

В.І. Осипенко, М.Р. Прусс

Черкаський державний технологічний університет

ВПЛИВ ВНТРИШНЬОЇ СТРУКТУРИ ТА РОЗМІРІВ ТИПОВИХ СОПЕЛ НА ПОЛЕ РІЗУЧОГО ТИСКУ АСИСТУЮЧОГО ГАЗУ ПРИ ГАЗОЛАЗЕРНОМУ РІЗАННІ

В роботі запропоновано обладнання та методика дослідження взаємодії між струменем асистуючого газу та поверхнею деталі. Дана взаємодія формує так званий ріжучий тиск який відіграє важливу роль в газолазерному різанні. Наведено результати експериментальних досліджень закономірностей впливу внутрішньої структури і розмірів сопел, манометричного тиску всередині сопла, величини зазору між торцем сопла та деталі на формування геометрії струменя та величини ріжучого тиску в довільному перетині струменя.

Ключові слова: газолазерне різання, ріжучий тиск, асистуючий газ, сопло, струмінь асистуючого газу, зазор.

V.I. Osypenko, M.R. Pruss

INFLUENCE OF THE INTERNAL STRUCTURE AND DIMENSIONS OF TYPICAL NOZZLES ON THE CUTTING PRESSURE FIELD OF THE ASSISTANT GAS IN GAS LASER CUTTING

This paper presents the developed equipment and methodology for studying the aerodynamic interaction between the assist gas jet and the surface of a workpiece. This interaction forms cutting pressure, which plays an important role in gas laser cutting technologies. Air and nitrogen were used as the assist gases. The results of a systematic set of experimental studies of the regularities of the influence of the internal structure and geometric dimensions of nozzles, gauge pressure inside the nozzle, the gap size between the nozzle tip and the workpiece on the formation of the jet geometry, and the cutting pressure in an arbitrary jet cross section are presented. The obtained data can serve as the basis for the efficient design of gas laser cutting processes for maximum productivity by accurately predicting the cutting pressure that the gas jet of the selected nozzle will create under specific technological conditions.

Key words: gas laser cutting, cutting pressure, assist gas, nozzle, assist gas jet, gap.

Постановка проблеми. Асистуючий газ відіграє центральну роль у технологіях газолазерного різання металів. Аеродинамічна взаємодія між струменем асистуючого газу і деталлю формує так званий ріжучий тиск, який в основному і обумовлює характер видалення розплаву з зони різання. Зрозуміло, що за будь якої потужності лазерного випромінювання, об'єми плавлення матеріалу не можуть перевищувати об'єми його видалення [1]. Відомо, що динаміка гальмування потоку асистуючого газу визначається тиском в системі подачі газу, внутрішньою структурою і розмірами сопла, величиною зазору між торцем сопла та деталлю і є ключовим фактором, який впливає на об'єми видаленого матеріалу і, відповідно, на швидкість і якість різання. Через важливість даного фактора існує багато робіт присвячених різним аспектам впливу асистуючого газу на процес газолазерного різання металів [1, 2, 3, 4].

В роботі [5] виконано цикл досліджень по встановленню ролі конструкції сопел у формуванні параметрів струменів асистуючого газу. Однак їх результати важко використовувати українським виробникам верстатів для газолазерного різання через велику номенклатуру сопел різної внутрішньої структури та розмірів, які пропонує насичений ринок. Тому багато дослідників відзначають, що потенціал сучасних потужних (6 кВт – 12 кВт) оптоволоконних лазерів далеко не завжди використовується в повній мірі через неефективне видалення розплавленого матеріалу струменем асистуючого газу [6]. Тому вкрай важливою є інформація про реальний ріжучий тиск в зоні обробки, яке створює сопло відомої внутрішньої структури та розмірів в конкретних технологічних умовах. Це дозволяє більш адекватно обирати як тип сопла так і параметри лазерного процесу при проектуванні ефективних технологій. Враховуючи сказане робота, представлена в даній статті, спрямована на ідентифікацію полів ріжучого тиску, як засади надійного, високоякісного і продуктивного різання з високим рівнем відтворюваності процесів на конкретній лазерній технологічній установці. При виконанні досліджень в якості асистуючих газів використовувалися повітря та азот.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Ріжучий тиск на поверхні заготовки прямо обумовлений тиском гальмування потоку струменя, створюваного соплом конкретної внутрішньої структури та розмірів. Різниця даних параметрів навіть за однакового тиску на вході в сопло призводить до варіацій швидкості та діаметра потоку по довжині струменя. Додатковим фактором варіативності є утворення ударних хвиль, яке призводить до додаткових коливань ріжучого тиску на поверхні деталі в зоні обробки [7,8]. Дана варіативність безпосередньо впливає на швидкість

видалення утвореного розплаву і, як наслідок, на продуктивність і якість різання та відповідно погіршує рівень відтворюваності процесу.

В роботі (9 Miller, 1988) пропонується розраховувати відстань від торцю сопла до першого диску Маха за наступним емпіричним рівнянням:

$$\frac{x_m}{d} = 0,67 \sqrt{\frac{P_0}{P_a}} \quad (1)$$

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

d – вихідний діаметр сопла;

P_0 – повний манометричний тиск всередині сопла;

P_a – атмосферний тиск.

Точність наведеного рівняння є сумнівною через те, що воно не враховує теплофізичні параметри газу та того факту, що за реальних умов газолазерного різання струмів гальмується на поверхні деталі, тобто не є вільним. Є цілий ряд спроб розробки математичних моделей процесів газолазерного різання, але в результаті використаних спрощень і допущень вони недостатньо адекватно відтворюють реальні фізичні процеси [10,11]. Однак наведені матеріали дають чітке розуміння того, що зміни співвідношення P_0/P_a , внутрішньої структури та розмірів сопла, величини зазору між торцем сопла та поверхнею деталі призводять до варіативності в структурі струменя і, відповідно, в появі невизначеності значень величини ріжучого тиску асистуючого газу. Дана невизначеність понижує точність проєктування режимів високої продуктивності та погіршує рівень відтворюваності процесу навіть при незначних змінах даних параметрів.

Мета статті. Отримання точних експериментальних даних про параметри полів ріжучого тиску, що формуються соплами з відомими внутрішньою структурою та розмірами і здатні забезпечити ефективне видалення розплавленого матеріалу та, відповідно, підвищити швидкість і якість різання на вироблених в Україні сучасних промислових верстатах укомплектованих новими лазерними джерелами високої потужності.

Виклад основного матеріалу.

Обладнання, та методи дослідження. В роботі [12] авторами даної статті запропоновано обладнання і методика та виконано комплекс досліджень полів ріжучого тиску, які формувалися двома типами сопел різної внутрішньої структури. Однак при цьому використане обладнання дозволяло реєструвати лише середні значення тиску в зоні гальмування асистуючого газового струменя, що по суті є певним недоліком. З урахуванням цього було розроблено та реалізовано нову установку. Вона дозволяє з високою точністю локально реєструвати ріжучий тиск (тиск гальмування) вимірювальним перетворювачем тиску в зоні отвору діаметром 0.4 мм в металічному диску, що моделює заготовку. Дослідження виконувалися на експериментальному верстаті компанії «Арамис», провідного виробника лазерних технологічних установок в Україні. Основна інформація про верстат наведена в таблиці 1. В початковий момент співвісність вісей дискового зонду та сопла, вмонтованого в оптичну головку верстата, встановлювалася за допомогою юстувального лазера та відео-оптичної системи верстата (рис 1 а).

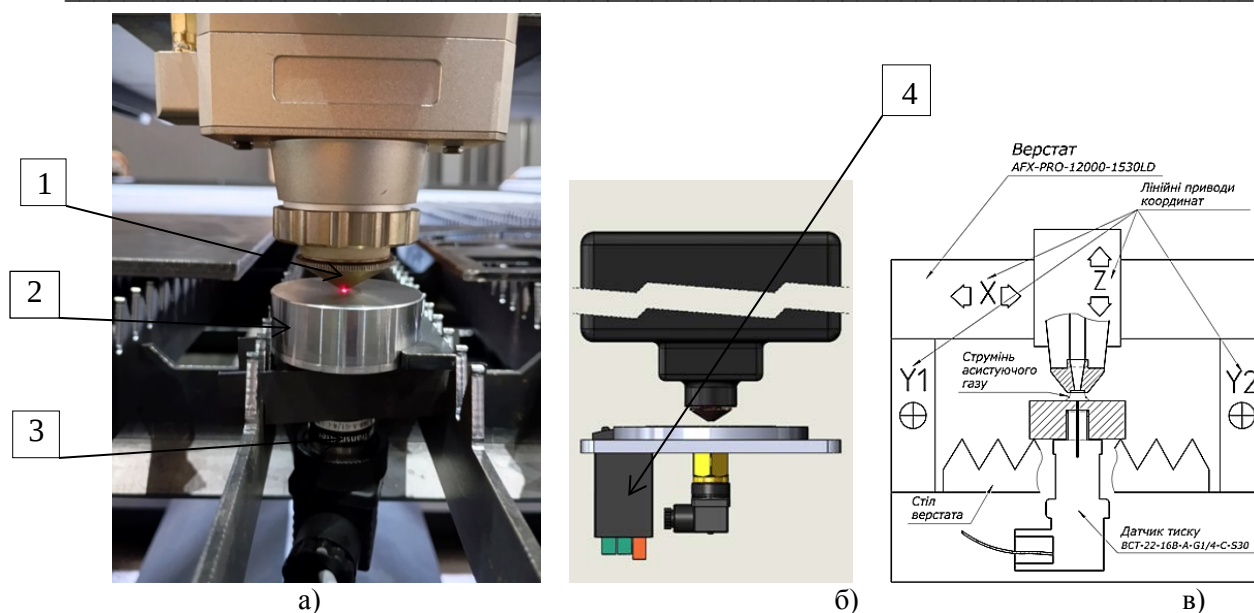
Табл. 1

Моделі основних систем верстата для проведення досліджень

Верстат	AFX-PRO-12000-1530LD
Модель лазера, діаметр оптоволока	MAX Photonics 12 kWt, оптоволокну 100 мкм
Модель оптичної головки, коліматор	BOCI BLT642, f 200 мм

На рис. 1, 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. Сканування дискового зонда вздовж вісей X та Y газового струменя виконувалося за рахунок покрокового зміщення сопла оптичної головки приводом відповідної координати верстата відносно центра приймального отвору (крок 0,2 мм).

Блок відслідковування зазору верстата визначає координату вісі Z при торканні торцем сопла 1 поверхні дискового зонда 2, приймаючи її за нульову координату відліку (рис. 1, а). Всі три лінійних приводи координат експериментального верстата забезпечували похибку позиціонування, що не перевищувала $\pm 0,005$ мм. В якості вимірювального перетворювача дискового зонда було використано п'єзорезистивний датчик тиску моделі BCT110 (рис. 2). Технічні характеристики датчика наведено в таблиці 2.



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

Рис. 1. 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)



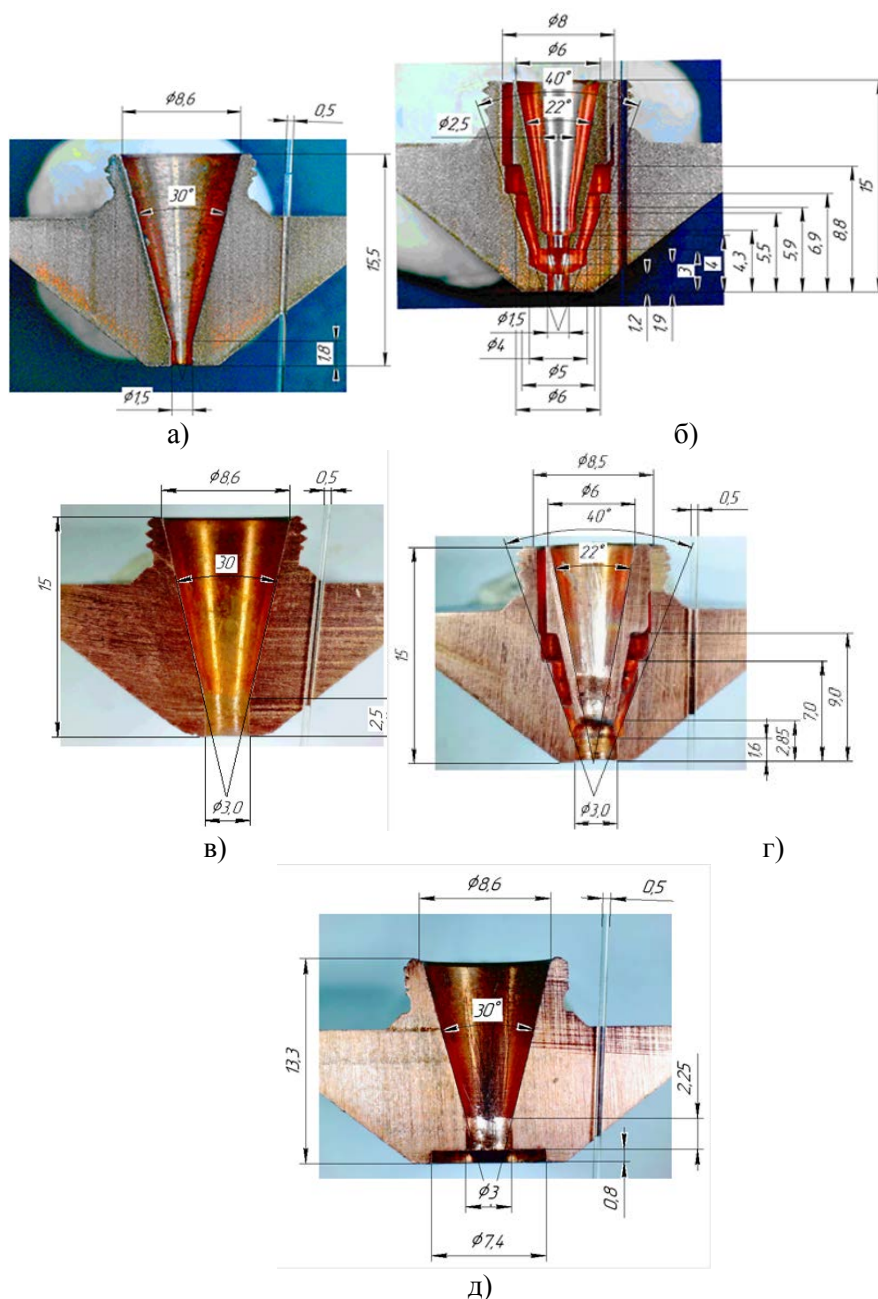
Рис. 2. Загальний вигляд п'єзорезистивного датчика тиску моделі ВСТ110 підключеного до контролера ЕРА100 та персонального комп'ютера

При проведенні досліджень використовувалися 5 типів найбільш вживаних у верстатах компанії «Арамис» сопел компанії Thermacut. Внутрішня структура та розміри сопел наведені на рис. 3. 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.

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



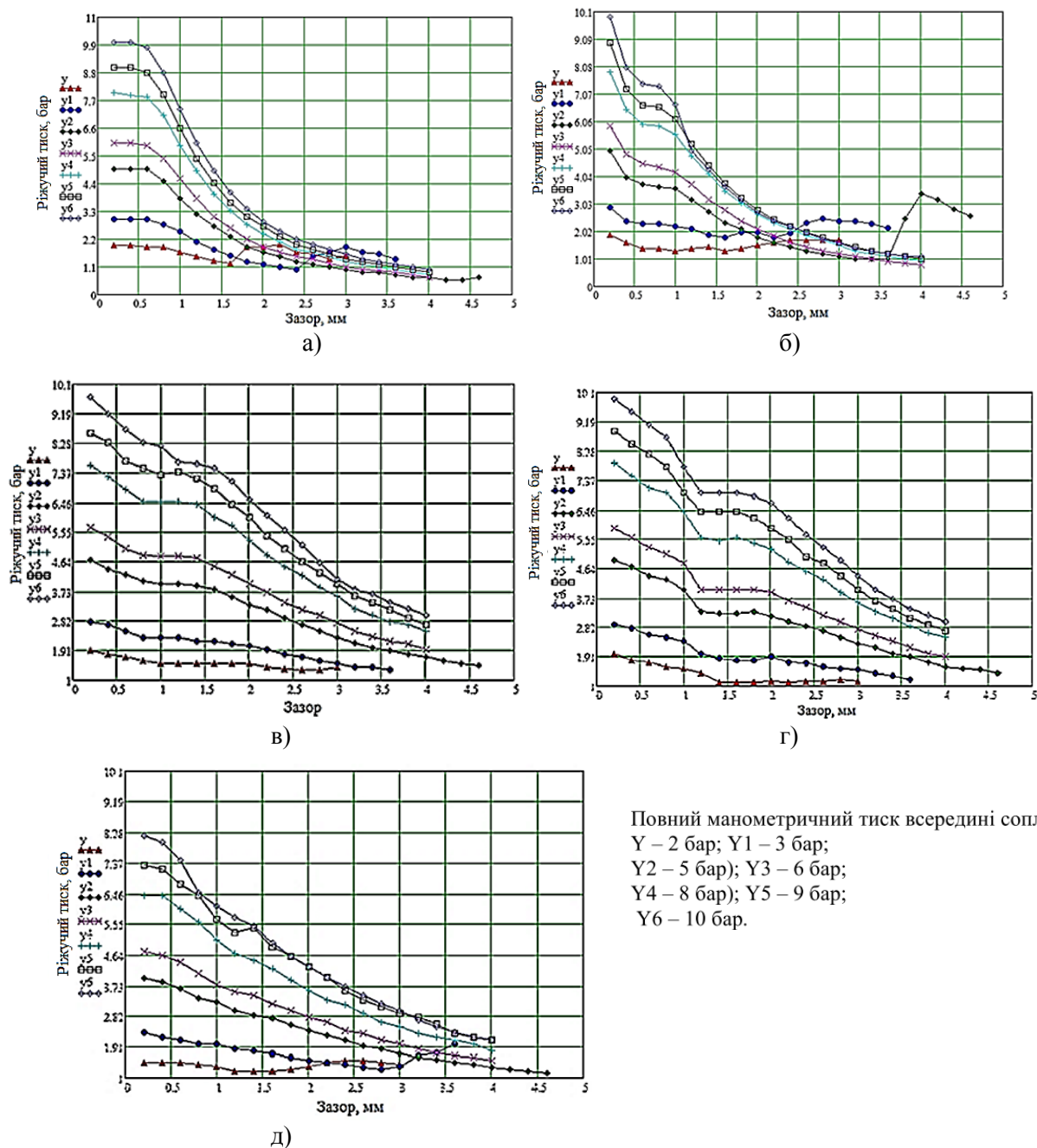
а – одноканальне з вихідним діаметром 1,5 мм; б – двоканальне з діаметром центрального отвору 1,5 мм; в – одноканальне з вихідним діаметром 3 мм; г – двоканальне з діаметром центрального отвору 3 мм; д – одноканальне з вихідним діаметром 3 мм та бустеризацією вихідного отвору.

Рис. 3. Внутрішня структура та розміри сопел компанії Thermacut, використаних в експериментах

Результати досліджень. Використовуючи розроблену установку було виконано комплекс експериментальних досліджень впливу внутрішньої структури і геометричних розмірів сопла (рис. 3), повного манометричного тиску всередині сопла та зазору між соплом та деталлю на ріжучий тиск на вісі струменя та розподіл тиску по його поперечному перетину. Детальний аналіз отриманих результатів дозволив встановити наступне.

Ріжучий тиск на вісі струменя. Відразу варто констатувати, що вже перші результати досліджень показали, що ріжучі тиски створювані струменями повітря і азоту за однакових вхідних умов практично відрізняються лише в межах похибки експерименту (їх вплив на сам процес плавлення та формування структури поверхневих шарів деталей в межах даного дослідження не розглядався). Це можливо пояснити близькими теплофізичними характеристиками обох газів (78,09 об'єму повітря складає азот). Тому, враховуючи мету роботи і вартість балонного азоту, було ухвалено рішення в подальших дослідженнях в якості асистуючого газу використовувати повітря,

поширюючи отримані результати і на використання азоту. Отримані графіки зміни ріжучого тиску по вісі струменя для всіх розглянутих типів сопел представлені на рис. 4. За використання одноканального та двоканального сопел з вихідним діаметром 1,5 мм при різанні на малих зазорах 0,5 мм – 1 мм (менші зазори як правило не використовуються через високий ризик пошкодження оптичної головки) одноканальне сопло за величиною ріжучого тиску у всьому діапазоні зміни повного манометричного тиску має очевидні переваги, які з тенденцією до зменшення зберігаються до зазору 2,5 мм (рис. 4, а, б).



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

Рис. 4. Зміна ріжучого тиску по вісі струменя залежно від повного манометричного тиску всередині сопла та зазору між соплом і деталлю

Обидва типи сопла при зростанні зазорів мають зони відносно незмінних ріжучих тисків. Для одноканального це діапазон зазорів 0,2 мм – 0,6 мм, двоканального 0,6 мм – 1 мм. Зі зростанням зазору спостерігається чітка тенденція до нівелювання впливу повного манометричного тиску на ріжучий тиск на вісі струменя. Так для одноканального сопла при зміні повного манометричного

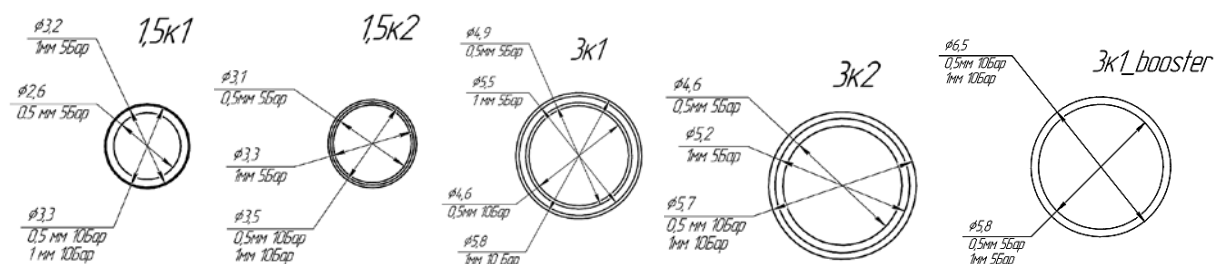
тиску від 10 бар до 8 бар різниця тисків різання практично нівелюється на зазорах ≥ 2.2 мм, для двоканального вже ≥ 1.4 мм. Одноканальне сопло в зоні малих робочих зазорів (0.5 мм – 1 мм) формує менші діаметри та кути розходження струменя порівняно з двоканальним (рис. 5, а, б). Таким чином результати експериментів показують, що двоканальне сопло наведеної структури та розмірів (рис. 3, б) не забезпечує виконання свого основного завдання – обмеження розширення струменя. Враховуючи суттєво вищу вартість таких сопел порівняно з одноканальними, доцільність їх застосування при використанні в якості асистуючих газів повітря та азоту є вкрай сумнівною.

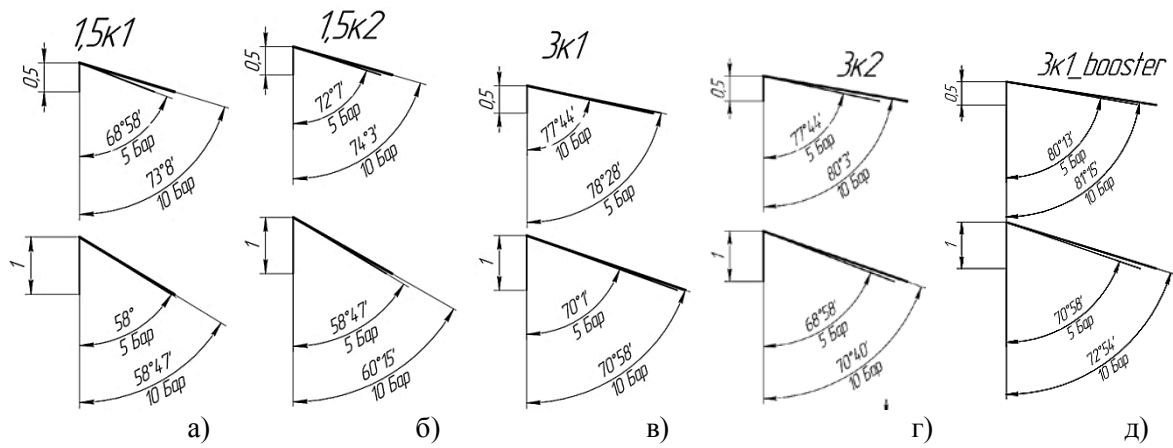
Одноканальне та двоканальне сопла з вихідним діаметром 3 мм (рис. 4, в, г) на зазорах до 0.8 мм формують дещо менші ріжучі тиски в порівнянні з соплами з вихідним діаметром 1.5 мм. Зі зростанням зазорів перевага в формуванні ріжучих тисків переходить до сопел з вихідним діаметром 3 мм. Так за повного манометричного тиску 10 бар одноканальне сопло з вихідним діаметром 1.5 мм на зазорі 1 мм формує ріжучий тиск 7.4 бар, а сопло з вихідним діаметром 3 мм – 8.28 бар. Це очевидно обумовлено тим, що збільшені вихідні діаметри при зростанні зазорів від 0.8 мм забезпечують значно менші як швидкість падіння ріжучого тиску так і рівень нівелювання впливу повного манометричного тиску всередині сопла. Як і в попередньому випадку сопла з вихідним діаметром 3 мм при зростанні зазорів мають зони відносно незмінних ріжучих тисків.

Для одноканального це діапазон зазорів 1 мм – 1.4 мм, двоканального 1.2 мм – 1.8 мм. В цілому ці сопла з різною внутрішньою структурою та однаковим вихідним діаметром виявили достатньо близькі характеристики як за параметрами формування ріжучого тиску, так і діаметрів та кутів розходження струменя (рис. 5, в, г). Це знову ставить питання про доцільність застосування дорогих двоканальних сопел в технологічних умовах різання, що близькі до умов проведення експериментів.

Результати отримані за використання в експериментах одноканального сопла з вихідним діаметром 3 мм та бустеризацією вихідного отвору (рис. 3, д) наведені на рис. 4, д. Внутрішня структура бустеризованого сопла відрізняється від типового одноканального (рис. 3, г) наявністю в торці кільцевої канавки (так званого бустера) діаметром 7.4 мм та глибиною 0.8 мм. В цілому, як видно з графіків, наявність бустера призводить до зниження ріжучих тисків практично у всьому досліджуваному діапазоні. Тобто з точки зору ефективності видалення розплаву з зони різання тиском асистуючого газу наявність бустера лише погіршує ситуацію. Однак їх використання саме в установках укомплектованих потужними оптоволоконними лазерами (як правило 10 кВт – 12 кВт) може бути пояснено термодинамікою процесу. Наявність бустера призводить до збільшення площ контакту асистуючого газу з поверхнями сопла та матеріалу деталі безпосередньо в зоні різання, що дозволяє покращувати їх охолодження і тим самим може впливати як на ресурс сопла так і на якість різання.

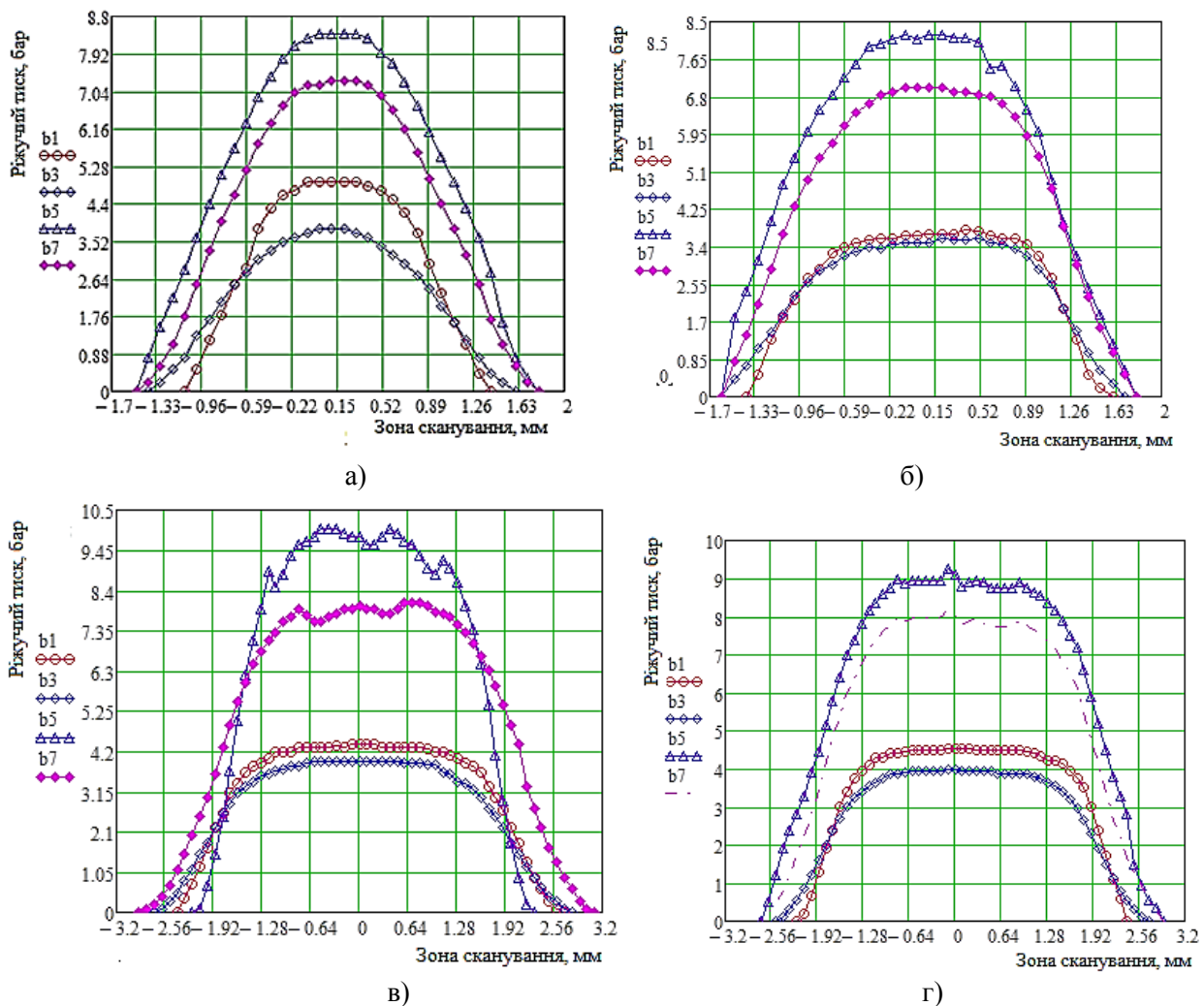
На рис. 6 представлені результати сканування поля ріжучого тиску по поперечному перетину струменя на зазорах 0.5 мм та 1 мм за повного манометричного тиску всередині сопла 5 бар та 10 бар. Різниця результатів сканування вздовж вісей X та Y знаходилися в межах похибки експерименту, тому на рис. 6 наведено графіки розподілу тиску вздовж вісі Y. Це є додатковим підтвердженням високої точності виставлення співвісності центральних отворів сопел та приймального отвору дискового зонда і, відповідно, адекватності отриманих результатів. Ріжучий тиск в центрі струменя (діаметр приймального отвору дискового зонда обрано з міркувань близькості до середньої величини ширини різку ≈ 0.4 мм) в основному обумовлює характер видалення розплаву з зони різання і відповідно суттєво впливає на максимально можливу продуктивність різання. Діаметр струменя і характер розподілу тиску по його поперечному перетину є факторами, що впливають на винесення тепла з зони різання і тим самим можуть впливати на термонапруги в матеріалі деталі, шорсткість отриманих поверхонь, структуру та глибину зони термічного впливу і відповідно на якість технології.

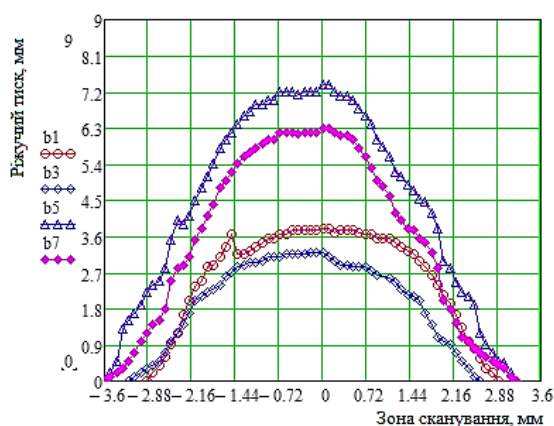




а – одноканальне з вихідним діаметром 1.5 мм; б – двоканальне з діаметром центрального отвору 1.5 мм; в – одноканальне з вихідним діаметром 3 мм; г – двоканальне з діаметром центрального отвору 3 мм.

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





Повний тиск в середині сопла

b1 – зазор 0,5 мм (5 бар)

b3 – зазор 1 мм (5 бар)

b5 – зазор 0.5 мм (10 бар)

b7 – зазор 1 мм (10 бар)

д)

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

Рис. 6. Результати сканування розподілу поля тиску в зоні гальмування струменя

Висновки.

1. Запропоновано конструкцію зонда та методику для локальної високоточної реєстрації величини ріжучого тиску утвореного при гальмуванні струменя асистуючого газу сформованого соплом оптичної головки на поверхні деталі, в будь-якій точці перетину струменя за технологічних умов газолазерного різання.

2. В результаті проведеного комплексу експериментальних досліджень вперше отримані точні чисельні дані про локальні значення величин ріжучого тиску, які формуються найбільш масовими соплами компанії Thermacut в зоні різання. Отриманий масив експериментальних даних, дозволив виявити закономірності впливу внутрішньої структури та розмірів сопла, манометричного тиску всередині сопла, величини зазору між соплом деталлю на геометрію сформованого струменя асистуючого газу (повітря і азот) та величини ріжучого тиску в будь-якому його перетині при гальмуванні на поверхні деталі.

3. На практиці використання отриманих результатів дозволяє зробити більш адекватним 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.

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

Список використаних джерел:

1. Halm, U., Nießen, M., & Schulz, W. (2021). Simulation of melt film dynamics in laser fusion cutting using a boundary layer approximation. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 168, 120837.
2. Darwish, M., Orazi, L., & Angeli, D. (2019). Simulation and analysis of the jet flow patterns from supersonic nozzles of laser cutting using OpenFOAM. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 102, 3229-3242.
3. Zhang, Z., & Gogos, G. (2004). Theory of shock wave propagation during laser ablation. *Physical Review B*, 69(23), 235403.
4. Chen, K., Yao, Y. L., & Modi, V. (2001). Gas dynamic effects on laser cut quality. *Journal of manufacturing processes*, 3(1), 38-49.
5. Fieret, J., Terry, M. J., & Ward, B. A. (1987, September). Invited Paper Overview Of Flow Dynamics In Gas-Assisted Laser Cutting. In *High Power Lasers: Sources, Laser-Material Interactions, High Excitations, and Fast Dynamics* (Vol. 801, pp. 243-250). SPIE.

6. 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.
- Wen P, Zhang C, Yuan Y, Fan X (2016) Evaluation and optimal design of supersonic nozzle for laser-assisted oxygen cutting of thick steel sections. *Int J Adv Manuf Technol* 86(5-8):1243- 1251.
7. Borkmann, M., & Mahrle, A. (2021). Numerical analysis of the primary gas boundary layer flow structure in laser fusion cutting in context to the striation characteristics of cut edges. *Fluids*, 7(1), 17.
8. Zhou, Y., Kong, J., & Zhang, J. (2016). Study on the role of supersonic nozzle in fiber laser cutting of stainless steel. *Materials Sciences and Applications*, 8(1), 85-93.
9. Miller, D. R. (1988). Free jet sources. In *Atomic and Molecular Beam Methods* (ed. G. Scoles), (Vol. I, pp. 14–53). Oxford University Press.
10. Asproulis I (2014) RANS modelling for compressible turbulent flows involving shock wave boundary layer interactions. Master's thesis, University of Manchester.
11. Yu N, Jourdain R, Gourma M, Shore P (2016) Analysis of DeLaval nozzle designs employed for plasma figuring of surfaces. *Int J Adv Manuf Technol* 87(1-4):735-745.
12. 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>