

Кирило Віталійович Красносельський¹, Денис Євгенійович Молочков²

¹аспірант кафедри «Інтегровані технології зварювання та моделювання конструкцій»
Національний університет «Запорізька політехніка» (Запоріжжя, Україна)

E-mail: kranoselsky@zp.edu.ua. ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-5251-9076>. Researcher ID: IQX-0653-2023

²доктор філософії, старший викладач кафедри «Інтегровані технології електронних засобів»
Національний університет «Запорізька політехніка» (Запоріжжя, Україна)

E-mail: molochkov@zp.edu.ua. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9030-5371>

Scopus Author ID: 58666044500. Researcher ID: НТО-8255-2023

ВПЛИВ ВУГЛЕКИСЛОГО ГАЗУ НА МАКРОГЕОМЕТРІЮ ТА ЕНЕРГОЕФЕКТИВНІСТЬ ДРОТОВОГО АДИТИВНОГО ВИРОБНИЦТВА

У статті досліджено вплив окислювального потенціалу захисного середовища (0–100% CO₂ в аргоні) на стабільність дровового адитивного виробництва (WAAM) сталі за технологією Cold Metal Transfer. Завдяки розробленому методу комп'ютерного зору та аналізу осцилограм дуги виявлено технологічне вікно (10–15 % CO₂). Воно забезпечує глобальний мінімум питомої об'ємної енергії наплавлення (1,29 кДж/см³) та найвищу макрогеометричну стабільність (коефіцієнт варіації <2,5%). Встановлено енергетичний парадокс: 100% CO₂, попри мінімальне тепловкладення, погіршує масоперенесення та спричиняє періодичне горбоутворення. Дані є базисом для створення нейромережових систем керування процесом.

Ключові слова: Дротове адитивне виробництво, WAAM, холодне перенесення металу, СМТ, захисне газове середовище, питома об'ємна енергія наплавлення, стабільність макрогеометрії, комп'ютерний зір.

Рис.: 5. Бібл.: 10.

Актуальність теми. Технологія дровового дугового адитивного виробництва (Wire Arc Additive Manufacturing, або WAAM) нині розглядається як один із найперспективніших напрямів металевого 3D-друку великогабаритних об'єктів [1]. Її головні переваги полягають у високій продуктивності наплавлення, відносно низькій вартості обладнання та можливості формування виробів складної просторової геометрії. Проте головним недоліком, що стримує масове впровадження WAAM у точне машинобудування, є низька розмірна точність та значна хвилястість бокових поверхонь вирощених стінок [2]. Оскільки процес базується на вільному формоутворенні, контроль за фінальними розмірами деталі зводиться до керування гідродинамікою рідкої зварювальної ванни, що робить задачу стабілізації геометрії дуже актуальною для забезпечення стабільної якості виробництва.

Постановка проблеми. На відміну від традиційного зварювання, у WAAM форма валика формується виключно внаслідок еволюції рідкої металевої ванни під дією сил поверхневого натягу, в'язкого тертя, гравітації та електродинамічних сил. Традиційно для керування геометрією стінки використовують кінематичні параметри – швидкість подачі дроту (WFS) та швидкість переміщення джерела тепла (TS). Захисний газ здебільшого розглядається як пасивний елемент для ізоляції розплаву від атмосфери. Однак зміна складу захисного газу, зокрема додавання активного вуглекислого газу (CO₂), радикально змінює окислювальний потенціал плазми та реологію розплаву. Це робить склад газу повноцінним незалежним інструментом впливу на формоутворення, роль якого наразі недооцінена в алгоритмах керування WAAM [3].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Геометрія виробу в WAAM визначається еволюцією рідкої металевої ванни в умовах рухомого джерела теплоти, що вимагає розгляду точності формоутворення як задачі нестационарної термогідродинаміки з вільною поверхнею. Сучасні дослідження підтверджують, що ключовими чинниками геометричної стабільності є тепловкладення, стратегія наплавлення та режим перенесення металу [1]. Проте все частіше науковці звертають увагу на те, що газове середовище повинно розглядатися не як допоміжний параметр, а як активний інструмент керування геометрією [4].

Зміна газового складу впливає на поверхневий стан ванни та характер конвективних течій. Фундаментальні роботи з фізики зварювання доводять, що вирішальний вплив на форму шва мають термокапілярні течії Марангоні, напрям яких визначається температурним градієнтом поверхневого натягу [5]. Встановлено, що навіть незначні добавки CO_2 до аргону суттєво змінюють вміст кисню у ванні [6], що може розвернути потік розплаву від відцентрового до доцентрового, радикально змінюючи ширину та глибину проплавлення.

Останні експериментальні дані свідчать, що вибір газової суміші дозволяє цілеспрямовано формувати різну макрогеометрію стінок та впливати на їхню шорсткість [3; 7]. Зокрема, дослідження низьковуглецевих сталей демонструють, що зміна співвідношення Ar/CO_2 безпосередньо корелює зі стабільністю процесу наплавлення та якістю поверхні [8]. Крім того, виявлено масштабний ефект: та сама суміш може діяти по-різному в тонких та товстих стінках через різницю в часі існування рідкої фази та інтенсивності тепловідводу [9]. Для малих ванн розвиток течій Марангоні обмежується швидким затвердінням, тоді як у більших об'ємах поверхневі сили встигають суттєво перерозподілити масу розплаву.

Окремим викликом є робота з високоміцними низьколегованими сталями (HSLA), де легуючі елементи у поєднанні з активним газом можуть формувати стійкі оксидні плівки [10]. Такі плівки змінюють змочуваність та можуть спричинити появу бічних впадин або дефектів неповного сплавлення. Попри значну кількість робіт, наразі бракує інтегрованого підходу, який би одночасно враховував склад газу, масштаб ванни та хімічну природу присадного матеріалу для комплексного прогнозування геометрії.

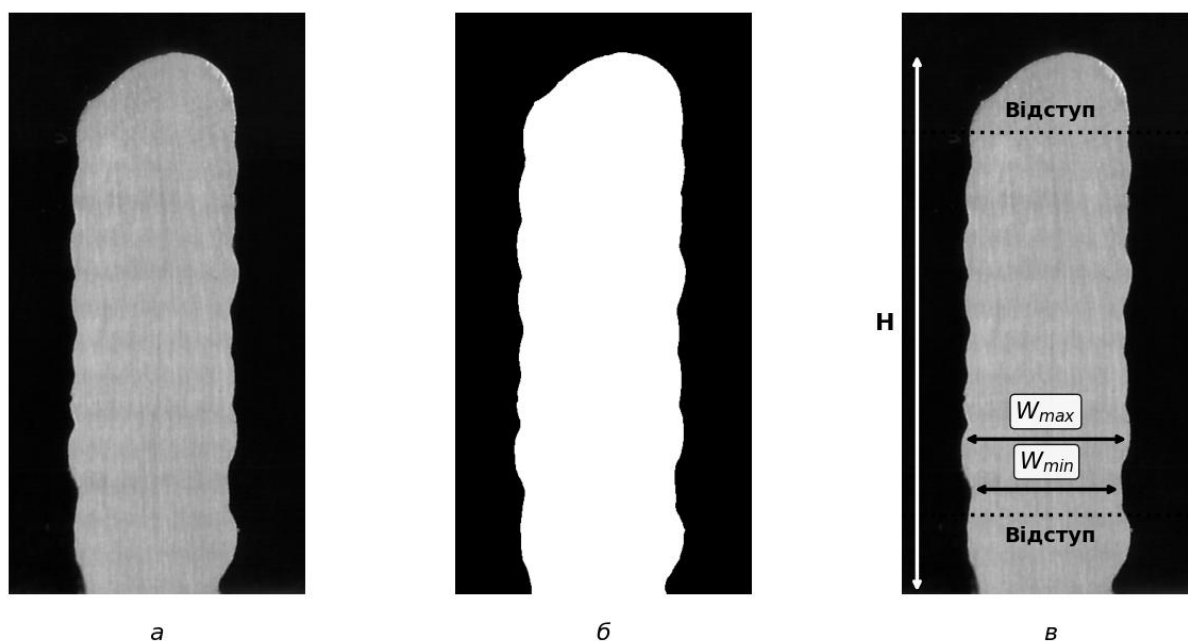
Виділення недосліджених частин загальної проблеми. Попри наявність ґрунтовних праць із термогідродинаміки зварювальної ванни, у науковій літературі бракує систематичних даних щодо впливу широкого градієнта концентрації CO_2 (від 0% до 100%) на макрогеометрію багатошарових стінок в умовах технології Cold Metal Transfer (CMT). Також не розкрито масштабний ефект – як саме змінюється вплив активного газу при переході від режимів з низьким тепловкладенням (мікротанни, тонкі стінки) до режимів з високим тепловкладенням (макротанни, товсті стінки), та як синергетичні алгоритми джерела живлення адаптують енергетичні параметри дуги під зміну газового середовища.

Мета роботи. Встановлення закономірностей впливу концентрації вуглекислого газу (0–100 % CO_2) у суміші з аргонем на зовнішню макрогеометрію (ширину та висоту) та енергетичні показники процесу формування багатошарових стінок з низьковуглецевої сталі в умовах роботизованого CMT–WAAM для режимів з різним тепловкладенням.

Методика проведення досліджень. Експериментальні дослідження проводилися з використанням роботизованого комплексу та джерела живлення Fronius TPSi з активованим режимом CMT. Як присадний матеріал використовувався обміднений дріт ER70S–6 діаметром 1.2 мм. Для перевірки масштабного впливу маси розплаву на гідродинаміку ванни процес наплавлення здійснювався на двох кінематичних режимах при фіксованій швидкості переміщення пальника 45 см/хв: для тонкої стінки швидкість подачі дроту становила 2.5 м/хв (низьке тепловкладення), а для товстої – 6,0 м/хв (високе тепловкладення). Досліджено спектр захисних середовищ від чистого аргону до 100 % вуглекислого газу з проміжними сумішами $\text{Ar} + 5...25\% \text{CO}_2$. Для кожної комбінації параметрів було вирощено багатошарові зразки–стінки довжиною 100 мм по 20 шарів кожна. З метою ізоляції впливу теплового накопичення на геометрію валиків застосовано метод активного міжшарового охолодження водяним спреєм із подальшим осушенням стисненим повітрям. Температурний контроль здійснювався інфрачервоним пірометром, при цьому

наплавлення наступного шару розпочиналося виключно при досягненні міжшарової температури 85 ± 10 °С. Енергетичні параметри дуги фіксувалися через внутрішнє логування апарату з частотою 10 Гц.

Для об'єктивної оцінки стохастичної макрогеометрії наплавлених валиків та усунення суб'єктивної похибки ручних вимірювань було застосовано розроблений алгоритм комп'ютерного зору на базі бібліотеки OpenCV. Оцифрування поперечних макрошліфів виконувалося шляхом оптичного сканування з роздільною здатністю 600 DPI, що забезпечило фізичний розмір одного пікселя на рівні 0,0423 мм. Процедура автоматизованої обробки включала фільтрацію Гаусса для придушення шумів, адаптивну бінаризацію Оцу для точного відділення тіла металу від фону та морфологічні операції закриття можливих внутрішніх мікропор. На основі отриманої бінарної маски розраховувалася площа поперечного перерізу методом чисельного попиксельного інтегрування, що гарантувало повне врахування локальних напливів та хвилястості бокових поверхонь. З метою виключення похибки від нестационарних теплофізичних крайових ефектів (зони кореневого змочування та фінального шару), алгоритм фізично відсікав по 4,5 мм (приблизно 3 шари) від верхньої та нижньої меж габаритного контуру стінки. Для отриманої стабілізованої центральної зони здійснювалося одновимірне горизонтальне сканування з кроком в один піксель. На основі цього масиву розраховувалася середня ефективна ширина профілю, а також визначалися просторові екстремуми (максимальна та мінімальна ширина), різниця між якими слугувала кількісним критерієм абсолютної хвилястості бокової поверхні (рис. 1).



*Рис. 1. Етапи автоматизованого прецизійного аналізу макрогеометрії:
а – вихідний скан поперечного шліфа; б – бінарна маска з відсіченням крайових зон;
в – визначення габаритних розмірів та екстремумів ширини валика*
Джерело: розроблено авторами.

Апаратна валідація розробленого комп'ютеризованого методу здійснювалася шляхом еталонного калібрування для забезпечення необхідної точності та якості вирощених частин. Спільне сканування дослідних зразків із перевіреною метричною кінцевою мірою довжини (куб зі стороною 10 мм) за ідентичних умов підтвердило відсутність значущих оптичних дисторсій: абсолютне відхилення при вимірюванні еталона склало 0,045 мм. Програмний

розрахунок дистанції між контрольними точками еталона із застосуванням базового масштабового коефіцієнта показав, що відносна апаратна похибка вимірювань не перевищує 0,5 %. Така верифікація є критично важливою, оскільки в безматричних процесах WAAM геометрія виробу визначається виключно динамічною еволюцією рідкої металевої ванни, а застосована процедура повністю підтвердила достовірність математичного перерахунку піксельної матриці у фізичні розміри та виключила вплив системних або суб'єктивних факторів на результати визначення макрогеометричних параметрів.

Виклад основного матеріалу. Результати прецизійного вимірювання макрогеометричних параметрів наплавлених зразків продемонстрували нелінійну залежність розмірних характеристик та стабільності формоутворення від окислювального потенціалу захисного середовища. При наплавленні масивних елементів у режимі високого тепловкладення ($WFS = 6,0$ м/хв) використання чистого аргону забезпечило формування стінки із середньою ефективною шириною 8,91 мм та площею поперечного перерізу 341,15 мм². Додавання 10 % CO₂ призвело до локального збільшення цих показників до 9,15 та 349,25 мм² відповідно, що вказує на покращення змочування та розтікання металу в цьому діапазоні. Подальше зростання концентрації активного газу до 100 % спричинило різке скорочення площі наплавлення до мінімального значення 265,59 мм². Це супроводжувалося значним зменшенням загальної висоти зразка з 39,54 мм у чистому аргоні до 30,61 мм у чистому вуглекислому газі, що відповідає зниженню середньої висоти одного наплавленого шару з 1,98 мм до 1,53 мм. Для тонкостінних зразків, вирощених при низькому тепловкладенні ($WFS = 2,5$ м/хв), найбільш стабільні геометричні показники зафіксовані також у діапазоні 10...15 % CO₂, де площа перерізу варіювалася в межах 144,71...154,56 мм², тоді як у суміші з 20 % CO₂ спостерігалось критичне звуження ванни до площі 117,01 мм² (рис. 2).

Об'єктивним критерієм оцінки стабільності процесу вільного формоутворення слугував статистичний аналіз відхилень ширини по всій висоті стінки. Встановлено, що для товстої стінки абсолютна хвилястість бокової поверхні знижується з 1,57 мм у чистому аргоні до свого глобального мінімуму 0,85 мм при додаванні 10 % CO₂. Показник середньоквадратичного відхилення ширини (σ_w) при переході від 5 до 10 % CO₂ різко знизився з 0,51 до 0,18 мм, а коефіцієнт варіації (CV) досяг значення 1,98 %, що свідчить про ідеальну поширену відтворюваність геометрії. Коефіцієнт варіації розраховувався за наступною формулою:

$$CV = \frac{\sigma_w}{W_{avg}} \cdot 100\%, \quad (1)$$

де CV – коефіцієнт варіації ширини валика, %; σ_w – середньоквадратичне відхилення ширини валика, мм; W_{avg} – середня ефективна ширина стабілізованої частини стінки, мм.

У режимах із вмістом 5 та 20 % CO₂ зафіксовано суттєве зростання нестабільності, де показник CV становив 5,87 та 4,41 % відповідно. Для тонких стінок оптимальна рівномірність профілю зафіксована при вмісті 15 % CO₂ з показником коефіцієнта варіації на рівні 2,46 %, тоді як при 20 % CO₂ нестабільність зростає до максимуму в 6,32 %. Таким чином, чисельні та статистичні дані підтверджують формування стійкого технологічного вікна в діапазоні 10...15 % CO₂, де мінімізується стохастичне відхилення розмірів та забезпечується найбільш рівномірне формування міжшарових з'єднань незалежно від масштабу наплавлення (рис. 3).

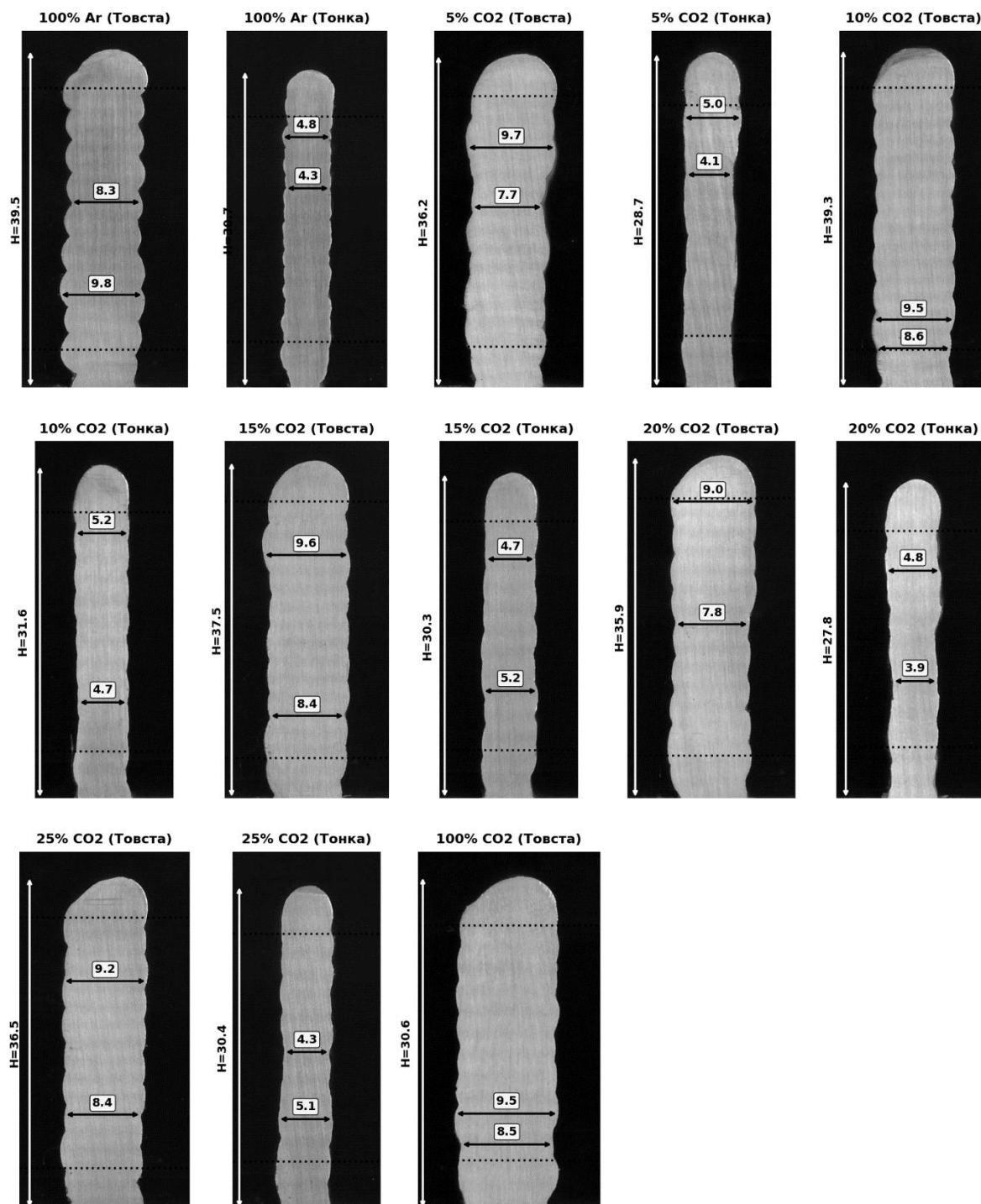


Рис. 2. Макрогеометричні профілі та розрахункові контури наплавлених зразків (товстих і тонких стінок) залежно від концентрації CO₂ у захисному газовому середовищі

Джерело: розроблено авторами.

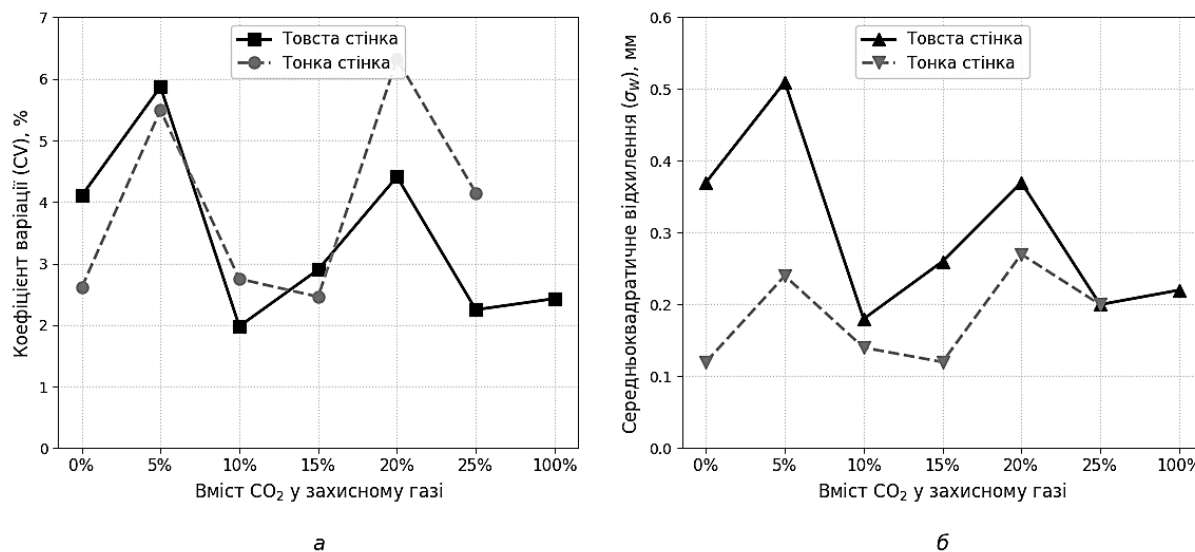


Рис. 3. Вплив концентрації CO₂ на геометричну стабільність стінок: а – коефіцієнт варіації ширини (CV); б – середньоквадратичне відхилення ширини (σ_w) Джерело: розроблено авторами.

Аналіз енергетичних параметрів процесу наплавлення, зафіксованих із частотою 10 Гц, виявив специфіку роботи адаптивних алгоритмів керування джерела живлення при зміні складу захисного газу. Встановлено, що синергетичний контур технології СМТ забезпечує високу стабільність робочої напруги незалежно від окислювального потенціалу середовища, тоді як середній зварювальний струм демонструє виражену залежність від концентрації активного компонента. Для масивних зразків при наплавленні в чистому аргоні середнє значення струму становило 225,2 А, проте зі збільшенням частки вуглекислого газу спостерігалось його автоматичне зниження. Найбільш суттєве падіння потужності зафіксовано при переході до 100 % CO₂, де середній струм зменшився до 179,2 А. Така кіберфізична реакція апарату є наслідком необхідності компенсації енергії, що витрачається на дисоціацію багатоатомного газу в дуговому проміжку. Розрахунок лінійного тепловкладення здійснювався за класичною формулою:

$$HI = \eta \cdot \frac{P_{avg}}{TS}, \tag{2}$$

де *HI* – лінійне тепловкладення, Дж/мм; *η* – ефективний тепловий коефіцієнт корисної дії, який для процесу СМТ приймався на рівні 0,8; *P_{avg}* – середня електрична потужність дуги, Вт; *TS* – швидкість переміщення пальника, яка становила 7,5 мм/с.

Для забезпечення високої репрезентативності енергетичних даних та виключення впливу нестационарних крайових ефектів (процесів запалювання дуги та заварювання кратера), розрахунок середньої потужності здійснювався за допомогою розробленого програмного алгоритму. Цей алгоритм автоматично аналізував високочастотні лог-файли, ідентифікував стаціонарний режим за номінальною швидкістю подачі дроту та примусово відсікав по 0,5 секунди запису на початку та в кінці кожного наплавленого шару.

Аналіз отриманих даних підтвердив, що режим із використанням 100 % CO₂ характеризується найнижчим рівнем термічного впливу, який для товстостінних елементів становив 381,2 Дж/мм. Водночас у технологічному вікні стабільності (10 % CO₂) спостерігалось локальне підвищення енергетичних параметрів до рівня 451,1 Дж/мм, що зумовлено активацією синергетичних ліній для підтримки стабільного краплеперенесення в умовах зміненого градієнта потенціалу дуги (рис. 4).

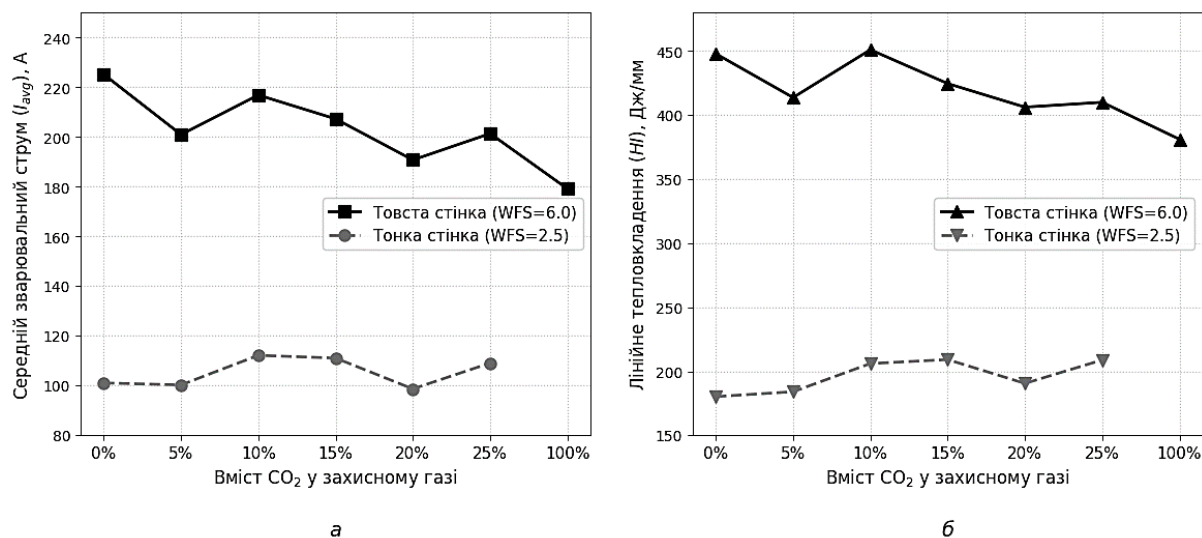


Рис. 4. Енергетична адаптація синергетичного контуру залежно від складу захисного газу та масштабу наплавлення: а – середній зварювальний струм; б – лінійне тепловкладення

Джерело: розроблено авторами.

Аналогічна тенденція зафіксована і для тонкостінних зразків: лінійне тепловкладення в чистому аргоні становило 180,3 Дж/мм, тоді як у діапазоні 10...15 % CO_2 воно досягло максимуму на рівні 206,1...209,2 Дж/мм. Незважаючи на значні коливання потужності між різними сумішами, електрична стабільність дугового проміжку залишалася безпрецедентно високою у всьому діапазоні досліджень. Показник середньоквадратичного відхилення напруги (σ_U) не перевищував 0,6 В (максимальне значення 0,60 В зафіксовано при 5 % CO_2 для тонкої стінки), що свідчить про відсутність неконтрольованих коротких замикань та ефективну роботу цифрового зворотного зв'язку. Таким чином, констатовано факт глибокої адаптації зварювальної системи до складу газу, де зміна теплофізики плазми автоматично трансформується в енергетичний відгук джерела.

Зіставлення геометричних та енергетичних показників дозволило виявити фундаментальний енергетичний парадокс процесу вільного формоутворення, який найбільш об'єктивно описується через метрику питомої об'ємної енергії наплавлення (VED). Цей показник розраховувався як відношення лінійного тепловкладення до фактичної площі поперечного перерізу валика за формулою:

$$VED = \frac{HI}{F}, \quad (3)$$

де VED – питома об'ємна енергія наплавлення, Дж/мм³ (що еквівалентно кДж/см³); HI – лінійне тепловкладення, Дж/мм; F – площа поперечного перерізу наплавленого валика, мм².

Попри те, що режим у 100 % CO_2 для товстої стінки характеризувався найнижчим лінійним тепловкладенням (381,2 Дж/мм) завдяки адаптивному зниженню струму, він виявився найменш рентабельним. Через значне розбризкування, випаровування та відповідне зменшення ефективного перерізу валика до 265,59 мм², питома енергоємність цього режиму досягла максимуму і стаговила 1,44 кДж на кожен кубічний сантиметр надрукованого металу. На противагу цьому, технологічне вікно стабільності в діапазоні 10...15 % CO_2 , попри локальне компенсаторне збільшення електричної потужності (тепловкладення 451,1 Дж/мм при 10 % CO_2), продемонструвало найвищий коефіцієнт засвоєння матеріалу із площею перерізу 349,25 мм². Як наслідок, глобальний мінімум питомої об'ємної енергії

був зафіксований саме для цієї газової суміші і становив $1,29 \text{ кДж/см}^3$. Це доводить, що використання суміші з 10 % CO_2 є на 10...11 % енергоефективнішим порівняно з чистим вуглекислим газом за умови наплавлення однакового фізичного об'єму виробу (рис. 5).

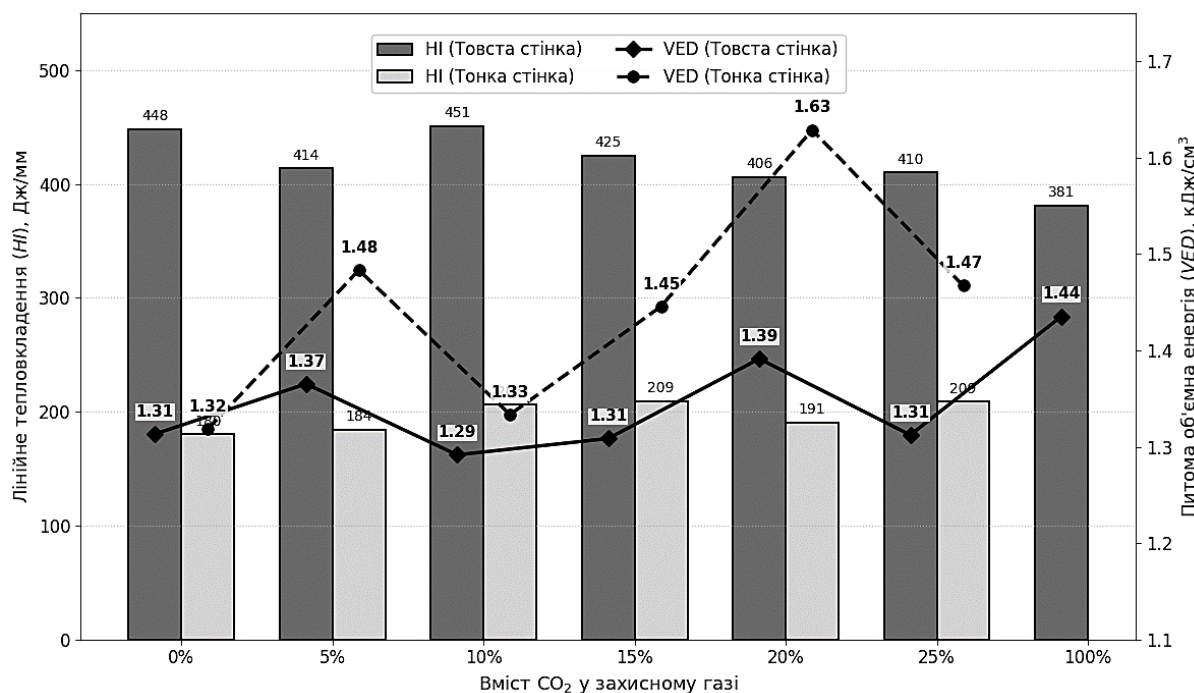


Рис. 5. Аналіз енергетичної ефективності масоперенесення: вплив концентрації CO_2 на лінійне тепловкладення (НІ) та питому об'ємну енергію (VED) для товстостінних та тонкостінних зразків.

Джерело: розроблено авторами.

Спостережувані геометричні трансформації та схильність до дефектоутворення пояснюються комплексним впливом теплофізики плазми та гідродинаміки зварювальної ванни, які по-різному проявляються для стінок з різним масогабаритним показником. Для масивних елементів в умовах високого тепловкладення використання 100% аргону провокує дефект знакозмінного поперечного зміщення валиків (втрату просторової співвідносності шарів), що зумовлено специфічним вузьким («кинжальним») проплавленням переднього шару та асиметричним стіканням розплаву по краях. Натомість для тонкостінного друку при низькому тепловкладенні використання високих концентрацій вуглекислого газу призводить до гідродинамічного колапсу. Експериментально підтверджено, що застосування 100 % CO_2 для тонкостінних зразків ініціює такий катастрофічний ефект періодичного горбоутворення та постійні обриви дуги, що побудова зразка на задану висоту та його подальше макрогеометричне сканування виявилися фізично неможливими. Це явище ініціюється високим поверхневим натягом ванни та її передчасною кристалізацією внаслідок загального дефіциту підведеної теплової енергії, що створює сприятливі умови для розвитку гідродинамічної нестійкості Релея–Плато. Виявлене ж оптимальне вікно 10...15 % CO_2 забезпечує ідеальний баланс між напрямком термокапілярних течій Марангоні та гідродинамічним тиском дуги, гарантуючи рівномірне змочування та симетричне формування шарів.

Обговорюючи отримані результати, необхідно окреслити технологічні обмеження даного дослідження. Експериментальна база спиралася на використання суцільного присадного дроту фіксованого діаметра 1,2 мм, виготовленого з низьковуглецевої нелегованої сталі. Оскільки теплофізичні властивості розплаву, зокрема градієнт поверхневого

натягу та кінематична в'язкість, критично залежать від хімічного складу матеріалу, пряма екстраполяція отриманих кількісних значень макрогеометрії на інші класи сплавів потребує додаткової валідації. Крім того, фундаментальним апаратним обмеженням є застосування закритого алгоритму управління процесом краплеперенесення (СМТ), де всі зафіксовані компенсаторні реакції джерела живлення детерміновані препрограмованими синергетичними лініями. Відповідно, кіберфізична адаптація на обладнанні з іншими алгоритмами керування дугою може мати інакший характер відгуку на зміну газу.

Виявлена складна та глибоко нелінійна природа процесу WAAM безапеляційно доводить обмеженість традиційних аналітичних моделей для предиктивного керування. Отримані результати вказують на те, що для переходу до концепції керованого даними виробництва доцільним є застосування методів штучного інтелекту, зокрема нейронних мереж. Це дозволить інтегрувати виявлені стохастичні відхилення у предиктивні алгоритми, забезпечуючи стабільність просторового друку навіть в умовах динамічної зміни теплового балансу.

Висновки. Проведене дослідження доводить, що окислювальний потенціал захисного газового середовища виступає самостійним та високоефективним фактором керування формоутворенням у технології WAAM. Встановлено, що вплив концентрації CO₂ має яскраво виражений нелінійний та інверсний характер залежно від рівня тепловкладення: для масивних елементів збільшення частки активного газу призводить до зрушення валика за рахунок інверсії термокапілярних течій Марангоні, тоді як при низькому тепловкладенні спостерігається його розширення внаслідок зміни просторових характеристик плазми. Визначено жорсткі межі технологічної застосовності моногазових середовищ, оскільки використання 100 % аргону для товстих стінок провокує просторову нестабільність формування валика через вузьке проплавлення, а застосування 100 % CO₂ для тонкостінного друку викликає гідродинамічний колапс та ефект періодичного горбоутворення. Оптимізована суміш із 10...15 % CO₂ формує технологічне вікно, у якому досягається найвища стабільність макрогеометрії та мінімальна стохастична хвилястість бокових поверхонь.

Комплексний аналіз високочастотних осцилограм розкрив механізм кіберфізичної адаптації синергетичного алгоритму СМТ, який автоматично компенсує зміну теплофізики дугового проміжку шляхом зниження зварювального струму при зростанні концентрації багатоатомного газу. На основі цього виявлено та формалізовано енергетичний парадокс вільного формоутворення: режим зі 100% CO₂, незважаючи на мінімальне загальне тепловкладення, характеризується найгіршим масопереносом та найвищою питомою об'ємною енергією наплавлення. Натомість діапазон 10...15 % CO₂ забезпечує глобальний мінімум енергетичних витрат на одиницю надрукованого об'єму (1,29 кДж/см³), що на 10...12 % ефективніше за чистий вуглекислий газ, максимізуючи коефіцієнт засвоєння матеріалу при збереженні електричної стабільності краплеперенесення.

Виявлена висока складність та нелінійність процесу безапеляційно доводять неможливість застосування простих аналітичних моделей для предиктивного керування точним адитивним виробництвом. Подальші дослідження будуть спрямовані на створення репрезентативних датасетів для навчання нейронних мереж із використанням сталей зі складною реологією розплаву. Застосування таких сплавів у комбінації з прецизійним мікротюнінгом швидкості подачі дроту та швидкості зварювання дозволить суттєво підвищити роздільну здатність геометричних відгуків системи, формуючи надійний фундамент для розробки інтелектуальних систем керування WAAM із замкненим контуром.

Список використаних джерел

1. Zhang, H., Li, R., Liu, J., Wang, K., Weijian, Q., Shi, L., Lei, L., He, W., & Wu, S. (2024). State-of-art review on the process-structure-properties-performance linkage in wire arc additive manufacturing. *Virtual and Physical Prototyping*, 19(1), e2390495. <https://doi.org/10.1080/17452759.2024.2390495>.
2. Jafari, D., Vaneker, T. H. J., & Gibson, I. (2021). Wire and arc additive manufacturing: Opportunities and challenges to control the quality and accuracy of manufactured parts. *Materials & Design*, 202, 109471. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2021.109471>.
3. Teixeira, F. R., Jorge, V. L., Scotti, F. M., Siewert, E., & Scotti, A. (2024). A methodology for shielding-gas selection in wire arc additive manufacturing with stainless steel. *Materials*, 17(13), 3328. <https://doi.org/10.3390/ma17133328>.
4. Silwal, B., Pudasaini, N., Roy, S., Murphy, A. B., Nycz, A., & Noakes, M. W. (2022). Altering the supply of shielding gases to fabricate distinct geometry in GMA additive manufacturing. *Applied Sciences*, 12(7), 3679. <https://doi.org/10.3390/app12073679>.
5. Wang, Y., & Tsai, H. L. (2001). Effects of surface active elements on weld pool fluid flow and weld penetration in gas metal arc welding. *Metallurgical and Materials Transactions B*, 32(3), 501–515. <https://doi.org/10.1007/s11663-001-0035-5>.
6. Lu, S., Fujii, H., & Nogi, K. (2004). Marangoni convection and weld shape variations in Ar–O₂ and Ar–CO₂ shielded GTA welding. *Materials Science and Engineering: A*, 380(1-2), 290–297. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2004.05.057>.
7. Yamaguchi, M., Komata, R., Furumoto, T., Abe, S., & Hosokawa, A. (2021). Influence of metal transfer behavior under Ar and CO₂ shielding gases on geometry and surface roughness of single and multilayer structures in GMAW-based wire arc additive manufacturing of mild steel. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 119(1-2), 911–926. <https://doi.org/10.1007/s00170-021-08231-8>.
8. Kanishka, K., & Acherjee, B. (2025). A study on the effect of shielding gases on the GMAW-WAAM process and performance of WAAM-deposited low-carbon steel. *International Journal of Materials Research*, 116(11-12), 905–916. <https://doi.org/10.1515/ijmr-2024-0319>.
9. Wu, F., Falch, K. V., Guo, D., English, P., Drakopoulos, M., & Mirihanage, W. (2020). Time evolved force domination in arc weld pools. *Materials & Design*, 190, 108534. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2020.108534>.
10. Akbarzadeh, E., Yurtışık, K., Gür, C. H., & et al. (2024). Influence of shielding gas on the microstructure and mechanical properties of duplex stainless steel in wire arc additive manufacturing. *Metals and Materials International*, 30(7), 1977–1996. <https://doi.org/10.1007/s12540-023-01623-3>.

References

1. Zhang, H., Li, R., Liu, J., Wang, K., Weijian, Q., Shi, L., Lei, L., He, W., & Wu, S. (2024). State-of-art review on the process-structure-properties-performance linkage in wire arc additive manufacturing. *Virtual and Physical Prototyping*, 19(1), e2390495. <https://doi.org/10.1080/17452759.2024.2390495>.
2. Jafari, D., Vaneker, T. H. J., & Gibson, I. (2021). Wire and arc additive manufacturing: Opportunities and challenges to control the quality and accuracy of manufactured parts. *Materials & Design*, 202, 109471. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2021.109471>.
3. Teixeira, F. R., Jorge, V. L., Scotti, F. M., Siewert, E., & Scotti, A. (2024). A methodology for shielding-gas selection in wire arc additive manufacturing with stainless steel. *Materials*, 17(13), 3328. <https://doi.org/10.3390/ma17133328>.
4. Silwal, B., Pudasaini, N., Roy, S., Murphy, A. B., Nycz, A., & Noakes, M. W. (2022). Altering the supply of shielding gases to fabricate distinct geometry in GMA additive manufacturing. *Applied Sciences*, 12(7), 3679. <https://doi.org/10.3390/app12073679>.
5. Wang, Y., & Tsai, H. L. (2001). Effects of surface active elements on weld pool fluid flow and weld penetration in gas metal arc welding. *Metallurgical and Materials Transactions B*, 32(3), 501–515. <https://doi.org/10.1007/s11663-001-0035-5>.
6. Lu, S., Fujii, H., & Nogi, K. (2004). Marangoni convection and weld shape variations in Ar–O₂ and Ar–CO₂ shielded GTA welding. *Materials Science and Engineering: A*, 380(1-2), 290–297. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2004.05.057>.

7. Yamaguchi, M., Komata, R., Furumoto, T., Abe, S., & Hosokawa, A. (2021). Influence of metal transfer behavior under Ar and CO₂ shielding gases on geometry and surface roughness of single and multilayer structures in GMAW-based wire arc additive manufacturing of mild steel. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 119(1-2), 911–926. <https://doi.org/10.1007/s00170-021-08231-8>.

8. Kanishka, K., & Acherjee, B. (2025). A study on the effect of shielding gases on the GMAW-WAAM process and performance of WAAM-deposited low-carbon steel. *International Journal of Materials Research*, 116(11-12), 905–916. <https://doi.org/10.1515/ijmr-2024-0319>.

9. Wu, F., Falch, K. V., Guo, D., English, P., Drakopoulos, M., & Mirihanage, W. (2020). Time evolved force domination in arc weld pools. *Materials & Design*, 190, 108534. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2020.108534>.

10. Akbarzadeh, E., Yurtşik, K., Gür, C. H., & et al. (2024). Influence of shielding gas on the microstructure and mechanical properties of duplex stainless steel in wire arc additive manufacturing. *Metals and Materials International*, 30(7), 1977–1996. <https://doi.org/10.1007/s12540-023-01623-3>.

Дата першого надходження статті до видання: 28.02.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 21.03.2026

UDC 621.791.75:621.7.01

Kyrylo Krasnoselsky¹, Denys Molochkov²

PhD Student, Department of Integrated Welding Technologies and Structural Modeling
Zaporizhzhia Polytechnic National University (Zaporizhzhia, Ukraine)

E-mail: krasnoselsky@zp.edu.ua. ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-5251-9076>. Researcher ID: IOX-0653-2023

²PhD, Senior Lecturer, Department of Integrated Technologies of Electronic Devices
Zaporizhzhia Polytechnic National University (Zaporizhzhia, Ukraine)

E-mail: molochkov@zp.edu.ua. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9030-5371>

Scopus Author ID: 58666044500. Researcher ID: HTO-8255-2023

CARBON DIOXIDE EFFECT ON WIRE ADDITIVE MANUFACTURING MACROGEOMETRY AND EFFICIENCY

This study comprehensively investigates the influence of the shielding gas oxidation potential (ranging from 100% Argon to 100% CO₂) on the macrogeometric and energetic stability of Wire Arc Additive Manufacturing (WAAM) of low-carbon steel using Cold Metal Transfer (CMT) technology. A novel computer vision algorithm based on numerical pixel-by-pixel integration was developed and validated to eliminate the subjective human factor in assessing the stochastic geometry of deposited walls. This method enabled precise calculations of the cross-sectional area, effective width, and absolute waviness by strictly excluding morphological edge effects. High-frequency data logging of the power source (10 Hz) was synchronized with geometric metrics to establish the fundamental energetic rationale behind the morphological transformations of the layers. The results reveal a highly non-linear adaptive response of the CMT cyber-physical system to changes in the gas mixture. A distinct technological stability window was identified at 10–15% CO₂ concentration. Within this window, the standard deviation of the profile width drastically decreased, achieving a coefficient of variation below 2.5%, which corresponds to a remarkably stable and uniform layer-by-layer material deposition. Furthermore, an "energy paradox" of the WAAM process was identified and mathematically formalized through the Volumetric Energy Density (VED) metric. While pure 100% CO₂ exhibited the lowest linear heat input (381 J/mm) due to the automated current reduction by the synergic control loop, it proved to be the most energetically inefficient medium for mass transfer (1.43 kJ/cm³) owing to massive material losses and severe vaporization. Conversely, the optimized M21 gas mixture (10–15% CO₂) provided the global minimum of volumetric energy consumption (1.29 kJ/cm³), maximizing the overall deposition efficiency. The study also strictly delineates the process boundaries for different heat input conditions. It was experimentally confirmed that utilizing 100% Argon for massive thick-walled elements leads to structural meandering due to narrow finger-like penetration and asymmetrical melt flow. Simultaneously, applying 100% CO₂ for thin-walled elements triggers hydrodynamic collapse and severe humping defects caused by rapid crystallization and increased surface tension. The established thermodynamic limitations emphasize the vulnerability of static synergic curves in variable environments, highlighting the acute necessity of transitioning towards closed-loop control systems. The generated multi-dimensional datasets provide a robust physical foundation for training predictive artificial neural networks capable of dynamically optimizing the WAAM process to prevent macro-defects in real-time.

Keywords: Wire Arc Additive Manufacturing; WAAM; Cold Metal Transfer; CMT; shielding gas mixture; volumetric energy density; macrogeometry stability; computer vision.

Fig.: 5. References: 10.