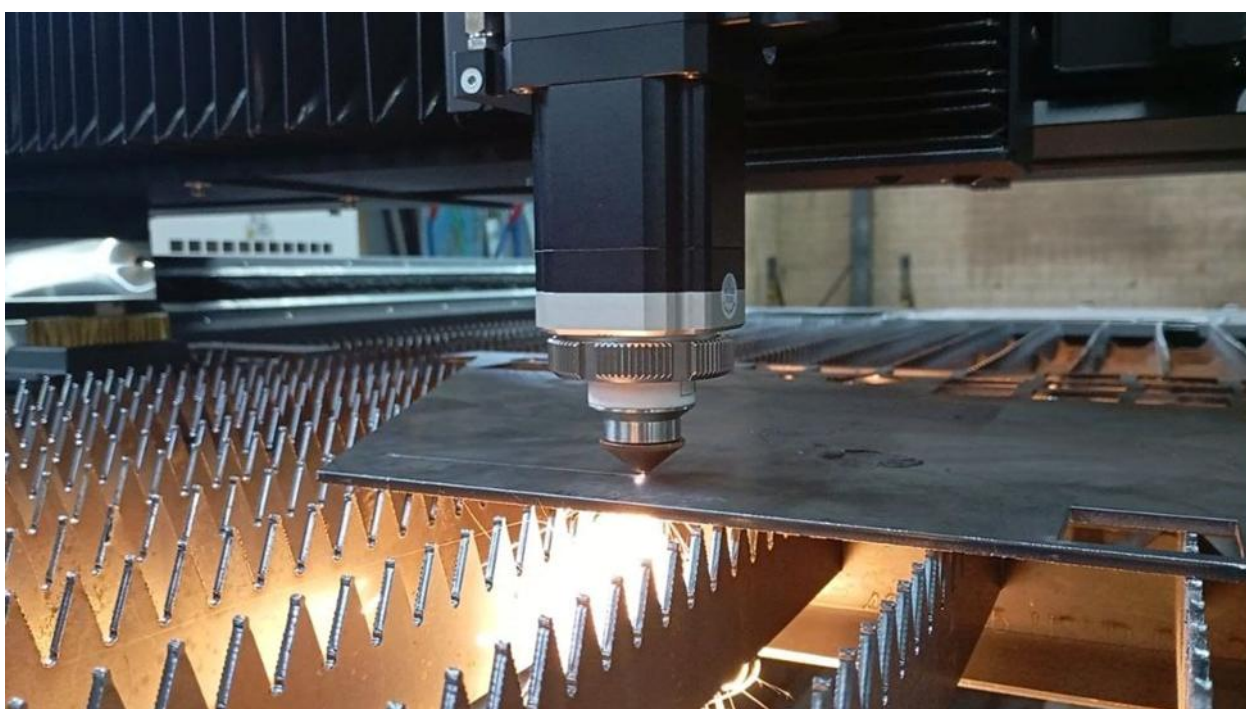


Рисунок 4.6 – Процес газолазерного різання на верстаті моделі AFX-PRO-12000-1530LD

З врахуванням попередніх експериментальних робіт авторів [70, 71] верстат комплектувався оптичною головкою з фокусною відстанню 250 мм, яка забезпечує в цілому більш високі показники якості при різанні нержавіючих сталей з використанням як асистуючого газу азоту (в порівнянні з оптичною головкою з фокусною відстанню 200 мм), та одноканальним конічним соплом з вихідним діаметром 3 мм. Відслідковуваний зазор між торцем сопла та поверхнею листа становив 0,5

мм і залишався незмінним. Згідно вимог ISO 9013:2017 як критерій оцінки якості поверхні (функція відгуку Y) обрано максимальне значення шорсткості R_z з трьох вимірів (верх, середина, низ зразка). Профілограми поверхні лазерного різку дослідних зразків отримували за допомогою профілографа TIME 3221 (див. п.п. 2.2.3.1). Креслення зразків для досліджень та методика вимірювань шорсткості також наведені в даному підпункті.

На основі аналізу результатів серії пошукових експериментів були визначені рівні варіювання досліджуваних факторів та розроблена матриця планування експерименту таким чином, щоб повний факторний експеримент відповідав 59 дослідам. При цьому обрана для досліджень область факторного простору виключала режими за яких фіксувалися наявність окалини на нижній поверхні зразка, повне або часткове заварювання пазу. За створеним планом експериментів проведено низка досліджень, умови проведення і результати яких наведено на рис. 4.7.

Spreadsheet				
	1 z1	2 z2	3 z3	4 Y
1	6	0.5	5500	46.5
2	6	-1.5	5500	39.3
3	8	0.5	5500	44.1
4	8	-1.5	5500	38.7
5	6	0.5	4500	46.9
6	6	-1.5	4500	40.1
7	8	0.5	4500	50.2
8	8	-0.5	4500	46.5
9	7	0	5000	49.2
10	6.5	-1	4750	40.9
11	7.5	-0.25	5250	46.7
12	6.2	-1.25	5375	42.5
13	7.2	-0.75	4875	45.4
14	6.8	-0.5	5125	49.5
15	7.8	0.0	4625	47.3
16	6.1	-1.0	5188	47.7
17	7.1	-0.2	4688	42.2
18	6.6	-1.2	5438	46.2
19	7.6	-0.8	4938	48.3
20	6.4	0.2	4813	45.8
21	7.4	0.4	5313	50.0
22	6.9	-0.6	4563	39.6
23	7.9	-1.1	5063	48.8
24	6.1	-0.1	4906	40.4
25	7.1	-0.9	5406	48.7
26	6.6	0.1	4656	45.9
27	7.6	-0.4	5156	45.7
28	6.3	-1.4	5031	49.8
29	7.3	-0.4	4531	47.5
30	6.8	-1.4	5281	43.3
31	7.8	-0.9	4781	46.3
32	6.2	0.1	5344	49.2
33	7.2	-1.2	4844	48.0
34	6.7	-0.2	5094	43.0
35	7.7	0.3	4594	48.8
36	6.4	-0.7	4719	41.8
37	7.4	-0.6	5219	43.0
38	6.9	0.4	4969	41.0
39	7.9	-0.1	5469	46.8
40	6	-1.1	5453	44.6
41	7	0.2	4953	42.7
42	6.5	-0.8	5203	46.9
43	7.5	-1.3	4703	50.1
44	6.3	-0.3	4578	48.1
45	7.3	0.1	5078	49.1
46	6.8	-0.9	4828	39.8
47	7.8	-1.4	5328	48.7
48	6.2	-0.4	4766	46.1
49	7.2	-0.7	5266	48.5
50	6.7	0.3	4516	43.4
51	7.7	-0.2	5016	47.8
52	6.4	-1.2	5141	43.0
53	7.4	-1.0	4641	42.9
54	6.9	-0.0	5391	47.2
55	7.9	0.5	4891	46.8
56	6.1	-0.5	5109	50.0
57	7.1	-0.3	4609	45.4
58	6.6	-1.3	5359	40.4
59	7.6	-0.8	4859	48.0

Рисунок 4.7 – Матриця планування експерименту та результати дослідів

Побудова регресійної моделі $Y = f(z_1, z_2, z_3)$. Наступний етап необхідно почати із оцінки можливих регресійних моделей, що можна побудувати різними методами [72, 73] з використанням різноманітних програмних продуктів. Отже, враховуючи низку вимог до програмних продуктів, а саме, використання простої програмно-орієнтованої мови, автоматизоване управління процесами обробки даних, підтримка користувацької бази даних і формування звітів за результатами проведеного аналізу, забезпечення діалогової взаємодії користувача з програмним пакетом та інтеграція і сумісність з іншими програмними засобами для подальшої роботи обрано пакет Statistica. При цьому пакет Statistica дозволяє працювати як із базовими модулями регресійного аналізу так і засобами інтелектуального аналізу даних Statistica Data Miner.

Використовуючи можливості пакету Statistica здійснюємо аналіз даних і визначаємо кореляційну матрицю (рис. 4.8).

Як видно із результатів сильної кореляції між факторами не спостерігається тобто вони не є мультиколінеарні, тому жодного з них видаляти не потрібно.

Variable	Correlations (Spreadsheet_ in Workbook1)			
	z1	z2	z3	Y
z1	1,000000	-0,035871	-0,065882	-0,441817
z2	-0,035871	1,000000	-0,055660	0,622814
z3	-0,065882	-0,055660	1,000000	-0,487432
Y	-0,441817	0,622814	-0,487432	1,000000

Рисунок 4.8 – Отримана кореляційна матриця

Відповідно будемо поліноміальну модель виду:

$$y = b_0 + b_1 \cdot z_1 + b_2 \cdot z_2 + b_3 \cdot z_3 \quad (4.1)$$

Для цього виконуємо розрахунок коефіцієнтів рівняння (1) та перевіряємо їх рівень значимості за критерієм Стюдента (рис. 4.9).

Regression Summary for Dependent Variable: Y (Spreadsheet_ in Workbook1)						
R= .89303372 R²= .79750922 Adjusted R²= .78646427 F(3,55)=72.206 p<0.0000 Std. Error of estimate: 1.4797						
N=59	b*	Std. Err. of b*	b	Std. Err. of b	t(55)	p-value
Intercept			86,76594	3,784764	22,92506	0,000000
z1	-0,452993	0,060857	-2,23833	0,300705	-7,44361	0,000000
z2	0,579563	0,060819	2,85566	0,299670	9,52936	0,000000
z3	-0,485011	0,060912	-0,00480	0,000603	-7,96250	0,000000

Рисунок 4.9 – Результати розрахунку коефіцієнтів поліноміальної моделі (стовпчик b) та значень критерію Стюдента для кожного з них ($t^{експ}$ - стовпчик t(55))

Критичне значення критерію Стюдента при рівні значущості $\alpha=0,05$ і числі степенів свободи $k=55$ становить $t_{0,05;55}^{крит} = 1,96$. Оскільки умова $t^{експ} > t_{0,05;55}^{крит}$ виконується для всіх чотирьох коефіцієнтів, то вони статистично значимі. Тоді рівняння лінійної регресії:

$$y = 86,76594 - 2,23833 \cdot z_1 + 2,85566 \cdot z_2 - 0,0048 \cdot z_3 \quad (4.2)$$

Проведений аналіз за створеною лінійною регресійною моделлю (4.2) встановив, що похибка отриманої регресійної моделі $MARE=2,4\%$. Перевірка за критерієм Фішера підтвердила адекватність розробленої моделі так як $F_{0,05;3;55}^{крит} = 2,812$, а $F_{3,55}^{експ} = 72,2$, тобто $F_{3,55}^{експ} > F_{0,05;3;55}^{крит}$, отже умова адекватності виконується. Значення коефіцієнту детермінації $R^2=0.797$. Тобто 79,7 % факторів враховано в моделі. Відповідна діаграма розсіювання наведена на рис. 4.9.

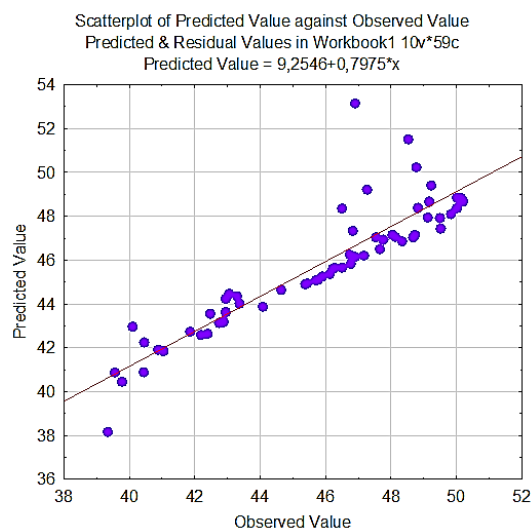


Рисунок 4.9 – Діаграма розсіювання значень цільової та апроксимаційної функцій за регресійною моделлю (4.2)

Наступним кроком побудуємо поліноміальну модель виду:

$$y = b_1 \cdot z_1 + b_2 \cdot z_2 + b_3 \cdot z_3 + b_4 \cdot z_1 \cdot z_2 + b_5 \cdot z_1 \cdot z_3 + b_6 \cdot z_2 \cdot z_3 + b_7 \cdot z_1 \cdot z_2 \cdot z_3 \quad (4.3)$$

Така модель враховує ефект взаємодії факторів. Як і в попередньому випадку розраховуємо коефіцієнти рівняння (4.3) та перевіряємо їх рівень значимості за критерієм Стьюдента. Всі коефіцієнти регресійної моделі є статистично значимі. Окрім цього такий висновок підтверджується за критерієм Фішера ($F_{0,05;3;55}^{крит} = 2,812$; $F_{3,55}^{експ} = 99,94$; $F_{3,55}^{експ} > F_{0,05;3;55}^{крит}$). Отримане рівняння регресії:

$$y = 9,936 \cdot z_1 - 140,756 \cdot z_2 + 0,011 \cdot z_3 + 20,041 \cdot z_1 \cdot z_2 - 0,002 \cdot z_1 \cdot z_3 + 0,026 \cdot z_2 \cdot z_3 - 0,004 \cdot z_1 \cdot z_2 \cdot z_3 \quad (4.4)$$

Похибка отриманої регресійної моделі (4.4) MAPE=1,58 %. Значення коефіцієнту детермінації $R^2=0.92$. Тобто 92% факторів враховано в моделі. Відповідна діаграма розсіювання наведена на рис. 4.10. Таким чином врахування ефекту взаємодії факторів дозволило підвищити адекватність і точність регресійної моделі.

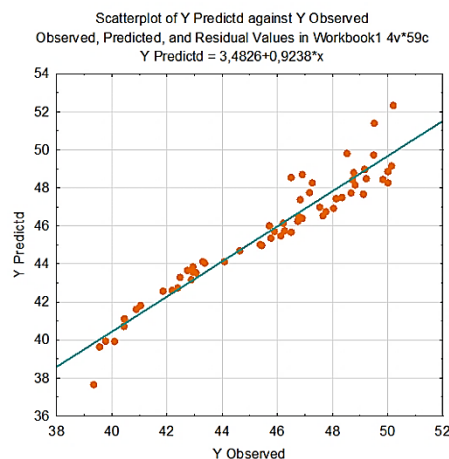


Рисунок 4.10 – Діаграма розсіювання значень цільової та апроксимаційної функцій за регресійною моделлю (4.4)

Розглянемо в якості поліноміальної регресійної моделі поліном другого ступеня, який в даному випадку має вигляд:

$$y = b_0 + b_1 \cdot z_1 + b_2 \cdot z_1^2 + b_3 \cdot z_2 + b_4 \cdot z_2^2 + b_5 \cdot z_3 + b_6 \cdot z_3^2 + b_7 \cdot z_1 \cdot z_2 + b_8 \cdot z_1 \cdot z_3 + b_9 \cdot z_2 \cdot z_3 \quad (4.5)$$

Розраховуємо коефіцієнти рівняння (4.5) та перевіряємо їх рівень значимості за критерієм Стюдента (рис. 4.11).

Parameter Estimates (Spreadsheet_13/05 in Workbook1)										
Sigma-restricted parameterization										
Effect	Y Param.	Y Std.Err	Y t	Y p	-95,00% Cnf.Lmt	+95,00% Cnf.Lmt	Y Beta (?)	Y St.Err.?	-95,00% Cnf.Lmt	+95,00% Cnf.Lmt
Intercept	65,6354	48,61699	1,35005	0,183203	-32,0641	163,3349				
z1	4,0915	7,16079	0,57138	0,570355	-10,2986	18,4817	0,82804	1,449201	-2,08424	3,74032
z1^2	-0,3569	0,46308	-0,77075	0,444554	-1,2875	0,5737	-1,01025	1,310731	-3,64426	1,62376
z2	-14,2673	3,80517	-3,74946	0,000469	-21,9141	-6,6205	-2,89559	0,772269	-4,44752	-1,34366
z2^2	-1,2680	0,44692	-2,83713	0,006603	-2,1661	-0,3698	-0,29623	0,104413	-0,50606	-0,08641
z3	-0,0069	0,01892	-0,36249	0,718544	-0,0449	0,0312	-0,69277	1,911132	-4,53333	3,14780
z3^2	0,0000	0,00000	0,15727	0,875679	-0,0000	0,0000	0,29387	1,868577	-3,46118	4,04892
z1*~\FT1...z2	1,8548	0,30047	6,17290	0,000000	1,2510	2,4586	2,67273	0,432977	1,80263	3,54283
z1*~\FT1...z3	-0,0001	0,00060	-0,11264	0,910773	-0,0013	0,0011	-0,08046	0,714252	-1,51580	1,35489
z2*~\FT1...z3	0,0006	0,00061	0,91994	0,362112	-0,0007	0,0018	0,57451	0,624510	-0,68049	1,82951

Рисунок 4.11 – Результати розрахунку значень коефіцієнтів рівняння (4.5) та рівня їх значимості за критерієм Стюдента

На відміну від попередніх випадків, як видно з рис. 4.11, лише деякі коефіцієнти регресійної моделі другого ступеня є статистично значимими (виділено червоним), які необхідно врахувати. Відповідно отримане квадратичне рівняння регресії:

$$y = -14,267 \cdot z_2 - 1,268 \cdot z_2^2 + 1,8548 \cdot z_1 \cdot z_2 \quad (4.6)$$

За критерієм Фішера ($F_{0,05;3;55}^{крит} = 2,812$; $F_{3,55}^{експ} = 51,81$; $F_{3,55}^{експ} > F_{0,05;3;55}^{крит}$) модель є адекватною. Похибка отриманої регресійної моделі (4.6) $MARE=1,6\%$. Значення коефіцієнту детермінації $R^2=0.90$. Тобто 90% факторів враховано в моделі. Відповідна діаграма розсіювання наведена на рис. 4.12.

Наступний рисунок 4.14 демонструє вже результат моделювання для всіх запропонованих методів, які можливо передивитися та проаналізувати в модулі – Reporting Documents.

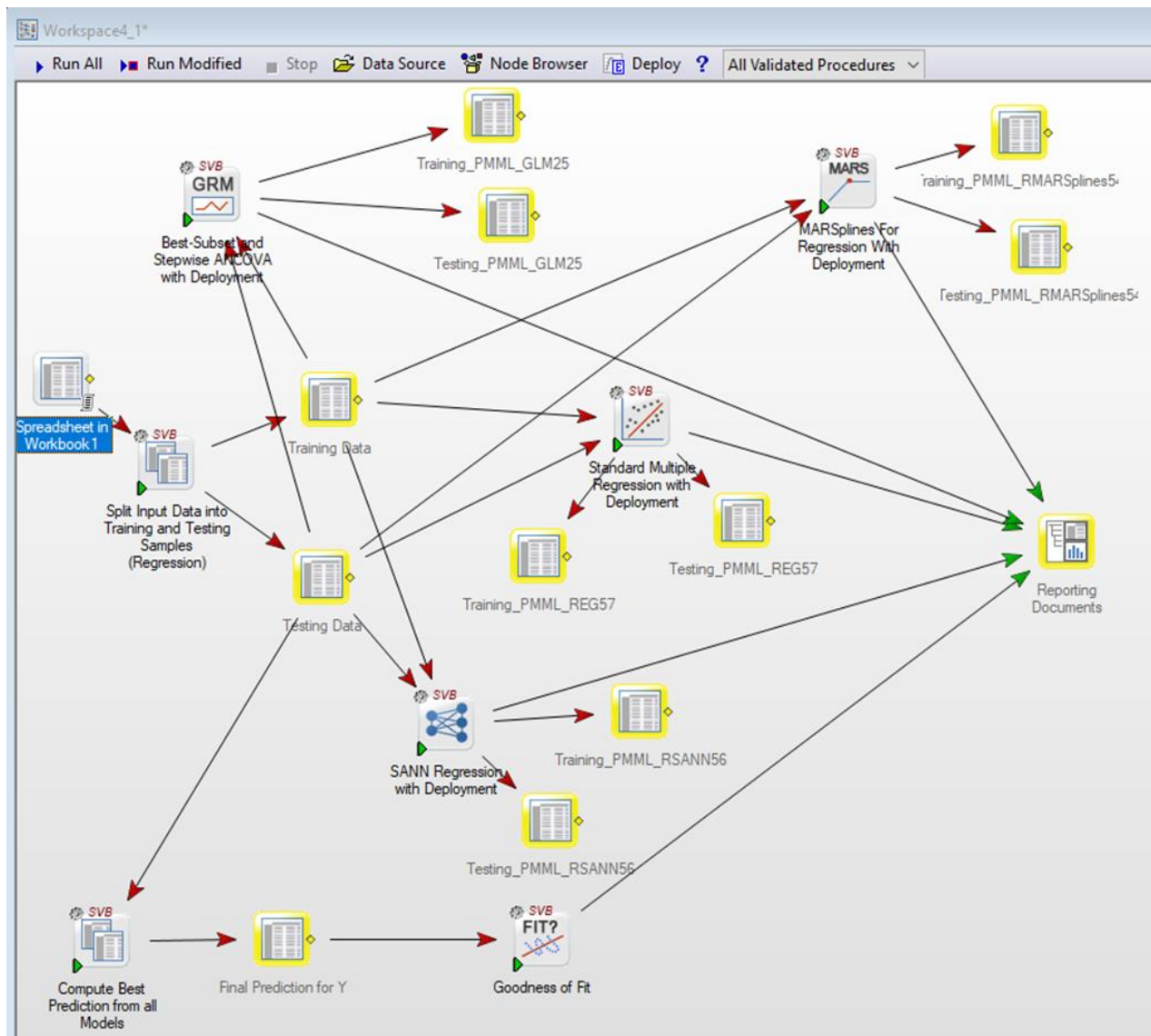


Рисунок 4.14 – Демонстрація роботи проекту

На рис. 4.15 наведено отримані діаграми розсіювання цільової та апроксимаційної функцій для різних методів інтелектуального аналізу регресійної моделі.

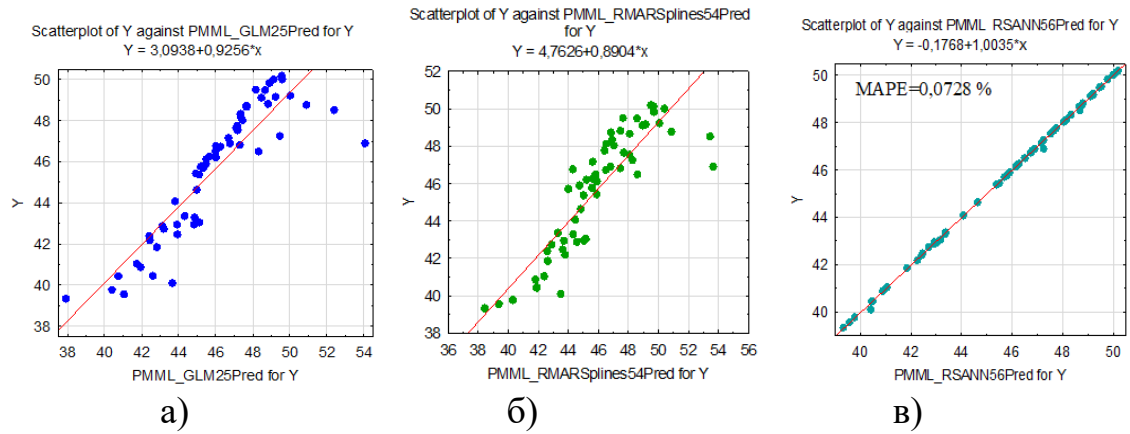


Рисунок 4.15 – Діаграми розсіювання цільової та апроксимаційної функцій для інтелектуальної регресійної моделі (навчання та тестування) за використання методів: а – Best-Subset and Stepwise ANCOVA with Deployment; б – MARSplines For Regression With Deployment; в – SANN Regression with Deployment (неймережева модель MLP-3-23-1)

Очевидно що найкращу точність та адекватність регресійної інтелектуальної моделі , що створена на основі штучних нейронних мереж, дає метод SANN Regression with Deployment (MLP нейронна мережа із 3 входами із одним прихованим шаром, що має 23 нейрони та 1 вихід. Функція активації прихованого шару – \tanh (гіперболічний тангенс). Функція активації вихідного шару – identity). Похибка отриманої за даним методом інтелектуальної регресійної моделі $MAPE=0,0728 \%$. Значення коефіцієнту детермінації $R^2 > 0.95$. В загальному вигляді ця модель описується рівнянням [74,75]:

$$F(x_1, x_2, \dots, x_K) = \sum_{i=1}^N a_i \cdot f\left(\sum_{k=1}^K a_{ik} \cdot x_k + a_{0k}\right), \quad (4.7)$$

де (x_1, x_2, \dots, x_K) – вектор вхідних даних;

$f(\cdot)$ обмежена, не постійно монотонно висхідна неперервна функція;

K – кількість вхідних вузлів;

N – кількість нейронів прихованого шару;

a_{ik} – синаптичні ваги прихованого шару;

a_i – синаптичні ваги вихідного шару;

a_{0k} – зміщення.

Отримана регресійна нейромережева модель MLP-3-23-1 має експериментальне значення показника Фішера $F_{3;45}^{експ}=29800.52$, а критичне значення цього критерію з рівнем значущості $\alpha=0,05$ та числом степенів свободи $\nu_R=45$, $\nu_D=3$ складає $F_{\alpha;\nu_D;\nu_R}^{крит} = F_{0,05;3;45}^{крит} = 2,812$. Тобто умова $F_{3;45}^{експ} > F_{0,05;3;45}^{крит}$ виконується, регресійна модель адекватна. Оскільки $R^2 > 0,95$ то регресійна модель інформативна та значимо достовірна.

Таким чином зі всіх отриманих регресійних моделей найкращі статистичні показники має регресійна модель MLP-3-23-1, що створена на основі штучних нейронних мереж за методом SANN Regression with Deployment. Тому поверхню відгуку будуюмо за даною регресійною нейромережевою моделлю (рис. 4.16).

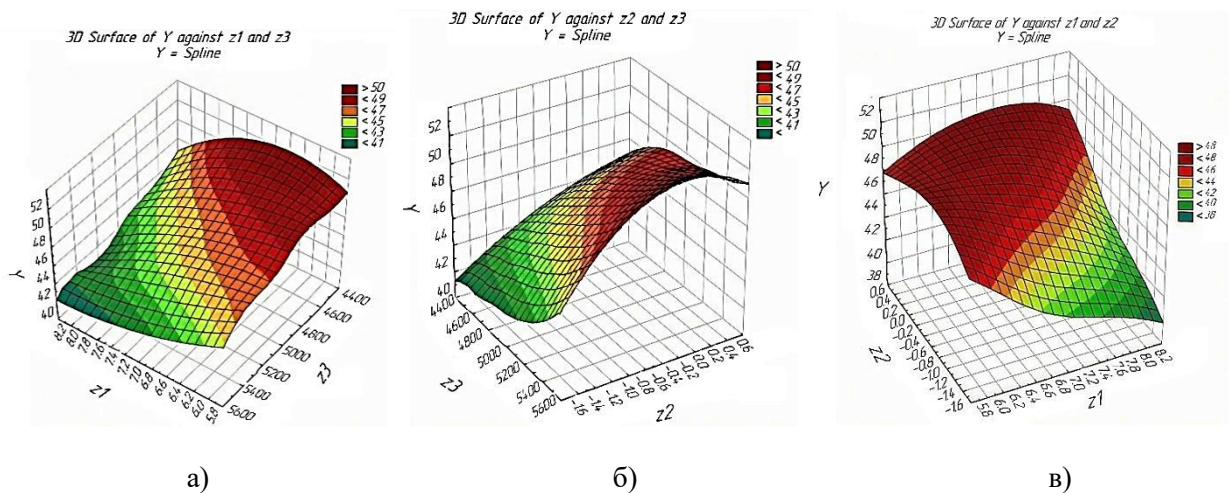


Рисунок 4.16 – Поверхня відгуку отримана за регресійною моделлю MLP-3-23-1: а – $Y = f(z_1, z_3)$; б – $Y = f(z_2, z_3)$; в – $Y = f(z_1, z_2)$

Загальний аналіз отриманих результатів показує, що в області обраного факторного простору найбільший вплив на шорсткість поверхні різку має положення фокусу відносно поверхні деталі, дещо нижчий вплив має тиск асистуючого газу, і найбільш низький вплив показала швидкість різання. Це пояснюється тим, що положення фокусу суттєво впливає на розподіл

падаючої енергії по висоті різіу і відповідно на ширину прорізу, яка є вагомим чинником протікання асистуючого газу через проріз та ефективності видалення розплаву від якої залежить формування мікрогеометрії поверхні. Аеродинамічна взаємодія між струменем асистуючого газу і деталлю формує так званий ріжучий тиск, який в основному і обумовлює характер видалення розплаву з зони різання. В свою чергу швидкість різання по суті забезпечує баланс між об'ємами розплавленого та видаленого металу. На рис. 4.16 а показано взаємозалежність між шорсткістю поверхні різіу, тиском асистуючого газу та швидкістю різання. Очевидно, що за умов експерименту збільшення тиску асистуючого газу дозволяє отримати меншу шорсткість при більшій швидкості різання. На рис. 4.16 б показано взаємозалежність між шорсткістю поверхні різіу, положенням фокусу та швидкістю різання. Спостерігається чітка тенденція до зниження шорсткості при заглибленні положення фокусу всередину заготовки. Однак варто відзначити незначне зростання шорсткості при збільшенні швидкості різання. На рис. 4.16 в показано взаємозалежність між шорсткістю поверхні різіу, тиском асистуючого газу та положенням фокусу. Найкращий відгук за шорсткістю ($Rz38$) можливо отримати за тиску 8,2 бар та положенні фокусу -1,6 мм. Для експериментального підтвердження отриманих результатів було виконано вирізання 5 тестових зразків на розрахованих за регресійною моделлю режимах ($Z1=8,2$ бар; $Z2=-1,6$ мм; $Z3=5600$ мм/хв). Контроль шорсткості показав діапазон зміни максимальної шорсткості поверхонь зразків $Rz37,92$ – $Rz41,71$ що є досить високим рівнем кореляції між прогнозом за регресійною моделлю та експериментом.

Висновки за розділом 4

1. Розроблені методики досліджень та проведена серія експериментів які дозволили вперше встановити діапазон збалансованих параметрів лазерного променя та лазерного процесу при різанні листової нержавіючої

сталі AISI 304 стандартного ряду товщин випромінюванням оптоволоконного лазера потужністю 12000 Вт в середовищі повітря та азоту. Встановлені режими забезпечують високу продуктивність та кількісний контроль за параметрами якості різу, які відповідають вимогам стандарту ISO 9013:2017.

2. Отримані результати покладені в основу розділу технологічної інструкції до серійних верстатів моделі AFX-PRO-2000-1530-LD. Проведена експериментальна верифікація підтвердила добру відтворюваність наданих режимів. Відхилення параметрів якості від табличних значень не перевищувало 5%.

3. З застосуванням методів математичного планування експерименту проведено комплекс системних експериментальних досліджень, результати яких дозволили отримати дані про кількісний вплив базових параметрів газолазерного різання на продуктивність та якість процесу при обробці 12 мм нержавіючої сталі AISI 304 випромінюванням оптоволоконного лазера потужністю 12 кВт.

4. Використовуючи ліцензійний пакет Statistica виконано статистичний аналіз отриманого експериментального матеріалу та розроблено три регресійні моделі, які встановлюють залежність максимальної шорсткості поверхні різання (Y) від базових факторів процесу: тиску асистуючого газу ($Z1$ -азот), положення фокусу відносно поверхні листа ($Z2$), швидкості різання ($Z3$). Перевірка отриманих моделей за критеріями Стюдента та Фішера підтвердила їх інформативність та адекватність. Виконане порівняння моделей показало, що найвищі точність і адекватність має регресійна інтелектуальна модель MLP-3-23-1, що створена на основі штучних нейронних мереж, за методом SANN Regression with Deployment. Розрахункова похибка прогнозу за моделлю не перевищує 0,0728 %.

5. Розраховані за регресійною інтелектуальною моделлю MLP-3-23-1, параметри різання ($Z1=8,2$ бар; $Z2=-1,6$ мм; $Z3=5600$ мм/хв) які забезпечують високу якість та продуктивність процесу підтверджені експериментально.

При прогнозі Rz38 реальні значення максимальної шорсткості отримані на 5 зразках мали розкид Rz37,92 – Rz41,71 що є високим рівнем точності прогнозування та відтворюваності процесу.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

Сукупність представлених у дисертації результатів експериментальних та теоретичних досліджень становить нове вирішення актуальної науково-технічної задачі, що полягає в отриманні нової інформації про рівень впливу компонентів факторного простору на параметри процесу газолазерного різання та розробці технологічних режимів різання нержавіючих сталей випромінюванням оптоволоконного лазера потужністю 12 кВт, які забезпечують високу продуктивність і відтворюваність процесу та відповідну якість отриманих деталей.

Найбільш істотні наукові результати і висновки дисертаційної роботи полягають у такому:

1. Проведеним аналізом стану проблеми технологічного забезпечення максимальної продуктивності та якості газолазерного різання нержавіючих сталей що потенціал сучасних потужних (6 кВт – 12 кВт) оптоволоконних лазерів далеко не завжди використовується в повній мірі через недостатнє експериментальне обґрунтування збалансованості базових параметрів процесу, включаючи потужність лазера, фокусну відстань оптичної головки, положення фокусу відносно поверхні заготовки, типу та тиску допоміжного газу, внутрішню структуру та діаметр сопла, відстанню від сопла до поверхні заготовки.

2. Запропонована загальна концепція проведення комплексу експериментальних досліджень для обґрунтування збалансованих параметрів лазерного променя та технологічного процесу при різанні нержавіючих сталей на лінійці установок, укомплектованих оптоволоконними лазерами потужністю 12 кВт, які забезпечують високу продуктивність та відповідну якість виготовлених деталей.

3. Розроблені оригінальна конструкція дискового зонда та методика для високоточної реєстрації величини ріжучого тиску утвореного гальмуванням струменя асистуючого газу, сформованого соплом оптичної головки на поверхні деталі, в будь-якій точці перетину струменя в технологічних умовах

газолазерного різання. Розроблено та підібрано методики та обладнання для коректного визначення показників якості бокової поверхні різу.

4. Вперше отримані точні чисельні дані про параметри полів ріжучого тиску, які формуються найбільш масовими соплами компанії Thermacut. Отриманий масив експериментальних даних, дозволив виявити закономірності впливу внутрішньої структури та розмірів сопла, манометричного тиску всередині сопла, величини зазору між соплом деталлю на геометрію сформованого струменя асистуючого газу (повітря і азот) та величини ріжучого тиску в довільному його перетині при гальмуванні на поверхні деталі.

5. Використання отриманих результатів дозволило зробити більш точним та ефективним проектування процесів газолазерного різання максимальної продуктивності, за рахунок обґрунтування вибору типу сопла точного прогнозування величини ріжучого тиску, який створить газовий струмінь обраного сопла в конкретних технологічних умовах.

6. В більш широкому сенсі, запропонований підхід дозволяє відносно просто отримати інформацію про ріжучий тиск створюваний довільним типом сопла, яким комплектується верстат за тих чи інших технологічних умов (отримати газодинамічний «паспорт» сопла). Відповідно створюється умови для більш надійного забезпечення продуктивного високоякісного різання та підвищення рівня відтворюваності процесу.

7. Розроблені методики досліджень та проведена серія експериментів які дозволили вперше встановити діапазон збалансованих параметрів лазерного променя та лазерного процесу при різанні листової нержавіючої сталі AISI 304 стандартного ряду товщин випромінюванням оптоволоконного лазера потужністю 12000 Вт в середовищі повітря та азоту. Встановлені режими забезпечують високу продуктивність та кількісний контроль за параметрами якості різу, які відповідають вимогам стандарту ISO 9013:2017. Виявлено закономірності впливу типу асистуючого газу на параметри процесу та якість отриманих деталей. Отримані результати

покладені в основу розділу технологічної інструкції до серійних верстатів моделі AFX-PRO-2000-1530-LD. Проведена експериментальна верифікація підтвердила добру відтворюваність наданих режимів. Відхилення параметрів якості від табличних значень не перевищувало 5%.

8. З застосуванням методів математичного планування експерименту проведено комплекс системних експериментальних досліджень, результати яких дозволили отримати дані про кількісний вплив базових параметрів газолазерного різання на продуктивність та якість процесу при обробці 12 мм нержавіючої сталі AISI 304 випромінюванням оптоволоконного лазера потужністю 12 кВт.

9. Використовуючи ліцензійний пакет Statistica виконано статистичний аналіз отриманого експериментального матеріалу та розроблено три регресійні моделі, які встановлюють залежність максимальної шорсткості поверхні різання (Y) від базових факторів процесу: тиску асистуючого газу ($Z1$ -азот), положення фокусу відносно поверхні листа ($Z2$), швидкості різання ($Z3$). Перевірка отриманих моделей за критеріями Стюдента та Фішера підтвердила їх інформативність та адекватність. Виконане порівняння моделей показало, що найвищі точність і адекватність має регресійна інтелектуальна модель MLP-3-23-1, що створена на основі штучних нейронних мереж, за методом SANN Regression with Deployment. Розрахункова похибка прогнозу за моделлю не перевищує 0,0728 %.

10. Розраховані за регресійною інтелектуальною моделлю MLP-3-23-1, параметри різання ($Z1=8,2$ бар; $Z2=-1,6$ мм; $Z3=5600$ мм/хв) які забезпечують високу якість та продуктивність процесу підтверджені експериментально. При прогнозі $Rz38$ реальні значення максимальної шорсткості отримані на 5 зразках мали розкид $Rz37,92 - Rz41,71$ що є високим рівнем точності прогнозування та відтворюваності процесу.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Charles L. Cariston. Laser Cutting. – USA, Michigan, 2004.
2. Low D. K. Y., Li L., Byrd P. J. Hydrodynamic Physical Modeling of Laser Drill– ing // Transaction of the ASME, 852. Vol. 124. November 2002.
3. Dowen J. The Theory Laser Materials Processing. – Springer Series, 2009.
4. Gas Jet Effects in Laser Cutting, Laser Machinig Process Section 3.7. – Columbia University, 2009.
5. Steen W. M. – Laser Material Processing, 2010.
6. Dahotre N., Harimkar S. Laser Fabrication and Machining of Materials. – Springer, 2008.
7. Lothar Morgenthal. Cutting with Fiber Laser. – Fraunhofer IWS Dresden, 23.11. 2005.
8. TruControl1000 «Ассистент різки». Керівництво фірми Trumpf, 2010.
9. Dahotre N., Harimkar S. Laser Fabrication and Machining of Materials. – Springer, 2008.
10. Lothar Morgenthal. Cutting with Fiber Laser. – Fraunhofer IWS Dresden, 23.11.2005.
11. Введення в лазерні різку матеріалів – Linde Group, 2004.
12. Maerten Otto, Kramer Reinhard, Schwede Harald, Wolf Stefan, Brandl Volker. Thermal effect of focusing systems // Laser+fotonics, 2/2008.
13. Kusano, Y., et al. (2004). Effect of assist gases on the laser cutting of stainless steel. Journal of Materials Processing Technology, 157–158, 141–147.
14. Kim, J. Y., & Lee, C. S. (2016). The influence of assist gases on the quality of laser cut surface in stainless steel. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 84(5–8), 1425–1433.
15. Rao, P. K., et al. (2013). Effect of assist gases on the laser cutting process of stainless steel. Journal of Laser Applications, 25(2), 022004.

16. Chen, J., et al. (2011). Influence of assist gas on laser cutting quality of stainless steel. *Procedia CIRP*, 1, 489–493.

17. Silvio Genna, Erica Menna, Gianluca Rubino and Vincenzo Tagliaferri (2020). Experimental Investigation of Industrial Laser Cutting: The Effect of the Material Selection and the Process Parameters on the Kerf Quality

18. Ахім Марле, Мадлен Боркманн, Пір Пфоль.

Факторний аналіз різання волоконним лазером наплавленням нержавіючої сталі AISI 304: оцінка впливу на продуктивність процесу, геометрію різу та шорсткість кромки різу. *Матеріали (Базель)*. 19 травня 2021 р.; 14(10):2669

19. Шайлендра Кумар, Анікет Джадхав.

«Лазерне різання матеріалу AISI 304: експериментальне дослідження шорсткості поверхні» *Досягнення в матеріалознавстві та технологіях обробки*, Том 5, 2019 –Випуск 3

20. Rajaram, N., Sheikh–Ahmad, J. Y., & Cheraghi, H. S. Experimental investigation of CO₂ laser cutting of austenitic stainless steel. *Applied Sciences*, 10(14), 4956, 2020. DOI: 10.3390/app10144956

21. Mohd Azwan, A. S., et al. Factorial analysis of fiber laser fusion cutting of AISI 304 stainless steel. *Materials*, 14(10), 2669, 2021. DOI: 10.3390/ma14102669

22. Aminzadeh, A., et al. Laser cutting of AISI 304 material: an experimental investigation. *Journal of Manufacturing and Materials Processing*, 3(2), 40, 2019. DOI: 10.3390/jmmp3020040

23. Ghoreishi, M., & Monfared, V. Cutting stainless steel with disc and CO₂ lasers. *Journal of Laser Applications*, 26(4), 042006, 2014. DOI: 10.2351/1.4895563

24. Laser Cutting: A Review on the Influence of Assist Gas. *Materials*, 12(1), 157, 2019. DOI: 10.3390/ma12010157

25. Ghani, J. A., & Ghazali, M. J. Optimization of CO₂ laser cutting parameters on austenitic stainless steel sheet. IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng., 183, 012022, 2017. DOI: 10.1088/1757-899X/183/1/012022
26. Blacha, L., et al. Analysis of stainless steel waste products generated during laser cutting in nitrogen atmosphere. Materials, 10(9), 1572, 2017. DOI: 10.3390/ma10091572
27. Mori, M., et al. Cutting properties of austenitic stainless steel using laser cutting process without assist gas. Journal of Sensors, 2012, Article ID 234321, 2012. DOI: 10.1155/2012/234321
28. A comprehensive review of studying the influence of laser cutting parameters on surface and kerf quality of metals. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 127, 501–527, 2023. DOI: 10.1007/s00170-023-12768-1
29. Fomin, V. M., Golyshev, A. A., Orishich, A. M., & Shulyat'ev, V. B. Energy balance in high-quality cutting of steel by fiber and CO₂ lasers. Journal of Applied Mechanics and Technical Physics, 58, 371–378, 2017. DOI: 10.1134/S0021894417020237
30. Ozaki, H., Koike, Y., Kawakami, H., & Suzuki, J. Cutting properties of austenitic stainless steel by using laser cutting process without assist gas. Advances in Optical Technologies, 2012, Article ID 234321. DOI: 10.1155/2012/234321
31. Schulz, T., Experimental investigations on fusion cutting stainless steel with fiber and CO₂ laser beams. Physics Procedia, 41, 399–405, 2013. DOI: 10.1016/j.phpro.2013.03.093
32. Scintilla, L., et al. Fiber laser micro-cutting of stainless steel sheets. Applied Physics A, 85, 121–124, 2006. DOI: 10.1007/s00339-006-3687-9
33. Liang, Y., et al. Improved surface quality and microstructure regulation in high power fiber laser cutting of stainless steel grid plates. Materials, 17(23), 5959, 2024. DOI: 10.3390/ma17235959

34. Wandera, C., & Kujanpää, V. Optimization of parameters for fibre laser cutting of a 10 mm stainless steel plate. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 2011, vol. 225, no. 5, pp. 641–649. DOI: 10.1177/2041297510394078
35. Rajaram, N., Sheikh–Ahmad, J. Y., & Cheraghi, H. S. Experimental investigation of CO₂ laser cutting of austenitic stainless steel. *Applied Sciences*, 10(14), 4956, 2020. DOI: 10.3390/app10144956
36. Mohd Azwan, A. S., et al. Factorial analysis of fiber laser fusion cutting of AISI 304 stainless steel. *Materials*, 14(10), 2669, 2021. DOI: 10.3390/ma14102669
37. Aminzadeh, A., et al. Laser cutting of AISI 304 material: an experimental investigation. *Journal of Manufacturing and Materials Processing*, 3(2), 40, 2019. DOI: 10.3390/jmmp3020040
38. Керівництво лазерного верстата для різання металів AFX–PRO. – Фірма ARAMIS.
39. Ghoreishi, M., & Monfared, V. Cutting stainless steel with disc and CO₂ lasers. *Journal of Laser Applications*, 26(4), 042006, 2014. DOI: 10.2351/1.4895563
40. В.І. Осипенко, О.П. Плахотній, О.В. Тімченко, М.Р. Прусс, С.П. Середюк «Закономірності впливу конструкції сопла та технологічних параметрів газолазерного різання на тиск гальмування асистуючого газу» *Вісник ЧДТУ* 2023. – Т. 28 №3. – С. 156–168
41. В.І. Осипенко, М.Р. Прусс, «Вплив внутрішньої структури та розмірів типових сопел на поле ріжучого тиску асистуючого газу при газолазерному різанні»
Міжвузівський збірник «Наукові нотатки» 2024 – №79– С.100 – 108
42. В.І. Осипенко, О.П. Плахотний, М.Р. Прусс, С.П. Середюк «Експериментальне обґрунтування ефективних режимів різання сталей випромінюванням потужного оптоволоконного лазера»
Міжвузівський збірник «Наукові нотатки» 2024 – №78– С.100–108

43. В.І. Осипенко, М.Р. Прусс, «Розробка регресійних моделей для розрахунку ефективних режимів різання 12 мм нержавіючої сталі випромінюванням потужного оптоволоконного лазера»

Міжвузівський збірник «Наукові нотатки» 2025 – №81

44. Laser Cutting: A Review on the Influence of Assist Gas. *Materials*, 12(1), 157, 2019. DOI: 10.3390/ma12010157

45. Ghani, J. A., & Ghazali, M. J. Optimization of CO₂ laser cutting parameters on austenitic stainless steel sheet. *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.*, 183, 012022, 2017. DOI: 10.1088/1757-899X/183/1/012022

46. Blacha, L., et al. Analysis of stainless steel waste products generated during laser cutting in nitrogen atmosphere. *Materials*, 10(9), 1572, 2017. DOI: 10.3390/ma10091572

47. Mori, M., et al. Cutting properties of austenitic stainless steel using laser cutting process without assist gas. *Journal of Sensors*, 2012, Article ID 234321, 2012. DOI: 10.1155/2012/234321

48. A comprehensive review of studying the influence of laser cutting parameters on surface and kerf quality of metals. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 127, 501–527, 2023. DOI: 10.1007/s00170-023-12768-1

49. Романенко, В. В., Кагляк, О. Д., Блощин, М., Євсюкова, Є. та ін. Розробка способу газолазерної різки металів із подальшим вигладжуванням поверхні різів (Технічні науки та технології, 2024).; DOI: 10.20535/2521-1943.2024.8.2(101).299709

50. Кушнеренко, А. С., Романенко, В. В. Вдосконалення технології лазерної різки металевих матеріалів (КПІ, 2024).

51. Halm, U., Nießen, M., & Schulz, W. (2021). Simulation of melt film dynamics in laser fusion cutting using a boundary layer approximation. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 168, 120837.

52. Darwish, M., Orazi, L., & Angeli, D. (2019). Simulation and analysis of the jet flow patterns from supersonic nozzles of laser cutting using

OpenFOAM. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 102, 3229-3242.

53. Zhang, Z., & Gogos, G. (2004). Theory of shock wave propagation during laser ablation. *Physical Review B*, 69(23), 235403.

54. Chen, K., Yao, Y. L., & Modi, V. (2001). Gas dynamic effects on laser cut quality. *Journal of manufacturing processes*, 3(1), 38-49

55. Fieret, J., Terry, M. J., & Ward, B. A. (1987, September). Invited Paper Overview Of Flow Dynamics In Gas-Assisted Laser Cutting. In *High Power Lasers: Sources, Laser-Material Interactions, High Excitations, and Fast Dynamics* (Vol. 801, pp. 243-250). SPIE.

56. Riveiro, A., Quintero, F., Boutinguiza, M., Del Val, J., Comesaña, R., Lusquiños, F., & Pou, J. (2019). Laser cutting: A review on the influence of assist gas. *Materials*, 12(1), 157.

57. Borkmann, M., & Mahrle, A. (2021). Numerical analysis of the primary gas boundary layer flow structure in laser fusion cutting in context to the striation characteristics of cut edges. *Fluids*, 7(1), 17.

58. Borkmann, M., & Mahrle, A. (2021). Numerical analysis of the primary gas boundary layer flow structure in laser fusion cutting in context to the striation characteristics of cut edges. *Fluids*, 7(1), 17.

59. Miller, D. R. (1988). Free jet sources. In *Atomic and Molecular Beam Methods* (ed. G. Scoles), (Vol. I, pp. 14–53). Oxford University Press

60. Asproulas I (2014) RANS modelling for compressible turbulent flows involving shock wave boundary layer interactions. Master's thesis, University of Manchester

61. Yu N, Jourdain R, Gourma M, Shore P (2016) Analysis of DeLaval nozzle designs employed for plasma figuring of surfaces. *Int J Adv Manuf Technol* 87(1-4):735-745.

62. Wen P, Zhang C, Yuan Y, Fan X (2016) Evaluation and optimal design of supersonic nozzle for laser-assisted oxygen cutting of thick steel sections. *Int J Adv Manuf Technol* 86(5-8):1243- 1251.

63. Sparkes, M., Gross, M., Celotto, S., Zhang, T., and O'Neill, W. Inert cutting of medium section stain-less steel using a 2.2kW high brightness fibre laser. In Proceeding of the 25th International Congress on Applications of lasers and electro optics (ICALEO), Scottsdale, Arizona, USA, 30 October–2 November 2006, paper 402, pp. 197–205 (Laser Institute of America).

64. Gross, M. S., Celotto S. and O'Neill, W. Melt flow in narrow thick-section kerfs. In Proceeding of the 25th International Congress on Applications of lasers and electro optics (ICALEO), Scottsdale, Arizona, USA, 30 October–2 November 2006, paper 403, pp. 206–210 (Laser Institute of America).

65. Benedikt Adelman, Ralf Hellmann: Simultaneous Burr and Cut Interruption Detection during Laser Cutting with Neural Networks, Sensors, 21(17), 5831, 2021.

66. Maciej Zubko, Jan Loskot, Paweł Świec, Krystian Prusik, Zbigniew Janikowski: Analysis of Stainless Steel Waste Products Generated during Laser Cutting in Nitrogen Atmosphere, Metals, 10(12), 1572, 2020.

67. В.І. Осипенко. Вплив внутрішньої структури та розмірів типових сопел на поле ріжучого тиску асистуючого газу при газолазерному різанні / В.І. Осипенко, М.Р. Прусс // Міжвузівський збірник «НАУКОВІ ПОТАТКИ». Луцьк, 79/2024 Ст 70-78. DOI 10.36910/775.24153966.2024.79.10.

68. J. Petru, T. Zlamal, R. Cep, K. Monkova, P. Monka: Influence of cutting parameters on heat-affected zone after laser cutting, Tehnički vjesnik, volume 20, 225-230, 2013.

69. Sparkes, M., Gross, M., Celotto, S., Zhang, T., and O'Neill, W. Practical and theoretical investigations into inert gas cutting of 304 stainless steel using a high brightness fiber laser. J. Laser Applic., 2008, 20, 59–67.

70. Осипенко В.І. Технологічне забезпечення якісного газолазерного різання 12 мм нержавіючої сталі / Плахотний О.П., Прусс М.Р., Середюк С.П. // Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем (КЗЯТПС – 2025): матеріали тез доповідей XV Міжнародної науково-практичної конференції (м. Чернігів, 22–23 травня 2025 р.): у 2 т. /

Національний університет «Чернігівська політехніка» [та ін.]; – Чернігів: НУ «Чернігівська політехніка», 2025. – Т. 1. – Ст 82-83.

71. В.І. Осипенко. Експериментальне обґрунтування ефективних режимів різання сталей випромінюванням потужного оптоволоконного лазера / В.І. Осипенко, О.П. Плахотний, М.Р. Прусс, С.П. Середюк // Міжвузівський збірник «НАУКОВІ НОТАТКИ». Луцьк, 78/2024 Ст 100-108. DOI 10.36910/775.24153966.2024.78.14

72. Олійник А. О. Інтелектуальний аналіз даних: навчальний посібник / А. О. Олійник, С. О. Субботін, О. О. Олійник. – Запоріжжя: ЗНТУ, 2012. – 278 с. ISBN 978-617-529-052-1.

73. Гороховатський В.О., Творошенко І.С. Методи інтелектуального аналізу та оброблення

74. <https://docs.tibco.com/pub/stat/14.0.0/doc/html/UsersGuide/GUID-058F49FC-F4EF-4341-96FB-A785C2FA76E9-homepage.html>

75. Субботін С. О. Нейронні мережі: теорія та практика: навч. посіб. / С. О. Субботін. – Житомир: Вид. О. О. Євенок, 2020. - 184 с.

ДОДАТКИ

Додаток А



АКТ ВПРОВАДЖЕННЯ результатів науково-дослідних робіт

Даний акт складений у тому, що за результатами науково-дослідних робіт виконаних д.т.н., професором Осипенко В.І., д.т.н., професором Плахотним О.П., аспірантами Середюком С.П., Пруссом М.Р., в Черкаському державному технологічному університеті відповідно до договору № 72-Д від 27.12.2022 р. була вдосконалена технологічна таблиця параметрів різання нержавіючих сталей на лазерних технологічних комплексах AFX-PRO-12000-1530LD виробництва ТОВ «Арамис», укомплектованих ітербієвими волоконними лазерами з вихідною потужністю 12000W. Вдосконалення забезпечило підвищення продуктивності процесів різання на 15% – 20% залежно від товщини листа, за відповідності якості деталей вимогам стандарту ISO 9013:2017. Перевірка в умовах реального виробництва підтвердила високу відтворюваність запропонованих режимів. Відхилення параметрів якості від табличних значень не перевищувало 5%.

Представник ТОВ «Арамис»:

Керівник виробництва деталей
та обробки металів

A handwritten signature in blue ink, appearing to read "Маріух".

Олег МАРЮХ

Представник Черкаського технологічного
університету:

Професор, д.т.н.

A handwritten signature in blue ink, appearing to read "Осипенко".

Василь ОСИПЕНКО