

С.П. Середюк, В.В. Чудов

Черкаський державний технологічний університет

ЗАКОНОМІРНОСТІ ФОРМУВАННЯ РІЖУЧОГО ТИСКУ НА ВІСІ СТРУМЕНЯ АСИСТУЮЧОГО ГАЗУ ПРИ ГАЗОЛАЗЕРНОМУ РІЗАННІ

Наведено результати теоретичних та експериментальних досліджень ріжучого тиску асистуючого газу, сформованого дозвуковими та надзвуковими струменями при їх гальмуванні на поверхні деталі при газолазерному різанні. Отримані закономірності впливу типу газу (повітря/кисень), тиску на вході в сопло, зазору між соплом та деталлю на структуру газового струменя, та ефективність видалення розплаву. Експериментально підтверджено високу точність запропонованої чисельної моделі. Показано високий рівень кореляції між якістю різку та характером коливань ріжучого тиску на вісі струменя.

Ключові слова: оптоволоконний лазер, чисельна модель, газолазерне різання, тиск асистуючого газу, сопло, газовий струмінь, ударно-хвильова структура

S.P. Seredyuk, V.V. Chudov

REGULARITIES OF FORMING CUTTING PRESSURE ON THE AXIS OF THE ASSISTING GAS JET DURING GAS LASER CUTTING

The results of theoretical and experimental studies of the cutting pressure of the assist gas formed by subsonic and supersonic jets when they are decelerated on the surface of a part during gas laser cutting are presented. The patterns of influence of the gas type (air/oxygen), pressure at the nozzle inlet, gap between the nozzle and the part on the gas jet structure, and the efficiency of melt removal have been established. The obtained accurate quantitative data are in good agreement with the basic features of gas dynamics of supersonic jets. The high accuracy of the proposed numerical model has been experimentally confirmed. A high level of correlation between the quality of the cut and the nature of the cutting pressure fluctuations on the jet axis has been demonstrated.

Keywords: fiber laser, numerical model, gas-assisted laser cutting, assist gas pressure, nozzle, gas jet, shock wave structure

Постановка проблеми.

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 (задири, 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.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Газодинаміка надзвукового струменя в зоні лазерного різання є визначальним фактором ефективного видалення розплавленого металу та формування якісної поверхні різку. 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 роботах Іварсона та співавт. [1], де було встановлено існування двох оптимальних діапазонів тиску, що забезпечують високу якість різання. Водночас О'Ніл і Стін [2] виконали чисельне моделювання

тривимірному турбулентному кисневому струменю та показали, що всередині різку утворюються зони захоплення домішок, які можуть негативно впливати на процес окиснення та, відповідно, на ефективність різання. Численні варіанти конструкцій сопел досліджувались у роботах Chrystolouris і Choi [3], Brandt і Settles [4], а також інших авторів [5–8], що свідчить про актуальність проблеми оптимізації потоків допоміжного газу. Узагальнений аналіз газодинамічних ефектів був представлений Fieret та ін. [9], де зазначено, що наявність диска Маха суттєво знижує ріжучий 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.

Метою статті є встановлення закономірностей взаємодії надзвукових газових струменів з поверхнею заготовки за реальних технологічних умов газолазерного різання шляхом чисельного моделювання процесу, експериментальної верифікації результатів моделювання та використання отриманих закономірностей при проектуванні ефективних режимів газолазерного різання.

Обладнання та методи дослідження. Методика чисельного моделювання процесів газодинаміки. 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:

$$\rho \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \bar{u}_k \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_k} \right) = -\frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mu \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} \right) + \frac{\partial R_{ij}}{\partial x_j}, \quad (1)$$

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

Для замикання системи RANS-рівнянь застосовано двопараметричну k - ϵ 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 ϵ .

Турбулентна в'язкість визначається залежністю:

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

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:

$$\frac{\delta}{\delta t}(\rho h_{tot}) + \frac{\delta}{\delta x_j}(\rho h_{tot} u_j) = \frac{\delta P}{\delta t} + \frac{\delta}{\delta x_j} \left(u_i \tau_{ij} + \lambda \frac{\delta T}{\delta x_j} \right) \quad (3)$$

Рівняння стану ідеального газу:

$$p = \rho RT \quad (4)$$

У чисельному моделюванні асистуючого газу використано повітря та кисень як робочі середовища основні параметри яких наведені в таблиці 1. Обидва гази розглядаються як ідеальні, а їхні властивості визначаються стандартними термодинамічними залежностями.

Табл. 1

Основні параметри газів які були застосовані в розрахунках

Газ	Молярна маса, кг/моль	Газова стала, J/(кг·K)	В'язкість μ , 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 шоківих 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.

На рис. 1,а представлено розподіл тиску для робочого тиску 1 бар. Потік перебуває у трансзвуковому режимі зі швидкістю, близькою до числа Маха ≈ 1 ; формування дисків Маха на даному режимі не спостерігається. На рис. 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.

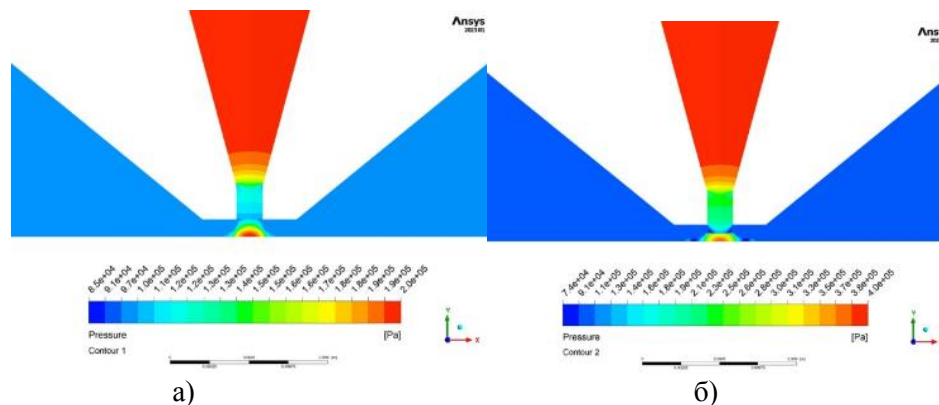


Рис. 1. Графічне зображення 2D моделі розрахункової карти тиску в перерізі сопла отриманого в ANSYS, тиск 1 Бар, приклад гальмування дозвукового струменя (а); тиск 3 Бар приклад гальмування надзвукового струменя (б)

Для експериментальної верифікації результатів чисельного моделювання було розроблено та реалізовано установку для реєстрації значень тиску в зоні гальмування асистуючого газового струменя [10]. Вона дозволяє з високою точністю локально реєструвати ріжучий тиск вимірювальним перетворювачем тиску в зоні отвору діаметром 0.3 мм в металічному диску, що моделює заготовку. Дослідження виконувалися на експериментальному верстаті компанії «Арамис», провідного виробника лазерних технологічних установок в Україні. В початковий момент співвісність вісей дискового зонду та сопла, вмонтованого в оптичну головку верстата, встановлювалася за допомогою юстувального лазера та відео-оптичної системи верстата (рис 2 а).

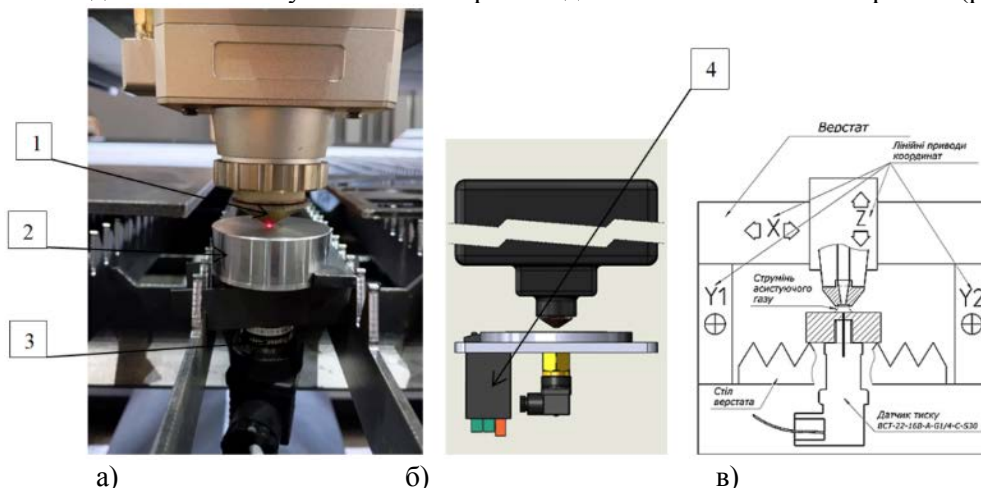


Рис. 2. Загальний вигляд дискового зонда з вимірювальним перетворювачем тиску (п'єзорезистивний датчик тиску моделі ВСТ110) при виставленні співвісності сопла оптичної головки верстата та приймального отвору дискового зонда (а); 3d модель дискового зонда (б); конструктивна схема установки для проведення досліджень (в) [10]

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

На рис. 2, б наведена 3d модель дискового зонда. Конструктивна схема установки для проведення досліджень полів ріжучого тиску асистуючого газу в робочій зоні верстата наведена на рис. 1, в. Блок відслідковування зазору верстата визначає координату вісі Z при торканні торцем сопла 1 поверхні дискового зонда 2, приймаючи її за нульову координату відліку (рис. 1, а). Всі три лінійних приводи координат експериментального верстата забезпечували похибку позиціювання, що не перевищувала $\pm 0,005$ мм. В якості вимірювального перетворювача дискового зонда було використано п'єзорезистивний датчик тиску моделі ВСТ110. Технічні характеристики датчика наведено в таблиці 2.

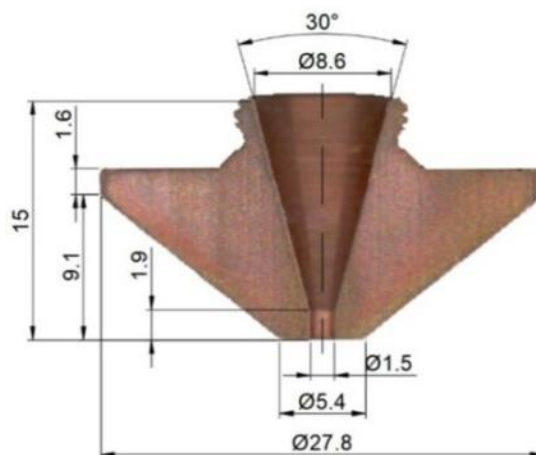


Рис. 3. Внутрішня структура та розміри одноканального сопла з вихідним діаметром 1,5 мм компанії Thermacut, використаного в експериментах

При проведенні досліджень використовувалося найбільш вживане по типу і характеристикам сопло у верстатах компанії «Арамис». Внутрішня структура та розміри сопла наведені на рис. 3. 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.

Табл. 2

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

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 досліджень. Результати чисельного моделювання та експериментальних досліджень з використанням в якості асистуючого газу повітря представлені на рис. 4.

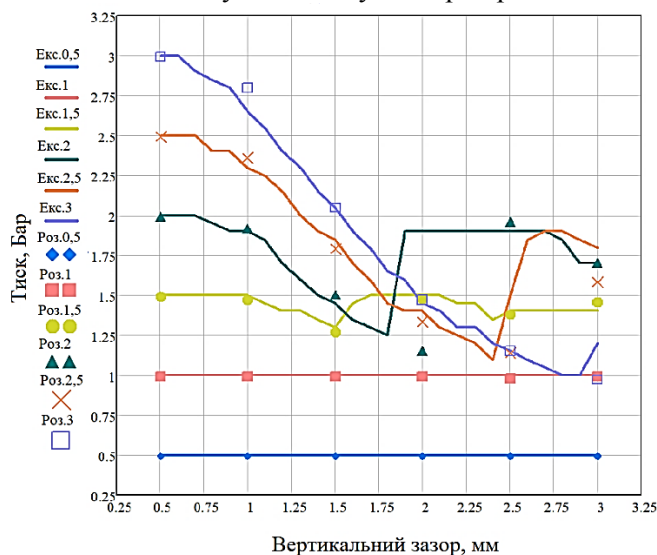


Рис. 4. Розрахункові та експериментальні графіки розподілу ріжучого тиску при зміні тиску на вході в сопло та вертикальних зазорів між соплом і поверхнею деталі для повітря

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 ~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. 5.

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

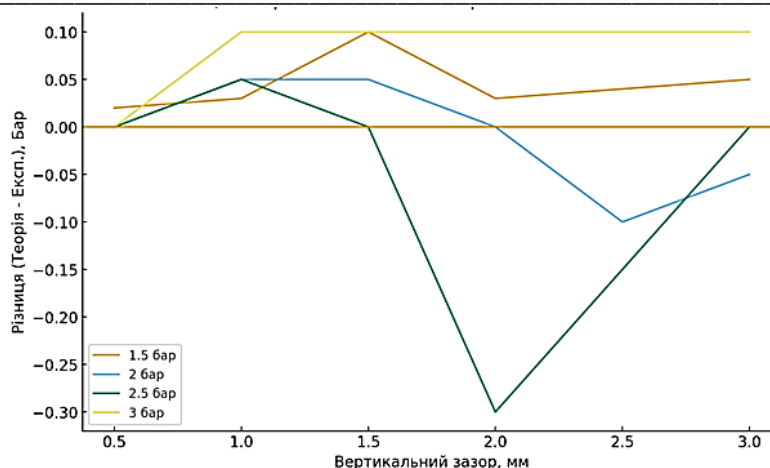


Рис. 5. Різниця розрахункових та експериментальних значень ріжучого тиску на вісі струменя для повітря

Результати чисельного моделювання та експериментальних досліджень з використанням в якості асистуючого газу кисню представлені на рис. 6.

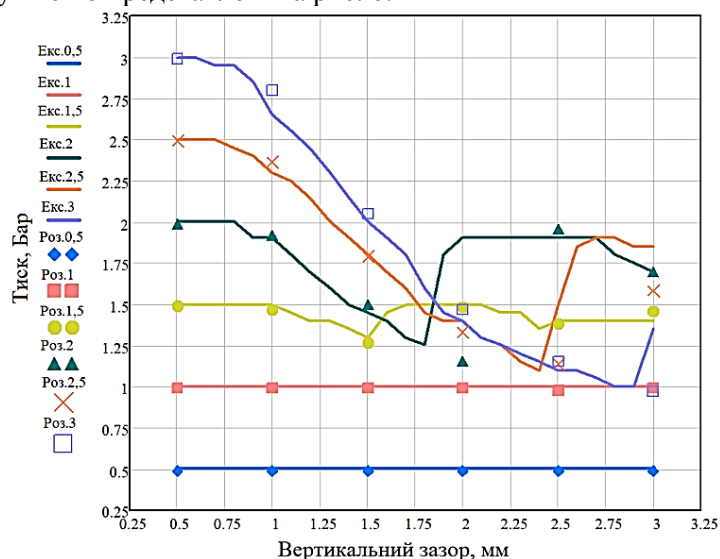


Рис. 6. Розрахункові та експериментальні графіки розподілу ріжучого тиску при зміні тиску на вході в сопло та вертикальних зазорів між соплом і поверхнею деталі для кисню

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. 7.

Основні висновки за графіками різниці (розрахунок – експеримент) полягають у наступному. Тиск 1.5 бар – майже ідеальна узгодженість, різниця не перевищує ± 0.06 бар. Теоретична модель добре описує поведінку струменя. Тиск 2 бар – збіжність добра при малих зазорах, але погіршується після ~ 2 мм. Модель занижує тиск у режимі розходження потоку ($-0.1 \dots -0.05$ бар). Тиск 2.5 бар – найбільші відхилення (~ -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.

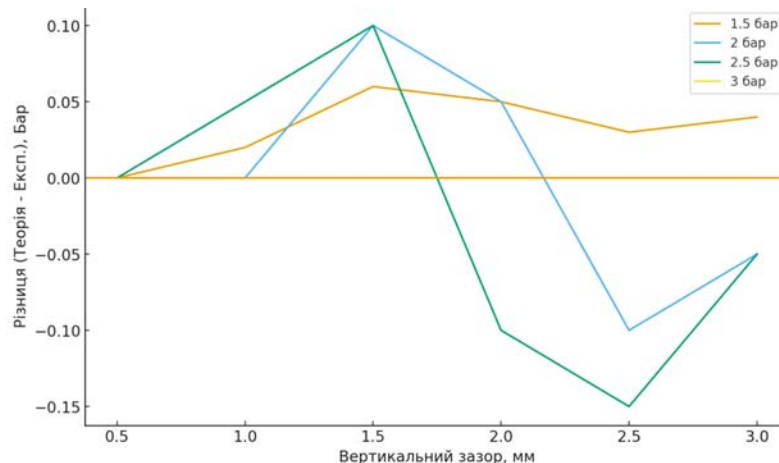


Рис. 7. Різниця розрахункових та експериментальних значень ріжучого тиску на вісі струменя для кисню

Порівняння. 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 особливості 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. На рис. 8 показано як зміна зазору і ріжучого тиску, які відповідають експериментальним і розрахунковим даним, за постійної швидкості різання та тиску на вході в сопло суттєво змінюють якість поверхонь різі.

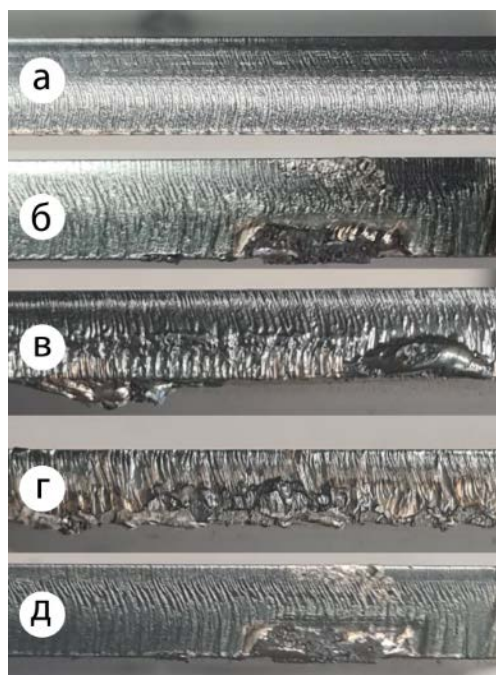


Рис. 8. Візуальна оцінка якості різі сталі Ст3 товщиною 5 мм при зміні вертикального зазору за постійної швидкості різання та тиску кисню 2 Бар: при зазорі 0,5 мм (а); при зазорі 1 мм (б); при зазорі 1,5 мм (в); при зазорі 1,8 мм (г); при зазорі 2,5 мм (д)

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 бездефектні поверхні отриманих деталей.

Висновки.

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.

Список використаних джерел:

1. Ivarson, A., et al., 1996, "The Role of Oxygen Pressure in Laser Cutting Mild Steels," J. Laser Appl., 8, pp. 191–196.
2. O'Neill, W., and Steen, W. M., 1995, "A Three-Dimensional Analysis of Gas.
3. Entrainment Operating During the Laser-Cutting Process," J. Phys. D: Appl. Phys., 28, pp. 12–18.
4. Chryssolouris, G., and Choi, W. C., 1989, "Gas Jet Effects on Laser Cutting", CO2 Lasers and Applications, SPIE, 1042, pp. 86-96.
5. 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, стр. 269-277.
6. LaRocca, A. V., et al., 1994, "Nozzle Design to Control Fluid-Dynamic Effects in Laser Cutting," SPIE, 2207, pp. 169–180.
7. O'Neill, W., et al., "The Dynamics Behavior of Gas Jets in Laser Cutting," Proc. ICALEO'92, pp. 449–458.
8. Man, H. C., et al., 1997, "Design of Supersonic Nozzle for Laser Cutting With Pressure Gas," Proc. ICALEO'97, Sec. B, pp. 118–127.
9. Masuda, W., et al., 1994, "Aerodynamic Characteristics of Underexpanded Coaxial Impinging Jets," JSME Int. J., 37, No. 4, pp. 769–775.
10. 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.
11. В.І. Осипенко. М.Р. Прусс (2024). Вплив внутрішньої структури та розмірів типових сопел на поле ріжучого тиску асистуючого газу при газолазерному різанні. Міжвузівський збірник «НАУКОВІ НОТАТКИ». Луцьк, 79/2024 Ст 70-78. DOI 10.36910/775.24153966.2024.79.10