

Черкаський державний технологічний університет

Міністерство освіти і науки України

Кваліфікаційна наукова

праця на правах рукопису

Середюк Станіслав Петрович

УДК 621.9.048.4

## **ДИСЕРТАЦІЯ**

# **ТЕХНОЛОГІЧНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ МАКСИМАЛЬНОЇ ПРОДУКТИВНОСТІ ГАЗОЛАЗЕРНОГО РІЗАННЯ НИЗЬКОВУГЛЕЦЕВИХ 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 \_\_\_\_\_ С. П. Середюк

Науковий керівник:

Осипенко Василь Іванович,

доктор технічних наук, професор

Черкаси – 2026

## АНОТАЦІЯ

**Середюк С.П. – Технологічне забезпечення максимальної продуктивності газолазерного різання низьковуглецевих 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, 2026.

Процес лазерного різання низьковуглецевих сталей у середовищі кисню є складним теплофізичним та гідродинамічним процесом, що включає взаємодію лазерного випромінювання з матеріалом, плавлення металу, хімічну реакцію окиснення та видалення продуктів плавлення струменем асистуючого газу. На першому етапі відбувається поглинання енергії лазерного випромінювання поверхнею металу. Поглинута енергія призводить до швидкого нагрівання матеріалу до температури плавлення та часткового випаровування. Після утворення розплавленої зони струмінь кисню ініціює екзотермічну реакцію окиснення заліза, яка постачає додаткове тепло в зону різання і дозволяє скорочувати витрати лазерної енергії. Виділення додаткової теплоти внаслідок хімічної реакції сприяє підвищенню ефективності процесу різання порівняно з інертними газами та дозволяє збільшити товщину матеріалу, що підлягає обробці. Важливу роль відіграє також гідродинаміка потоку газу. Струмінь кисню виконує дві основні функції: інтенсифікує реакцію окиснення та видаляє розплавлений метал з зони різання. Ефективність видалення розплаву значною мірою визначає якість сформованої кромки. Із збільшенням товщини матеріалу збільшується об'єм розплавленого металу та тепловідвід у масив деталі. Це призводить до необхідності підвищення потужності лазерного випромінювання та зменшення швидкості переміщення ріжучої головки. В останній час в багатьох промислових підприємствах України виникла гостра потреба якісного газолазерного різання сталей великих товщин (15 мм – 25 мм). Відкликаючись на потреби ринку провідний виробник лазерних технологічних установок в Україні компанія

«Араміс» започаткувала випуск лінійки установок, укомплектованих оптоволоконними лазерами потужністю 12 кВт. При газолазерному різанні низьковуглецевих сталей за використання в якості асистуючого газу кисню таку потужність економічно доцільно використовувати при різанні сталей товщиною більше 15 мм. Однак в рамках конкретного підприємства часто виникає потреба в різанні на даних потужних установках відносно невеликих товщин (від 2 мм і вище). Визначення ефективних режимів різання у всьому стандартному діапазоні товщин є складною багатоетапною задачею, вирішення якої вимагає системного комплексу експериментальних досліджень, аналізу отриманих результатів та їх апроксимації математичними функціями, побудови узагальненої математичної моделі процесу. Такий підхід забезпечує досягнення максимальної швидкості різання за заданої якості поверхонь отриманих деталей, що і обумовлює високу економічну ефективність технології за використання оптоволоконних лазерів з максимальною вихідною потужністю 12 кВт.

Сукупність представлених у дисертації результатів теоретичних та експериментальних досліджень складає нове вирішення актуальної науково-технічної задачі, що полягає в отриманні нової точної інформації про закономірності впливу базових факторів процесу газолазерного різання низьковуглецевих сталей в середовищі кисню на продуктивність технології, за умови отримання відповідної поставленим вимогам якості отриманих деталей. Отримані результати підвищують ефективність проектування технологічних режимів різання низьковуглецевих сталей в середовищі кисню випромінюванням оптоволоконного лазера потужністю 12 кВт.

У *вступі* представлена загальна характеристика дисертаційної роботи, надано обґрунтування її актуальності, сформульована мета та задачі наукового дослідження, предмет та об'єкт, подано наукову новизну та практичне значення здобутих результатів.

У *першому розділі* виконано комплексний аналіз базових фізичних та технологічних факторів процесу газолазерного різання низьковуглецевих сталей із використанням випромінювання потужних оптоволоконних лазерів. Розглянуто

фундаментальні механізми взаємодії лазерного випромінювання з металом. Показано, що визначальну роль у ефективності процесу відіграють коефіцієнт поглинання, стан поверхні матеріалу, наявність оксидних шарів та мікрогеометрія поверхні, які суттєво впливають на енергетичний баланс обробки. Детально проаналізовано механізм абляції як основного способу видалення матеріалу, що включає процеси плавлення, випаровування та витіснення розплавленої фази під дією тиску парів і допоміжного газового струменя. Встановлено, що ефективність абляційних процесів безпосередньо залежить від інтенсивності лазерного випромінювання та умов тепло- і масопереносу в зоні різання.

Значну увагу приділено впливу типу асистуючого газу (кисень, азот, повітря) на кінетику процесу різання. Показано, що кисень забезпечує додаткове тепловиділення за рахунок екзотермічної реакції окиснення, що підвищує продуктивність, тоді як інертні гази сприяють отриманню більш чистої поверхні різі. Проаналізовано газодинамічні параметри процесу, зокрема вплив швидкості та тиску газового потоку на ефективність видалення розплаву.

Сформовано багатофакторний простір параметрів, що визначає результати газолазерного різання, який включає лазерні, газодинамічні та матеріальні характеристики. Особливу увагу приділено впливу хімічного складу сталі, зокрема вмісту вуглецю та домішок (сірки, фосфору), на в'язкість розплаву, стабільність процесу та якість різі. Розглянуто енергетичний баланс процесу різання, визначено основні складові витрат енергії та втрат тепла. Показано роль щільності потужності випромінювання та гаусового розподілу інтенсивності в формуванні геометрії різального фронту, глибини проникнення та якості обробки. Встановлено, що розподіл інтенсивності суттєво впливає на формування дроселюючого каналу та характер течії розплаву.

Отримані результати дозволяють сформулювати узагальнене уявлення про фізичні основи процесу газолазерного різання та визначити ключові параметри, що забезпечують підвищення його ефективності й якості.

У другому розділі представлено експериментальну базу досліджень та методичні підходи до вивчення процесів газолазерного різання низьковуглецевих

сталей. Описано конструкцію та технічні характеристики сучасного лазерного технологічного комплексу AFX-PRO-12000-1530LD, оснащеного ітербієвим волоконним лазером потужністю 12 кВт. Розглянуто основні функціональні підсистеми установки, включаючи оптичний тракт, систему числового програмного керування, газопостачання та терморегулювання, що забезпечують стабільність і відтворюваність технологічного процесу.

Наведено параметри точності, швидкодії та технологічних можливостей комплексу, а також описано програмне забезпечення для керування процесом різання, що дозволяє оперативно змінювати режими обробки. Показано, що використання сучасних систем автоматичного контролю фокуса та параметрів процесу є ключовим фактором забезпечення високої якості різі.

Значну увагу приділено питанням достовірності експериментальних результатів. Розглянуто критерії оцінки точності досліджень, включаючи контроль вхідних параметрів (потужність лазера, тиск і чистота газу, характеристики матеріалу), забезпечення відтворюваності результатів, статистичну обробку даних та використання стандартизованих методів оцінки якості різі. Обґрунтовано необхідність комплексного підходу до аналізу результатів із урахуванням фізичних моделей процесу.

Описано характеристики досліджуваного матеріалу – низьковуглецевої сталі Ст3, її хімічний склад, механічні властивості та технологічні переваги, що обумовлюють широке застосування в промисловості. Показано вплив основних легуючих елементів і домішок на поведінку матеріалу під час лазерної обробки.

Розроблено та описано експериментальні методики дослідження параметрів газового струменя в зоні різання. Запропоновано оригінальний вимірювальний стенд для визначення геометричних характеристик струменя та розподілу контактного тиску. Наведено алгоритм проведення вимірювань, методи калібрування та оцінки похибок, що забезпечують високу точність експериментальних даних.

Отримані експериментальні результати дозволяють встановити закономірності впливу геометрії сопла, тиску газу та величини зазору на

характеристики газового потоку, що є важливим для оптимізації процесу газолазерного різання та підвищення його ефективності.

У *третьому та четвертому* розділах виконано комплексне теоретико-експериментальне дослідження процесів газолазерного різання низьковуглецевих сталей із застосуванням оптоволоконного лазера потужністю 12 кВт. Основну увагу приділено встановленню закономірностей формування ріжучого тиску асистуючими газовими струменями та визначенню ефективних технологічних режимів різання.

У *третьому розділі* досліджено газодинамічні особливості взаємодії дозвукових і надзвукових струменів асистуючого газу з поверхнею заготовки. Показано, що параметри газового середовища (тиск, тип газу, геометрія сопла та зазор між соплом і поверхнею) визначають структуру потоку, характер ударно-хвильових явищ і, як наслідок, ефективність видалення розплавленого металу та якість різку. Розроблено чисельну модель на основі рівнянь Нав'є–Стокса з використанням RANS-підходу та  $k-\epsilon$  моделі турбулентності, що дозволило адекватно відтворити процеси розширення струменя, формування дисків Маха та розподіл тиску. Експериментальні дослідження підтвердили задовільну збіжність із результатами моделювання. Встановлено, що зі збільшенням зазору між соплом і заготовкою ріжучий тиск зменшується, причому найбільші відхилення виникають у надзвукових режимах через складну ударно-хвильову структуру потоку. Також доведено кореляцію між стабільністю ріжучого тиску та якістю поверхні різку. Окремо досліджено особливості застосування двоканальних сопел, які забезпечують стабілізацію струменя та підвищення ефективності процесу.

У *четвертому розділі* наведено результати повнофакторного експерименту з визначення ефективних режимів лазерного різання в середовищі кисню. Встановлено залежності оптимальної потужності лазерного випромінювання та максимальної швидкості різання від товщини матеріалу. Показано, що зі збільшенням товщини металу зростає необхідна потужність і зменшується швидкість різання, що пов'язано з підвищенням об'єму розплаву та тепловідведенням у матеріал. Запропоновано аналітичні апроксимаційні

залежності та узагальнену технологічну модель, яка пов'язує швидкість різання з потужністю лазера і товщиною заготовки. Проведений енергетичний аналіз засвідчив зростання енергоефективності процесу при збільшенні товщини листа, що пояснюється підсиленням ролі екзотермічної реакції окиснення та кращою локалізацією теплових потоків.

Отримані результати мають важливе наукове та практичне значення, оскільки дозволяють підвищити продуктивність, якість і стабільність процесу газолазерного різання та можуть бути використані для оптимізації технологічних режимів у промислових умовах.

*Ключові слова:* газолазерне різання, оптоволоконний лазер, низьковуглецева сталь, асистуючий газ, ріжучий тиск, надзвуковий струмінь, кисень, газодинаміка, енергоефективність, технологічні режими.

#### ABSTRACT

**Serediuk S.P. – Technological approaches to maximizing the productivity of gas-assisted laser cutting of low-carbon steels using high-power fiber lasers – qualifying thesis.**

Doctoral dissertation for the degree of Doctor of Philosophy in the field of Specialty 131 Applied Mechanics – Cherkasy State Technological University of the Ministry of Education and Science of Ukraine, Cherkasy, 2026.

The process of laser cutting of low-carbon steels in an oxygen environment is a complex thermophysical and hydrodynamic process that includes the interaction of laser radiation with the material, metal melting, chemical oxidation reaction, and removal of molten products by an assist gas jet.

At the initial stage, laser radiation energy is absorbed by the metal surface. The absorbed energy leads to rapid heating of the material to the melting temperature and partial evaporation. After the formation of a molten zone, the oxygen jet initiates an exothermic oxidation reaction of iron, which supplies additional heat to the cutting zone and allows reducing laser energy consumption. The release of additional heat due to the chemical

reaction increases the efficiency of the cutting process compared to inert gases and enables processing of thicker materials.

The hydrodynamics of the gas flow also plays an important role. The oxygen jet serves two main purposes: intensifies the oxidation reaction and removes molten metal from the cutting zone. The efficiency of molten metal removal largely determines the quality of the formed edge.

As the material thickness increases, the volume of molten metal and heat transfer into the bulk of the part also increase. This necessitates an increase in laser power and a reduction in the cutting head feed rate.

Recently, many industrial enterprises in Ukraine have faced an urgent need for high-quality gas-assisted laser cutting of thick steels (15 mm – 25 mm). In response to market demands, the leading manufacturer of laser technological equipment in Ukraine, the company “Aramis”, has launched a series of systems equipped with 12 kW fiber lasers.

In gas-assisted laser cutting of low-carbon steels using oxygen as an assist gas, such power is economically justified when cutting steels thicker than 15 mm. However, within a specific enterprise, there is often a need to cut relatively small thicknesses (from 2 mm and above) using these high-power systems. Determining effective cutting parameters across the entire standard range of thicknesses is a complex, multi-step task that requires a systematic approach involving experimental studies, analysis of the results obtained, their approximation using mathematical functions, and the development of a generalized mathematical model of the process.

This approach ensures achieving the maximum cutting speed while maintaining the required surface quality of the produced parts, which determines the high economic efficiency of the technology when using fiber lasers with a maximum output power of 12 kW.

The set of theoretical and experimental research results presented in this dissertation provides a novel solution to an urgent scientific and technical problem, which involves

obtaining new, accurate information on the patterns of influence of the fundamental factors in the gas-assisted laser cutting process of low-carbon steels in an oxygen environment on the productivity of the technology, provided that the quality of the resulting parts meets the specified requirements.

The obtained results improve the efficiency of designing technological cutting parameters for low-carbon steels in an oxygen environment using a 12-kW fiber laser.

The introduction provides an overview of the dissertation, justifies its relevance, outlines the purpose and objectives of the research, defines the subject and object of study, and highlights the scientific novelty and practical significance of the findings.

*The first chapter* presents a comprehensive analysis of the fundamental physical and technological factors involved in the gas laser cutting of low-carbon steels using high-power fiber lasers. The fundamental mechanisms of laser-metal interaction are examined. It is shown that the absorption coefficient, the surface condition of the material, the presence of oxide layers, and the surface microgeometry play a decisive role in the process efficiency, as they significantly influence the energy balance of the machining. The mechanism of ablation as the primary method of material removal is analyzed in detail, including the processes of melting, evaporation, and displacement of the molten phase under the action of vapor pressure and an auxiliary gas jet. It has been established that the efficiency of ablation processes directly depends on the intensity of laser radiation and the conditions of heat and mass transfer in the cutting zone.

Considerable attention has been paid to the effect of the type of assist gas (oxygen, nitrogen, air) on the kinetics of the cutting process. It has been shown that oxygen provides additional heat release due to the exothermic oxidation reaction, which increases productivity, whereas inert gases contribute to a cleaner cut surface. The gas-dynamic parameters of the process were analyzed, in particular the effect of gas flow velocity and pressure on the efficiency of molten material removal.

A multifactorial parameter space has been established that determines the results of gas laser cutting, incorporating laser, gas-dynamic, and material characteristics. Particular

attention is paid to the influence of the chemical composition of steel, specifically the carbon content and impurities (sulfur, phosphorus) on the viscosity of the melt, process stability, and cut quality. The energy balance of the cutting process is examined, and the main components of energy consumption and heat loss are identified. The role of radiation power density and the Gaussian distribution of intensity in shaping the cutting front geometry, penetration depth, and machining quality is demonstrated. It is established that the intensity distribution significantly influences the formation of the throttling channel and the nature of the molten metal flow.

The results obtained provide a general understanding of the physical principles underlying the gas laser cutting process and identify the key parameters that enhance its efficiency and quality.

*The second chapter* presents the experimental framework and methodological approaches for studying gas laser cutting processes of low-carbon steels. It describes the design and technical specifications of the modern AFX-PRO-12000-1530LD laser machining system, equipped with a 12-kW ytterbium fiber laser. The main functional subsystems of the installation are considered, including the optical path, the numerical control system, the gas supply, and the temperature control system, which ensure the stability and reproducibility of the technological process.

The paper presents the system's accuracy, speed, and technical capabilities, and describes the software used to control the cutting process, which allows for quick changes to machining modes. It demonstrates that the use of modern systems for automatic focus control and process parameter monitoring is a key factor in ensuring high-quality cuts.

Considerable attention has been paid to the reliability of experimental results. Criteria for evaluating the accuracy of studies are considered, including control of input parameters (laser power, gas pressure and purity, material characteristics), ensuring the reproducibility of results, statistical data processing, and the use of standardized methods

for evaluating cut quality. The necessity of a comprehensive approach to analyzing results, taking into account physical models of the process, is substantiated.

This paper describes the characteristics of the material under study — Cr3 low-carbon steel including its chemical composition, mechanical properties, and technological advantages, which account for its widespread use in the industry. The influence of the main alloying elements and impurities on the material's behavior during laser processing is demonstrated.

Experimental methods for studying the parameters of a gas jet in the cutting zone have been developed and described. An original test bench has been proposed for determining the geometric characteristics of the jet and the distribution of contact pressure. An algorithm for conducting measurements, as well as methods for calibration and error estimation, are presented, ensuring high accuracy of the experimental data.

The experimental results obtained make it possible to identify patterns in how nozzle geometry, gas pressure, and gap width affect gas flow characteristics, which is important for optimizing the gas laser cutting process and improving its efficiency.

*Chapters 3 and 4* present a comprehensive theoretical and experimental study of gas laser cutting processes for low-carbon steels using a 12-kW fiber laser. The main focus is on establishing the patterns of cutting pressure formation by the assisting gas jets and determining effective cutting parameters.

*The third chapter* examines the gas-dynamic characteristics of the interaction between subsonic and supersonic jets of assist gas and the workpiece surface. It is shown that the parameters of the gas medium (pressure, gas type, nozzle geometry, and the gap between the nozzle and the surface) determine the flow structure, the nature of shock wave phenomena, and, as a result, the efficiency of molten metal removal and the quality of the cut. A numerical model based on the Navier–Stokes equations was developed using the RANS approach and the  $k$ – $\epsilon$  turbulence model, which allowed for an adequate reproduction of the jet expansion processes, the formation of Mach disks, and the pressure distribution. Experimental studies confirmed satisfactory agreement with the

simulation results. It was established that as the gap between the nozzle and the workpiece increases, the cutting pressure decreases, with the greatest deviations occurring in supersonic regimes due to the complex shock-wave structure of the flow. A correlation between the stability of the cutting pressure and the quality of the cut surface was also demonstrated. The specific features of using dual-channel nozzles, which ensure jet stabilization and improve process efficiency, were investigated separately.

*Chapter 4* presents the results of a full-factorial experiment aimed at determining the optimal conditions for laser cutting in an oxygen atmosphere. The dependencies of the optimal laser power and maximum cutting speed on material thickness have been established. It is shown that as the metal thickness increases, the required power increases and the cutting speed decreases, which is associated with an increase in the volume of the melt and heat dissipation into the material. Analytical approximate dependencies and a generalized technological model linking cutting speed to laser power and workpiece thickness are proposed. The energy analysis conducted demonstrated an increase in the energy efficiency of the process as sheet thickness increases, which is explained by the enhanced role of the exothermic oxidation reaction and better localization of heat fluxes.

The results obtained are of significant scientific and practical importance, as they enable improvements in the productivity, quality, and stability of the gas laser cutting process and can be used to optimize process parameters in industrial settings.

**Keywords:** *gas-assisted laser cutting, fiber laser, low-carbon steel, assist gas, cutting pressure, supersonic jet, oxygen, gas dynamics, energy efficiency, technological modes.*

## 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 повний цикл налаштування технологічної установки для проведення експериментів. Безпосередньо виконав серію досліджень розподілу ріжучого тиску в зоні гальмування газового струменя. Приймав участь у аналізі отриманих результатів експериментів та формулюванні висновків дослідження.*

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

*Здобувач виконав повний цикл налаштування технологічної установки для проведення експериментів та безпосередньо виконував весь комплекс досліджень по встановленню діапазону збалансованих параметрів лазерного променя та лазерного процесу при різанні листової сталі ВСт3сп стандартного ряду товщин. Здійснював вимірювання якості оброблених зразків відповідно до стандарту ISO 9013:2017. Приймав участь у аналізі отриманих результатів експериментів та формулюванні висновків дослідження.*

3. Закономірності формування ріжучого тиску на вісі струменя асистуючого газу при газолазерному різанні / С.П. Середюк, В.В. Чудов // Міжвузівський збірник «НАУКОВІ НОТАТКИ». Луцьк, 84/2025 Ст 233–240. DOI 10.36910/775.24153966.2025.84.37

[https://eforum.lntu.edu.ua/index.php/naukovi\\_notatky/en/article/view/2138/1954](https://eforum.lntu.edu.ua/index.php/naukovi_notatky/en/article/view/2138/1954)

*Здобувач проводив експериментальні дослідження на модернізованому стенді, здійснював калібрування вимірювального обладнання. Безпосередньо виконував натурні випробування на обладнанні з оптоволоконним лазером та вимірювальними приладами. Крім того, здобувач долучився до формулювання частини аналітичних висновків дослідження, та брав участь у підготовці текстових і графічних матеріалів.*

4. В.І. Осипенко. Експериментальне визначення ефективних режимів та аналітичне моделювання процесу лазерного різання низьковуглецевих сталей оптоволоконним лазером потужністю 12 квт / В.І. Осипенко, С.П. Середюк // Міжвузівський збірник «НАУКОВІ НОТАТКИ». Луцьк, 85/2026 Ст 145 – 153. DOI 10.36910/775.24153966.2026.85.19

[https://eforum.lntu.edu.ua/index.php/naukovi\\_notatky/en/article/view/2173](https://eforum.lntu.edu.ua/index.php/naukovi_notatky/en/article/view/2173)

*Здобувач виконав експериментальне дослідження процесу газолазерного різання та зробив обробку експериментальних даних для створення аналітичних апроксимаційних залежностей . Запропонував узагальнену технологічну модель процесу різання. 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-практична конференція «Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем» Том 1 22 - 23 травня 2025 р. м. Чернігів С.82-83

*Здобувач виконав експеримент та обробив результати. Крім того, здобувач долучився до інтерпретації отриманих результатів та оформлення.*

## ЗМІСТ

ВСТУП.....	19
РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ БАЗОВИХ ФАКТОРІВ ПРОЦЕСУ ГАЗОЛАЗЕРНОГО РІЗАННЯ НИЗЬКОВУГЛЕЦЕВИХ СТАЛЕЙ ВИПРОМІНЮВАННЯМ ПОТУЖНИХ ОПТОВОЛОКОННИХ ЛАЗЕРІВ.....	26
1.1 Особливості поглинання випромінювання оптоволоконних лазерів низьковуглецевими сталями.....	26
1.2 Вплив типу асистуючого газу на процеси газолазерного різання низьковуглецевих сталей.....	32
1.3 Факторний простір, що визначає результати газолазерного різання низьковуглецевих сталей.....	34
1.3.1 Вплив хімічного складу найбільш використовуваних в технологіях газолазерного різання низьковуглецевих сталей на процес різання.....	36
1.3.2 Величина вихідної потужності та вид розподілу інтенсивності випромінювання.....	38
1.3.3 Вплив фокусної відстані об'єктива та положення каустики відносно поверхні деталі.....	43
1.3.4 Оцінка вагомості впливу стану поверхні низьковуглецевих сталей, конструкції сопла та величини зазору між соплом та металом.....	45
1.4 Способи оптимізації параметрів лазерного випромінювання та ширини різання.....	47
1.5 Аналіз вимог до параметрів процесу і результатів газолазерного різання низьковуглецевих сталей.....	49
1.5.1 Основні вимоги до газолазерного різання низьковуглецевих сталей...	50
1.5.2 Загальна оцінка впливу типу асистуючого газу на процес та результати газолазерного різання металів.....	53
1.5.3 Характерні особливості газолазерного різання низьковуглецевих сталей потужними оптоволоконними лазерами з використанням	

кисню.....	55
1.5.4 Характерні особливості газолазерного різання низьковуглецевих сталей потужними оптоволоконними лазерами з використанням повітря.....	57
1.6 Висновки до розділу 1.....	59
<b>РОЗДІЛ 2 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ОБЛАДНАННЯ ТА МЕТОДИ ВИКОНАННЯ ДОСЛІДЖЕНЬ.....</b>	<b>62</b>
2.1. Експериментальна база досліджень та методи оцінки достовірності результатів.....	62
2.1.1 Базові технічні характеристики лазерного технологічного комплексу для розкрюювання металів випромінюванням потужного оптоволоконного лазера.....	62
2.1.2 Характеристики зразків низьковуглецевих сталей, обраних для проведення досліджень.....	70
2.2 Розроблені та підібрані методики проведення експериментальних досліджень.....	73
2.2.1 Методики реєстрації параметрів газового струменя в зоні обробки...	73
2.3 Методики, пристосування та прилади для досліджень характеристик якості отриманих газолазерним різанням поверхонь низьковуглецевих сталей.....	79
2.3.1 Методика та обладнання для визначення характеристик мікрогеометрії досліджуваних зразків.....	80
2.3.2 Методика визначення ширини різку в верхньому та нижньому перетинах деталі.....	82
2.3.3 Технологія візуальної оцінки характеристик поверхонь різання.....	83
2.3.4 Методика та обладнання для реєстрації величин відхилення від перпендикулярності поверхонь різання.....	85
2.4. Висновки за розділом 2.....	88

РОЗДІЛ 3 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ТА ТЕОРЕТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ЗАКОНОМІРНОСТЕЙ ФОРМУВАННЯ РІЖУЧОГО ТИСКУ ДОЗВУКОВИМИ ТА НАДЗВУКОВИМИ СТРУМЕНЯМИ АСИСТУЮЧОГО ГАЗУ.....	89
3.1. Загальний аналіз газодинамічних ефектів при взаємодії струменів асистуючого газу з поверхнею заготовки.....	89
3.2. Постановка задачі чисельного моделювання газодинамічних процесів в технологічних умовах газолазерного різання.....	92
3.3. Результати чисельного моделювання та експериментальних досліджень ріжучого тиску з використанням в якості асистуючого газу повітря.....	94
3.4. Результати чисельного моделювання та експериментальних досліджень ріжучого тиску з використанням в якості асистуючого газу кисню.....	98
3.5. Аналіз і порівняння газодинаміки газових струменів за використання в якості асистуючих газів повітря та кисню.....	99
3.6. Кореляційні закономірності впливу ріжучого тиску на параметри якості при різанні низьковуглецевої сталі.....	100
3.7. Особливості формування ріжучого тиску кисневим газовим струменем за використання двоканальних сопел.....	104
3.8. Висновки за розділом 3.....	109
РОЗДІЛ 4 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ВИЗНАЧЕННЯ ЕФЕКТИВНИХ РЕЖИМІВ ТА АНАЛІТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ ЛАЗЕРНОГО РІЗАННЯ НИЗЬКОВУГЛЕЦЕВИХ СТАЛЕЙ ОПТОВОЛОКОННИМ ЛАЗЕРОМ ПОТУЖНІСТЮ 12 КВТ.....	111
4.1. Результати повнофакторного експерименту по визначенню ефективних режимів газолазерного різання низьковуглецевих в середовищі кисню.....	111

4.2. Аналітичні залежності оптимальної потужності лазерного випромінювання та максимальної швидкості різання від товщини матеріалу.....	118
4.3 Узагальнена технологічна модель процесу газолазерного різання низьковуглецевих сталей в середовищі кисню.....	121
4.4 Енергетичний аналіз процесу газолазерного різання низьковуглецевих сталей в середовищі кисню.....	123
4.5. Висновки за розділом.....	124
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ.....	125
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	128
ДОДАТКИ.....	135

## ВСТУП

**Актуальність теми.** В останній час в багатьох промислових підприємствах України виникла гостра потреба якісного газолазерного різання сталей великих товщин (15 мм – 25 мм). Відкликаючись на потреби ринку провідний виробник лазерних технологічних установок в Україні компанія «Араміс» започаткувала випуск лінійки установок, укомплектованих оптоволоконними лазерами потужністю 12 кВт. При газолазерному різанні низьковуглецевих сталей за використання в якості асистуючого газу кисню таку потужність економічно доцільно використовувати при різанні сталей товщиною більше 15 мм. Однак в рамках конкретного підприємства часто виникає потреба в різанні на даних потужних установках відносно невеликих товщин (від 2 мм і вище). Визначення ефективних режимів різання у всьому стандартному діапазоні товщин є складною багатоетапною задачею, вирішення якої вимагає системного комплексу експериментальних досліджень, аналізу отриманих результатів та їх апроксимації математичними функціями, побудови узагальненої математичної моделі процесу. Такий підхід забезпечує досягнення максимальної швидкості різання за заданої якості поверхонь отриманих деталей, що і обумовлює високу економічну ефективність технології за використання оптоволоконних лазерів з максимальною вихідною потужністю 12 кВт. Враховуючи наведене, тема дисертаційного дослідження є безумовно актуальною.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Тема дисертаційного дослідження відповідає базовим 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, мети та завдань роботи також враховувалися матеріали наведені в підсумковому документі саміту ООН відносно

прийняття порядку денного присвяченого питанням сталого 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. Відповідно до цілі 8 «Сприяння безперервному, всеохопному і сталому економічному зростанню, повній і продуктивній зайнятості та гідній праці для всіх», завдання дисертаційної роботи розроблялися з врахуванням перспектив розвитку машинобудівної галузі України.

**Мета і завдання роботи.** Підвищення ефективності визначення раціональних параметрів технологічних процесів різання низьковуглецевих сталей на установках, оснащених оптоволоконними лазерами потужністю 12 кВт, що забезпечують високу продуктивність процесу та відповідність якості деталей вимогам замовників.

Для досягнення поставленої мети в дисертаційній роботі необхідно вирішити такі завдання:

1. Провести аналіз відомих результатів досліджень процесу газолазерного різання низьковуглецевих сталей потужними оптоволоконними лазерами.

2. Розробити та адаптувати комплекс методик, приладів і обладнання для проведення системних експериментальних досліджень газодинамічних процесів у зоні різання та оцінки якості поверхонь різу відповідно до вимог стандарту **ISO 9013:2017**.

3. Виконати чисельне моделювання і здійснити серію системних експериментів та отримати достовірні дані про закономірності зміни величини ріжучого тиску асистуючого газу на поверхні деталі за використання дозвукових та надзвукових струменів повітря та кисню.

4. Експериментально обґрунтувати раціональні параметри режимів різання низьковуглецевих сталей оптоволоконним лазером потужністю 12 кВт, що забезпечують високу продуктивність, стабільність і якість виготовлених деталей.

5. З використанням методів повнофакторного експерименту отримати аналітичні залежності оптимальної потужності лазерного випромінювання та максимальної швидкості різання від товщини матеріалу при використанні оптоволоконного лазера потужністю 12 кВт.

6. Отримати узагальнену технологічну модель процесу газолазерного різання низьковуглецевих сталей в середовищі кисню оптоволоконним лазером потужністю 12 кВт.

7. Виконати енергетичний аналіз процесу газолазерного різання низьковуглецевих сталей в середовищі кисню оптоволоконним лазером потужністю 12 кВт.

**Об'єкт дослідження** – параметри лазерного променя та процесу газолазерного різання низьковуглецевих сталей випромінюванням оптоволоконного лазера потужністю 12 кВт.

**Предмет дослідження** – закономірності впливу параметрів лазерного променя та процесу на продуктивність та якість газолазерного різання низьковуглецевих сталей випромінюванням оптоволоконного лазера потужністю 12 кВт.

**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 отримано аналітичні залежності оптимальної потужності та швидкості різання листової сталі ВСтЗсп від товщини листа за умов отримання параметрів якості, що відповідають вимогам стандарту ISO

9013:2017 при використанні оптоволоконного лазера з максимальною вихідною потужністю 12 кВт та кисню в якості асистуючого газу.

– Вперше запропоновано узагальнену технологічну модель, яка пов'язує швидкість різання з потужністю лазерного випромінювання та товщиною матеріалу при різанні листової сталі ВСтЗсп в середовищі кисню з використанням оптоволоконного лазера з максимальною вихідною потужністю 12 кВт.

– Вперше отримано чисельні параметри динаміки зміни енергоефективності процесу різання низьковуглецевих сталей в залежності від товщини листа при використанні оптоволоконного лазера з максимальною вихідною потужністю 12 кВт та кисню в якості асистуючого газу.

– Уточнено чисельні закономірності формування ріжучого тиску на вісі струменя для дозвукових та надзвукових струменів в залежності від тиску на вході в сопло та величини зазору між соплом та деталлю за використання в якості асистуючих газів повітря та кисню.

– Розширено уявлення про розподіл тиску в зоні гальмування кисневого струменя за використання двоканального сопла, який має виражений осесиметричний характер та складається з центральної стагнаційної області, перехідної зони радіального розтікання та периферійної турбулентної області. Такий розподіл сприяє формуванню більш стабільного струменя та розширенню області підвищеного тиску, що позитивно впливає на ефективність видування продуктів плавлення.

#### **Практичне значення одержаних результатів:**

– Визначено раціональні технологічні режими різання для стандартного ряду товщин листового матеріалу, що забезпечують високу продуктивність процесу та параметри якості різки, які відповідають вимогам стандарту ISO 9013:2017.

– Встановлено експериментальні залежності оптимальної вихідної потужності лазерного випромінювання та максимальної швидкості якісного

різання від товщини оброблюваного матеріалу. Отримані аналітичні апроксимаційні залежності дозволяють здійснювати інженерну оцінку раціональних параметрів технологічного процесу лазерного різання.

– Обґрунтовано та реалізовано комплекс методик і вимірювальних засобів для визначення показників якості бокової поверхні різку. Використання запропонованого підходу забезпечує достовірну оцінку геометричних та мікрогеометричних характеристик поверхні різку, що створює необхідні передумови для встановлення взаємозв'язку між параметрами технологічного процесу лазерного різання та якістю сформованої поверхні.

– Сукупність розроблених експериментальних засобів і методик створює методичну основу для подальшого дослідження фізичних закономірностей формування ріжучого струменя асистуючого газу та його впливу на ефективність видалення розплавленого металу із зони різання, що є необхідною умовою оптимізації технологічних режимів лазерного різання.

– За результатами проведених досліджень розроблено технологічну карту параметрів газолазерного різання сталі ВСтЗсп для верстатів моделі АFX-PRO-12000-1530-LD, яка може бути використана як практична основа для налаштування режимів різання на промислових лазерних установках.

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

У роботах, опублікованих у співавторстві:

– Здобувач виконав повний цикл налаштування технологічної установки для проведення експериментів. Безпосередньо виконав серію досліджень розподілу ріжучого тиску в зоні гальмування газового струменя. Приймав участь у аналізі отриманих результатів експериментів та формулюванні висновків дослідження [57].

– Виконав повний цикл налаштування технологічної установки для проведення експериментів та безпосередньо виконував весь комплекс досліджень по встановленню діапазону збалансованих параметрів лазерного променя та лазерного процесу при різанні листової сталі ВСтЗсп стандартного ряду товщин. Здійснював вимірювання якості оброблених зразків відповідно до стандарту ISO 9013:2017. Приймав участь у аналізі отриманих результатів експериментів та формулюванні висновків дослідження [52].

– Здобувач проводив експериментальні дослідження на модернізованому стенді, здійснював калібрування вимірювального обладнання. Безпосередньо виконував натурні випробування на обладнанні з оптоволоконним лазером та вимірювальними приладами . Крім того, здобувач долучився до формулювання частини аналітичних висновків дослідження, та брав участь у підготовці текстових і графічних матеріалів [60].

– Здобувач виконав експериментальне дослідження процесу газолазерного різання та зробив обробку експериментальних даних для створення аналітичних апроксимаційних залежностей. Запропонував узагальнену технологічну модель процесу різання. Крім того, здобувач долучився до інтерпретації отриманих результатів та оформлення графіків і таблиць для публікації [61].

***Апробація результатів дисертації.*** Основні положення та результати досліджень доповідалися на XV міжнародній науково-практичній конференції «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 теза 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 , з них обсяг основного тексту – 109 сторінок, 38 рисунків, 8 таблиць, список використаних джерел складає 61 найменування та займає 7 сторінок.

# РОЗДІЛ 1

## АНАЛІЗ БАЗОВИХ ФАКТОРІВ ПРОЦЕСУ ГАЗОЛАЗЕРНОГО РІЗАННЯ НИЗЬКОВУГЛЕЦЕВИХ СТАЛЕЙ ВИПРОМІНЮВАННЯМ ПОТУЖНИХ ОПТОВОЛОКОННИХ ЛАЗЕРІВ

### 1.1 Особливості поглинання випромінювання оптоволоконних лазерів низьковуглецевими сталями

Перед зануренням в деталі лазерної обробки металів, а саме, дослідити процеси, що відбуваються, та фактори, що впливають на її результати, варто згадати, як відбувається взаємодія лазерного випромінювання з металами. Першочергово розглянемо процеси які відбуваються під час лазерної обробки металів і чим визначаються її показники [1].

Ще до винаходу лазерів було встановлено, що світло поглинається вільними електронами в металах, концентрація яких становить  $N = 10^{28} \text{ м}^{-3}$ . Після поглинання, через час порядку  $10^{-11}$ – $10^{-12}$  с, електрони передають енергію кристалічній ґратці. Цей процес відомий як електрон-фононна взаємодія. 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,

$\alpha$  - 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.

Оптична глибина проникнення випромінювання, також відома як скін-шар, залежить від коефіцієнта поглинання  $\alpha$  та становить  $10^{-2}$  мкм. Часто енергії, отриманої електроном від поглинання фотона, недостатньо для повної передачі за одне зіткнення. Таким чином, релаксація енергії набуває

багатостадійного та дифузійного характеру. Як наслідок, перерозподіл енергії відбувається не тільки в межах скін-шару, а й у шарі глибиною  $l_a = 10^{-1}$  мкм. Цей шар нагрівається, а потім тепло поширюється вглиб матеріалу шляхом теплопровідності. З підвищенням температури кількість поглиненого світла може змінюватися, оскільки як електрони, так і атоми кристалічної решітки в металі набувають кінетичну енергію, що впливатиме на частоту зіткнень.

Поглинання також сильно залежить від властивостей поверхні металу, або сплаву. Більшість реальних поверхонь не є ідеально плоскими (навіть майже ідеальні дзеркала) та мають певний ступінь текстури та шорсткості, що впливатиме на їхню оптичну поведінку. Виїмки та западини що вказані на рис. 1.1 можуть, наприклад, «захоплювати» частину світла і тим самим посилювати поглинання [1].

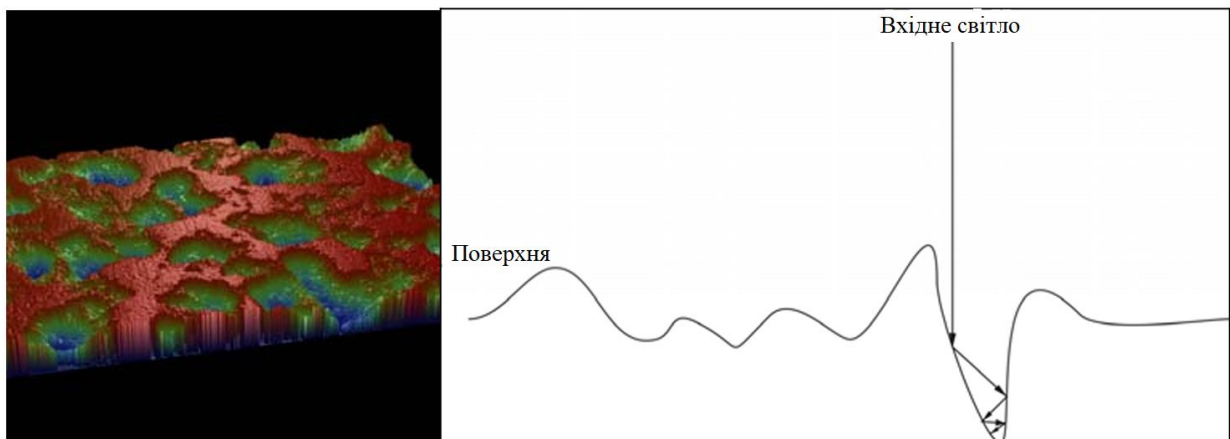


Рисунок 1.1 – Ліва сторона: Профілометричне сканування шорсткої металевої поверхні. Права сторона: Текстура поверхні може «захоплювати» частину світла і посилювати поглинання [1].

Метали також природно мають шар (або кілька шарів) оксидів на поверхні, і хімічні та оптичні властивості оксидів часто можуть дуже відрізнятися від властивостей металу або сплаву під ними. Тоді ми можемо, наприклад отримати ситуацію, зображену на рис. 1.2, де світло «вловлюється» шаром оксиду, що може ще збільшити поглинання.

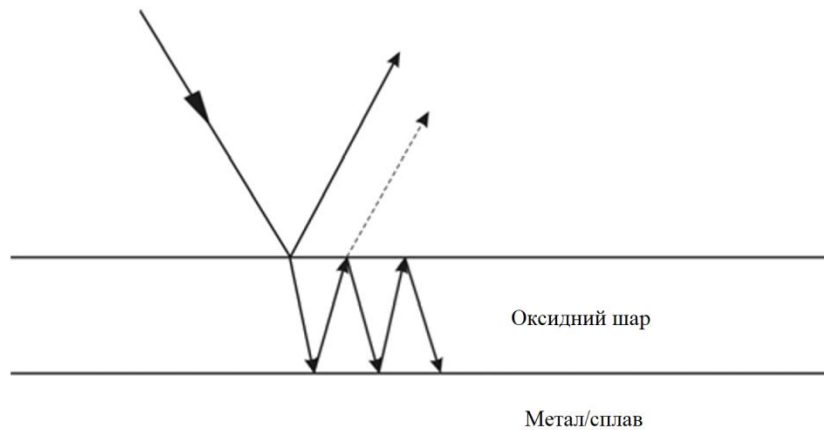


Рисунок 1.2 – Окислена поверхня може «вловлювати» світло в середині оксидного шару, що може більше посилити поглинання [1].

Також забруднення, такі як бруд, мастило або пил, також змінюють поглинальний потенціал металевої поверхні. Це може включати речовини, що залишилися на попередніх етапах обробки (таких як полірування або оздоблення), внаслідок оброблення, або навіть виготовлення самого металу чи сплаву [1].

Поглинання лазерного випромінювання — це не просто процес, який залежить від типу металу. Стан поверхні матеріалу, зокрема її шорсткість та наявність оксидних шарів, відіграє критичну роль. Це особливо важливо для низьковуглецевих сталей, які швидко окислюються, створюючи на поверхні тонкий шар оксидів.

Теорія передбачає, що гладкі металеві поверхні відбивають значну частину лазерного випромінювання. Однак на практиці поверхня ніколи не буває ідеально гладкою. Коли лазерний промінь потрапляє на шорстку поверхню, він розсіюється і багаторазово відбивається всередині мікроскопічних нерівностей (ямок і виступів). Цей ефект, відомий як багаторазове відбиття, значно збільшує загальний коефіцієнт поглинання, оскільки кожен відбитий промінь має додатковий шанс поглинутися.

З іншого боку, надмірна шорсткість може призвести до нерівномірного нагріву та, як наслідок, до неякісного різку або зварного шва. Тому в

промисловості прагнуть досягти оптимальної шорсткості, яка максимізує поглинання, але не погіршує якість обробки.

Оксиди металів зазвичай мають значно вищий коефіцієнт поглинання, ніж сам метал. Наприклад, оксид заліза, який утворюється на поверхні низьковуглецевої сталі, поглинає лазерне випромінювання значно краще, ніж чиста сталь. Цей ефект має як позитивні, так і негативні сторони:

- Позитивні: Оксидний шар може діяти як «поглинач-ініціатор», що полегшує початок процесу різання, або зварювання. Поглинена енергія оксидного шару швидко передається основному металу, починаючи його нагрів.

- Негативні: Неконтрольоване утворення оксидів може призвести до нестабільності процесу. Неоднорідний оксидний шар може спричинити нерівномірне поглинання та, як наслідок, непередбачувані результати обробки, зокрема, впливати на формування різального каналу.

Таким чином, для досягнення оптимальних результатів лазерної обробки необхідний контроль стану поверхні матеріалу. Інженери та дослідники враховують ці фактори при налаштуванні параметрів лазера, щоб забезпечити стабільний і якісний процес.

Коли певна ділянка металу, глибина якої перевищує  $10^{-1}$  мкм, нагрівається спочатку до температури плавлення, а потім до температури випаровування, розпочинається процес його видалення. Паралельно з цим відбувається витіснення розплавленої речовини. Під дією надлишкового тиску, що виникає в результаті пароутворення, відбувається інтенсивне видалення матеріалу. Цей сукупний процес, що включає випаровування та витіснення рідкої фази, відомий як абляція. Він безпосередньо формує геометрію каналу (отвору) або поверхню різального фронту [2].

Абляція – це основний механізм видалення матеріалу під час лазерного різання. Цей процес є складним, багатофазним і включає два ключові компоненти: випаровування та витіснення рідкої фази під дією високого тиску.

Етапи процесу абляції можна розбити на такі основні складові:

- Поглинання енергії. Лазерний промінь інтенсивно поглинається тонким поверхневим шаром металу (скін-шаром).
- Нагрів і плавлення. Поглинена енергія викликає швидке підвищення температури, яка спочатку досягає температури плавлення, а потім – випаровування. Утворюється розплавлена ванна.
- Утворення пари та тиск. Інтенсивне випаровування металу створює надлишковий тиск пари. Цей тиск спрямований на розплавлений метал і відштовхує його від зони дії лазера, утворюючи кратер або канал. Це і є витіснення рідкої фази.

Тиск, що виникає внаслідок пароутворення, є основним рушієм процесу абляції. Він не лише видаляє матеріал, а й формує геометрію каналу. У процесі лазерного різання цей тиск підсилюється допоміжним газовим струменем (наприклад, киснем або азотом), який подається під високим тиском.

- При кисневому різанні. Струмінь кисню не тільки механічно виштовхує розплавлений метал, а й бере участь в екзотермічній реакції окислення, що виділяє додаткову енергію. Це дозволяє підвищити швидкість і ефективність процесу, особливо для низьковуглецевих сталей.
- При різанні плавленням. Струмінь інертного газу (азоту) лише механічно видаляє розплавлену частину матеріалу, запобігаючи його окисленню.

Ефективність абляції прямо залежить від поглинальної здатності матеріалу. Чим вищий коефіцієнт поглинання, тим більше енергії лазера перетворюється на теплову, що призводить до швидшого нагріву, інтенсивнішого випаровування та сильнішого тиску пари. Це дозволяє досягти вищої швидкості різання або більшої глибини отвору.

На рис. 1.3 представлені значення коефіцієнта поглинання лазерного променя в залежності від швидкості різки волоконним і  $\text{CO}_2$  лазером для

товщин 3 і 5 мм. Потрібно відмітити суттєве перевищення значення  $A$  для  $\text{CO}_2$  лазера у порівнянні з волоконним при однаковій швидкості.

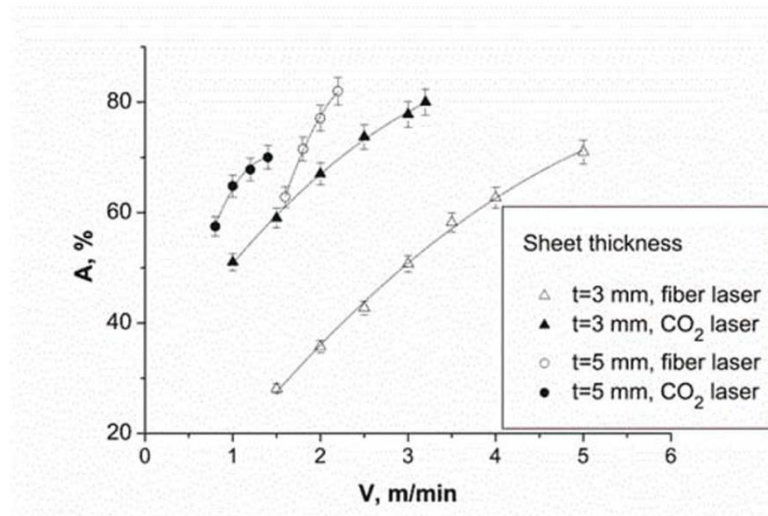


Рисунок 1.3 – Коефіцієнт поглинання  $A$  в залежності від швидкості різання [3]

На рис. 1.3 представлена залежність поглиненої енергії лазерного випромінювання в одиниці об'єму видаляемого матеріалу від швидкості різання. В розрахунку використовувалась середня ширина різання, яка визначається як співвідношення площі поперечного перерізу до товщини листа.

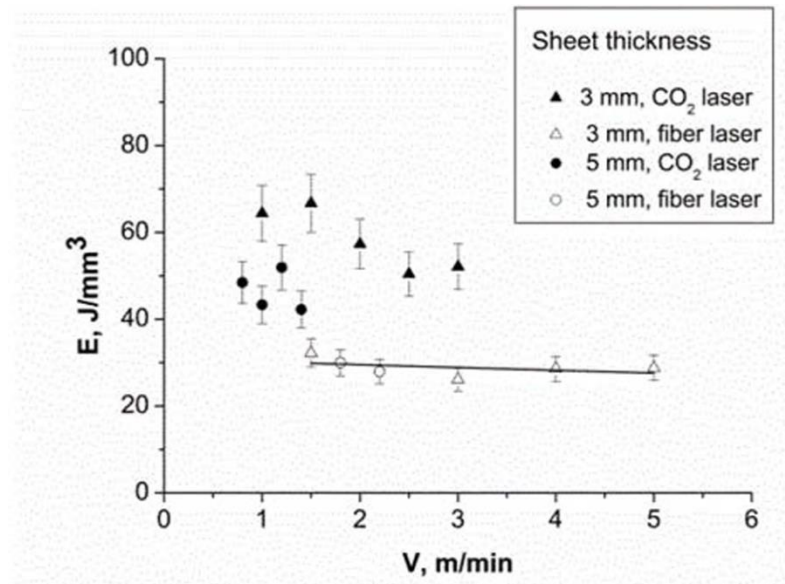


Рисунок 1.4 – Щільність енергії лазера в одиниці об'єму матеріалу, що видаляється в залежності від швидкості різання [3]

Питома енергія  $AW/Vib$  слабо залежить від швидкості, її значення приблизно однакове для товщин 3 і 5 мм і становить 26...32 Дж/мм для

волоконного лазера і (42...66) Дж/мм для CO<sub>2</sub> лазера. Середнє значення поглиненої питомої енергії для CO<sub>2</sub> лазера приблизно вдвічі вище за однакової продуктивності процесу різання.

## **1.2 Вплив типу асистуючого газу на процеси газолазерного різання низьковуглецевих сталей**

Низьковуглецеві сталі мають високий показник поглинання лазерного випромінювання (довжина хвилі 1.06 мкм). Через це вона легко ріжеться. Використання кисню (O<sub>2</sub>) як допоміжного газу сприяє горінню металу, що значно прискорює процес різки. Оптиковолоконні лазери значно краще поглинаються чорними металами ніж випромінювання CO<sub>2</sub>-лазерів. Це дозволяє більш ефективно використовувати енергію лазера для нагріву та плавлення матеріалу. Розрізняють два основні види лазерної різки низьковуглецевих сталей: лазерно-кисневе та різання плавленням.

При лазерно-кисневому різанні, як допоміжний газ використовується кисень. Його функція виходить за рамки простого механічного видалення розплавленого металу. Кисень вступає в інтенсивну екзотермічну реакцію горіння з розігрітим металом у зоні різання. Механізм полягає в тому що лазерний промінь, фокусуючись на поверхні, ініціює нагрів матеріалу. Після досягнення температури плавлення, асистуючий струмінь кисню вступає в реакцію з розплавом. Виділена при цьому додаткова енергія значно підвищує температуру в різальному каналі, що дозволяє збільшити швидкість різання, тобто додаткове джерело енергії дозволяє швидше прорізати матеріал, що робить цей метод дуже продуктивним. Також додаткова енергія виділена під час екзотермічної реакції дозволяє ефективно видаляти розплав. Струмінь кисню під тиском видуває розплавлені оксиди та шлак з каналу, тим самим роблячи різ з меншою шорсткістю і величиною грата.

Незважаючи на високу швидкість, цей метод має свої недоліки. На поверхні різ утворюється шар оксидів, який може бути небажаним для деяких подальших процесів (наприклад, зварювання чи фарбування), оскільки вимагає додаткового очищення.

На відміну від кисневого різання, метод різання плавленням використовує інертні гази, такі як азот або аргон. Ці гази не вступають у хімічну реакцію з металом. Єдиною функцією інертного газу є механічне видалення розплавленого металу. Лазерна енергія нагріває матеріал до температури плавлення, а струмінь газу під високим тиском просто видуває розплав з каналу, запобігаючи його повторному затвердінню. Головна перевага цього методу – чистий, без оксидів різ. Це робить його ідеальним для застосувань, де якість поверхні має першочергове значення. При різанні плавленням вдається досягти мінімальної шорсткості.

Азот найчастіше використовується для нержавіючих сталей, його можна застосовувати і для чорних металів, якщо потрібен чистий різ без оксидів. Азот механічно виштовхує розплав, але без додаткової енергії від горіння. Це призводить до зниження швидкості, але забезпечує високу якість поверхні.

Повітря використовується не тільки для нержавіючих сталей, його також можна застосовувати і для низьковуглецевих сталей. Повітря, як і азот механічно виштовхує розплав, але відрізняється тим що вміст кисню в повітрі створює додаткову енергію від горіння. Такий різ може мати оксидний наліт на поверхні, що може бути небажаним для деяких застосувань у виробництві. Але наявність кисню в повітрі дозволяє зменшити грат у порівнянні з різанням азотом.

Рідина, що утворюється на поверхні фронту різі, зменшує продуктивність і глибину різання, погіршує чистоту бокової поверхні різі, 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 фронті різі 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, або кисень в діапазоні тиску  $P_0 = 0.5 - 1.5$  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 різь, який є функцією числа Рейнольдса, що дорівнює

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

де  $\rho$  – густина газу;

$u$  – швидкість потоку газу, що проходить у різь;

$b$  – характерний розмір (ширина різь);

$\mu$  – динамічна в'язкість газу;

$f$  – коефіцієнт тертя між газом та поверхнею рідини [5].

Отже, швидкість газового потоку має вирішальне значення для того, наскільки ефективно він сприятиме видаленню з неї рідкої фази з бокової поверхні отвору або різь. 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 визначає результати газолазерного різання низьковуглецевих сталей**

Факторний простір, що визначає результати газолазерного різання низьковуглецевих сталей, є багатовимірним і включає три основні групи параметрів: лазерні, газодинамічні та матеріальні.

Результат різання, який оцінюється за якістю різь (шорсткість, ширина пропилу, наявність ґрату, глибина зони термічного впливу), залежить від оптимального балансу всіх цих факторів.

Потужність лазерного випромінювання  $P$  ключовий фактор, що визначає швидкість різання та товщину, яку можна прорізати. Більша потужність – більша енергія для плавлення та екзотермічної реакції (при використанні кисню).

Фактор відстані між фокусною точкою лазерного променя та поверхнею матеріалу визначає щільність енергії та ширину променя в зоні різання. Оптимальне положення фокуса є критичним для якості та ефективності.

Важливим фактором є режим роботи лазера, безперервний або імпульсний. Для товстих сталей часто використовується безперервний, для тонких або високоякісних різів – імпульсний.

Довжина хвилі лазера ( $\lambda$ ) визначається типом лазера (наприклад, CO<sub>2</sub> або волоконний лазер). Впливає на поглинання енергії матеріалом.

Газодинамічні параметри полягають в типі допоміжного газу, в основному для низьковуглецевої сталі зазвичай використовують кисень (O<sub>2</sub>). Він ініціює екзотермічну реакцію, додаючи теплову енергію та значно збільшуючи швидкість різання. Іноді для тонких листів і високої якості використовують азот (N<sub>2</sub>), або стиснене повітря.

Ключовий фактор це тиск допоміжного газу. Визначає зусилля, з яким розплав видаляється з пропила. Надто низький тиск призводить до грату, надто високий – до нестабільності процесу.

Діаметр сопла та відстань до матеріалу визначають характеристики газового струменя (його швидкість та ступінь розширення). Оптимальний вибір цих параметрів забезпечує ефективне видалення розплаву.

Важливий фактор чистоти газу, вміст домішок (особливо вологи) може негативно впливати на стабільність процесу та якість різки. А в кисневій різці чистота кисню впливає на якість проходження екзотермічної реакції горіння в прорізі.

При проектуванні технологічних процесів газолазерного різання обов'язковим є врахування матеріальних параметрів, які включають в себе:

- товщина матеріалу визначає необхідну потужність лазера, швидкість різання та тиск газу;

- хімічний склад сталі – вміст вуглецю, марганцю, кремнію та сірки впливає на температуру плавлення, в'язкість розплаву та активність окислення.
- стан поверхні – наявність окисної плівки, іржі або окалини впливає на поглинання лазерного випромінювання.

### 1.3.1 Вплив хімічного складу найбільш використовуваних в технологіях газолазерного різання низьковуглецевих сталей на процес різання

Хімічний склад низьковуглецевих сталей є критичним фактором, що визначає ефективність, швидкість та якість газолазерного різання (ГЛР) з використанням кисню. Основними елементами, що впливають на цей процес, є вуглець та домішки (сірка і фосфор), оскільки вони впливають на хімічну активність та фізичні властивості розплаву.

Вуглець є основним легуючим елементом, і його вміст безпосередньо впливає на температуру плавлення, в'язкість і, найголовніше, на екзотермічну реакцію. Низьковуглецеві сталі містять до 0.3% вуглецю.

Таблиця 1.1 – Вплив вуглецю на процес різання

Екзотермічна реакція	При ГЛР кисень реагує з розплавленим залізом та вуглецем ( $2\text{Fe} + \text{O}_2 \rightarrow 2\text{FeO} + \text{Q}$ ). Вуглець сприяє цій реакції, <b>виділяючи додаткове тепло</b> . Це тепло допомагає підтримувати процес різання, підвищує швидкість та дозволяє різати товщі матеріали.
Швидкість різання	Чим менший вміст вуглецю (в межах низьковуглецевих сталей), тим <b>легше і швидше</b> відбувається різання. Однак, при дуже високому вмісті вуглецю (середньо- та високовуглецеві сталі) різання значно ускладнюється через зміну фізичних властивостей розплаву та необхідність попереднього підігріву.

В'язкість розплаву	Зі збільшенням вмісту вуглецю підвищується в'язкість розплаву. Більш в'язкий розплав важче видаляється струменем допоміжного газу, що може призводити до утворення ґрату та погіршення якості різку.
--------------------	--

Домішки (сірка (S) та фосфор (P)).

Хоча сірка та фосфор присутні у невеликих кількостях, вони мають непропорційно великий вплив на якість різання через їхню поведінку в розплаві.

Сірка є найбільш небажаною домішкою для лазерного різання.

- Поверхневий натяг – сірка значно знижує поверхневий натяг розплавленого металу. Зниження поверхневого натягу зазвичай полегшує видалення рідкої фази, оскільки менше зусилля потрібно для розриву плівки розплаву.
- Стабільність процесу – надлишок сірки може призвести до нестабільності струменя розплаву та нерівномірного видалення шлаку, що проявляється у вигляді смуг (striations) на різі та зниженні якості поверхні.

Фосфор також впливає на процес, хоча менш критично, ніж сірка.

- Крихкість – фосфор сприяє утворенню крихких фаз (фосфідів) по межах зерен, що може збільшувати ймовірність утворення мікротріщин у зоні термічного впливу, особливо у товстих листах.
- Температура – як і сірка, фосфор може впливати на температуру плавлення і кристалізації.

Інші елементи (кремній (Si) та марганець (Mn)). Ці елементи зазвичай контролюються в низьковуглецевих сталях і впливають на кінцевий результат.

- Марганець (Mn). Він зазвичай пов'язує сірку, утворюючи сульфід марганцю (MnS), зменшуючи шкідливий вплив сірки на поверхневий натяг. Це є позитивним для стабільності процесу різання.

- Кремній (Si). Використовується як розкислювач і впливає на в'язкість розплаву, а також на властивості шлаку, що утворюється на поверхні різі.

Врахування впливу хімічного складу сталі є важливим компонентом, який необхідно враховувати як при проектуванні технологічних процесів так і при аналізі результатів газолазерного різання [9-14].

### 1.3.2 Величина вихідної потужності та вид розподілу інтенсивності випромінювання

Для отримання більш повної картини процесу формування лазерного різі розглянемо енергетичний баланс процесу різання при використанні азоту як допоміжного газу. Рівняння балансу описується відомим виразом [4]:

$$A \cdot W = W_m + W_{cond} + W_{etc} \quad , \quad (1.4)$$

де  $A$  – коефіцієнт поглинання металу;

$W$  – потужність лазера;

$W_m$  – потужність, що витрачається на нагрів металу, та плавлення;

$W_{cond}$  – потужність, що втрачається у площі різі через теплопровідність у навколишній матеріал;

$W_{etc}$  – інші втрати поглиненої потужності, включаючи конвективне та радіаційне охолодження.

Значення  $W_m$  можна розрахувати за формулою:

$$W_m = Vtb[\rho_m C_m(T_m - T_0) + \rho_m L_m + \rho_g C_g(T^* - T_m)], \quad (1.5)$$

де  $C_m, \rho_m$  і  $C_g, \rho_g$  – середня питома теплоємність та густина металу та розплаву відповідно;

$L_m$  – прихована теплота;

$T_m - T_0$  – різниця температури плавлення та початкової температури металу;

$T^* - T_m$  – різниця температури перегріву розплаву та температури плавлення металу;

$b$  – ширина різання;

$t$  – висота різання.

Для оцінки тепловтрат скористаємося результатами [5]:

$$W_{cond} = kt(T^* - T_0)3.2Pe^{0.868}, \quad (1.6)$$

де  $k$  – теплопровідність матеріалу,

$Pe$  – число Пекле, безрозмірне число визначається співвідношенням між конвективним і молекулярним процесами переносу тепла.

Після ряду математичних перетворень отримаємо [5]:

$$\frac{W_{cond}}{Vtb} = \frac{1.6\rho_m C_m (T_m - T_0)}{Pe^{0.132}}, \quad (1.7)$$

Підставляючи (1.6) та (1.7) у (1.4) та нехтуючи іншими втратами потужності [6], маємо загальний вираз для густини поглиненої потужності:

$$\frac{AW}{Vtb} = \rho_m L_m + \rho_m C_m (T_m - T_0) + \rho_g C_g (T^* - T_m) + \frac{1.6\rho_m C_m (T_m - T_0)}{Pe^{0.132}}, \quad (1.8)$$

Як видно з (1.8) густина поглиненої енергії слабо залежить від числа Пекле та визначається єдиним параметром  $T^*$ , тобто ступенем перегріву розплаву.

На рис. 1.5 видно, що за максимальної швидкості  $CO_2$  лазера значення числа Пекле близькі для обох лазерів. Щільність поглиненої потужності, згідно з даними на рис. 1.5 значно вища для  $CO_2$  лазера, ніж для волоконного лазера.

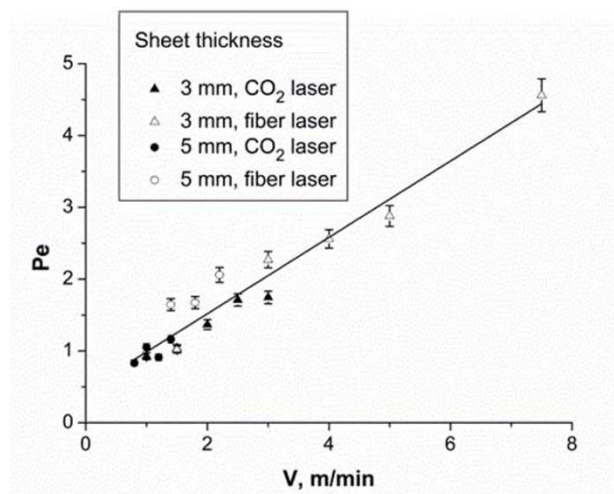


Рисунок 1.5 – Число Пекле в залежності від швидкості різання [3]

Фізичний механізм поширення фронту різання відбувається під час кисневого лазерного різання низьковуглецевої сталі. Процес кисневого лазерного різання можна описати як примусове горіння заліза, а поширення

фронту відбувається у вигляді циклічних хвиль горіння [7]. Фронт різання періодично відділяється від лазерного променя, і не лазерний промінь, а екзотермічна реакція окислення заліза є основним ініціатором утворення каналу. Лише незначна частина лазерної енергії потрапляє на поверхню листа під нормальним кутом падіння і може відбиватися. Більше того, окислення поверхні металу під час кисневого лазерного різання збільшує коефіцієнт поглинання та зменшує частку відбитого випромінювання. Отже метод вимірювання коефіцієнта поглинання [7], використаний у цій роботі, повинен давати менші похибки у випадку кисневого лазерного різання.

Якісне уявлення про гаусів розподіл інтенсивності випромінювання у світловій плямі діаметром  $d_1$ , 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 різання можна пояснити на основі фізичних закономірностей і експериментальних спостережень [3].

Оскільки лазерне випромінювання поширюється уздовж фронту різання завдяки численним відбиттям від бокових поверхонь каналу, гаусів характер розподілу інтенсивності зберігається в межах глибини різання до моменту утворення дротелюючого 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 різання з самого початку набуває кінчної 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 різки, розташованої за дроселюючим каналом. У цій області, де зменшена інтенсивність спричиняє переважання рідкої фази, знижується ефективність її видалення. Це, у свою чергу, визначає ширину різки 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 ґрата.

Усереднене значення щільності потужності в зоні фокусування ( $d_1$ ) як ключовий параметр процесу лазерного різання [15]. 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:

$$W = P / S \quad , \quad (1.9)$$

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 ґрата на вихідному краї різку та підвищується якість бокової поверхні.

До недавнього часу 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/см<sup>2</sup>.

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 ґрата на виході, особливо при обробці товстих заготовок. Зниження  $W$  по глибині обмежує граничну товщину металу, який можна якісно прорізати.

Експериментальні дослідження підтверджують [16], 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 різку 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 Вплив фокусної відстані об'єктива та положення каустики 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 різу. Для цього необхідно забезпечити переважання процесу випаровування у загальній абляції, що можливе за щільності потужності понад  $w \geq 2 \cdot 10^7$  Вт/см<sup>2</sup>. 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 [17].

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 Оцінка вагомості впливу стану поверхні низьковуглецевих сталей, конструкції сопла та величини 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 [18].

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 різку за таких умов, сопло слід розміщувати на більшій висоті [19].

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 різку [20].

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 [21].

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 [22].

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.

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 Способи оптимізації параметрів 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 [23]:

- 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 ( $\Delta f$ );
- 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  $\Delta f$  визначає ефективність видалення рідкої фази як за допомогою надлишкового тиску пари, так і завдяки дії асистуючого технологічного газу на бокову поверхню різу, це також істотно впливає на ширину різу. Зокрема, ширина різу на вхідній і вихідній частинах залежить від правильно обраної величини  $\Delta f$ .

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  $\Delta f$  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 [24].

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 [25].

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 водними струменями зі спеціального пристрою [26].

Підсумовуючи можна констатувати, що за доброго розуміння загальних закономірностей вибір раціональних параметрів в конкретних технологічних умовах вимагає додаткових комплексних системних експериментальних досліджень.

### **1.5 Аналіз вимог до параметрів процесу і результатів газолазерного різання низьковуглецевих сталей**

Різання низьковуглецевих сталей користується значним попитом на вітчизняних виробництвах. Найбільш актуальним є різання цих металів у діапазоні товщини від 2 до 40 мм.

Основними вимогами, що висуваються до процесу лазерної обробки низько вуглецевих 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 низьковуглецевих 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 низьковуглецевих 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. Для різання низьковуглецевих сталей в основному застосовувалися лазери з потужністю від 2 до 20 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 низьковуглецевих сталей можуть використовуватися різні види лазерів, серед яких найбільш популярними є волоконні та CO<sub>2</sub>-лазери. Волоконні лазери

мають високу ефективність і точність, а також забезпечують високу якість різку на матеріалах з високою теплоємністю [27].

**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 низьковуглецевої сталі.** Вміст вуглецю 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 низьковуглецевих 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 різу, збереження структурних властивостей матеріалу та економічної ефективності виробництва.

### **1.5.2 Загальна оцінка впливу типу асистуючого газу на процес та результати газолазерного різання металів**

Газолазерне різання є високоточним процесом, що поєднує використання лазерного променя і асистуючого газу для забезпечення ефективного та швидкого розрізання металів. Вибір асистуючого газу відіграє ключову роль у забезпеченні якості різу, 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 різу.

**Вплив типу асистуючого газу на швидкість різання та ефективність процесу.** Швидкість і ефективність газолазерного різання значною мірою залежать від типу асистуючого газу.

- **Кисень.** Використання кисню дозволяє підвищити швидкість різання, оскільки кисень активно взаємодіє з матеріалом і підтримує процес окислення на межі різу. Це збільшує швидкість абляції матеріалу та підвищує ефективність процесу. Проте при цьому можуть виникати оксиди на поверхні різу, що знижує якість, особливо для матеріалів, чутливих до окислення, таких як нержавіючі сталі або сплави з високим вмістом легуючих елементів.

- **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 різу, 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 різу.** Тип газу має значний вплив на якість поверхні різу, 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.** 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 різу.

- **Повітря.** Використання повітря призводить до присутності незначної кількості оксидів на межі різу, 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 різку, 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 різку.

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

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

- **Повітря.** Використання повітря по відношенню до структури матеріалу є проміжним варіантом між киснем та азотом. Має меншу глибину структурних змін в порівнянні з киснем, але більшу в порівнянні з азотом.

Таким чином вибір асистуючого газу є важливим фактором, що визначає продуктивність та якість газолазерного різання металів. 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 різку, що може бути непридатним для деяких матеріалів.[28].

### **1.5.3 Характерні особливості газолазерного різання низьковуглецевих сталей потужними оптоволоконними лазерами з використанням кисню**

За використання потужних оптоволоконних лазерів при різанні низьковуглецевих сталей, особливо з використанням кисню як допоміжного

газу (що є найбільш поширеним методом), має низку характерних особливостей порівняно з різанням інших металів чи іншими газами.

**1. Використання екзотермічної реакції.** Це найважливіша особливість, яка відрізняє різання низьковуглецевої сталі киснем від різання, наприклад, нержавіючої сталі азотом.

- **Додаткове тепло.** Кисень хімічно реагує з розплавленим залізом (Fe) та вуглецем (C), утворюючи оксиди та виділяючи значну кількість додаткового тепла (екзотермічна реакція).
- **Підвищена швидкість.** Це додаткове тепло сприяє плавленню матеріалу, дозволяючи досягати дуже високих швидкостей різання, особливо у товстих матеріалах, порівняно з тим самим лазером, що використовує інертний газ.
- **Ефективність.** Завдяки додатковому теплу, цей метод є дуже енергоефективним для різання товстої низьковуглецевої сталі.

**2. Параметри різання.** Різання низьковуглецевої сталі киснем вимагає інших налаштувань, ніж різання азотом.

- **Низький тиск газу.** Для низьковуглецевої сталі використовується відносно низький тиск кисню (зазвичай від 0.5 до 6 бар), оскільки основну роботу з нагрівання виконує лазер та хімічна реакція, а газ переважно видаляє розплав. Це контрастує з різанням азотом, де потрібен високий тиск (до 20–25 бар і вище).
- **Висока чистота кисню.** Для стабільності та якості процесу потрібен кисень високої чистоти (бажано понад 99.9%), оскільки домішки можуть порушувати хімічну реакцію.

**3. Якість поверхні та хімічні зміни.** Через окислення змінюється вигляд та властивості різаної кромки.

- **Окислена кромка.** На відрізаних поверхнях завжди залишається чорний оксидний шар (оксид заліза). Цей шар може вимагати додаткової обробки (зачистки) перед зварюванням або фарбуванням, оскільки фарба/покриття може погано триматися на оксиді.

- Утворення грату та шлаку. Хоча процес є швидким, неправильно підібрані параметри можуть призвести до утворення гранульованого шлаку (dross) на нижньому краю різку, який доводиться видаляти механічно.

- Зона термічного впливу (ЗТВ). Через додаткове тепло від екзотермічної реакції, зона термічного впливу (ЗТВ) вздовж лінії різку зазвичай більша, ніж при різанні інертним газом. Це може впливати на механічні властивості сталі біля кромки.

#### **4. Обмеження товщини та матеріалу. Добра розрізуваність.**

- Низьковуглецева сталь (з вмістом С до 0.3%) має дуже добру розрізуваність киснем, що дозволяє різати її в широкому діапазоні товщин.

- Ліміт вуглецю. Різання стає значно складнішим при переході до середньо- та високовуглецевих сталей (понад 0.7%), оскільки збільшується в'язкість розплаву та виникає потреба у попередньому підігріві.

#### **1.5.4 Характерні особливості газолазерного різання низьковуглецевих сталей потужними оптоволоконними лазерами з використанням повітря**

Газолазерне різання низьковуглецевих сталей із використанням стисненого повітря як допоміжного газу – це компромісний підхід, який забезпечує добру продуктивність при значно нижчих експлуатаційних витратах, ніж кисень чи азот, але призводить до нестабільної якості та інтенсивного окислення кромки.

**Швидкість різання.** Швидкість різання повітрям знаходиться між швидкістю різання киснем та азотом.

- Вища, ніж азотом (плавленням). Завдяки присутності 21% кисню відбувається часткова екзотермічна реакція, яка додає тепло і прискорює процес порівняно з чистим азотом.

- Нижча, ніж киснем (горінням). Через низьку концентрацію кисню (21% проти 99.9%+ чистого O<sub>2</sub>) і високий вміст азоту, повна екзотермічна реакція не відбувається, тому швидкість нижча, ніж при ГЛР чистим киснем.

**Експлуатаційні витрати.** Це головна перевага різання повітрям.

- Найнижчі витрати. Стиснене повітря виробляється на місці за допомогою компресора та системи фільтрації, що дозволяє уникнути постійних закупівель інертних або реактивних газів (азоту чи кисню) у балонах чи криогенних місткостях. Це забезпечує значне зниження експлуатаційних витрат.

Якість різання. Якість різку повітрям є нестабільною і часто має гірші естетичні та хімічні характеристики, ніж різання чистими газами.

- Інтенсивне окислення. Високий вміст кисню викликає окислення, що призводить до темної, окисленої кромки, подібної до тієї, що утворюється при різанні чистим киснем.

- Низька якість кромки (особливо для товстих листів). Через низьку чистоту та суміш газів, ріжуча кромка може бути грубою та мати більшу шорсткість порівняно з різанням азотом.

- Стійкість до корозії. Повітря, яке не завжди ідеально сухе, може прискорити корозію поверхні різку.

- Вузький діапазон параметрів. Оптимізація параметрів різання повітрям є складнішою. Навіть невеликі зміни тиску, швидкості або фокуса можуть призвести до швидкого погіршення якості.

**Утворення грату.** Через комбінований ефект (часткове горіння та неповне видалення розплаву азотом), різання повітрям часто призводить до інтенсивного утворення шлаку або грату на нижній кромці, особливо на товстіших листах. Цей грат зазвичай вимагає додаткової механічної обробки.

**Застосування.** Різання повітрям найбільше підходить для:

1. Тонких і середніх листів низьковуглецевої сталі (зазвичай до 6 мм) та оптоволоконних лазерів потужністю до 4 кВт.

2. Застосувань, де вартість є критичним фактором, а якість кромки (наприклад, її чистота для зварювання) не є найвищим пріоритетом.

Газолазерне різання низьковуглецевої сталі повітрям є **найбільш економічним** методом. Він забезпечує прийнятну швидкість, але користувач

повинен бути готовий до **погіршення якості кромки** (окислення, шорсткість) та необхідності додаткового видалення грату.

### **1.6 Висновки до розділу 1**

1. Проведено всебічний аналіз наукових результатів, присвячених дослідженню процесу газолазерного різання низьковуглецевих сталей за допомогою потужних оптоволоконних лазерів.

2. Розглянуто вплив основних параметрів факторного простору на продуктивність і якість процесу газолазерного різання низьковуглецевих сталей.

3. Виконано узагальнену оцінку ролі та значення різних типів асистуючих газів у забезпеченні ефективності процесу та якості результатів газолазерного різання.

Аналіз літературних джерел показав, що потенціал сучасних високопотужних оптоволоконних лазерів (у діапазоні 6–12 кВт) реалізується не повною мірою. Це зумовлено недостатнім експериментальним обґрунтуванням оптимального поєднання базових параметрів процесу, таких як потужність лазера, фокусна відстань оптичної головки, положення фокусу відносно поверхні заготовки, тип і тиск допоміжного газу, внутрішня структура та діаметр сопла, а також відстань від сопла до поверхні заготовки.

На основі проведеного аналізу сформульовано мету, об'єкт, предмет і основні завдання дослідження.

#### **Мета і завдання дослідження**

**Мета роботи** – підвищення ефективності визначення раціональних параметрів технологічних процесів різання низьковуглецевих сталей на установках, оснащених оптоволоконними лазерами потужністю 12 кВт, що забезпечують високу продуктивність процесу та відповідність якості деталей вимогам замовників.

Для досягнення поставленої мети в дисертаційній роботі необхідно вирішити такі завдання:

1. Провести аналіз відомих результатів досліджень процесу газолазерного різання низьковуглецевих сталей потужними оптоволоконними лазерами.

2. Розробити та адаптувати комплекс методик, приладів і обладнання для проведення системних експериментальних досліджень газодинамічних процесів у зоні різання та оцінки якості поверхонь різу відповідно до вимог стандарту **ISO 9013:2017**.

2. Виконати чисельне моделювання і здійснити серію системних експериментів та отримати достовірні дані про закономірності зміни величини ріжучого тиску асистуючого газу на поверхні деталі за використання дозвукових та надзвукових струменів повітря та кисню.

3. Експериментально обґрунтувати раціональні параметри режимів різання низьковуглецевих сталей оптоволоконним лазером потужністю 12 кВт, що забезпечують високу продуктивність, стабільність і якість виготовлених деталей.

4. З використанням методів повнофакторного експерименту отримати аналітичні залежності оптимальної потужності лазерного випромінювання та максимальної швидкості різання від товщини матеріалу при використанні оптоволоконного лазера потужністю 12 кВт.

5. Отримати узагальнену технологічну модель процесу газолазерного різання низьковуглецевих сталей в середовищі кисню оптоволоконним лазером потужністю 12 кВт.

6. Виконати енергетичний аналіз процесу газолазерного різання низьковуглецевих сталей в середовищі кисню оптоволоконним лазером потужністю 12 кВт.

**Об'єкт дослідження** – параметри лазерного променя та процесу газолазерного різання низьковуглецевих сталей випромінюванням оптоволоконного лазера потужністю 12 кВт.

**Предмет дослідження** – закономірності впливу параметрів лазерного променя та процесу на продуктивність та якість газолазерного різання

низьковуглецевих сталей випромінюванням оптоволоконного лазера потужністю 12 кВт.

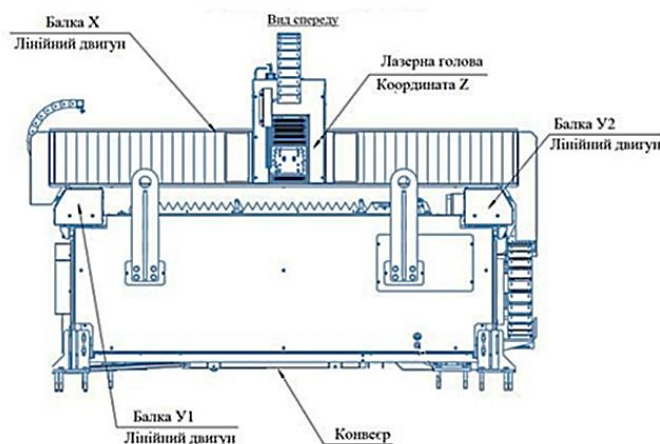
## РОЗДІЛ 2 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ОБЛАДНАННЯ ТА МЕТОДИ ВИКОНАННЯ ДОСЛІДЖЕНЬ

### 2.1 Експериментальна база проведення досліджень та методи оцінки достовірності результатів

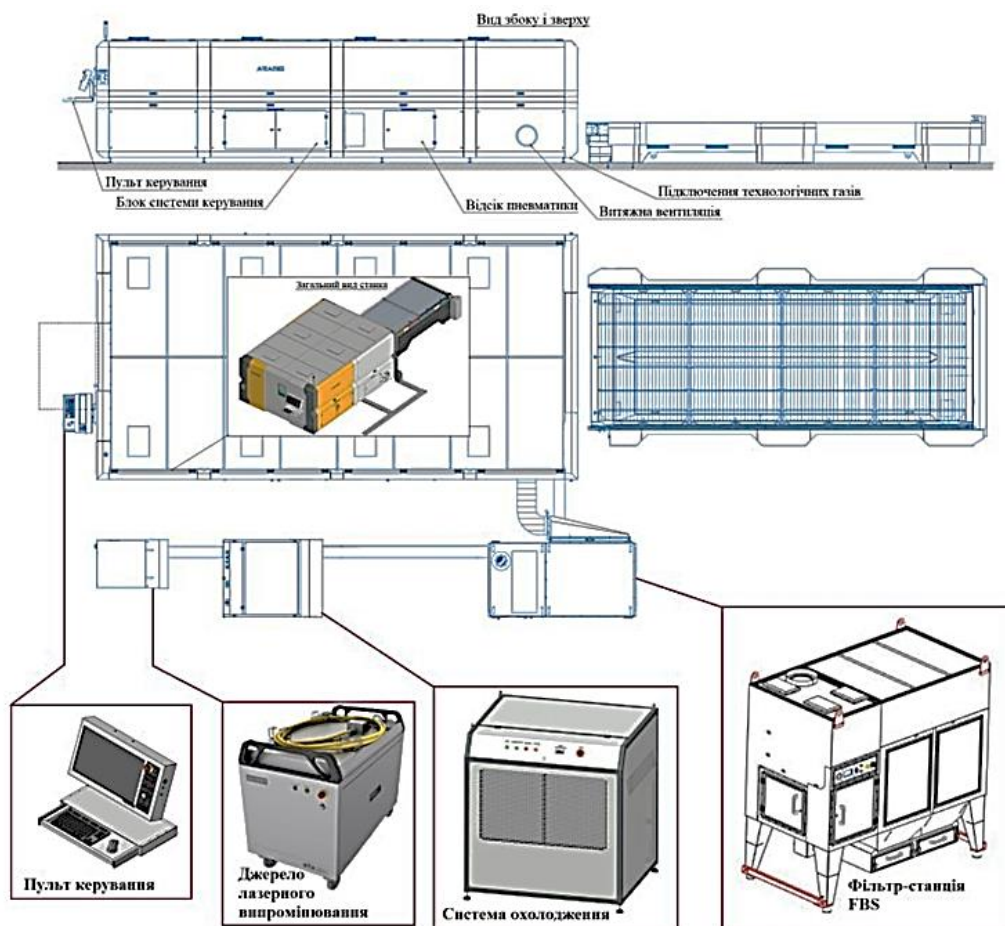
#### 2.1.1 Базові технічні характеристики лазерного технологічного комплексу для розкרוювання металів випромінюванням потужного оптоволоконного лазера

Експериментальні дослідження здійснювалися з використанням прогресивного лазерного технологічного комплексу моделі **AFX-PRO-12000-1530LD**. Дана установка є першим представником лінійки AFX, оснащеним ітербієвим волоконним лазером з номінальною вихідною потужністю 12 кВт, що забезпечує прецизійність та стабільність відтворення технологічних процесів. Архітектурна побудова комплексу (рис. 2.1) включає п'ять функціональних підсистем:

- **кінематичну систему** (координатні осі X, Y, Z);
- **модуль програмного керування** (сервер ЧПК із ПЗ CutControl);
- **оптичний тракт** (генератор випромінювання, транспортне волокно, конектор та фокусуєчу головку);
- **пневматичну систему розподілу асистуючих газів** ( $O_2$ ,  $N_2$ , стиснене повітря);
- **терморегулюючий вузол** (систему охолодження замкненого циклу).



a)



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

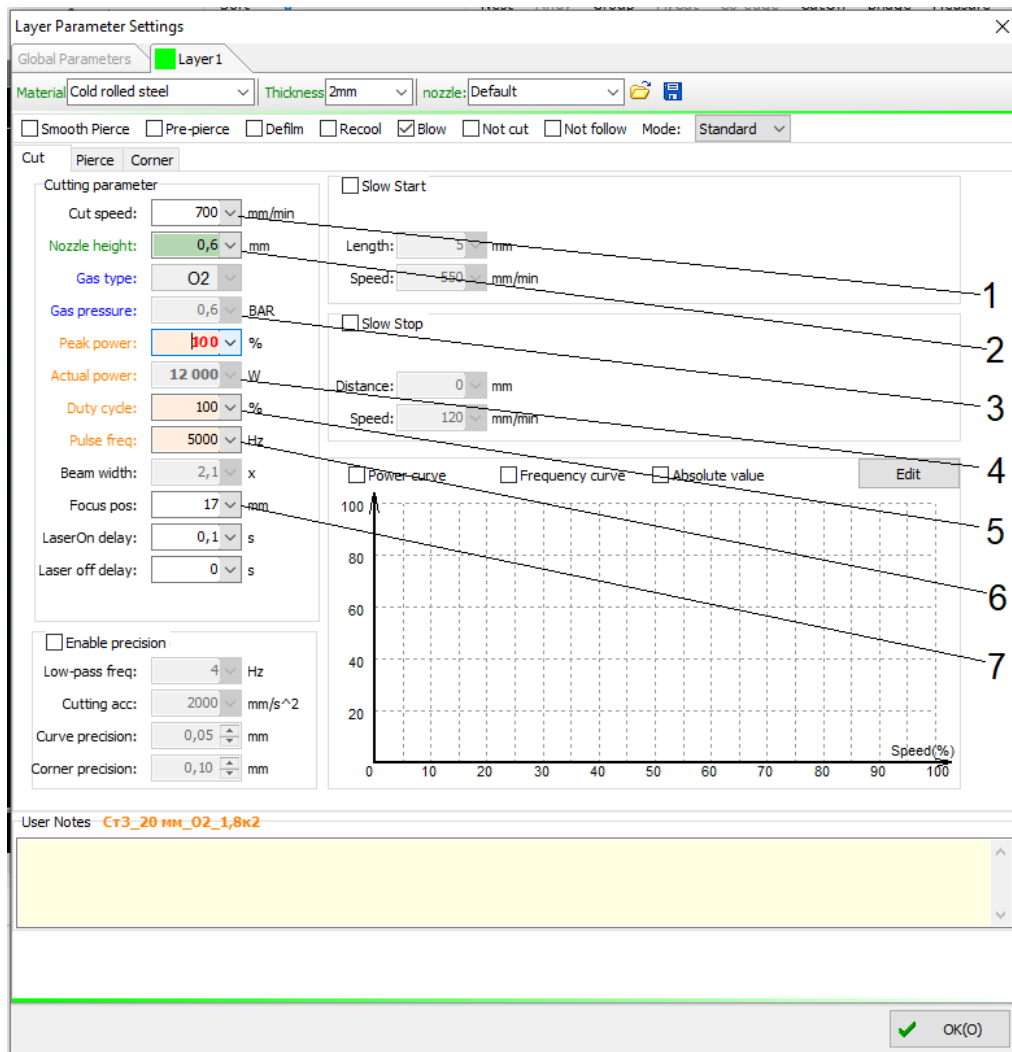
Технічні характеристики лазерного технологічного комплексу AFX-PRO-12000-1530LD	
<b>Лазерне джерело</b>	
Тип лазера	ітербієвий волоконний 12000W
Передача променю	через оптоволокно
Режими випромінення/різу	імпульсний, безперервний

Довжина хвилі лазерного випромінення	1064-1070 нм
<b>Оптична головка</b>	
Система зміни захисного скла	картриджна
Система фокусування	автоматична
Система підтримки фокусу	безконтактна, автоматична
<b>Характеристики точності</b>	
Точність позиціонування по координатам X, Y,	$\pm 0.01$ мм
Дискретність завдання положення	1 мкм
<b>Характеристики розкрою</b>	
Ширина різку (в залежності від товщини матеріалу)	0,08-0,2 мм
Застосовувані технологічні гази	кисень, азот, аргон, стиснене повітря
Перемикання ріжучого газу	автоматичне
<b>Система руху</b>	
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
<b>Програмне забезпечення</b>	
Система ЧПК	ARAMIS CNC
Розкладка деталей на віртуальному столі	автоматична/ручна
Формати даних	DXF, DWG, G-code
Можливі методи завантаження даних	інтернет, локальна мережа, USB - флеш- накопичувач
Можливість установки мікроперемичок 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	+
<b>Загальні характеристики</b>	
Напруга електромережі	380, ±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 Сур CUT, який слугує для внесення і коригування параметрів процесу різання, які автоматично підтримуються і контролюються системою числового програмного керування ARAMIS CNC [29].



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 Sur CUT на станку AFX-PRO-12000-1530LD

Генерація когерентного випромінювання забезпечується ітербієвим волоконним джерелом, що характеризується високою щільністю вихідної оптичної потужності та прецизійною побудовою оптичної схеми. Для інтенсифікації процесу руйнування матеріалу через систему газопостачання в зону термічного впливу подаються робочі середовища (повітря, кисень) або інертні гази (азот, аргон) із зовнішніх магістралей. Фокуруючий блок оптичної системи оснащено ємнісним датчиком безконтактного типу. Даний

сенсор реалізує автоматичне регулювання положення фокальної площини відносно поверхні заготовки, що гарантує стабільність геометричних параметрів різку та відтворюваність результатів у межах серійного виробництва. Конструкція установки також передбачає наявність пластинчастої системи для сепарації та збору дрібнорозмірних виробів виконано конвеєром та висувним піддоном. Для дегазації робочої зони та відведення продуктів горіння, що виникають під час лазерної обробки, конструкцією комплексу передбачено мережу аспіраційних каналів, інтегрованих із зовнішньою витяжною вентиляцією. Кінематична схема за осями X, Y1 та Y2 базується на використанні лінійних електродвигунів, що змонтовані на спільній опорній станині. Керування просторовим переміщенням реалізовується за допомогою багаторівневого контролера, що структурно об'єднує модуль системного управління (промисловий ПК) та силовий блок керування приводами. Останній жорстко зафіксований на несучій рамі системи руху для оптимізації передачі керуючих сигналів.

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.

Оцінка достовірності результатів дослідження лазерного розкрою металу (лазерного різання) є критично важливою і ґрунтується на всебічному аналізі кількох ключових аспектів методології та вимірювань.

Основні етапи та критерії для оцінки достовірності:

– **Достовірність вихідних даних (факторного простору).**

Оцінка починається з перевірки точності та контрольованості параметрів, які використовувалися в експерименті.

- Параметри лазера:
  - Виміряна та підтверджена фактична потужність лазера.
  - Контроль потужності та режиму імпульсів в процесі різки.

- Контроль положення фокуса та його зміщення протягом процесу.
- Параметри допоміжного газу:
  - Чистота газу (наприклад, кисню 99.99%) підтверджена сертифікатами. Недотримання чистоти критично впливає на хімічну реакцію та швидкість.
  - Відкаліброване обладнання для вимірювання тиску та витрати газу, які є основними силами для видалення розплаву.
- Характеристики матеріалу:
  - Відповідність хімічного складу і товщини металу точно задокументовану сертифікатом матеріалу.
  - Мінімізація вхідних дефектів матеріалу або стан поверхні (окалина, іржа).

– **Відтворюваність та статистична значущість.**

Науковий результат вважається достовірним, якщо його можна відтворити за однакових умов.

- Кількість повторень (реплікація) – проведено достатню кількість повторень (випробувань) для кожного набору параметрів. Результати, отримані на одному зразку, є малодостовірними.
- Дисперсія результатів – аналізується наскільки сильно відрізняються результати при повторних вимірюваннях. Велика дисперсія свідчить про неконтрольовані фактори (наприклад, нестабільність лазера або механічних рухів).
- Статистичний аналіз – використання адекватних статистичних методів (наприклад, дисперсійний аналіз, факторний експеримент, аналіз регресії) для підтвердження того, що спостережувані зміни якості дійсно викликані зміною досліджуваних параметрів, а не випадковими похибками.

– **Об'єктивність вимірювання якості (вихідні параметри).**

Якість різання повинна оцінюватися за міжнародними стандартами (наприклад, ISO 9013).

- Критерії якості: вимір основних критеріїв:
  - Шорсткість поверхні ( $R_z$  та  $R_a$ ) за допомогою профілометра.
  - Глибина зони термічного впливу за допомогою металографічного аналізу.
  - Кількість і розмір ґрату (шлаку) та його адгезія.
  - Відхилення від перпендикулярності (конусність різку).
- Методи вимірювання – використання каліброваного обладнання для вимірювання цих показників. Вимірювання, проведені "на око" або простими засобами, знижують достовірність.
- Відповідність фізичним принципам (обґрунтування).

Результати повинні узгоджуватися з відомими фізичними моделями газолазерного різання.

- Енергетичний баланс – пояснення зміни потужності або швидкості узгоджується із законом збереження енергії. Наприклад, збільшення швидкості різання при фіксованій потужності має призводити до погіршення якості або неповного прорізання.
- Гідродинаміка – пояснення впливу тиску газу, діаметра сопла та положення фокуса на ефективність видалення розплаву з точки зору фізики рідин.

Дослідження лазерного розкрою можна вважати достовірним, якщо воно демонструє високий ступінь контролю над вхідними параметрами, підтверджує результати статистично значущими повтореннями, використовує об'єктивні, стандартизовані методи вимірювання якості та представляє результати, які фізично обґрунтовані та відтворені.

### **2.1.2 Характеристики зразків низьковуглецевих сталей, обраних для проведення досліджень**

Для проведення експериментальних досліджень була обрана низьковуглецева сталь марки Сталь 3 (Ст3). На ТОВ «Арамис», 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.

Головні причини широкого вжитку низьковуглецевої сталі марки Сталь 3 (Ст3) криються в її оптимальному поєднанні технологічних властивостей, доступності та економічності.

### **Основні переваги сталі Ст3.**

Сталь Ст3 (часто у варіантах Ст3пс – напівспокійна, Ст3сп – спокійна) є конструкційною вуглецевою сталлю звичайної якості і є однією з найпоширеніших у будівництві та машинобудуванні.

– Відмінна зварюваність.

- Зварюється без обмежень: Сталь 3 має низький вміст вуглецю (зазвичай 0,14–0,22%), що забезпечує відмінну зварюваність без необхідності попереднього підігріву або подальшої термічної обробки для більшості конструкцій (для товщин понад 36 мм може знадобитися підігрів).
- Ця властивість значно спрощує і здешевлює монтажні роботи на будівельних майданчиках і виробництві металоконструкцій.

– Доступність та економічність.

- Низька вартість. Як нелегована вуглецева сталь звичайної якості, Ст3 не містить дорогих легуючих елементів. Це робить її найбільш доступною серед конструкційних сталей.
- Масова поширеність. Простота виробництва та широкий попит забезпечують її масову доступність у вигляді різноманітного прокату (листового, сортового, фасонного, трубного, арматури).

– Збалансовані механічні властивості.

- Достатня міцність: сталь має достатню межу міцності для використання у несучих та елементах будівельних конструкцій та інших деталей, що працюють при екстремальних температурах.

- Пластичність і в'язкість: низький вміст вуглецю забезпечує високу пластичність і в'язкість, роблячи матеріал менш схильним до крихкого руйнування при динамічних навантаженнях (для варіанту СтЗсп).
- Стійкість до крихкості: сталь не схильна до відпускнуї крихкості та нечутлива до утворення мілких тріщин.  
– Технологічність обробки.
- Легка оброблюваність. Сталь добре піддається механічній обробці, куванню, штампуванню, що дозволяє виготовляти з неї широкий спектр виробів і заготовок.

### Основні сфери застосування.

Завдяки переліченим перевагам, сталь СтЗ є універсальним матеріалом і використовується для:

- Будівельні конструкції: основний матеріал для виготовлення несучих та ненесучих металоконструкцій будівель і споруд (ферми, балки, колони, зв'язки, закладні елементи).
- Прокат: листовий, сортовий, фасонний прокат, труби, арматура.
- Деталі загального призначення: Болти, гайки, хомути, осі, важелі, втулки та інші малонавантажені деталі машин і механізмів, які працюють при помірних температурах.

Загальний висновок. Сталь СтЗ є ідеальним вибором, коли потрібен надійний, легкооброблюваний і максимально економічний матеріал для великого обсягу типових конструкційних робіт.

Основні елементи, що визначають властивості обраної для досліджень сталі наведені в табл. 2.2.

Таблиця 2.2 – Основні елементи що визначають властивості сталі СтЗ

Елемент	Вміст (СтЗпс, %)	Роль елемента
Вуглець (С)	0.14 – 0.22	Надає міцність, але його низька

Елемент	Вміст (СтЗпс, %)	Роль елемента
		кількість забезпечує високу пластичність і зварюваність.
Марганець (Mn)	0.40 – 0.65	Підвищує міцність і покращує зварюваність, служить розкислювачем.
Кремній (Si)	0.05 – 0.15	Посилює міцність, є розкислювачем (показує, що сталь напівспокійна).
Сірка (S)	≤ 0.050	Шкідлива домішка, погіршує зварюваність і механічні властивості.
Фосфор (P)	≤ 0.040	Шкідлива домішка, підвищує крихкість.

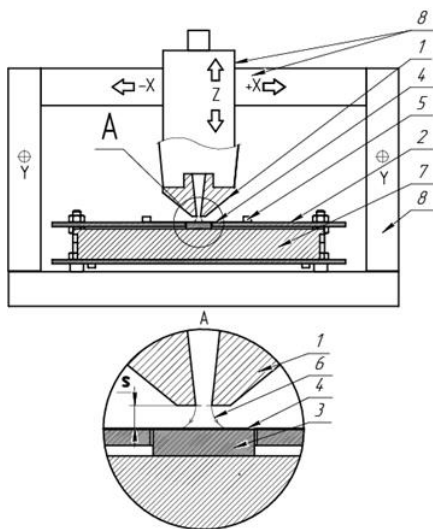
## 2.2 Розроблені та підібрані методики проведення експериментальних досліджень

### 2.2.1 Методики реєстрації параметрів газового струменя в зоні обробки

Для реалізації мети роботи було розроблено варіант експериментального стенда та відповідний супровідний алгоритм досліджень. Це дозволило верифікувати динаміку трансформації перерізу газового потоку та розподіл контактного тиску на оброблюваній поверхні з урахуванням специфіки геометрії сопла, конфігурації обладнання і заданих режимів газолазерного різання.

Конструктивне виконання та візуалізація експериментального стенда наведені на рис. 2.3. Алгоритм детермінації геометричних параметрів струменя та локального тиску робочого газу базується на експлуатації

оригінального пристрою (рис. 2.3, б), інтегрованого в робочий простір верстата (рис. 2.3, а). Процедура підготовки передбачає коаксіальну орієнтацію сопла оптичної головки (1) відносно циліндра передачі зусилля (3), що досягається шляхом юстування за лазерним променем. Початкова точка відліку по вертикальній осі (Z) фіксується системою контролю зазору в момент безпосереднього контакту торцевої площини сопла з верхньою поверхнею циліндра.



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 – копірувальна плівка реєстрації діаметра струменя; 5 – магнітні стійки фіксації плівки; 6 – струмінь асистуючого газу; 7 – датчик зусилля; 8 – приводи координатних переміщень серійного верстата LTS-PRO-12000-1530-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 б з похибкою, що не перевищує  $\pm 0.00981$  Н. Відбитки від дії тиску струменя на копірувальну плівку фотографувалися та оброблялися в середовищі САПР. Завдяки цьому похибка визначення діаметра струменя асистуючого газу на поверхні деталі не перевищувала  $\pm 0,01$  мм.

Приклад верифікації діаметрів газового струменя за результатами експериментальних досліджень ілюструє рис. 2.4. Масштабування та ідентифікація розмірів відбитка здійснювалися відносно калібрувального зразка у вигляді оптоволоконна ( $\varnothing 0,5$  мм), що характеризується прецизійною стабільністю геометрії (похибка  $\leq 1$  мкм). Розрахунок інтегрального тиску гальмування в зоні взаємодії базувався на діленні виміряного зусилля на відповідну площу контакту газового середовища з поверхнею.



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

В оптичній головці верстата встановлювалися серійні одноканальне та двоканальне сопла компанії ВОСНУ 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.

Реалізовано комплекс експериментальних досліджень, спрямованих на виявлення закономірностей впливу геометричних параметрів сопла, величини робочого зазору та вхідного манометричного тиску на морфологію асистуючого потоку й інтенсивність силового впливу в зоні різання. Характерну залежність отриманих показників наведено на рис. 2.5 [30]. Для забезпечення статистичної достовірності результатів кожне випробування проводилося три рази; при цьому коефіцієнт варіації (максимальна розбіжність даних) не виходив за межі 3 %.

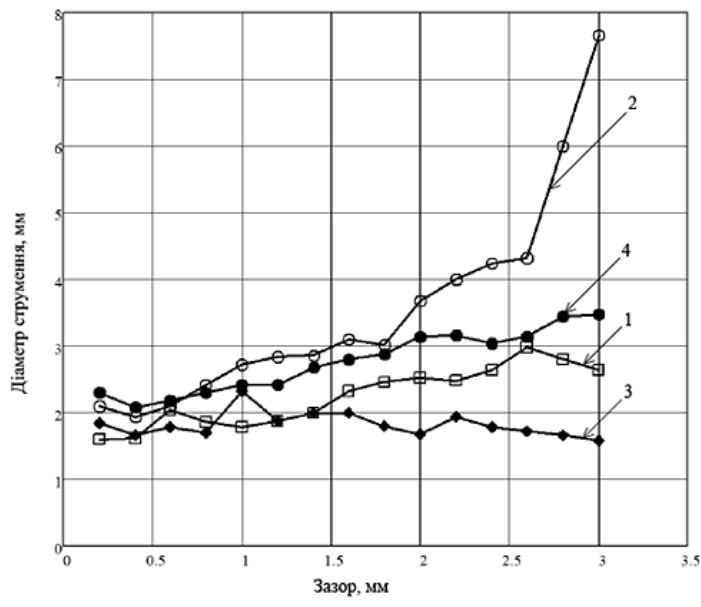
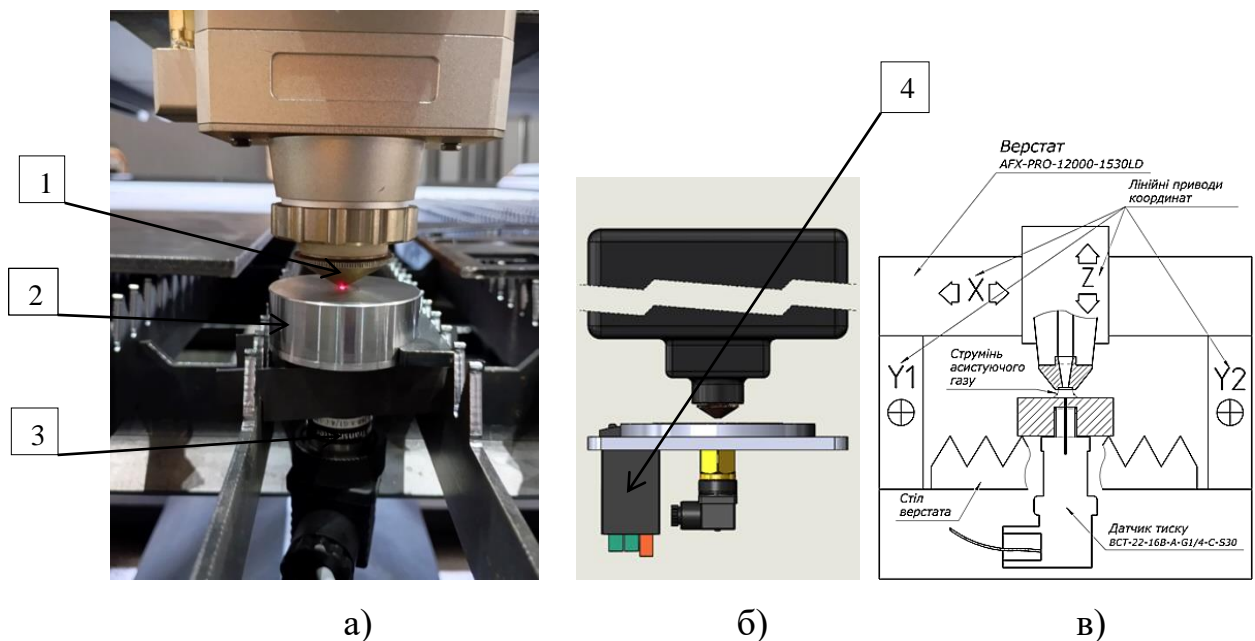


Рисунок 2.5 – Зміна діаметра струменя в зоні контакту з поверхнею деталі в залежності від зазору між соплом та деталлю

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;

Проте функціональні можливості попереднього обладнання обмежувалися реєстрацією лише усереднених показників тиску в зоні гальмування асистуючого потоку. Така методична особливість нівелювала можливість прецизійного аналізу локального розподілу тиску безпосередньо в зоні лазерного розділення. Враховуючи ці обмеження, було спроектовано та впроваджено вдосконалений вимірювальний комплекс. Нова конструкція забезпечує високу просторову розрізняюваність при фіксації параметрів газодинамічного впливу за допомогою перетворювача, інтегрованого в дисковий зонд з апертурою 0,3 мм, що імітує оброблювану заготовку. Експериментальна апробація здійснювалася на базі лазерного технологічного комплексу AFX-PRO-12000-1530LD (виробництва ТОВ «Араміс», Україна), технічні характеристики якого деталізовано в табл. 2.1 та на рис. 2.2–2.3.



1 – сопло оптичної головки верстата; 2 – дисковий зонд; 3 – п'єзорезистивний датчик тиску моделі ВСТ110; 4 – контролер ЕРА100;

Рисунок 2.6 – Загальний вигляд дискового зонда з вимірювальним перетворювачем тиску (п'єзорезистивний датчик тиску моделі ВСТ110) 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)

Початкове узгодження осей дискового детектора та сопла виконувалося шляхом коаксіального юстування з використанням штатних відео-оптичних систем верстата (рис. 2.6).

Просторову конфігурацію дискового зонда та принципову схему експериментального комплексу для картографування полів тиску асистуючого газу представлено на рис. 2.6 (б, в). Процес сканування здійснювався шляхом дискретного переміщення сопла оптичної головки по осях X та Y відносно апертури приймального вузла з кроком 0,2 мм. Вертикальна координата (Z) детермінувалася автоматизованою системою контролю зазору в момент механічного контакту торця сопла (1) з поверхнею зонда (2), що приймалося за базисну точку відліку (рис. 2.6, а). Висока точність результатів забезпечувалася прецизійними лінійними приводами верстата з похибкою позиціонування в межах  $\pm 0,01$  мм. Реєстрація силового впливу виконувалася за допомогою п'єзорезистивного перетворювача моделі ВСТ110 (рис. 2.7), робочі характеристики якого систематизовано в табл. 2.3.



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 «Араміс» сопел компанії Thermacut.

Таблиця 2.3 – 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

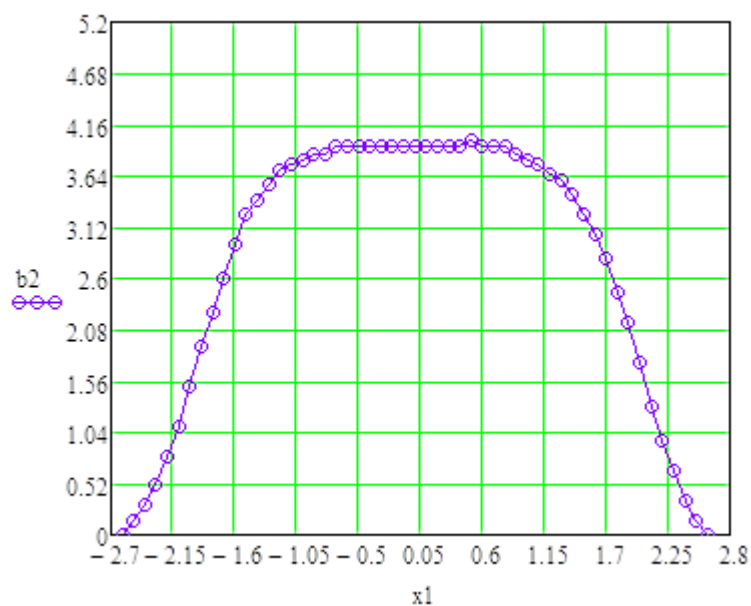


Рисунок 2.8 – Отриманий розподіл ріжучого тиску асистуючого газу по поперечному перетину струменя

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 [31].

### **2.3 Методики, пристосування та прилади для досліджень характеристик якості отриманих газолазерним різанням поверхонь низьковуглецевих сталей**

У межах проведених досліджень основну увагу було зосереджено на аналізі процесів лазерного розділення листового прокату з чорних металів,

зокрема низьковуглецевих та конструкційних сталей. Вибір зазначених матеріалів обумовлений їх широким застосуванням у промисловості та специфікою термічного циклу, що супроводжується інтенсивним окисненням у зоні різання.

На відміну від високолегованих корозійностійких сплавів, обробка чорних металів асистуючим струменем кисню активізує екзотермічну реакцію, що суттєво змінює енергетичний баланс процесу. Під час експериментів враховувався вплив товщини сталевого листа та стану його поверхні на формування газодинамічного тиску та якість отриманого зрізу. Використання вуглецевих сталей дозволило встановити кореляції між параметрами газового потоку та морфологією ґрата, що є характерним саме для даної групи металів.

### 2.3.1 Методика та обладнання для визначення характеристик мікрогеометрії досліджуваних зразків

Конфігурація та розміри зразків відповідають графічним даним, поданим на рис. 2.9.

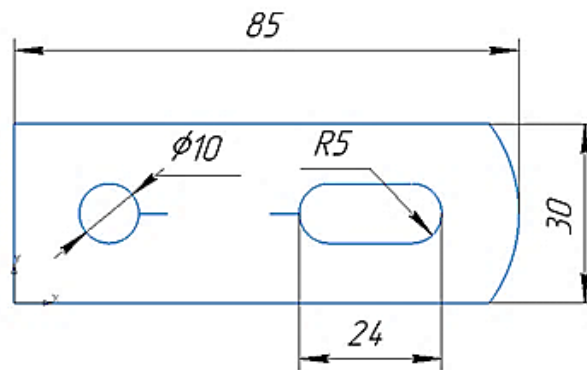
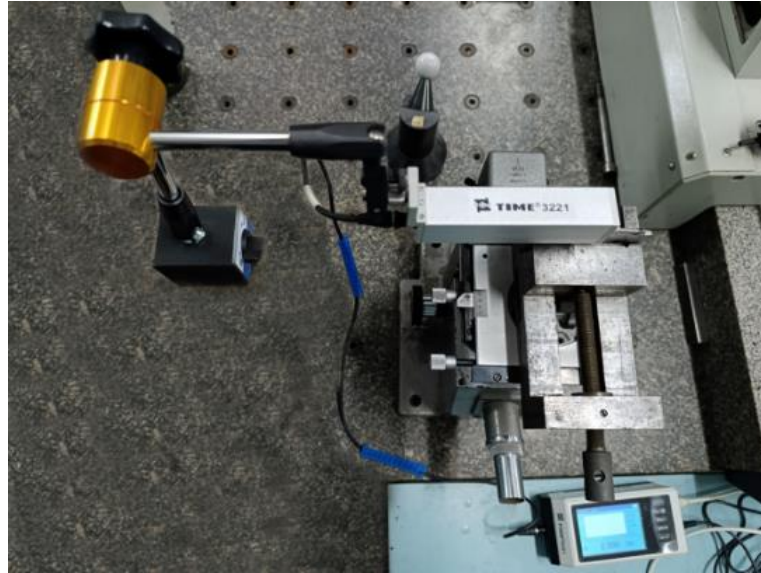


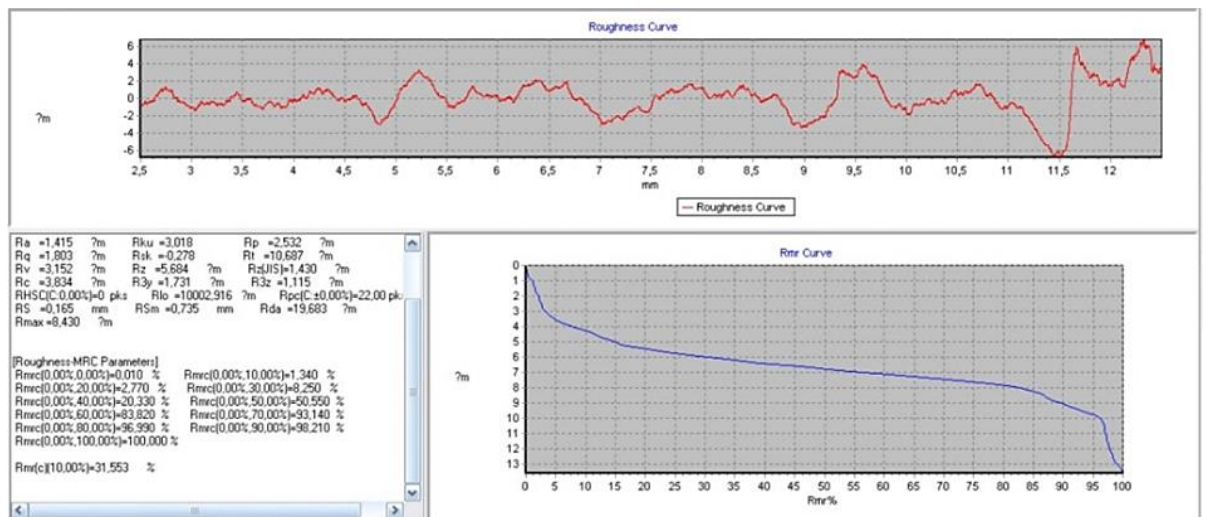
Рисунок 2.9 – Геометричні параметри зразків для досліджень

Дослідження мікрогеометрії поверхонь лазерного розкрою здійснювали із застосуванням профілографа TIME 3221 (рис. 2.10, а). Використане програмне забезпечення дозволило реалізувати комплексний аналіз параметрів текстури оброблених країв (рис. 2.10, б). Величину базової довжини встановлювали відповідно до нормативів, наведених у табл. 2.4. Алгоритм роботи приладу передбачає фіксацію профілю на ділянці від 1 до 5

елементарних відрізків з подальшим усередненням отриманих результатів. Встановлено, що для об'єктів товщиною до 2 мм диференціація зони різку на окремі сегменти практично відсутня. Для масивніших металоконструкцій проводили трирівневий моніторинг шорсткості (у верхній, середній та нижній частинах торця).



a)



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

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

Загальний алгоритм обробки даних передбачає обчислення 45 показників згідно з регламентами ISO 1997, ANSI та JIS2001. Для сепарації хвиль шорсткості використовували методи фільтрації 2RC та GAUSS. На базі відносної опорної довжини  $Rmr$  побудовано криву Еббота-Файрстоуна (криву опорної поверхні), що характеризує зносостійкість та ступінь гостровершинності мікрорельєфу. Відповідно до положень ISO 9013:2017, ключовим дескриптором якості було обрано висоту нерівностей  $Rz$ . Додатково, враховуючи специфічні вимоги замовників обладнання компанії «Араміс», проводили оцінку середнього арифметичного відхилення профілю  $Ra$  [32-33].

### 2.3.2 Методика визначення ширини різку в верхньому та нижньому перетинах деталі

Алгоритм прецизійного визначення геометричних параметрів зони термічного впливу за допомогою систем автоматизованого проектування (САПР) включає декілька етапів:

– Підготовка та первинна фіксація. Початкова стадія передбачає отримання цифрових мікрофотографій зразків за допомогою мікроскопа Ну-500m. Об'єкт дослідження позиціонують у фокусі об'єктива одночасно з калібрувальним елементом – відрізком оптоволокна фіксованого діаметра (0,5 мм). Використання еталона з верифікованими метричними характеристиками є обов'язковою умовою для подальшої програмної апроксимації масштабу зображення.

– Верифікація масштабу та імпорт даних. Сформовані графічні файли експортують у середовище САПР. Для забезпечення метрологічної точності застосовують процедуру масштабування: віртуальний розмір еталонного об'єкта (оптоволокна) приводиться у відповідність до його номінального фізичного значення. Така кореляція дозволяє нівелювати похибки оптичного збільшення та перевести піксельну сітку в одиниці SI.

– Кількісний аналіз та реєстрація результатів. Безпосереднє вимірювання ширини прорізу реалізується шляхом ідентифікації меж різку та застосування вбудованого інструментарію визначення відстаней між опорними точками. Оператор проводить детектування країв обробленої зони на моніторі, після чого здійснюється фіксація лінійних розмірів (рис. 2.11).

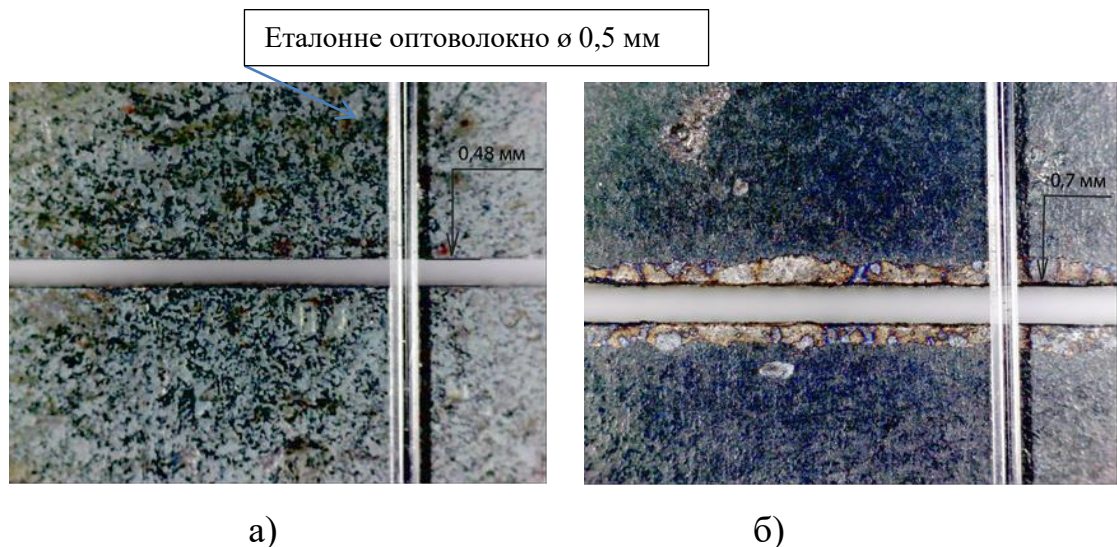


Рисунок 2.11 – Оброблені в середовищі системи автоматизованого проектування фотографії прорізаних пазів: а) верхній; б) нижній

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

### **2.3.3 Технологія візуальної оцінки характеристик поверхонь різання**

Аналогічно до попередніх етапів досліджень, для комплексної візуальної оцінки морфології та якісних характеристик обробленого торця застосовували метод цифрової оптичної мікроскопії на базі приладу Ну-500m. Вибір параметрів масштабування та експозиції мікрофотознімків був

зумовлений необхідністю досягнення високої роздільної здатності для ідентифікації дрібнодисперсних структурних елементів поверхні.

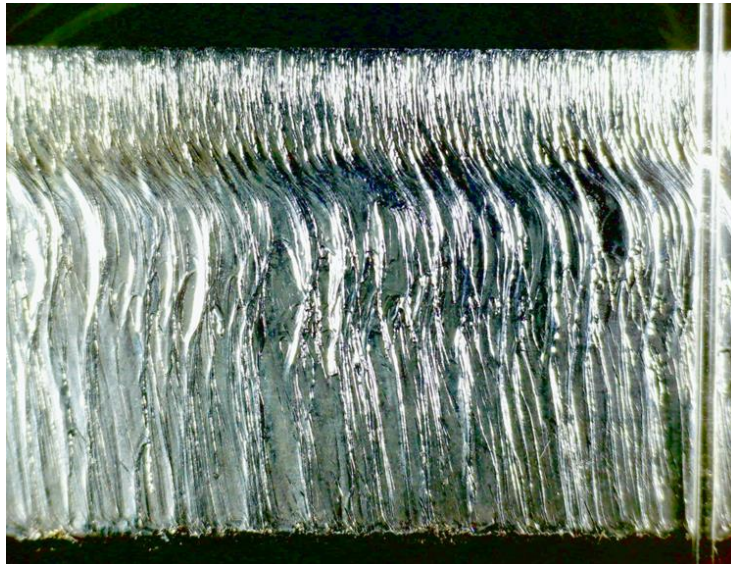
Проведений аналіз геометричних форм, топографії та кольорового спектра оксидних плівок і застиглої рідкої фази дозволяє детально реконструювати фізико-хімічні процеси в зоні взаємодії променя з матеріалом, а саме:

- **Термодеструкція та фазові переходи:** оцінка співвідношення механізмів плавлення та випаровування металу, а також визначення фактичних меж зони термічного впливу (ЗТВ).
- **Газогідродинамічна картина:** встановлення характеру течії розплаву та ефективності його видалення з каналу різку під дією допоміжного газу.
- **Хімічні перетворення:** ідентифікація термічного окиснення та інших реакцій, що проявляються через зміну кольорів мінливості та формування шлакових включень.
- **Режимні особливості:** детектування слідів динамічної нестабільності (хвилястості), що свідчить про специфіку поглинання лазерної енергії та стабільність газового потоку (рис. 2.12).

Такий інтегрований підхід до аналізу мікрофотографій забезпечує можливість не лише зафіксувати кінцевий стан поверхні, а й верифікувати адекватність обраних параметрів лазерного випромінювання.



а)



б)

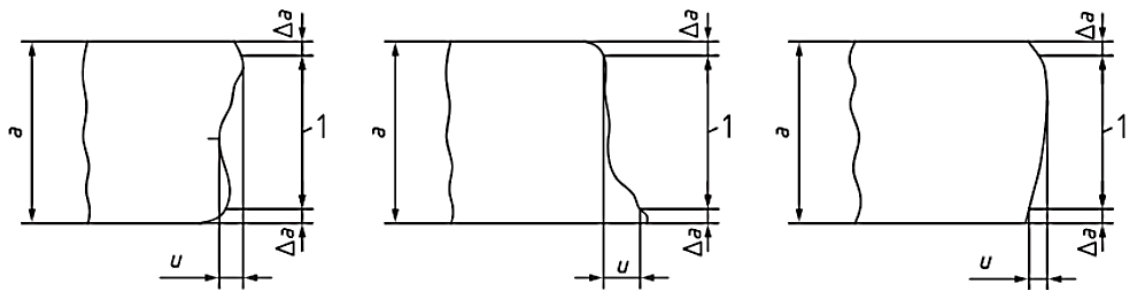


в)

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

#### **2.3.4 Методика та обладнання для реєстрації величин відхилення від перпендикулярності поверхонь різання**

**Визначення геометричної точності за параметром відхилення.** Допуск перпендикулярності або кута нахилу  $u$  (perpendicularity or angularity tolerance): гранично допустимий інтервал між двома паралельними дотичними лініями, що обмежують фактичний профіль поверхні різання в межах заданого кута (зокрема,  $90^\circ$  для вертикального розкрою). Даний показник визначає лінійне відхилення реального контуру від номінальної теоретичної площини в межах товщини оброблюваного матеріалу [34].



1 – відстань до розрахунку площі визначення допуску перпендикулярності чи нахилу;  $a$  – товщина деталі;  $\Delta a$  – зменшення товщини; 1 – товщина різку;  $u$  – допуск перпендикулярності або нахилу;

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

З метою фіксації топографії профілю та прецизійного визначення відхилення від перпендикулярності (нахилу) торця згідно з вимогами ISO 9013:2017, було спроектовано та реалізовано спеціалізовану вимірвальну установку (рис. 2.14, а).

Механізм взаємодії з об'єктом базується на роботі підпружиненого щупа, що вводиться в контакт із досліджуваною поверхнею за допомогою електромагнітного привода. Кінематика переміщення щупа реєструється лазерним тріангуляційним датчиком (рис. 2.14, б), функціонування якого ґрунтується на методах оптичної тріангуляції:

- **Формування сигналу** – випромінювання напівпровідникового лазера 1 фокусується оптичною системою (об'єктивом 2) на поверхні контрольованого зразка б.
- **Детектування** – дифузно відбитий від деталі світловий потік збирається приймальним об'єктивом 3 та спрямовується на світлочутливу CMOS-матрицю (лінійку 4).

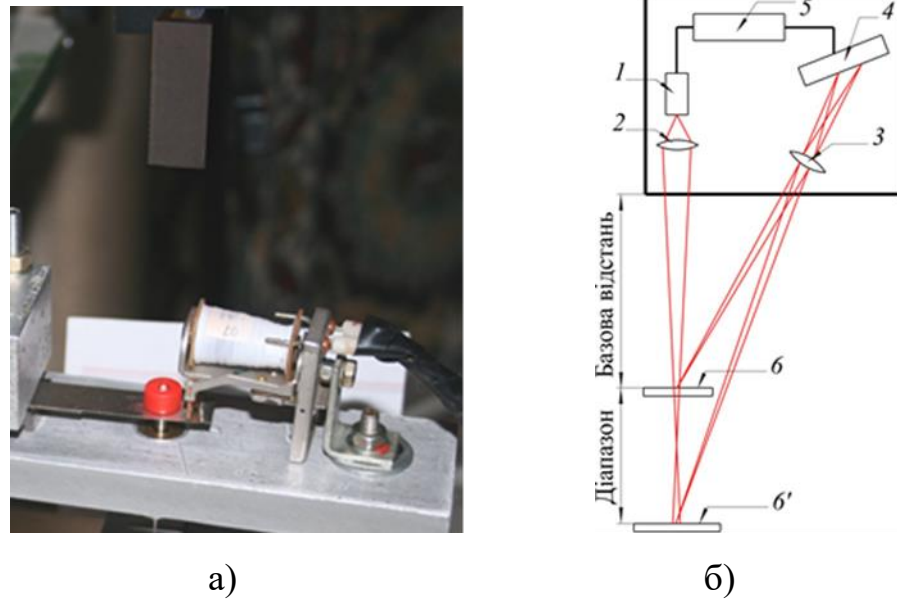


Рисунок 2.14 – Установка для визначення профілю бокової поверхні різь: а) пристрій для фіксації координат; б) схема лазерного триангуляційного вимірювача RIFTEK

- **Обробка даних** – Зміна положення об'єкта дослідження (6 – 6') трансформується у відповідне зміщення світлової плями на фотоприймачі. На основі аналізу позиції зображення на лінійці 4, інтегрований мікропроцесор 5 розраховує точну відстань до відповідної точки профілю.

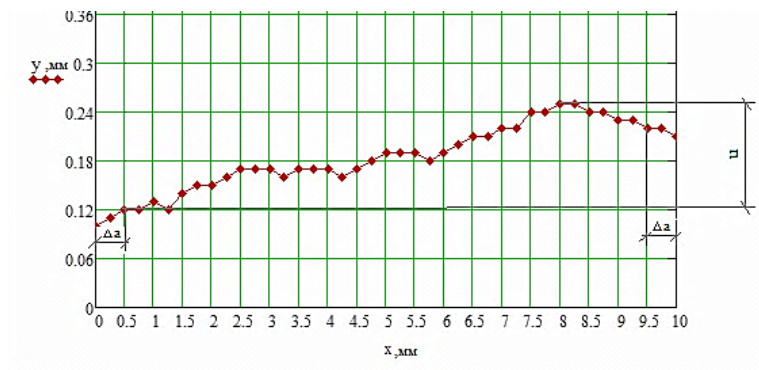


Рисунок 2.15 – Профіль бокової поверхні різь де:  $x$  – товщина деталі;  $\Delta a$  – зменшення товщини виміру;  $u$  – допуск перпендикулярності (згідно з вимогами ISO 9013:2017)

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

## 2.4 Висновки за розділом 2

1. Розроблено та науково обґрунтовано концепцію проведення комплексу експериментальних досліджень, спрямованих на визначення раціональних параметрів лазерного випромінювання та технологічних режимів процесу газолазерного різання низьковуглецевих сталей. Запропонований підхід передбачає використання технологічних установок, оснащених оптоволоконними лазерами потужністю 12 кВт, що забезпечують підвищення продуктивності обробки та стабільне формування різку з заданими показниками якості.

2. Розроблено оригінальну конструкцію дискового зонда та експериментальну методику високоточного вимірювання ріжучого тиску, який формується внаслідок гальмування струменя асистуючого газу на поверхні оброблюваної деталі. Запропонована методика дозволяє здійснювати реєстрацію просторового розподілу тиску в поперечному перерізі струменя, сформованого соплом оптичної головки, безпосередньо в умовах, наближених до реального технологічного процесу газолазерного різання.

3. Обґрунтовано та реалізовано комплекс методик і вимірювальних засобів для визначення показників якості бокової поверхні різку. Використання запропонованого підходу забезпечує достовірну оцінку геометричних та мікрогеометричних характеристик поверхні різку, що створює необхідні передумови для встановлення взаємозв'язку між параметрами технологічного процесу лазерного різання та якістю сформованої поверхні.

4. Сукупність розроблених експериментальних засобів і методик створює методичну основу для подальшого дослідження фізичних закономірностей формування ріжучого струменя асистуючого газу та його впливу на ефективність видалення розплавленого металу із зони різання, що є необхідною умовою оптимізації технологічних режимів лазерного різання.

## РОЗДІЛ 3

### ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ТА ТЕОРЕТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ЗАКОНОМІРНОСТЕЙ ФОРМУВАННЯ РІЖУЧОГО ТИСКУ ДОЗВУКОВИМИ ТА НАДЗВУКОВИМИ СТРУМЕНЯМИ АСИСТУЮЧОГО ГАЗУ

#### 3.1 Загальний аналіз газодинамічних ефектів при взаємодії струменів асистуючого газу з поверхнею заготовки

Із ростом вимог до якості та продуктивності у промисловому лазерному різанні (металів, сплавів, тонколистової сталі тощо), роль асистуючого газу зокрема, його тиск, тип газу, конструкція сопла та відстань сопло – заготовка – стає критичною. Асистуючий газ не лише сприяє видаленню розплавленого металу з прорізу, а й значною мірою визначає такі параметри, як швидкість різання, якість кромки, рівень дефектів (задирки, шорсткість, неповний проріз) та повторюваність процесу.

Однак, як показує огляд літератури, динаміка газового струменя – утворення ударних хвиль, розширення або “задушення” (choking), відхилення потоку, розшарування граничного шару – часто не враховується або досліджується в умовах, далеких від реальних технологічних режимів.

Крім того – це особливо важливо для тонкостінних або складних за конфігурацією заготовок – взаємодія газового струменя з розплавленим металом, зоною стінок прорізу, а також вплив конструкції сопла та вертикального зазору на стабільність струменя і тиск, який видаляє розплав, поки погано вивчена. Існуючі моделі часто ігнорують реальні геометрії сопла та нестабільності потоку під дією шоківих та турбулентних структур. Така ситуація ускладнює надійне прогнозування ефективних режимів для досягнення високої якості різання (мікрогеометрія, відхилення від перпендикулярності, бездефектність різання). Виходячи з наведеного систематичне експериментальне та чисельне дослідження впливу ключових газових параметрів (тиск, тип газу, зазор сопло–заготовка, конструкція сопла) на формування газового струменя та поля ріжучого тиску в зоні обробки,

який визначає розподіл тиску в прорізі й умови ефективного видалення розплаву, є важливим підґрунтям підвищення продуктивності, якості і стабільності процесу газолазерного різання.

Газодинаміка надзвукового струменя в зоні лазерного різання є визначальним фактором ефективного видалення розплавленого металу та формування якісної поверхні різу. У промислових установках найчастіше застосовуються стиснене повітря, азот або кисень під підвищеним тиском, що забезпечує утворення нерозширеного або помірно розширеного надзвукового потоку. Правильний вибір режимів подачі газу безпосередньо впливає на стабільність процесу та кінцеві технологічні характеристики поверхні.

Експериментальні дослідження ролі тиску кисню під час різання сталей наведені в роботі [35], де було встановлено існування двох оптимальних діапазонів тиску, що забезпечують високу якість різання. Водночас в роботі [36] виконали чисельне моделювання тривимірного турбулентного кисневого струменя та показали, що всередині різу утворюються зони захоплення домішок, які можуть негативно впливати на процес окиснення та, відповідно, на ефективність різання. Численні варіанти конструкцій сопел досліджувались у роботах [37] та [38], а також інших авторів [39–41], що свідчить про актуальність проблеми оптимізації потоків допоміжного газу. Узагальнений аналіз газодинамічних ефектів був представлений в [42], де зазначено, що наявність диска Маха суттєво знижує різучий тиск на заготовці та може сприяти формуванню застійної зони. Водночас варто зазначити, що систематичних теоретичних досліджень, присвячених впливу положення сопла, його геометрії, внутрішньої конфігурації каналів і манометричного тиску газу на вході в сопло, поки що недостатньо. При виході з сопла надзвуковий струмінь формує складну систему ударно-хвильових структур, зокрема хвиль розширення Прандтля–Мейєра, косих та рефлектованих ударних хвиль. Їхня взаємодія визначає розподіл тиску вздовж осі струменя та формує характерну «алмазну» структуру потоку.

Зміна відстані між соплом і поверхнею заготовки впливає на просторову конфігурацію хвильової системи, що, у свою чергу, змінює умови винесення розплаву з різку та ефективність процесу.

Необхідність встановлення оптимальних параметрів подачі газу пояснюється тим, що надмірні втрати повного тиску при взаємодії падаючої та нормальної ударної хвиль призводять до зменшення ріжучого тиску, зниження масової витрати через проріз та, відповідно, погіршення очищення канавки. Навпаки, режими, за яких косі хвилі відбиваються до зустрічі з нормальною ударною хвилею, зменшують втрати тиску і підвищують стабільність процесу.

Сучасний розвиток промислових технологій лазерної обробки матеріалів характеризується інтенсифікацією вимог до прецизійності, енергоефективності та морфологічної стабільності поверхні розділу. У цьому контексті параметри асистуючого середовища — зокрема робочий тиск, молекулярний склад газу, геометрія сопла та дистанція від сопла до поверхні заготовки (*stand-off \space distance*) – набувають статусу детермінуючих факторів, що визначають термодинамічну стійкість процесу [43, 44].

Асистуючий газ виконує мультифункціональну роль, що виходить за межі механічного видалення рідкої фази з каналу прорізу. Кінетична енергія газового струменя забезпечує подолання сил поверхневого натягу та в'язкого тертя розплаву, що є критичним для формування чистої кромки без налипання грату [45]. При використанні активних газів (наприклад, кисню) ініціюється екзотермічна реакція окиснення, яка генерує додаткову теплову енергію, підвищуючи швидкість обробки, але водночас змінюючи хімічний склад поверхневого шару. Навпаки, застосування інертних газів (азот, аргон) у процесах сублімаційного різання запобігає оксидації, що є принциповим для матеріалів із високою хімічною активністю, таких як титанові сплави або високолеговані сталі [46].

Конструктивні особливості сопла та ламінарність газового потоку безпосередньо корелюють із якісними показниками результуючого прорізу.

Нестабільність тиску або турбулентність струменя призводять до виникнення періодичних мікроструктурних дефектів, збільшення шорсткості ( $Ra$ ,  $Rz$ ) та формування зони термічного впливу (ЗТВ), що знижує втомну міцність готових виробів [47]. Таким чином, оптимізація взаємодії «промінь–газ–матеріал» є ключовою умовою забезпечення повторюваності процесу в умовах високотехнологічного виробництва.

### 3.2 Постановка задачі чисельного моделювання газодинамічних процесів в технологічних умовах газолазерного різання

У даній роботі чисельне моделювання процесів газодинаміки асистуючого надзвукового потоку здійснювалося на основі рівнянь Нав'є–Стокса для стисливого середовища з урахуванням турбулентності шляхом розв'язання осереднених за Рейнольдсом рівнянь (RANS). Адже пряме моделювання турбулентності (DNS) в умовах задач газолазерного різання є практично недосяжним через необхідність застосування надзвичайно дрібних просторових сіток та малих часових кроків, що мають бути меншими характерного часу турбулентних пульсацій. Тому застосовується наближений підхід, у якому миттєві газодинамічні величини представляють у вигляді суми середнього значення та флуктуаційної компоненти.

Осереднене по Рейнольдсу рівняння руху має наступний вигляд:

$$\rho \left( \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \bar{u}_k \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_k} \right) = - \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \mu \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} \right) + \frac{\partial R_{ij}}{\partial x_j}, \quad (3.1)$$

де  $R_{ij} = -\rho \bar{u}'_i \bar{u}'_j = \mu_t \left( \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \mu_t \frac{\partial \bar{u}_k}{\partial x_k} \delta_{ij} - \frac{2}{3} \rho k \delta_{ij}$  – тензор напружень

Рейнольдса.

Для замикання системи RANS-рівнянь застосовано двопараметричну  $k$ – $\epsilon$  модель турбулентності, яка добре зарекомендувала себе при моделюванні течій із великими перепадами тиску, ударними структурами та інтенсивним турбулентним змішуванням, характерним для процесу газолазерного різання.

Модель складається з рівняння для кінетичної енергії турбулентності  $k$  та рівняння для швидкості її дисипації  $\varepsilon$ .

Турбулентна в'язкість визначається залежністю:

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}, \quad (3.2)$$

Вона дозволяє урахувати додатковий перенос імпульсу, обумовлений турбулентними пульсаціями. Молекулярна та турбулентна в'язкість сумуються, забезпечуючи коректний опис як ламінарних, так і турбулентних ділянок потоку. Для підвищеної точності біля стінок використано стандартний набір пристінкових функцій (standard wall functions), рекомендований для великих значень числа Рейнольдса.

Математична модель доповнюється рівнянням енергії та рівняннями стану ідеального газу.

Рівняння збереження енергії:

$$\frac{\delta}{\delta t}(\rho h_{tot}) + \frac{\delta}{\delta x_j}(\rho h_{tot} u_j) = \frac{\delta P}{\delta t} + \frac{\delta}{\delta x_j} \left( u_i \tau_{ij} + \lambda \frac{\delta T}{\delta x_j} \right), \quad (3.3)$$

Рівняння стану ідеального газу:

$$p = \rho RT, \quad (3.4)$$

У чисельному моделюванні асистуючого газу використано повітря та кисень як робочі середовища основні параметри яких наведені в таблиці 3.1. Обидва гази розглядаються як ідеальні, а їхні властивості визначаються стандартними термодинамічними залежностями.

Таблиця 3.1 – Основні параметри газів які були застосовані в розрахунках

Газ	Молярна маса, кг/моль	Газова стала, J/(кг·К)	В'язкість $\mu$ , кг/(м·с)
Повітря	0.02897	287	1.81e-5
Кисень	0.032	259.8	2.0e-5

Застосування моделі ідеального газу в даних режимах характеризується незначним відхиленням від реальної газової поведінки. Такий підхід є обґрунтованим, оскільки забезпечує істотне прискорення обчислювального процесу без відчутної втрати точності при аналізі газодинаміки струменя.

Дискретизація області розрахунку виконувалася з використанням структурованої або гібридної обчислювальної сітки з локальним її згущенням у зоні виходу сопла та формування ударно-хвильової структури. Відповідно до сучасних методик моделювання високошвидкісних потоків, було забезпечено необхідні умови для коректної роботи пристінкових функцій: значення параметра  $y^+$  підтримувалося в межах 30–200. У зонах шоків хвиль та потенційного ядра потоку застосовувалися додаткові локальні згущення, що дозволило підвищити роздільну здатність сітки. Типовий розмір комірок у найбільш критичних областях становив 0,01–0,02 мм, що забезпечило достовірне відтворення дрібномасштабних градієнтів тиску та швидкості.

Запропонована методика дозволяє з достатньою точністю моделювати основні фізичні характеристики надзвукового струменя: процес його розширення, формування ударно-хвильових структур, турбулентне змішування, а також зміну параметрів уздовж осі. Це є важливим для аналізу взаємодії асистуючого газового потоку із зоною різання та подальшої валідації математичної моделі процесу газолазерного різання.

### **3.3 Результати чисельного моделювання та експериментальних досліджень ріжучого тиску з використанням в якості асистуючого газу повітря**

На рис. 3.1,а представлено розподіл тиску для робочого тиску 1 бар. Потік перебуває у трансзвуковому режимі зі швидкістю, близькою до числа Маха  $\approx 1$ ; формування дисків Маха на даному режимі не спостерігається. На рис. 3.1,б наведено розподіл тиску для тиску 3 бар, за якого потік набуває надзвукових властивостей і чітко простежується система ударних хвиль та сформовані диски Маха.

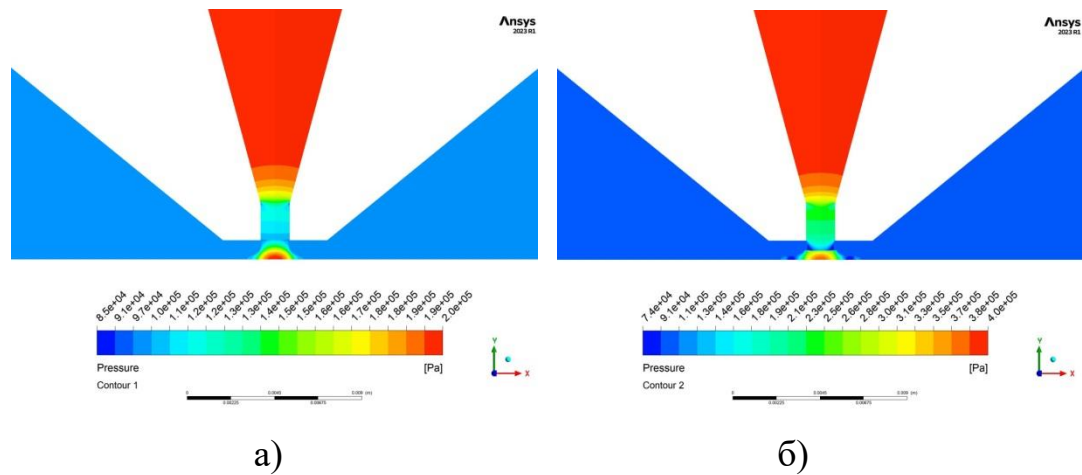


Рисунок 3.1 – Графічне зображення 2D моделі розрахункової карти тиску в перерізі сопла отриманого в ANSYS, тиск 1 Бар, приклад гальмування дозвукового струменя (а); тиск 3 Бар приклад гальмування надзвукового струменя (б)

Для експериментальної верифікації результатів чисельного моделювання було розроблено та реалізовано установку для реєстрування значень тиску в зоні гальмування асистуючого газового струменя (див. п.п 2.2.1). Вона дозволяє з високою точністю локально реєструвати різучий тиск вимірювальним перетворювачем тиску в зоні отвору діаметром 0.3 мм в металічному диску, що моделює заготовку. Дослідження виконувалися на експериментальному верстаті компанії «Араміс», провідного виробника лазерних технологічних установок в Україні. При проведенні досліджень використовувалося найбільш вживане по типу і характеристикам сопло у верстатах компанії «Араміс». Внутрішня структура та розміри сопла наведені на рис. 3.2. В якості асистуючих газів використовувалися повітря та кисень. Повний манометричний тиск всередині сопла задавався та контролювався системою числового програмного керування верстатом і паралельно зовнішнім датчиком для підвищення достовірності вимірів.

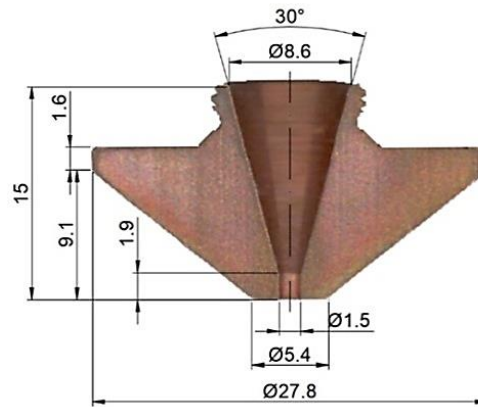


Рисунок 3.2 – Внутрішня структура та розміри одноканального сопла з вихідним діаметром 1,5 мм компанії Thermacut, використаного в експериментах

Як чисельне моделювання так і експериментальні дослідження виконано для повних манометричних тисків 0,5; 1,0; 1,5, 2,0, 2,5 та 3,0 бар та вертикальних зазорів між соплом і поверхнею деталі 0,5 мм; 1,0 мм; 1,5 мм; 2,0 мм; 2,5 мм; 3,0 мм з кроком 0,5 мм.

Результати чисельного моделювання та експериментальних досліджень з використанням в якості асистуючого газу повітря представлені на рис. 3.3.

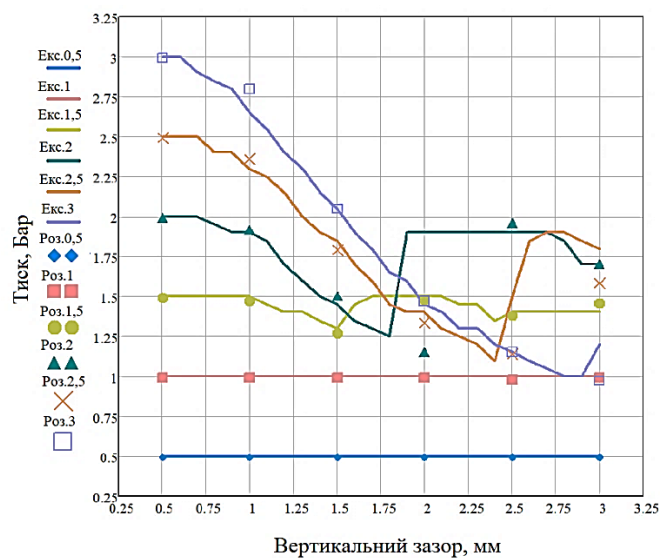


Рисунок 3.3 – Розрахункові та експериментальні графіки розподілу ріжучого тиску при зміні тиску на вході в сопло та вертикальних зазорів між соплом і поверхнею деталі для повітря

Аналіз отриманих результатів показує наступне. Для низьких вхідних тисків (0.5 і 1 бар, синя та рожева криві) осьовий тиск залишається практично постійним при зміні зазору – це видно як майже горизонтальні суцільні лінії. Точки (теорія) для цих випадків також лежать близько до експерименту. Для середніх і високих тисків (1.5–3 бар) при переході до надзвукових струменів спостерігається загальний спад осьового тиску зі збільшенням зазору: при малому зазорі осьовий тиск близький до тиску на вході, при більших – падає значно (до  $\sim 1$ – $1.5$  бар залежно від випадку). У деяких серіях (особливо для 2–3 бар) видно неоднорідну/нелінійну поведінку: локальне падіння, потім збільшення або плато при певних зазорах. Це типово для переходів між режимами (формування/руйнування ударних структур, віддалення/приближення потенційного ядра диску Маха). Теоретичні точки (маркери) загалом повторюють тренд експерименту, але часто спостерігаємо зсув вниз або інша крутизна кривих у залежності від діапазону зазору і тиску. Порівняння розрахунку й експерименту наведено на рис. 3.4.

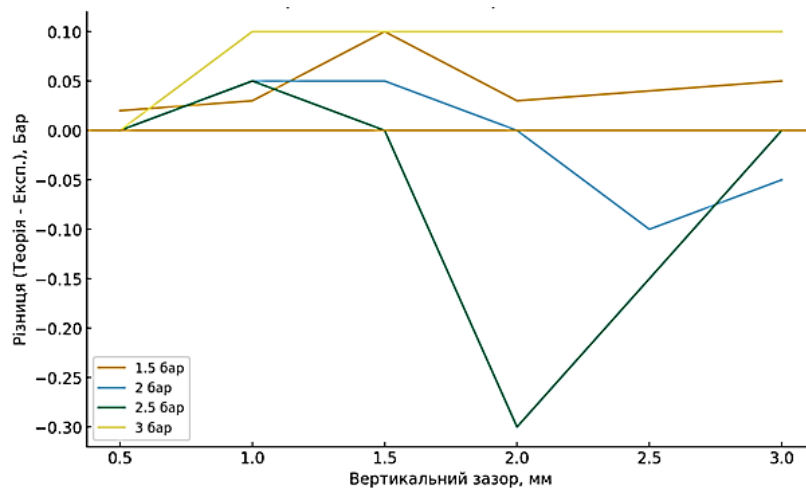


Рисунок 3.4 – Різниця розрахункових та експериментальних значень різного тиску на вісі струменя для повітря

Аналіз графіків різниці (розрахунок – експеримент) показує, що найбільш точна відповідність спостерігається у діапазоні 1.5–2 бар, де відхилення не перевищують 0.1 бар. Для тисків 2.5–3 бар спостерігаються помітніші розходження, особливо при зазорах 1.5–2.5 мм, що очевидно пов'язано з нерівномірною ударною структурою надзвукового струменя та

можливо недостатньою деталізацією моделі в цих режимах. Загальний характер зміни збережено, проте теорія переважно дещо знижує тиск у високobarних режимах.

### 3.4. Результати чисельного моделювання та експериментальних досліджень ріжучого тиску з використанням в якості асистуючого газу кисню

Результати чисельного моделювання та експериментальних досліджень з використанням в якості асистуючого газу кисню представлені на рис. 3.5.

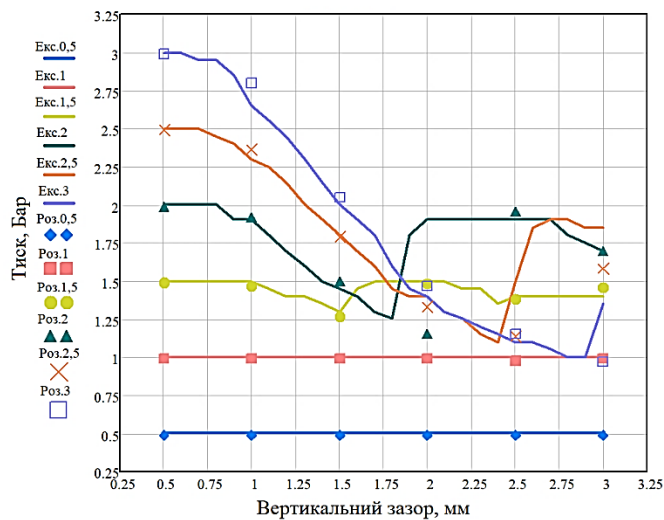


Рисунок 3.5 – Розрахункові та експериментальні графіки розподілу ріжучого тиску при зміні тиску на вході в сопло та вертикальних зазорів між соплом і поверхнею деталі для кисню

Аналіз розподілу тиску гальмування на осі газового струменя кисню показав відмінну збіжність між теоретичною моделлю та експериментом у діапазоні 0.5–2 бар, де відхилення не перевищують 0.04 бар (як і для повітря за низьких вхідних тисків (0.5 і 1 бар) осьовий тиск залишається практично постійним при зміні зазору). При вищих тисках (2.5–3 бар) спостерігається зростання розходження, пов'язане з інтенсивним формуванням ударно-хвильової структури та нерівномірною турбулентною взаємодією струменя із поверхнею. Як і у випадку повітря, теорія коректно відтворює загальну тенденцію спаду тиску зі збільшенням зазору, проте згладжує локальні піки, що присутні в реальному потоці. Модель системно знижує тиск для 2.5–3

бар, що може бути зумовлено спрощенням турбулентних і теплових механізмів у струмені кисню, який має вищу реакційну активність та теплову провідність порівняно з повітрям.

Кількісне порівняння розрахунку й експерименту наведено на рис. 3.6.

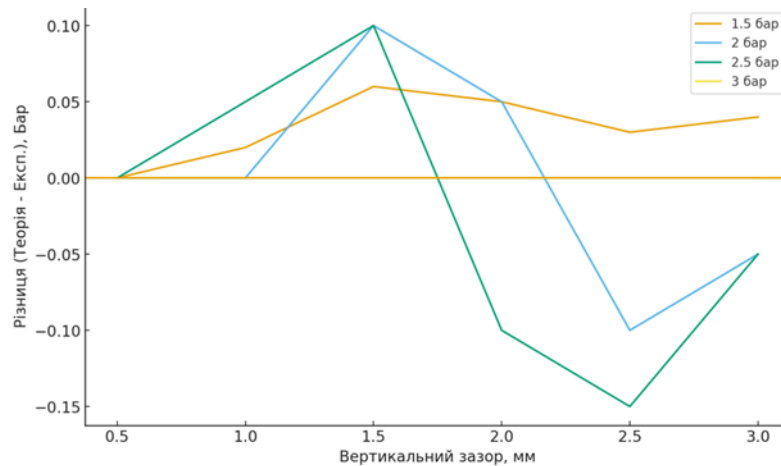


Рисунок 3.6 – Різниця розрахункових та експериментальних значень ріжучого тиску на вісі струменя для кисню.

Основні висновки за графіками різниці (розрахунок – експеримент) полягають у наступному. Тиск 1.5 бар – майже ідеальна узгодженість, різниця не перевищує  $\pm 0.06$  бар. Теоретична модель добре описує поведінку струменя. Тиск 2 бар – збіжність добра при малих зазорах, але погіршується після  $\sim 2$  мм. Модель занижує тиск у режимі розходження потоку ( $-0.1 \dots -0.05$  бар). Тиск 2.5 бар – найбільші відхилення ( $\sim -0.15$  бар на  $h=2-2.5$  мм). Саме тут активні ударні структури та турбулентне розширення, які модель дещо спрощує. Тиск 3 бар – за збільшення дистанції до першого диску Маха тренд майже нульовий, модель стабільно близька до експерименту. Режим стабільніший, хвильові перепади менш впливають на центральний тиск.

### **3.5 Аналіз і порівняння газодинаміки газових струменів за використання в якості асистуючих газів повітря та кисню**

В цілому отримані як розрахункові так і експериментальні результати для повітря і кисню мають відносно незначні відмінності. Кисень має вищу густину та нижчу теплоємність, що робить хвильову структуру більш різкою,

експеримент показує більші піки, а теорія їх не завжди високоточно відтворює. Отримані точні кількісні дані добре корелюють з базовими особливостями газодинаміки надзвукових струменів. Малий зазор завжди гарантує підвищений локальний ріжучий тиск. Це зумовлено близьким розташуванням зони стагнації і прямою взаємодією хвиль стиснення з поверхнею деталі. Середній зазор – наявне різке падіння тиску. Причина – взаємодія косих хвиль з нормальною хвилею стояння, що створює значні втрати повного тиску. Перехід на відносно великі зазори в залежності від тиску на вході в сопло призводить до стабілізації ріжучого тиску на дещо нижчому рівні. На таких відстанях ударні структури частково «розсмоктуються» і потік наближається до квазівільного надзвукового режиму.

Встановлені закономірності важливі при налаштуванні реального процесу лазерного різання, для забезпечення максимальної продуктивності процесу та відповідної якості отриманих деталей.

### **3.6 Кореляційні закономірності впливу ріжучого тиску на параметри якості при різанні низьковуглецевої сталі**

Для визначення впливу зміни вертикального зазору на якість бокової поверхні різку було вирізано 5 зразків зі сталі Ст3 товщиною 5 мм за однакових режимів при зміні лише величини вертикального зазору між соплом та поверхнею листа. Технологічна карта експерименту наведена в табл. 3.2. На рис. 3.7 – фотографії бокових поверхонь різку.

Таблиця 3.2 – Технологічна карта параметрів різання при визначенні впливу зміни вертикального зазору на якість бокової поверхні різку для сталі Ст3 товщиною 5 мм

**ARAMIS**

Тел: +38 (067) 522-42-21; +380

(472) 56-69-59,

Факс: +380 (472) 65-13-61

e-mail: [laser@aramis.com.ua](mailto:laser@aramis.com.ua)

Сайт: [www.aramis.com.ua](http://www.aramis.com.ua)

Випробовування виконував:

Станіслав СЕРЕДІЮК

[Ш]

### **Технологічна карта параметрів різання**

#### **низьковуглецевої сталі Ст 3**

1. **Застосування:** Дослідне різання.
2. **Замовник:** АРАМІС.
3. **Мета:** Мета: визначення впливу висоти сопла на якість бокових поверхонь різку

**4. Обладнання:**

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

5. **Швидкість холостого переміщення:** 170000 [мм/хв]

6. **Матеріал:** сталь Ст3

7. **Допоміжний газ:** кисень [O<sub>2</sub>]

## 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
5	1,5к1	0,5	3,6	8	2	3000	0,32/ 0,43	Rz(V)=14,72/ Ra(V)=3,34 Rz(N)=38,89/ Ra(N)=7,73	0,045
5	1,5к1	1	3,6	8	2	3000	0,4/ 0,51	Rz(V)=19,83/ Ra(V)=4,05 Rz(N)=45,68/ Ra(N)=8,95	0,051
5	1,5к1	1,5	3,6	8	2	3000	0,39/ 0,55	Rz(V)=25,49/ Ra(V)=5,11 Rz(N)=51,63/ Ra(N)=10,57	0,074
5	1,5к1	1,8	3,6	8	2	3000	0,45/ 0,65	Rz(V)=45,49/ Ra(V)=9,11 Rz(N)=61,6/ Ra(N)=12,7	0,1
5	1,5к1	2,5	3,6	8	2	3000	0,41/ 0,55	Rz(V)=21,9/ Ra(V)=4,11 Rz(N)=47,3/ Ra(N)=9,11	0,064

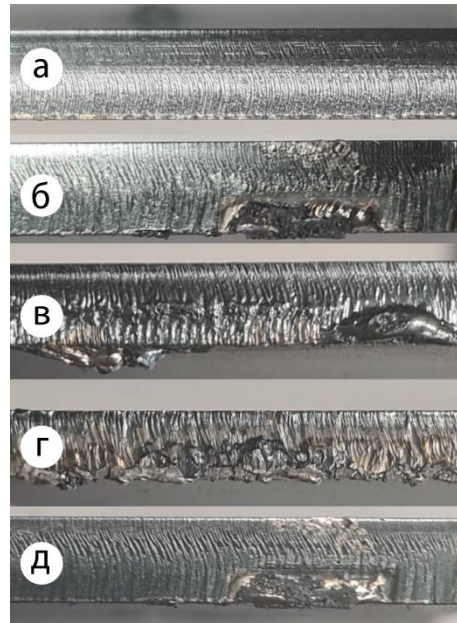


Рисунок 3.7 – Візуальна оцінка якості різки сталі Ст3 товщиною 5 мм при зміні вертикального зазору за постійної швидкості різання та тиску кисню 2 Бар: при зазорі 0,5 мм (а); при зазорі 1 мм (б); при зазорі 1,5 мм (в); при зазорі 1,8 мм (г); при зазорі 2,5 мм (д).

Аналізуючи отримані результати нескладно побачити, що коливання якості різання відповідають характеру коливань ріжучого тиску на вісі струменя при його гальмуванні на поверхні деталі. Зазори зі стабільним тиском забезпечують більш якісні та менш дефектні поверхні отриманих деталей.

### **3.7 Особливості формування ріжучого тиску кисневим газовим струменем за використання двоканальних сопел**

Багато дослідників рекомендують при різанні великих товщин низьковуглецевих сталей в середовищі кисню використовувати двоканальні сопла. Використання двоканальних (двошарових) сопел для газолазерного різання низьковуглецевих сталей зумовлено фізикою процесу окислення металу киснем – це, по суті, кероване горіння. Зовнішній шар газу двоканального сопла допомагає точніше сфокусувати «робочий» кисень у вузьку щілину різки. Це дозволяє отримувати чистий зріз навіть на великих товщинах без зайвого випалювання металу навколо. Окрім того зовнішній кільцевий потік газу виступає фізичним

бар'єром. Він «відсікає» навколишнє повітря, не даючи азоту змішуватися з центральним струменем високочистого кисню (атмосферне повітря містить близько 78% азоту. Навіть потрапляння 1–2% азоту в зону різку різко знижує ефективність окислення). Збільшення діаметра сопла при зростанні товщин – це встановлення балансу між фізикою плавлення та гідродинамікою видування металу. Для прорізання металу товщиною 20 мм потрібно окислити (спалити) значно більшу масу заліза, ніж на 5–10 мм. Більший діаметр дозволяє подати великий об'єм газу на низькій швидкості. Це забезпечує стабільне горіння по всій глибині різку (до самого низу плити). Велике сопло дозволяє працювати на мінімальному тиску (0.4–0.8 бар). Газ заповнює різ м'яко, підтримуючи реакцію горіння без зайвого «роздування» факела на поверхні. Враховуючи наведене виконано експериментальне сканування поля тиску кисню в зоні гальмування газового струменя на поверхні деталі. Струмінь формувався двокавальним соплом з діаметром центрального отвору 1,5 мм (рис. 3.10). Як асистуючий газ застосовувався кисень з чистотою 99,97 (рівень чистоти, який в основному використовують замовники верстатів даного типу).

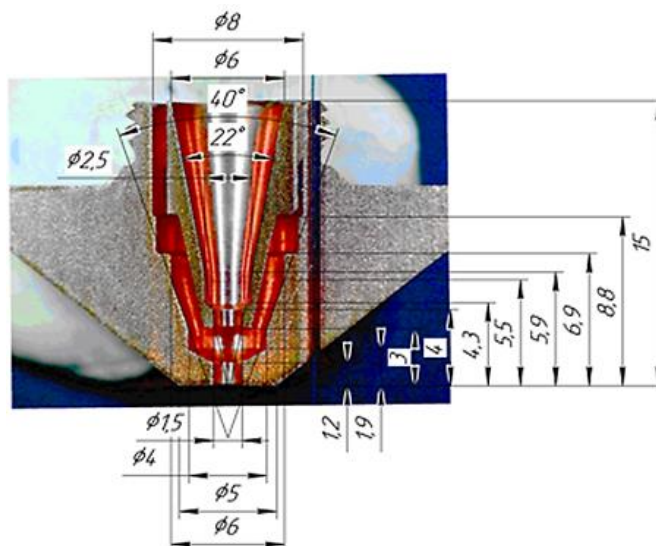


Рисунок 3.8 – Внутрішня структура та розміри двокавального сопла з діаметром центрального отвору 1,5 мм компанії Thermacut

Результати експериментального дослідження розподілу тиску кисню в зоні гальмування газового струменя на поверхні деталі за технологічних умов газолазерного різання наведено на рис. 3.9.

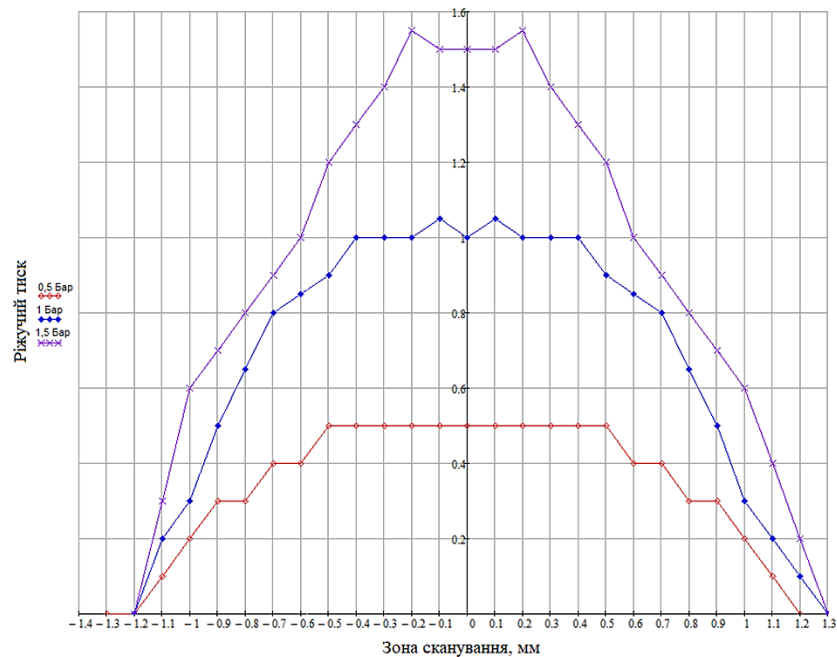


Рисунок 3.9 – Експериментальний розподіл тиску кисню в зоні гальмування газового струменя на поверхні деталі (зазор між соплом і деталлю 0,6 мм) при використанні двоканального сопла з діаметром центрального отвору 1,5 мм.

Експериментальні дані свідчать, що розподіл тиску в зоні взаємодії струменя з поверхнею деталі має виражений осесиметричний характер. Максимальні значення тиску спостерігаються поблизу осі струменя, де формується область стагнації. У цій точці швидкість потоку практично дорівнює нулю, а кінетична енергія газу перетворюється на енергію статичного тиску.

У центральній частині розподілу формується зона відносно сталого тиску, що характеризується наявністю плато. Це свідчить про стабільність ядра струменя, сформованого центральним каналом сопла. Радіальний розмір цієї області визначає ефективну зону дії струменя на розплавлений метал.

У міру віддалення від осі струменя спостерігається поступове зменшення тиску, що відповідає області радіального розтікання газу по поверхні деталі. На периферії струменя відбувається різке зниження тиску до значень, близьких до атмосферного. Тут потік переходить у турбулентний режим розтікання, а його вплив на процес різання значно зменшується.

Такий розподіл є типовим для надзвукових або близьких до надзвукових газових струменів, що гальмуються на твердій поверхні.

Таким чином, у структурі поля тиску можна виділити три характерні області:

1. центральну стагнаційну зону;
2. перехідну зону радіального розтікання;
3. периферійну турбулентну область.

Саме параметри першої та другої зон визначають ефективність видування розплавленого металу та стабільність технологічного процесу. Особливістю використаного сопла є наявність двох каналів, що формують складну структуру газового струменя. Центральний канал створює основне ядро струменя з максимальною швидкістю та імпульсом потоку. Периферійний канал формує додатковий кільцевий потік, який стабілізує структуру струменя та зменшує його турбулентні коливання.

Завдяки такій конструкції досягається розширення області підвищеного тиску у зоні гальмування струменя. Це сприяє більш ефективному видуванню продуктів плавлення та покращує стабільність процесу різання.

Отримані результати підтверджують, що поле тиску в зоні різання визначає:

- ефективність видування шлаку;
- стабільність процесу горіння;
- якість крайки різку.

Максимальний тиск у центрі струменя забезпечує:

- проникнення кисню в різ;
- інтенсифікацію окислювальної реакції.

Водночас ширина плато тиску визначає стабільність процесу різання.

**Безрозмірний аналіз параметрів газового струменя.** Для більш глибокого аналізу структури струменя доцільно використати безрозмірні критерії газової динаміки, зокрема число Рейнольдса та число Маха. Число Рейнольдса характеризує співвідношення інерційних та в'язкісних сил у потоці і визначає режим течії газу.

$$R_e = \frac{\rho v d}{\mu} , \quad (3.5)$$

де  $\rho$  – густина газу;

$v$  – швидкість струменя;

$d$  – характерний діаметр сопла;

$\mu$  – динамічна в'язкість газу.

Для кисневих струменів, що використовуються у процесі лазерного різання, характерні значення числа Рейнольдса становлять  $R_e = (10^5 - 10^6)$ , що відповідає розвиненому турбулентному режиму течії. Турбулентний характер струменя забезпечує інтенсивне перемішування газу та підвищує ефективність видування продуктів плавлення.

Важливим параметром є також число Маха, яке визначає відношення швидкості потоку до швидкості звуку в газі. У цьому випадку струмінь має трансзвуковий або надзвуковий характер, що суттєво впливає на структуру поля тиску.

**Імпульс газового струменя.** Ефективність видування розплавленого металу з різу визначається імпульсом струменя (3.6), який характеризує силу дії потоку на поверхню матеріалу.

$$J = \rho v , \quad (3.6)$$

Де  $J$  – густина імпульсу струменя (Н/м<sup>2</sup>);

$\rho$  – густина газу (кг/м<sup>3</sup>),

$v$  – швидкість газового струменя (м/с).

Для процесу газолазерного різання імпульс струменя визначає:

- інтенсивність видування розплавленого металу з різу;
- стабільність окиснювальної реакції;
- формування нижньої крайки різу;
- ймовірність утворення грата (задирок).

Зі збільшенням швидкості струменя імпульс зростає квадратично, тому навіть невелике підвищення швидкості газу значно підсилює газодинамічну дію струменя.

Враховуючи отримані результати в подальших дослідженнях параметрів газолазерного різання низьковуглецевих сталей на AFX-PRO-12000-1530-LD в середовищі кисню використовувалися двоканальні сопла з різними діаметрами вихідних каналів залежно від товщини металу.

### **3.8 Висновки за розділом 3**

1. Проведено комплексні системні теоретичні та експериментальні дослідження взаємодії дозвукового та надзвукового газових струменів (повітря та кисень), сформованих східним конічним соплом лазерної технологічної установки з поверхнею деталі для обраного ряду тисків на вході в сопло та величин вертикальних зазорів між соплом та деталлю. Чисельне моделювання виконувалося з використанням структурованої або гібридної обчислювальної сітки з локальним її згущенням у зоні виходу сопла та формування ударно-хвильової структури. Експериментальні дослідження проведені з використанням устаткування та методики для високоточної реєстрації величини ріжучого тиску утвореного гальмуванням струменя асистуючого газу.

2. Встановлені чисельні закономірності формування ріжучого тиску на вісі струменя для дозвукових та надзвукових струменів в залежності від тиску на вході в сопло та величини зазору між соплом та деталлю за використання в якості асистуючих газів повітря та кисню.

3. Співставлення розрахункових та експериментальних результатів підтвердило, що рівень точності запропонованої чисельної моделі достатній для ефективних розрахунків газодинамічних процесів взаємодії газових струменів з поверхнею деталі. Модель може успішно використовуватися при налаштуванні реального процесу газолазерного різання, для забезпечення максимальної продуктивності процесу та відповідної якості отриманих деталей.

4. Отримано експериментальне підтвердження високого рівня кореляції якості різку та характеру коливань ріжучого тиску на вісі струменя при його гальмуванні на поверхні деталі.

5. Проведений аналіз експериментальних даних показав, що за використання двоканального сопла розподіл тиску в зоні гальмування кисневого струменя має виражений осесиметричний характер та складається з центральної стагнаційної області, перехідної зони радіального розтікання та периферійної турбулентної області. Двоканальне сопло сприяє формуванню більш стабільного струменя та розширенню області підвищеного тиску, що позитивно впливає на ефективність видування продуктів плавлення.

## РОЗДІЛ 4

### ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ВИЗНАЧЕННЯ ЕФЕКТИВНИХ РЕЖИМІВ ТА АНАЛІТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ ЛАЗЕРНОГО РІЗАННЯ НИЗЬКОВУГЛЕЦЕВИХ СТАЛЕЙ ОПТОВОЛОКОННИМ ЛАЗЕРОМ ПОТУЖНІСТЮ 12 КВТ

#### 4.1 Результати повнофакторного експерименту по визначенню ефективних режимів газолазерного різання низьковуглецевих в середовищі кисню

Процес лазерного різання низьковуглецевих сталей у середовищі кисню є складним теплофізичним та гідродинамічним процесом, що включає взаємодію лазерного випромінювання з матеріалом, плавлення металу, хімічну реакцію окиснення та видалення продуктів плавлення струменем асистуючого газу. На першому етапі відбувається поглинання енергії лазерного випромінювання поверхнею металу. Поглинута енергія призводить до швидкого нагрівання матеріалу до температури плавлення та часткового випаровування. Після утворення розплавленої зони струмінь кисню ініціює екзотермічну реакцію окиснення заліза, яка постачає додаткове тепло в зону різання і дозволяє скорочувати витрати лазерної енергії. Виділення додаткової теплоти внаслідок хімічної реакції сприяє підвищенню ефективності процесу різання порівняно з інертними газами та дозволяє збільшити товщину матеріалу, що підлягає обробці. Важливу роль відіграє також гідродинаміка потоку газу. Струмінь кисню виконує дві основні функції: інтенсифікує реакцію окиснення та видаляє розплавлений метал з зони різання. Ефективність видалення розплаву значною мірою визначає якість сформованої кромки. Із збільшенням товщини матеріалу збільшується об'єм розплавленого металу та тепловідвід у масив деталі. Це призводить до необхідності підвищення потужності лазерного випромінювання та зменшення швидкості переміщення ріжучої головки. В останній час в багатьох промислових підприємствах України виникла гостра потреба якісного газолазерного різання сталей великих товщин (15 мм – 25 мм). Відкликаючись на потреби ринку

провідний виробник лазерних технологічних установок в Україні компанія «Араміс» започаткувала випуск лінійки установок, укомплектованих оптоволоконними лазерами потужністю 12 кВт. При газолазерному різанні низьковуглецевих сталей за використання в якості асистуючого газу кисню таку потужність економічно доцільно використовувати при різанні сталей товщиною більше 15 мм. Однак в рамках конкретного підприємства часто виникає потреба в різанні на даних потужних установках відносно невеликих товщин (від 2 мм і вище). Визначення ефективних режимів різання у всьому стандартному діапазоні товщин є складною багатоетапною задачею, вирішення якої вимагає системного комплексу експериментальних досліджень, аналізу отриманих результатів та їх апроксимації математичними функціями, побудови узагальненої математичної моделі процесу. Такий підхід забезпечує досягнення максимальної швидкості різання за заданої якості поверхонь отриманих деталей, що і обумовлює високу економічну ефективність технології за використання оптоволоконних лазерів з максимальною вихідною потужністю 12 кВт.

Аналізуючи останні дослідження і публікації стало відомо, що в сучасних технологіях лазерного розкрою низьковуглецевих сталей використання в якості асистуючого газу кисню є широко поширеним і складним застосуванням [49, 50]. Екзотермічна реакція кисню із залізом дає високу швидкість різання для низьковуглецевих сталей та збільшує максимальну товщину різання для конкретної максимальної вихідної потужності оптоволоконного лазера. Це робить економічно привабливим використання кисню для товстих листів, але породжує ряд проблем [51, 52]. Кисень, як асистуючий газ, виконує дві основні функції: видаляє рідкий розплав з зони різання та вносить суттєвий вклад в енергетичний баланс процесу завдяки додатковій теплоті реакції окислення. При зниженому тиску рідкий метал не видалятиметься з необхідною швидкістю. Завищений тиск призводить до зростання теплоти горіння та об'ємів розплавленого металу, який не встигатиме повністю видалятися з зони різання. Ефективність видалення розплаву значною мірою визначає якість сформованої кромки [56]. В роботі [50] показано що вагомий вплив на термічну ефективність горіння має чистота кисню.

Із збільшенням товщини матеріалу збільшується об'єм розплавленого металу та тепловідвід у масив деталі. Це призводить до необхідності підвищення потужності лазерного випромінювання та зменшення швидкості переміщення ріжучої головки. На процес кисневого газолазерного різання також суттєво впливають: положення фокусу променя лазера відносно поверхні заготовки; геометричні параметри сопла; висота різання (відслідковуваний зазор); швидкість різання [52, 53]. Поряд зі швидкістю різання якість поверхонь отриманих деталей визначає необхідність подальшої обробки деталей і тим самим безпосередньо впливає на економічну ефективність технології. Критичний огляд публікацій наведений в роботі [56] показав, що найбільш важливими і контрольованими параметрами якості є шорсткість, ширина різку в верхній та нижній площинах заготовки, перпендикулярність (нахил) отриманих поверхонь. Дані параметри повинні жорстко відповідати вимогам стандарту ISO 9013:2017 [52]. Розширений комплекс можливостей обумовлений появою потужних 12 кіловатних лазерів показав необхідність експериментального обґрунтування ефективності використання потужності лазерного променя з точки зору продуктивності процесу та якості отриманих деталей, аналізу та математичної обробки результатів експериментальних досліджень, які можуть бути використані для прогнозування ефективних технологічних режимів лазерної обробки.

Експерименти виконувалися на серійному верстаті компанії «Араміс», провідного виробника лазерних технологічних установок в Україні. Основні інформація про верстат наведена в таблиці 4.1.

Таблиця 4.1 – Моделі основних систем верстата для проведення досліджень

Верстат	AFX-PRO-12000-1530-LD
Модель лазера, Ø оптоволокна	MAX Photonics 12 kWt, оптоволокно 100 мкм
Модель оптичної головки, коліматор	BOCS BLT642, f 200 мм

Оброблялася листовая сталь СтЗсп стандартного ряду товщин (мм) 2; 3; 4; 5; 6; 8; 10; 12; 14; 16; 20; 25. Спираючись на матеріали попередніх досліджень авторів [57, 58] в оптичній головці верстата встановлювалися серійні двоканальні сопла компанії Thermacut з вихідними діаметрами центрального отвору 1,2 мм; 1,5 мм; 1,8 в залежності від товщини листа. Внутрішня структура та розміри сопла з вихідним діаметром 1,5 мм показана на рис. 3.8.

Комплекс досліджень виконувався з використанням методів планування повнофакторного експерименту (ППФЕ). Факторний простір включав вихідну потужність лазера ( $Q$  – кВт), швидкість різання ( $F$  – м/хв), тиск асистуючого газу ( $P$  – бар, кисень з чистотою 99,97%), положення фокусу відносно поверхні листа ( $S$  – ±мм). Відповідно до паспортних даних оптичної головки в фокальній площині діаметр лазерної плями становив 200 мкм. Контрольований зазор між поверхнею деталі та соплом становив 0,6 мм і залишався незмінним в кожному досліді. Значення факторів на трьох рівнях (нульовий, верхній, нижній) задавалися і контролювалися системою числового програмного керування (ЧПК) верстата з точністю, яка відповідає паспортним даним верстата рис. 2.2. Зразки з наявністю ґрату відбраковувалися і не досліджувалися, так як ґрат є очевидною ознакою незадовільного результату досліді. При детальному дослідженні прийнятних зразків, визначалися режими з максимальними швидкостями різання за умови відповідності вимогам стандарту ISO 9013:2017. Відповідно до вимог стандарту у прийнятих зразків контролювалися шорсткість бокових поверхонь (за  $Ra$  та  $Rz$ ), верхня та нижня ширина різі, величина відхилення від перпендикулярності (нахил) поверхні різання. Креслення зразків для досліджень та методики вимірювань ширини різі, шорсткості, відхилення від перпендикулярності наведені в розділі 2.2.1.

Основні результати проведеного комплексу експериментальних досліджень, оформлені як технологічні карти параметрів різання низьковуглецевих сталей в середовищі кисню технологічної інструкції до верстатів моделі AFX-PRO-12000-1530-LD представлені на рис. 4.1. Як видно з таблиць у процесі досліджень

встановлено залежності оптимальної потужності лазерного випромінювання та максимальної швидкості якісного різання від товщини оброблюваного матеріалу.

Товщина металу, мм	High/Low	Діаметр сопла, мм	Потужність, кВт	Положення фокусу відносно торцю сопла	Тиск, бар	Швидкість подачі мм/хв	Ширина різання (верх/низ), мм	Шорсткість поверхні, Rz /Ra	Відхилення від перпендикуля рності, мм
2	Low (№4)	1,2	3300	+7	1	4200	0,43/ 0,51	Rz(S)=8,63...8,7/ Ra(S)=1,98...2	0,04
	High (№6)	1,2	3300	+7	1	5000	0,49/ 0,55	Rz(S)=8,34...8,93/ Ra(S)=1,91...2,08	0,03
3	Low (№1)	1,2	3300	+8	0,8	3700	0,39/ 0,51	Rz(S)=4,15...6,24/ Ra(S)=0,8...1,28	0,06
	High (№5)	1,2	3300	+8	0,8	4200	0,37/ 0,39	Rz(S)=4,8...7,0/ Ra(S)=1,08...1,13	0,01
4	Low (№1)	1,2	3600	+7	0,6	2800	0,55/ 0,65	Rz(V)=4,46...7,2/ Ra(V)=0,94...1,18	0,05
								Rz(S)=7,8...12,2/ Ra(S)=1,72...2,41м	
	High (№5)	1,2	3600	+7	0,6	3200	0,66/ 0,78	Rz(N)=8,0...9,4/ Ra(N)=1,72...2,69	0,06
								Rz(V)=4,46...7,2/ Ra(V)=0,94...1,18	
Rz(S)=7,8...12,2/ Ra(S)=1,72...2,41									
Rz(N)=8,0...9,4/ Ra(N)=1,72...2,69									

Товщина металу, мм	High/Low	Діаметр сопла, 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 перпендикуля рності, мм
5	High (№4)	1,2	3600	+8	0,7	3200	0,34/ 0,47	Rz(N)=7,48...10,5/ Ra(N)=1,35...2,35	0,07
								Rz(S)=10,3...11/ Ra(S)=1,89...1,9	
								Rz(N)=7,48...10,5/ Ra(N)=1,35...2,35	
6	High (№4)	1,2	5400	+7,5	0,8	2800	0,48/ 0,61	Rz(V)=5,5...11,7/ Ra(V)=1,0...1,6	0,07
								Rz(S)=5,7...8,5/ Ra(S)=1,3...1,8	
								Rz(N)=7,5/ Ra(N)=1,7	
8	High (№27)	1,2	5400	+7,5	0,8	2300	0,48/ 0,7	Rz(V)=15...18,6/ Ra(V)=2,43...3,0	0,11
								Rz(S)=25,3...28,3/ Ra(S)=4,72...5,13	
								Rz(N)=29,5...32,6/ Ra(N)=5,0...5,32	
10	High (№2)	1,2	6000	+7,5	0,7	2200	0,53/ 0,81	Rz(V)=29/ Ra(V)=5	0,14
								Rz(S)=23,6...41,4/ Ra(S)=4,9...7,7	
								Rz(N)=24,5...35,8/ Ra(N)=4,2...6,7	

Товщина металу, мм	High/Low	Діаметр сопла, 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
12	High (№2)	1,2	7500	+8	0,7	1900	0,58/ 0,9	Rz(V)=42,8...57/ Ra(V)=7...11	0,15
								Rz(S)=50,7...72,7/ Ra(S)=9,57...16,4	
								Rz(N)=53,8...73/ Ra(N)=13,84...19,85	
14	High (№8)	1,4	8500	+8	0,7	1600	0,6/ 0,8	Rz(V)=48...49/ Ra(V)=9,44...9,49	0,14
								Rz(S)=55,3...54,9/ Ra(S)=9,99...10,88	
								Rz(N)=50,4...57/ Ra(N)=14,44...15,5	
16	High (№1)	1,8	9500	+8,5	0,7	1500	0,7/ 1,2	Rz(V)=40...47,1/ Ra(V)=7,98...8,97	0,28
								Rz(S)=35,7...40,3/ Ra(S)=6,72...8,57	
								Rz(N)=43,5...44,2/ Ra(N)=8,54...8,83	
Товщина металу, мм	High/Low	Діаметр сопла, 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
20	High (№2)	1,8	12000	+9	0,7	1300	0,8/ 0,95	Rz(V)=42,8...57/ Ra(V)=7...11	0,31
								Rz(S)=50,7...72,7/ Ra(S)=9,57...16,4	
								Rz(N)=53,8...73/ Ra(N)=13,84...19,85	
25	High (№8)	1,8	12000	+12	0,7	800	0,9/ 1,5	Rz(V)=48...49/ Ra(V)=14,44...15,49	0,34
								Rz(S)=55,3...55,9/ Ra(S)=13,99...16,88	
								Rz(N)=20,4...27/ Ra(N)=14,44...15,5	

Рисунок 4.1 – Технологічна карта параметрів різання сталі ВСтЗсп технологічної інструкції до верстатів моделі AFX-PRO-12000-1530-LD

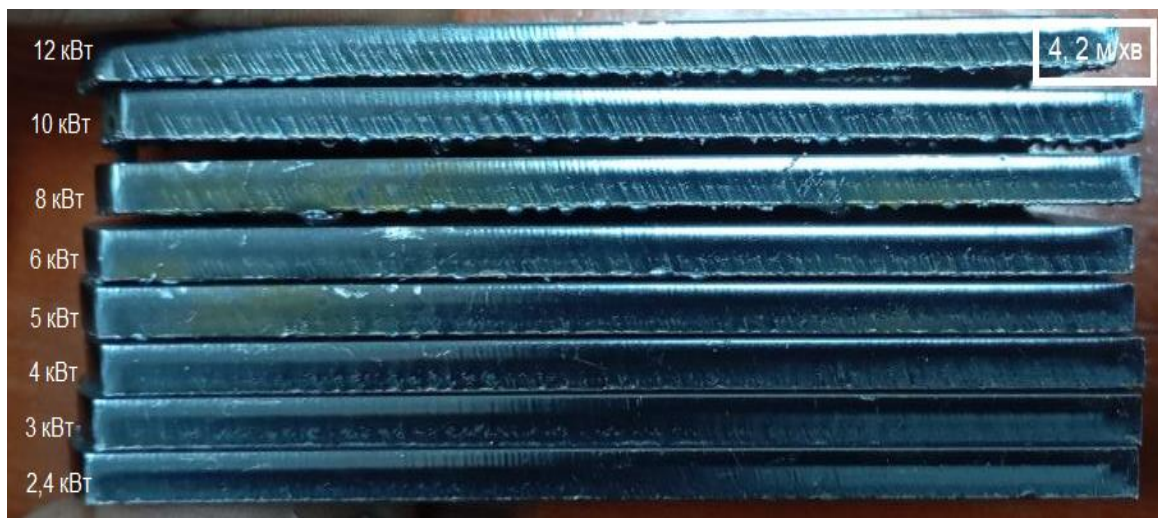


Рисунок 4.2 – Зразки з 3 мм СтЗ, порізані з однією швидкістю на різних потужностях

На рис. 4.2 зображено як збільшення потужності лазера впливає на якість різу в кисні. Ми спостерігаємо збільшення грату яке пояснюється неконтрольованістю процесу горіння в кисні зі збільшенням потужності. На фото зразки товщиною 3 мм.



Рисунок 4.3 – Зразки з 3 мм Ст3, порізані на потужності 12 кВт на різних швидкостях

На рис. 4.3 ми бачимо, що збільшення швидкості на великій потужності не покращує різ, а навпаки погіршує. З цього робимо висновок що порізка в кисні на малих товщинах, до 10 мм, не є рентабельною на великих потужностях лазера, оскільки швидкість різу в кисні залежить не від механічного видалення розплаву під великим тиском, а від процесу горіння кисню в різі. Перехід від прецизійного лазерного розділення до неконтрольованого горіння металу при використанні високої потужності випромінювання (6 кВт і вище) обумовлений порушенням динамічної рівноваги між лазерним нагрівом та екзотермічною реакцією окислення заліза, при якому швидкість виділення теплоти хімічної реакції перевищує здатність матеріалу до тепловідведення та кінетичну охолоджувальну дію газового потоку. Нагрівання будь-якої частини поверхні розплаву вище температури дисоціації спричинить термодинамічні коливання такого типу: а) перегріта поверхня починає дисоціювати на залізо та кисень, б) процес дисоціації споживає енергію і ти самим охолоджує навколишній розплав, в) коли температура поверхні розплаву падає нижче температури дисоціації  $FeO$ , реакція окислення знову запалюється, і перегрів починається знову, перезапускаючи цикл. Ймовірно, що цей цикл буде призводити до порушення процесу різання, що призведе до зниження швидкості різання та погіршення якості. Якби фронт

різання залізо/кисень піддавався впливу ще більшої щільності потужності лазера то температура поверхні підвищилася б до значень, що перевищують температуру дисоціації (яка б не потребувала б підтримки реакції окислення). Поверхня розплаву буде покрита шаром киплячого заліза, і реакція окислення (яка все ще може відбуватися обмеженою мірою в холоднішому, підповерхневому розплаві) перестане бути основним джерелом енергії для процесу різання. В'язкість розплаву буде значно вищою за відсутності (або значного зменшення) окислення, а тиск кисню буде набагато нижчим, ніж той який необхідний для видалення неокисленого розплаву. Таке поєднання факторів може призвести до колапсу процесу різання. У будь-якому випадку процес різання стане набагато менш ефективним просто тому, що будь-який процес, що включає широке кипіння, набагато менш енергоєфективний, ніж той що базується на плавленні [59].

Для запобігання цьому явищу в промислових умовах критично важливим є балансування наступних факторів:

**Діаметр сопла та дистанція** – оптимізація ламінарності потоку для рівномірного окислення.

**Частотна модуляція** – використання імпульсних режимів замість безперервного випромінювання на складних ділянках контуру.

**Зміна потужності** – зниження потужності на кутах та при зменшенні швидкості подачі для запобігання надлишковому вкладу енергії.

#### **4.2 Аналітичні залежності оптимальної потужності лазерного випромінювання та максимальної швидкості різання від товщини матеріалу**

Отримані експериментальні результати були піддані математичній обробці з метою отримання аналітичних залежностей, які можуть бути використані для прогнозування технологічних режимів лазерної обробки (рис. 4.4, рис. 4.5). На графіку (рис. 4.4) представлено залежність оптимальної потужності лазера  $Q$ , що забезпечує максимальну швидкість та якість різання, від товщини листа  $h$ .

Основні особливості експериментальної залежності:

- при малих товщинах (2–5 мм) потужність майже не змінюється ( $\approx 3$ –3.6 кВт);

- при 6–15 мм спостерігається майже лінійне зростання потужності;
- при 20–25 мм відбувається насичення потужності ( $\approx 12$  кВт), що пов'язано з обмеженням потужності джерела та інтенсивним зростанням необхідної потужності, що пов'язано зі збільшенням тепловідведення в матеріал та зростанням об'єму металу, який необхідно перевести у рідкий стан. Для опису всієї області товщин найкраще підходить квадратична апроксимація (4.1).

Як видно з графіка, отримана аналітична залежність (4.1) добре узгоджується з експериментальними точками та може використовуватися для оцінки оптимальної потужності лазерного випромінювання при різанні низьковуглецевих сталей різної товщини.

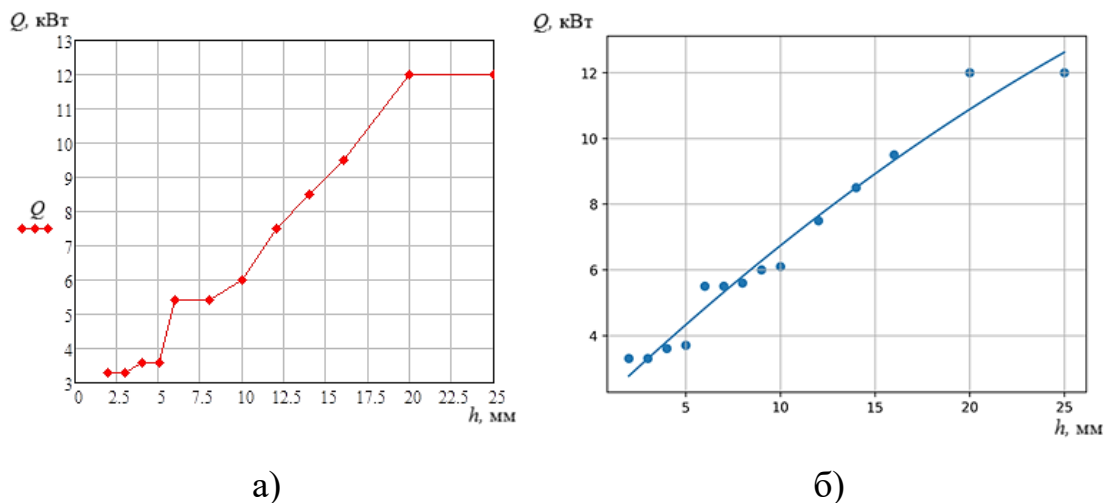


Рисунок 4.4 – Залежність величини оптимальної вихідної потужності ( $Q$ ) оптоволоконного лазера з максимальною вихідною потужністю 12 кВт, що забезпечує максимальну швидкість різання ( $F$ ) листової сталі ВСт3сп за умов отримання параметрів якості, що відповідають вимогам стандарту ISO 9013:2017: а) експериментальні дані; б) отримана в середовищі Mathcad апроксимуюча криві

$$Q(h) = -0,0045h^2 + 0,5500h + 1,638 \quad , \quad (4.1)$$

де  $Q(h)$  – оптимальна для даної товщини потужність лазера, кВт;

$h$  – товщина листа, мм.

Значення коефіцієнту детермінації  $R^2 = 0.970$ .

На графіку рис. 4.5 представлено залежність максимальної швидкості різання від товщини матеріалу, оскільки другим важливим параметром

технологічного процесу є максимальна швидкість різання, яка забезпечує отримання якісної кромки без утворення дефектів.

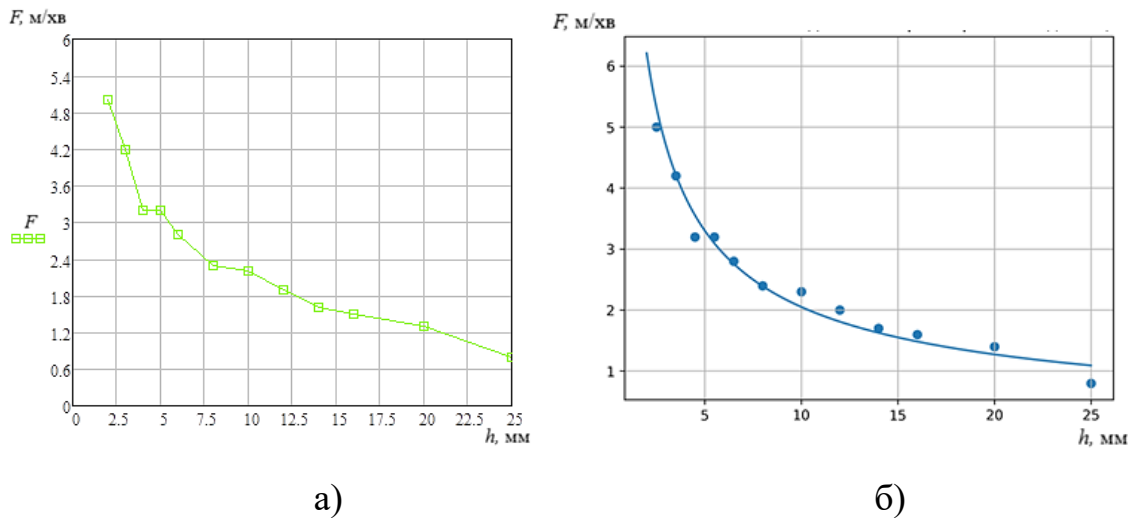


Рисунок 4.5 – Залежність максимальної швидкості різання ( $F$ ) листової сталі ВСтЗсп випромінюванням оптоволоконного лазера з максимальною вихідною потужністю 12 кВт за використання оптимальної вихідної потужності від товщини листа ( $h$ ) за умов отримання параметрів якості, що відповідають вимогам стандарту ISO 9013:2017: а) експериментальні дані; б) отримана в середовищі Mathcad апроксимуюча криві

#### Експериментальна тенденція:

- швидкість різко зменшується при переході від тонких до середніх товщин;
- при великих товщинах зниження стає більш плавним;
- характер кривої відповідає степеневій або гіперболічній залежності.

Найкраща апроксимація отримана степеневою функцією (4.2)

$$F(h) = 10,006 \cdot h^{-0,688} \quad , \quad (4.2)$$

де  $F(h)$  – швидкість різання, м/хв;

$h$  – товщина листа, мм.

Значення коефіцієнту детермінації  $R^2 = 0.971$ .

#### Фізична інтерпретація:

1. Зі збільшенням товщини:
  - збільшується об'єм розплаву;

- погіршується видалення продуктів плавлення киснем;
- зростає тепловідвід у матеріал.

2. Це призводить до степеневого зниження швидкості різання.

#### 4.3 Узагальнена технологічна модель процесу газолазерного різання низьковуглецевих сталей в середовищі кисню

Для узагальненого опису процесу лазерного різання була запропонована технологічна модель, яка пов'язує швидкість різання з потужністю лазерного випромінювання та товщиною матеріалу. Отримана емпірична залежність має вигляд

$$F(Q, h) = 8,693Q^{0.1} \cdot h^{-0.705}, \quad (4.3)$$

Значення коефіцієнту детермінації  $R^2 = 0.974$ . На рис.4.6 представлена 3D-поверхня запропонованої технологічної моделі.

Отримана модель показує:

- плавне зростання швидкості при збільшенні потужності лазера;
- швидке зменшення швидкості при зростанні товщини металу, що відповідає експериментальній фізиці процесу.

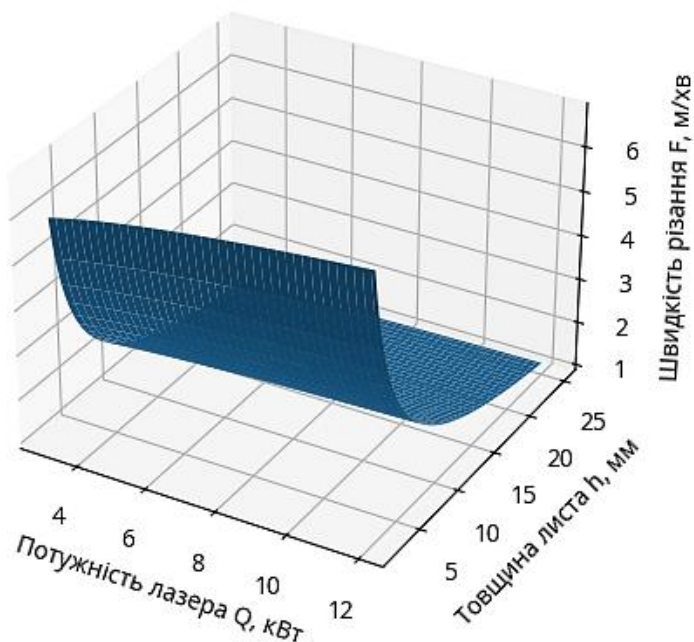


Рисунок 4.6 – 3D-модель швидкості лазерного різання  $F(Q, h)$

Невелике значення показника ступені при  $Q$  ( $a \approx 0,1$ ) означає, що в дослідженому діапазоні товщин швидкість різання слабо залежить від потужності, оскільки потужність вже близька до оптимальної (4.1) і процес обмежується гідродинамікою видалення розплаву.

Показник при  $h$  ( $b \approx -0,705$ ) свідчить про суттєвий вплив товщини, що добре узгоджується з тепловою теорією балансу різання.

На рис. 4.7 представлені результати перевірки працездатності узагальненої технологічної моделі процесу різання.

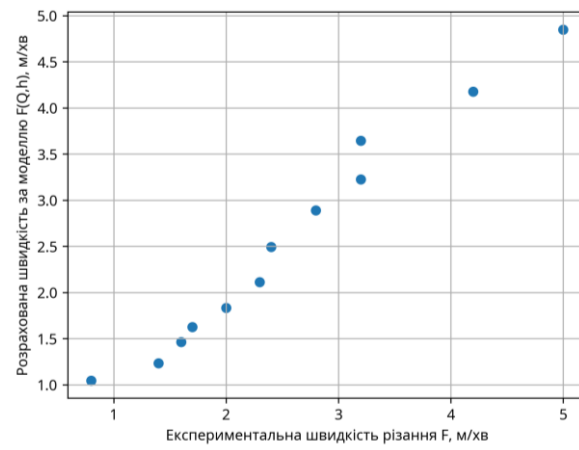


Рисунок 4.7 – Результати перевірки рівня співпадіння розрахованих за моделлю  $F(Q,h)$  та визначених експериментально швидкостей різання

Наведені результати підтверджують задовільну узгодженість розрахункових та експериментальних даних.

#### 4.4 Енергетичний аналіз процесу газолазерного різання низьковуглецевих сталей в середовищі кисню

Запропонований енергетичний аналіз базується на співвідношенні між енергією лазера та корисною енергією, що витрачається на нагрів і плавлення металу. Енергоефективність процесу різання оцінювалася за коефіцієнтом корисної дії при використанні енергії лазерного променя, який розраховувався за рівнянням (4.4).

$$\eta = \frac{\rho \cdot F \cdot b \cdot h \cdot (c \cdot \Delta T + L_m)}{Q} \quad (4.4)$$

де  $\rho$  – густина металу,  $\text{кг/м}^3$ ;

$c$  – питома теплоємність металу, Дж/кг·град;

$\Delta T$  – нагрів до температури плавлення, град;

$L_m$  – питома теплота плавлення, Дж/кг;

$b$  – середня ширина різну, мм;

$F$  – швидкість різання, м/с;

$Q$  – потужність лазера, Вт.

На рис. 4.8 представлено розраховану за (4.4) динаміку зміни енергоефективності процесу різання низьковуглецевих сталей в залежності від товщини листа при використанні оптоволоконного лазера з максимальною вихідною потужністю 12 кВт та кисню в якості асистуючого газу.

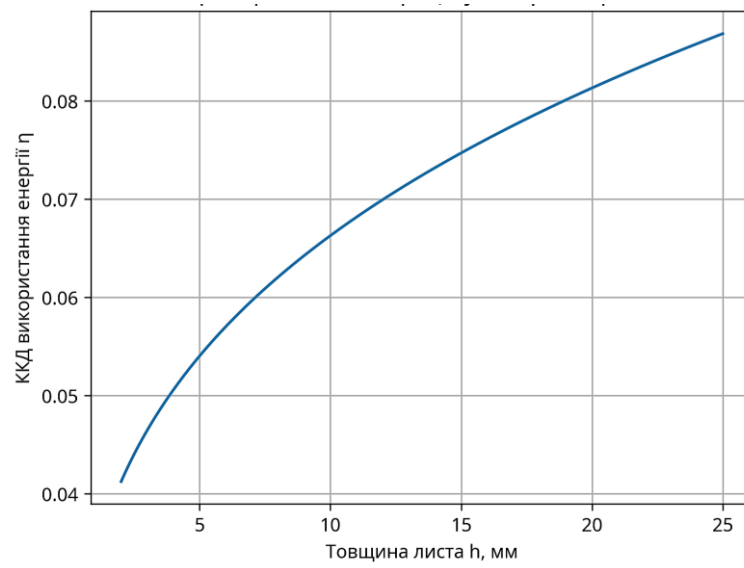


Рисунок 4.8 – Залежність енергоефективності лазерного різання низьковуглецевих сталей від товщини заготовки

Встановлене стрімке зростання енергоефективності лазерного різання зі збільшенням товщини листа має чітке теплофізичне пояснення зумовлене сукупністю факторів: збільшенням масової продуктивності процесу; зменшенням відносних теплових втрат; зростанням ролі екзотермічного окиснення металу; кращою локалізацією тепла в каналі різну; багаторазовим поглинанням випромінювання в глибокому різні.

## 4.5 Висновки за розділом

1. Проведено комплекс експериментальних досліджень процесу газолазерного різання листової низьковуглецевої сталі ВСтЗсп випромінюванням оптоволоконного лазера потужністю 12 кВт у середовищі кисню із застосуванням методів повнофакторного планування експерименту. Визначено раціональні технологічні режими різання для стандартного ряду товщин листового матеріалу, що забезпечують високу продуктивність процесу та параметри якості різки, які відповідають вимогам стандарту ISO 9013:2017.

2. Встановлено експериментальні залежності оптимальної вихідної потужності лазерного випромінювання та максимальної швидкості якісного різання від товщини оброблюваного матеріалу. Отримані аналітичні апроксимаційні залежності дозволяють здійснювати інженерну оцінку раціональних параметрів технологічного процесу лазерного різання.

3. Запропоновано узагальнену технологічну модель процесу лазерного різання, яка встановлює взаємозв'язок між швидкістю різання, потужністю лазерного випромінювання та товщиною матеріалу. Експериментальна перевірка моделі показала задовільну узгодженість розрахункових та експериментальних результатів, що підтверджує можливість її використання для прогнозування технологічних режимів обробки.

4. Виконано енергетичний аналіз процесу різання, який показав зростання енергоефективності лазерного різання низьковуглецевих сталей зі збільшенням товщини заготовки. Встановлена тенденція пояснюється підвищенням масової продуктивності процесу, зменшенням відносних теплових втрат та зростанням ролі екзотермічної реакції окиснення металу киснем.

5. За результатами проведених досліджень розроблено технологічну карту параметрів газолазерного різання сталі ВСтЗсп для верстатів моделі AFX-PRO-12000-1530-LD, яка може бути використана як практична основа для налаштування режимів різання на промислових лазерних установках.

## ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

Сукупність представлених у дисертації результатів теоретичних та експериментальних досліджень складає нове вирішення актуальної науково-технічної задачі, що полягає в отриманні нової точної інформації про закономірності впливу базових факторів процесу газолазерного різання низьковуглецевих сталей в середовищі кисню на продуктивність технології, за умови отримання відповідної поставленим вимогам якості отриманих деталей. Отримані результати підвищують ефективність проектування технологічних режимів різання низьковуглецевих сталей в середовищі кисню випромінюванням оптоволоконного лазера потужністю 12 кВт.

Найбільш вагомими науковими результатами і висновками дисертаційної роботи полягають у наступному:

1. Проведено всебічний аналіз наукових результатів, присвячених дослідженню процесу газолазерного різання низьковуглецевих сталей за допомогою потужних оптоволоконних лазерів. Розглянуто вплив основних параметрів факторного простору на продуктивність і якість процесу газолазерного різання низьковуглецевих сталей. Виконано узагальнену оцінку ролі та значення різних типів асистуючих газів у забезпеченні ефективності процесу та якості результатів газолазерного різання.

2. Розроблено та науково обґрунтовано концепцію проведення комплексу експериментальних досліджень, спрямованих на визначення раціональних параметрів лазерного випромінювання та технологічних режимів процесу газолазерного різання низьковуглецевих сталей. Сукупність розроблених експериментальних засобів і методик створює методичну основу для подальшого дослідження фізичних закономірностей формування ріжучого струменя асистуючого газу та його впливу на ефективність видалення розплавленого металу із зони різання, що є необхідною умовою оптимізації технологічних режимів лазерного різання.

3. В результаті проведеного комплексу системних теоретичних та експериментальних досліджень взаємодії дозвукового та надзвукового газових

струменів (повітря та кисень), сформованих східним кінцевим соплом лазерної технологічної установки з поверхнею деталі для обраного ряду тисків на вході в сопло та величин вертикальних зазорів між соплом та деталлю встановлені чисельні закономірності формування ріжучого тиску на вісі струменя для дозвукових та надзвукових струменів в залежності від тиску на вході в сопло та величини зазору між соплом та деталлю за використання в якості асистуючих газів повітря та кисню.

4. Виконаний теоретичний аналіз отриманих результатів експериментальних досліджень показав, що за використання двоканального сопла розподіл тиску в зоні гальмування кисневого струменя має виражений осесиметричний характер та складається з центральної стагнаційної області, перехідної зони радіального розтікання та периферійної турбулентної області. Двоканальне сопло сприяє формуванню більш стабільного струменя та розширенню області підвищеного тиску, що позитивно впливає на ефективність видування продуктів плавлення.

5. Проведено комплекс експериментальних досліджень процесу газолазерного різання листової низьковуглецевої сталі ВСтЗсп випромінюванням оптоволоконного лазера потужністю 12 кВт у середовищі кисню із застосуванням методів повнофакторного планування експерименту. Визначено раціональні технологічні режими різання для стандартного ряду товщин листового матеріалу, що забезпечують високу продуктивність процесу та параметри якості різку, які відповідають вимогам стандарту ISO 9013:2017. Розроблено технологічну карту параметрів газолазерного різання сталі ВСтЗсп для верстатів моделі AFX-PRO-12000-1530-LD, яка може бути використана як практична основа для налаштування режимів різання на промислових лазерних установках.

6. З використанням методів повнофакторного експерименту встановлено експериментальні залежності оптимальної вихідної потужності лазерного випромінювання та максимальної швидкості якісного різання від товщини оброблюваного матеріалу. Отримані аналітичні апроксимаційні залежності дозволяють здійснювати інженерну оцінку раціональних параметрів

технологічного процесу лазерного різання при використанні оптоволоконного лазера потужністю 12 кВт.

7. Запропоновано узагальнену технологічну модель процесу лазерного різання, яка встановлює взаємозв'язок між швидкістю різання, потужністю лазерного випромінювання та товщиною матеріалу. Експериментальна перевірка моделі показала задовільну узгодженість розрахункових та експериментальних результатів, що підтверджує можливість її використання для прогнозування технологічних режимів обробки низьковуглецевих сталей в середовищі кисню оптоволоконним лазером потужністю 12 кВт.

8. Виконано енергетичний аналіз процесу лазерного різання низьковуглецевих сталей в середовищі кисню оптоволоконним лазером потужністю 12 кВт, який показав зростання енергоефективності процесу зі збільшенням товщини заготовки. Встановлена тенденція пояснюється підвищенням масової продуктивності процесу, зменшенням відносних теплових втрат та зростанням ролі екзотермічної реакції окиснення металу киснем.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. David Bergström. The Absorption of Laser Light by Rough Metal Surfaces. – Luleå, February 2008. DOI: 10.1063/1.2930808
2. Charles L. Cariston. Laser Cutting. – USA, Michigan, 2004.
3. A.M. Orishich et al. /Experimental comparison of laser cutting of steel with fiber and 2 lasers on the basis of minimal roughness – Physics Procedia 56 ( 2014 ) 875 – 884.
4. Gas Jet Effects in Laser Cutting, Laser Machinig Process Section 3.7. – Columbia University, 2009.
5. Prusa JM, Venkitachalam G, Molian PA. Estimation of heat conduction losses in laser cutting. Int. J. Mach. Tools Manuf. 1999; 39:431–458.
6. Powell J, Kaplan AFH. A technical and commercial comparison of fiber laser and CO2 laser cutting. In Proc. 31th International Congress on Applications of Lasers and Electro-Optics, Anaheim, CA, USA; 2012, p. 277-281.
7. Miyamoto I, Maruo H. Mechanism of laser cutting. Welding in the world 1991; 29:283–294.
8. Lothar Morgenthal. Cutting with Fiber Laser. – Fraunhofer IWS Dresden, 23.11. 2005.
9. A.I. Gordienko, A.G. Malikov, M.N. Volochaev, A.D. Panyukhina, Influence of chemical composition and thermomechanical treatment of low-carbon steels on the microstructure and mechanical properties of their laser welded joints, Materials Science and Engineering: A, Volume 839, 2022, 142845, ISSN 0921-5093. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2022.142845>.
10. Парусов, Е. В., Луценко, В. А., Парусов, О. В., Чуйко, І. М., Голубенко, Т. М., & Сівак, Г. І. (2019). Особливості впливу параметрів післядеформаційної термічної обробки та хімічного складу сталі на формування величини дійсного зерна. // Вісник Придніпровської державної академії будівництва та архітектури, (3), 87-97.

11. Oliinyk E. V., Parusov E. V., Chuiko I. M. Teoretychni ta tekhnolohichni zasady znemitsniuiuchoho termomekhanichnoho obroblennia stalevoho prokatu zvariuvalnoho pryznachennia. *Informatsiini tekhnolihii v metalurhii ta mashynobuduvanni – ITMM’2024 : mater. intern. sci. tech. conf., Dnipro, April 10-11, 2024. Dnipro : USUST, – 2024. P. 57–64. [In Ukrainian].* <https://doi.org/10.34185/1991-7848.itmm.2024.01.010>
12. Parusov E. V., Chuiko I. M., Oliinyk E. V., Parusov O. V. Analiz tendentsii ta problem vyrobnytstva prokatu i drotu z nyzkovuhletsevykh Cr-Mo-V stalei zvariuvalnoho pryznachennia. *Fundamentalni ta prykladni problemy chornoï metalurhii. – 2024. Vol. 38. P. 431 – 454. [In Ukrainian].* <https://doi.org/10.52150/2522-9117-2024-38-431-454>
13. Bhadeshia H. K. D. H. Reliability of weld microstructure and property calculations. *Welding Journal. – 2004. Vol. 83. P. 237s – 243s.*
14. Togobitska D., Belkova A. New approach to evaluating the thermodynamic consistency of melts in the "Metal-Slag" system based on interatomic interaction parameters. *Lithuanian Journal of Physics. – 2024. Vol. 64. No. 1. P. 58 – 71.* <https://doi.org/10.3952/physics.2024.64.1.6>
15. Ахім Марле, Мадлен Боркманн, Пір Пфоль. Факторний аналіз різання волоконним лазером наплавленням нержавіючої сталі AISI 304: оцінка впливу на продуктивність процесу, геометрію різку та шорсткість кромки різку. *Матеріали (Базель).* 19 травня 2021 р.; 14(10):2669
16. Шайлендра Кумар, Анікет Джадхав. «Лазерне різання матеріалу AISI 304: експериментальне дослідження шорсткості поверхні» *Досягнення в матеріалознавстві та технологіях обробки, Том 5, 2019 –Випуск 3*
17. Rajaram, N., Sheikh–Ahmad, J. Y., & Cheraghi, H. S. Experimental investigation of CO<sub>2</sub> laser cutting of austenitic stainless steel. *Applied Sciences*, 10(14), 4956, 2020. DOI: 10.3390/app10144956
18. 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

19. 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
20. Ghoreishi, M., & Monfared, V. Cutting stainless steel with disc and CO<sub>2</sub> lasers. *Journal of Laser Applications*, 26(4), 042006, 2014. DOI: 10.2351/1.4895563
21. Laser Cutting: A Review on the Influence of Assist Gas. *Materials*, 12(1), 157, 2019. DOI: 10.3390/ma12010157
22. Ghani, J. A., & Ghazali, M. J. Optimization of CO<sub>2</sub> 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
23. 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
24. 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
25. Fomin, V. M., Golyshev, A. A., Orishich, A. M., & Shulyat'ev, V. B. Energy balance in high-quality cutting of steel by fiber and CO<sub>2</sub> lasers. *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*, 58, 371–378, 2017. DOI: 10.1134/S0021894417020237
26. 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
27. 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
28. 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
29. Керівництво лазерного верстата для різання металів AFX-PRO. – Фірма ARAMIS.

30. 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

31. 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 – №79–80 – С.70–78

32. В.І. Осипенко, О.П. Плахотній, 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

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

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

35. O'Neill, W., and Steen, W. M., 1995, "A Three-Dimensional Analysis of Gas

36. Entrainment Operating During the Laser-Cutting Process," *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 28, pp. 12–18.

37. Chryssolouris, G., and Choi, W. C., 1989, "Gas Jet Effects on Laser Cutting", *CO2 Lasers and Applications*, SPIE, 1042, pp. 86-96.

38. Brandt, A. D., and Settles, G. S., 1997, "Effect of Nozzle Orientation on the Gas Dynamics of Inert-Gas Laser Cutting of Mild Steel ", *J. Laser Appl.*, 9, стор. 269-277.

39. LaRocca, A. V., et al., 1994, "Nozzle Design to Control Fluid-Dynamic Effects in Laser Cutting," *SPIE*, 2207, pp. 169–180.

40. O'Neill, W., et al., "The Dynamics Behavior of Gas Jets in Laser Cutting," *Proc. ICALEO'92*, pp. 449–458.

41. Man, H. C., et al., 1997, ‘‘Design of Supersonic Nozzle for Laser Cutting With Pressure Gas,’’ Proc. ICALEO’97, Sec. B, pp. 118–127.
42. Masuda, W., et al., 1994, ‘‘Aerodynamic Characteristics of Underexpanded Coaxial Impinging Jets,’’ JSME Int. J., 37, No. 4, pp. 769–775.
43. Steen, W. M., & Mazumder, J. (2010). *Laser Material Processing*. Springer Science & Business Media. Springer-Verlag London 2010 <https://doi.org/10.1007/978-1-84996-062-5>
44. John Powell , CO2 Laser Cutting. Springer-Verlag London Limited 1998 <https://doi.org/10.1007/978-1-4471-1279-2>
45. Wandera, C., & Kujanpää, V. (2010). Characterization of the melt flow dynamics in laser cutting. Journal of Laser Applications. <https://doi.org/10.2351/1.3455824>
46. Schuöcker, D. (2013). Handbook of the EuroLaser Academy. Theory and Practice of Laser Technology.
47. Caiazzo, F., et al. (2005). Laser cutting of different polymeric plastics and metals. Journal of Materials Processing Technology.
48. 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.
49. Badoniya P (2018) CO<sub>2</sub> laser cutting of different materials. A review. Int Res J Eng Technol (February):1–12 [Online]. Available: <http://www.irjet.net>. Accessed 22 Oct 2022.
50. Liu Y, Zhang S, Zhao Y, Ren Z (2022) Experiments on the kerf quality characteristic of mild steel while cutting with a high-power fiber laser. Opt Laser Technol 154(June):108332. <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2022.108332>.
51. Naresh, Khatak P (2022) Laser cutting technique: a literature review. Mater Today Proc 56(5 SI):2484–2489. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.08.250>.
52. 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.

53. Steen W, Mazumder J (2010) Laser Cutting, Drilling and Piercing. In: Laser Material Processing. Springer, London. [https://doi.org/10.1007/978-1-84996-062-5\\_4](https://doi.org/10.1007/978-1-84996-062-5_4) .

54. Bäuerle D (ed) (2013) Laser Processing and Diagnostics: Proceedings of an International Conference, University of Linz, Austria, Vol 39. Springer Science & Business Media, 15–19.

55. Dutta Majumdar J, Manna I (2003) Laser processing of materials. *Sadhana* 28:495–562. <https://doi.org/10.1007/BF02706446> .

56. Muhammad Alsaadawy, Montasser Dewidar, Ahmed Said, Ibrahim Maher, Taher A. Shehabeldeen (2024) 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* (2024) 130:1039–1074. <https://doi.org/10.1007/s00170-023-12768-1>.

57. V. I. Osypenko, O. P. Plakhotnyi, S. P. Serediuk, M. R. Pruss, O. V. Timchenko, (2023) The influence patterns of nozzle design and technological parameters of gas-assisted laser cutting on the stagnant pressure of assisting gas. *Bulletin of Cherkasy State Technological University*, 28/3, 156-167. <http://vtn.chdtu.edu.ua/article/view/288972>

58. 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

59. Powell, J., et al. "Laser–oxygen cutting of mild steel: The thermodynamics of the oxidation reaction." *Journal of Physics D: Applied Physics*. DOI: 10.1088/0022-3727/42/1/015504

60. Закономірності формування ріжучого тиску на вісі струменя асистуючого газу при газолазерному різанні / С.П. Середюк, В.В. Чудов // Міжвузівський збірник «НАУКОВІ НОТАТКИ». Луцьк, 84/2025 Ст 233–240. DOI

10.36910/775.24153966.2025.84.37

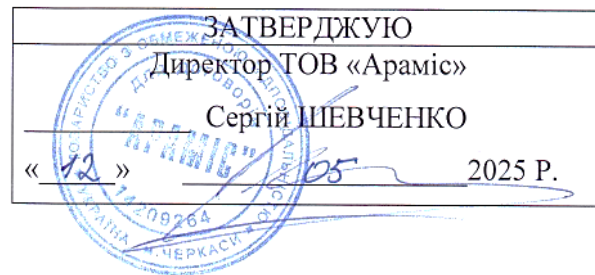
[https://eforum.lntu.edu.ua/index.php/naukovi\\_notatky/en/article/view/2138/1954](https://eforum.lntu.edu.ua/index.php/naukovi_notatky/en/article/view/2138/1954)

61. В.І. Осипенко. Експериментальне визначення ефективних режимів та аналітичне моделювання процесу лазерного різання низьковуглецевих сталей оптоволоконним лазером потужністю 12 кВт / В.І. Осипенко, С.П. Середюк // Міжвузівський збірник «НАУКОВІ НОТАТКИ». Луцьк, 85/2026 Ст 145–153. DOI 10.36910/775.24153966.2026.85.19

[https://eforum.lntu.edu.ua/index.php/naukovi\\_notatky/en/article/view/2173](https://eforum.lntu.edu.ua/index.php/naukovi_notatky/en/article/view/2173)

## 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 «Арамiс», 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 «Арамiс»:  
 Керівник виробництва деталей  
 та обробки металів

Олег МАРІУХ

Представник Черкаського технологічного  
 університету:

Професор, д.т.н.

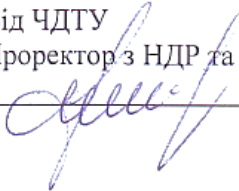
Василь ОСИПЕНКО



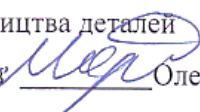
Використання отриманих результатів дозволяє зробити більш точним та ефективним проектування процесів газолазерного різання максимальної продуктивності, за рахунок точного прогнозування величини ріжучого тиску, який створить газовий струмінь обраного сопла в конкретних технологічних умовах. Виробники, 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 розроблена технологія впливає на покращення технічних та економічних критеріїв, що впливають на вибір відповідної лазерної системи для конкретного лазерного різання.

охорона навколишнього середовища, надр, поліпшення умов праці, вдосконалення структури управління, спеціальні призначення та ін.

Від ЧДТУ  
Проректор з НДР та МЗ

  
Еміль ФАУРЕ

Від ТОВ «Араміс»

Керівник виробництва деталей  
та обробки металів  Олег МАРЮХ

Керівник

  
Василь ОСИПЕНКО

## Додаток В

ЗАТВЕРДЖУЮ:



Ректор ЧДТУ

Олег ГРИГОР

Директор ТОВ «Арамис»



Сергій ЦЕВЧЕНКО

### А К Т

#### впровадження результатів науково-дослідної роботи

Даним актом стверджується, що результати НДР:

**«Обґрунтування ефективних режимів газолазерного різання низьковуглецевих сталей за використання різних типів асистуючих газів»**, яка виконана Черкаським державним технологічним університетом (ЧДТУ), в період з 08.12.2025 по 29.12. 2025, згідно з договором №3/12//2025 від 08.12.2025 між Черкаським державним технологічним університетом та ТОВ «Арамис»,

Розроблені методики досліджень та проведена серія експериментів які дозволили вперше встановити діапазон збалансованих параметрів лазерного променю та лазерного процесу при різанні листової сталі ВСтЗсп стандартного ряду товщин випромінюванням оптоволоконного лазера потужністю 12000 Вт в середовищі кисню. Встановлені режими забезпечують високу продуктивність та кількісний контроль за параметрами якості різку, які відповідають вимогам стандарту ISO 9013:2017

(назва результату НДР)

Керівник: д.т.н., професор Осипенко Василь Іванович

впроваджені

ТОВ «Арамис»

назва підприємства, де здійснювалось впровадження

#### 1. Вид впроваджених робіт

Отримані результати покладені в основу розділу технологічної інструкції до серійних верстатів моделі AFX-PRO-12000-1530-LD. Проведена експериментальна верифікація підтвердила добру відтворюваність наданих режимів. Відхилення параметрів якості від табличних значень не перевищувало 5%.

технології, сорти, породи, лінії, гібриди, препарати, машини тощо

#### 2. Масштаби провадження

Розроблені технологічні рекомендації з отримання параметрів режимів різання максимальної продуктивності при заданій якості поверхонь різку використовуються в новій лінійці лазерних технологічних комплексів FX-PRO-12000-1530LD, які комплектуються ітербієвим волоконним зером з вихідною потужністю 12000W.

площа, поголів'я, кількість вузлів, комплексів машин тощо

#### 3. Новизна результатів науково-дослідної роботи

Вперше встановлено діапазон збалансованих параметрів лазерного променю та лазерного процесу при різанні листової сталі ВСтЗсп стандартного ряду товщин випромінюванням оптоволоконного лазера потужністю 12000 Вт в середовищі кисню.

#### 4. Річний економічний ефект у грошовому виразі (із зазначенням цін якого року)

Річний економічний ефект в цінах 2025 року становить 85 700 грн

## 5. Соціальний і науково-технічний ефект

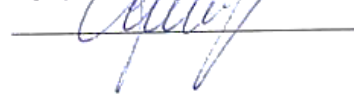
Отримані результати покладені в основу розділу технологічної інструкції до серійних верстатів моделі AFX-PRO-12000-1530-LD. Використання отриманих результатів дозволяє зробити більш точним та ефективним проєктування процесів газолазерного різання максимальної продуктивності. Виробники, які використовують 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 розроблена технологія впливає на покращення технічних та економічних критеріїв, що впливають на вибір відповідної лазерної системи для конкретного лазерного різання.

охорона навколишнього середовища, надр, поліпшення умов праці, вдосконалення структури управління, спеціальні призначення та ін.

### ПОГОДЖЕНО:

Від ЧДТУ

Проректор з НДР та МЗ



Еміль ФАУРЕ

Від ТОВ «Араміс»

Керівник виробництва, деталей  
та обробки металів



Олег МАРЮХ

Керівник



Василь ОСИПЕНКО