УДК 621.791.7.5 DOI 10.36910/775.24153966.2025.83.11

В.М. Франчук[1], Л.М. Самчук[1], Ю.В. Шишко[2]

Луцький національний технічний університет[1]
Національний технічний університет «Дніпровська політехніка»[2]

АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЙ ЗВАРЮВАННЯ ДЛЯ АВТОМОБІЛЬНОЇ ГАЛУЗІ

У статті розглянуто сучасні методи зварювання в автомобілебудуванні, зокрема такі технології, як дугове зварювання (MMA, MIG/MAG, TIG), зварювання під флюсом, електрошлакове та плазмове зварювання. Проведено аналіз їхніх технічних характеристик, переваг і недоліків, а також особливостей застосування в контексті вимог до якості, надійності та економічної ефективності з'єднань. Визначено, що вибір оптимальної зварювальної технології залежить від матеріалу, конструкції та призначення деталей, а впровадження інноваційних методів сприяє підвищенню якості та конкурентоспроможності автомобільної продукції.

Ключові слова: *Зварювальні технології, автомобільне зварювання, ефективність виробництва, міцність конструкцій.*

V.M. Franchuk, L.M. Samchuk, Y.V. Shyshko

ANALYSIS OF WELDING TECHNOLOGIES FOR THE AUTOMOTIVE INDUSTRY

The article discusses modern welding methods in automotive engineering, in particular technologies such as arc welding (MMA, MIG/MAG, TIG), submerged arc welding, electroslag welding and plasma welding. An analysis of their technical characteristics, advantages and disadvantages, as well as the specifics of their application in the context of requirements for quality, reliability and economic efficiency of joints is carried out. It has been determined that the choice of the optimal welding technology depends on the material, design and purpose of the parts, and the introduction of innovative methods contributes to improving the quality and competitiveness of automotive products.

Keywords:*Welding technologies, automotive welding, production efficiency, structural strength.*

Постановка проблем. Сучасне автомобілебудування демонструє вражаючу динаміку, що провокує підвищені запити до ключових технологічних етапів, зокрема до показників якості, стабільності, тривалості експлуатації. Застосування класичних способів зварювання нерідко показує низьку ефективність в реаліях сучасного виробництва, особливо при створенні легких та енергоощадних конструкцій, які повинні відповідати жорстким вимогам безпеки, екологічної відповідності та продуктивності. З ускладненням конструкцій та розширенням номенклатури матеріалів, залучених в автомобілебудуванні — таких як високоміцні сталі, алюмінієві та магнієві сплави — виникає потреба впровадження передових зварювальних технологій, що вимагає ретельного техніко-економічного обґрунтування. Паралельно, відсутність цілісного та систематизованого підходу до вибору найоптимальніших зварювальних процесів здатна спричинити зниження якості фінальної продукції, збільшення виробничих витрат та уповільнення темпів модернізації. З огляду на це, надзвичайно важливим є всебічний аналіз актуальних зварювальних технологій з урахуванням специфіки автомобільної галузі, з метою оптимізації виробництва, підвищення конкурентоспроможності підприємств та забезпечення високих стандартів якості.

Мета роботи – аналіз сучасних зварювальних процесів з метою визначення оптимальних методів для забезпечення високої якості надійності та економічності з'єднань в автомобілебудуванні.

Аналіз літературних джерел. Авторами роботи [1] досліджено вплив адгезійного клею на параметри контактного точкового зварювання сталей. Для оцінки процесу використовували аналіз руху електродів та синхронізовані параметри, сформувавши базу даних шляхом збурення вхідних значень (нанесення клею). Металографічні дослідження дозволили точно виміряти діаметр і площу зварної точки, а також виявити дефекти. Побудовані графіки допомогли оцінити вплив клею на технологічні характеристики зварювання.

У роботі [2] досліджено вплив параметрів зварювання, таких як товщина металу, зварювальний струм та кут зварювання, на міцність зварних з'єднань за технологією TIG. Проаналізовано основні види зварювання (TIG, MMA, MIG) та створено регресійну модель для оцінки взаємозв'язку параметрів і якості шва. Отримані результати можуть бути використані для оптимізації автоматизованих зварювальних процесів і відповідають Цілі сталого розвитку 9 – «Промисловість, інновації та інфраструктура».

У дослідженні [3] проведено екологічний та економічний аналіз чотирьох типів дугового зварювання: TIG (з присадкою і без), MIG, MAG та SMAW. Було зварено 480 зразків із вуглецевої, нержавіючої сталі та алюмінію. Аналіз показав, що TIG- зварювання з присадкою має найбільший

© В.М. Франчук, Л.М. Самчук

екологічний вплив через високий витрат захисного газу, а SMAW – найменший, зокрема зменшення викидів CO_2 на 93,29%. Також TIG виявився найменш сприятливим для здоров'я людини та найдорожчим через збільшення часу зварювання на 61,36% порівняно з іншими методами.

У дослідженні [4] проаналізовано комбінований процес зварювання TIG–MIG/MAG, що поєднує продуктивність MIG/MAG і кращий контроль тепла від TIG. Вперше проведено експеримент з оцінки впливу полярності MIG/MAG та сили струму TIG на геометрію зварного шва. Порівнювалися зварні шви, отримані традиційним MIG/MAG та комбінованим TIG–MIG/MAG методом. Оцінювали ширину шва, підсилення, глибину проплавлення, площу розплавленої зони та кут опуклості. Аналіз показав, що зміна полярності впливає на форму шва, а введення TIG-струму сприяє кращому проплавленню, збільшенню площі розплавлення, ширині шва та зменшенню підсилення.

У статті [5] розглянуто основні вдосконалення технології TIG-зварювання, спрямовані на покращення глибини проплавлення. Хоча TIG-зварювання широко застосовується для тонколистових матеріалів, інтерес промисловості до зварювання деталей середньої товщини стимулював появу нових варіантів процесу: імпульсне TIG, активоване TIG, TIG із формуванням ключової області, багатоелектродне TIG тощо. У статті проаналізовано механізми цих методів і геометрію зварного шва, отриману за різними технологіями з середини 2000-х років до сьогодні. Метою огляду є демонстрація потенціалу TIG-зварювання для промисловості та науки.

У статті [6] розглянуто способи підвищення ефективності TIG-зварювання шляхом оптимізації процесу, модернізації обладнання та застосування зовнішніх обмежень. Проаналізовано принципи дії цих методів і сучасний стан досліджень. Окрему увагу приділено перспективним рішенням — використанню магнітного вольфрамового електрода та двосоплового TIG-зварювання, що дозволяють покращити керованість процесу, підвищити продуктивність і зменшити габарити зварювального устаткування.

У статті [7] проаналізовано дослідження з лазерно-плазмового зварювання за останні 20 років. Основна увага приділена вивченню дії стисненої плазмової дуги та лазерного випромінювання (1,03–1,07 мкм, переважно волоконного лазера) на сталі й сплави. Розглянуто фізичні основи синергетичного ефекту та можливості його практичного використання. Встановлено, що ефективність такого ефекту зростає завдяки покращенню горіння плазмової дуги та спрощенню формування лазерного кейхолу.

Авторами [8] досліджено метод лазерно-плазмової обробки матеріалів, який поєднує вплив лазерного випромінювання та стисненої плазмової дуги для підвищення ефективності поверхневої обробки металевих деталей. Розглянуто особливості формування гібридного ефекту, що забезпечує глибоке проникнення енергії в матеріал і стабільність процесу. Також проаналізовано роль спеціальних поглинаючих покриттів, які знижують відбиття лазерного світла та сприяють збільшенню глибини обробки. Запропонований підхід дозволяє підвищити якість обробки, продуктивність і розширити можливості застосування цієї технології, зокрема в агроінженерії.

У статті [9] досліджено вплив параметрів багатодротового дугового зварювання під флюсом на механіко-технологічні властивості зварних швів високоміцних дрібнозернистих сталей. Запропоновано спосіб зменшення теплового впливу та обсягу зварювання за рахунок регулювання конфігурації зварювального дроту і параметрів дуги, що дозволяє зберегти високу стабільність процесу і продуктивність, водночас покращуючи якість зварних з'єднань.

У роботі [10] розглянуто розробку моделі розподілу неметалевих включень за розмірами в металі зварних швів. Проаналізовано експериментальні дані щодо включень у швах, виконаних методами зварювання під флюсом та в захисному газі. Встановлено, що кінцевий розподіл включень відповідає гамма-розподілу з високою ймовірністю. Запропоновано ймовірнісну модель еволюції розподілу включень під час формування шва з параметрами, що залежать від часу.

Викладення основного матеріалу. У сучасному світі автомобільна промисловість є однією з найдинамічніших галузей, що вимагає постійного впровадження інноваційних технологій для підвищення якості, надійності та безпеки транспортних засобів. Одним із ключових аспектів виробництва автомобілів є зварювання — процес, який забезпечує міцність та довговічність конструкцій, з'єднуючи окремі елементи в єдине ціле. Ефективність зварювальних технологій безпосередньо впливає на експлуатаційні характеристики автомобілів, зокрема на їхню вагу, жорсткість кузова, витрати пального та загальну екологічність. Сьогодні існує широкий спектр зварювальних методів, таких як дугове зварювання, точкове контактне зварювання, лазерне зварювання, фрикційне зварювання із перемішуванням тощо, кожен з яких має свої переваги та

© В.М. Франчук, Л.М. Самчук

обмеження. Вибір конкретної технології зумовлений конструктивними особливостями автомобіля, типом використовуваних матеріалів та вимогами до виробничої ефективності.

Ручне дугове зварювання (MMA) — це універсальна техніка зварювання електричною дугою, що використовує покриті електроди. Найчастіше його використовують для з'єднання товстих металевих деталей, зокрема, під час ремонту або виробництва невеликими партіями. Під час зварювання електрична дуга, сформована між електродом і базовим металом, розплавляє краї деталей і електродний матеріал, в результаті чого утворюється шов. Покриття електрода виконує роль захисту розплавленого металу від окиснення, утворюючи газову та шлакову оболонку. Серед переваг цього методу – простота, мобільність, можливість працювати в різноманітних просторових позиціях та несприятливих умовах. Недоліки включають: відносно низьку продуктивність, потребу у високій кваліфікації зварювальника та обмеженість автоматизації процесу. Незважаючи на ці обмеження, MMA-зварювання залишається важливою технологією, особливо коли інші методи зварювання недоступні або економічно недоцільні.

Напівавтоматичне зварювання в захисному газі (MIG/MAG) – це один з найпопулярніших різновидів дугового зварювання. Суть його полягає в автоматичній подачі плавкого суцільного дроту в зону дуги, котра виникає між дротом і основним металом. В залежності від використаного захисного газу, виділяють MIG (зварювання в інертному газі, як аргон), котре використовується для кольорових металів, і MAG (зварювання в активному газі, наприклад, суміш вуглекислого газу з аргоном), що призначене для чорних металів. Захисний газ має критично важливе значення, він ізолює розплавлений метал від взаємодії з атмосферою, що дозволяє отримати високоякісний шов з мінімальною кількістю домішок та дефектів. Плавкий дріт подається автоматично спеціальним механізмом, а зварювальник контролює процес вручну, поєднуючи автоматизацію та гнучкість ручного управління. Зварювання MIG/MAG вирізняється високою продуктивністю, забезпечує гарне формування шва, дозволяє працювати в різних положеннях у просторі та має широку сферу застосування – від тонколистових деталей кузова до несучих елементів конструкцій. Цей метод є ключовою технологією в масовому автомобілебудуванні завдяки його ефективності, стабільності процесу і можливості інтегрування з робототехнічними системами. В той же час, даний метод вимагає надійного захисту зони зварювання від повітряних потоків, а також точного налаштування параметрів зварювання, щоб уникнути таких дефектів, як пористість або непровар.

Зварювання вольфрамом в інертному газі (TIG) - це надзвичайно точний метод дугового зварювання, що передбачає утворення дуги між неплавким вольфрамовим електродом і основним металом в атмосфері інертного газу, як правило, аргону або гелію. Цей метод дозволяє створювати високоякісні, чисті зварні з'єднання з мінімальною кількістю шлакових включень. TIG- зварювання (Tungsten Inert Gas) демонструє особливу ефективність при роботі з нержавіючими сталями, алюмінієм, титаном, магнієвими сплавами та іншими кольоровими металами, що вимагають ретельного контролю теплового впливу та мінімізації деформації структури. Процес може виконуватися з додаванням присадного матеріалу або без нього, що забезпечує гнучкість у роботі з різноманітними типами швів. Серед ключових переваг даного методу - висока якість та естетичний вигляд шва, відсутність шлаку, точне керування дугою та можливість зварювання тонкостінних деталей. Водночас, TIG-зварювання характеризується відносно низькою швидкістю, висуває високі вимоги до кваліфікації зварювальника та потребує чистого робочого середовища для досягнення стабільних результатів. Враховуючи ці особливості, TIG-зварювання широко використовується в автомобільній промисловості для з'єднання відповідальних вузлів з кольорових металів, а також у виробництві компонентів, де критичними є герметичність і точність шва (наприклад, елементи паливної системи, радіатори, вихлопні системи високого класу та подібне).

Зварювання під флюсом — це надзвичайно ефективний спосіб дугового зварювання, під час якого зварювальна дуга знаходиться під шаром зернистого флюсу, що повністю покриває зону зварювання. Під час роботи автоматично подається плавний електрод, а флюс розплавляється від тепла дуги, формуючи захисний шлаковий шар. Цей шар захищає розплавлений метал від впливу атмосфери та допомагає створити якісний зварний шов. Цей метод найбільше застосовується для зварювання чорних металів, особливо вуглецевих та низьколегованих сталей, товщиною від кількох міліметрів до декількох сантиметрів. Завдяки глибокому проплавленню, високій швидкості наплавлення та можливості механізації, зварювання під флюсом чудово підходить для з'єднання довгих прямих швів у великогабаритних конструкціях, таких як рами, балки, осі, а також окремі несучі компоненти в автомобілебудуванні (наприклад, вантажні платформи чи шасі). Серед переваг цього методу — висока продуктивність, стабільна якість шва, незначні втрати металу через бризки, низьке виділення диму та можливість автоматизувати процес. До недоліків можна віднести

© В.М. Франчук, Л.М. Самчук

обмежене застосування (лише для горизонтальних і плоских швів), велику вагу обладнання та необхідність видалення шлаку після зварювання. В автомобільній промисловості метод зварювання під флюсом використовується головним чином у важкому сегменті, при виробництві вантажівок, причепів, рамних конструкцій і несучих елементів великої товщини, де надійність та ефективність процесу є критичними факторами.

Електрошлакове зварювання — це високотехнологічний метод з'єднання, призначений для вертикального з'єднання товстостінних деталей з чорних металів, зазвичай товщиною більше 30 мм. Процес базується на використанні тепла, що генерується при проходженні електричного струму через розплавлений шлак, який виступає водночас провідником струму й теплоносієм. На відміну від дугового зварювання, дуга в цьому процесі існує тільки на початковому етапі, а далі тепло утворюється через опір шлаку. Зварювальний дріт або стрічка подаються вертикально в зону зварювання, де плавляться під дією високої температури шлакової ванни. Процес зазвичай виконується в спеціальній мідній водоохолоджувальній формі, яка обмежує розтікання розплаву та формує шов.Основними перевагами електрошлакового зварювання є надзвичайно висока продуктивність, значна глибина проплавлення, мінімальні деформації, висока якість шва та здатність з'єднувати дуже масивні елементи за один прохід. Завдяки цим властивостям метод активно використовується в суднобудуванні, енергетиці, мостобудуванні та важкому машинобудуванні.У сфері автомобілебудування електрошлакове зварювання використовується обмежено — переважно для виготовлення або ремонту великих та товстостінних деталей спеціальної техніки (наприклад, у виробництві великовантажних платформ, кузовів самоскидів чи несучих конструкцій бронетехніки), де потрібне міцне вертикальне з'єднання металевих листів великої товщини.

Плазмове зварювання — це високотехнологічний різновид дугового зварювання, у якому тепло виникає з плазмової дуги, сформованої внаслідок іонізації газу (зазвичай аргону, зрідка в суміші з воднем або гелієм) в спеціальному плазмотроні. Отримана плазма відзначається вкрай високою температурою, що дає змогу ефективно розплавляти навіть тугоплавкі метали та виконувати зварювання з високою точністю. Процес плазмового зварювання має схожість з TIG-зварюванням, але має ряд переваг: стабільніша дуга, менший діаметр зони термічного впливу, глибший і вужчий шов, а також можливість автоматизації процесу. Цей метод забезпечує відмінну якість з'єднань з нержавіючої сталі, алюмінію, титану, міді, магнію та інших кольорових металів і сплавів. Його також можливо застосовувати як у режимі мікрозварювання (для надтонких деталей), так і для глибокого зварювання металів значної товщини. До переваг плазмового зварювання відносяться надзвичайна точність, чистота шва, можливість зварювання у важкодоступних місцях і мінімальні залишкові напруження. Серед недоліків — складність обладнання, високі вимоги до точності налаштувань, обмеження щодо просторових положень та вартість обладнання. У автомобільній промисловості плазмове зварювання знаходить застосування здебільшого в спеціалізованих виробничих процесах, які потребують високої точності, як-от: зварювання тонкостінних нержавіючих або алюмінієвих компонентів, герметичних систем, елементів електромобілів, а також при виробництві деталей зі складною геометрією, де інші методи є надто грубими або неточними.

Лазерне зварювання – це надзвичайно точний спосіб з'єднання металів, що використовує як джерело теплової енергії сконцентрований лазерний промінь великої потужності. Завдяки невеликій зоні нагріву, високій щільності енергії випромінювання та ретельному контролю параметрів, даний метод дає змогу отримувати з'єднання з мінімальними деформаціями та високою відтворюваністю. Лазерне зварювання широко застосовується для з'єднання тонких металевих листів, таких як нержавіюча сталь, алюміній, титан і високолеговані сталі, особливо ефективно при виробництві деталей, що потребують високої точності, міцності та герметичності. Головними перевагами цього методу є висока швидкість процесу, мінімальний вплив тепла, що зменшує ризик деформацій, та також висока якість шва з малою кількістю пустот та тріщин. Крім того, лазерне зварювання дозволяє з'єднувати деталі складної форми та легко інтегрується в автоматизовані та роботизовані виробничі процеси. Водночас метод має і недоліки – значну вартість устаткування, потребу в точному позиціонуванні деталей, необхідність ретельної підготовки поверхні та труднощі в роботі з товстими металами без спеціальної попередньої обробки. В сучасній автомобільній промисловості лазерне зварювання активно використовується для виготовлення кузовних деталей, зварювання акумуляторних блоків для електромобілів, компонентів шасі та паливних систем, де надзвичайно важливими є як механічна міцність, так і зовнішній вигляд зварного шва.

© В.М. Франчук, Л.М. Самчук

Для автопрому найбільш підходящим методом є напівавтоматичне зварювання у захисному газі (MIG/MAG). Ця техніка гарантує високу швидкість роботи та бездоганну якість з'єднань, що є критичним для виготовлення великої кількості автозапчастин. MIG/MAG добре працює з широким спектром металів, включаючи як сталь, так і кольорові метали, що робить його універсальним для різних деталей та конструкцій. До того ж, цей метод легко автоматизується та поєднується з роботами, що збільшує продуктивність та зменшує витрати. Хоча інші методи, такі як TIG або лазерне зварювання, можуть мати кращі характеристики з точки зору точності та якості шва, вони складніші у використанні, дорожчі та повільніші, тому зазвичай використовуються для спеціальних або особливо відповідальних деталей. Таким чином, MIG/MAG є оптимальним та найпоширенішим методом зварювання у серійному автомобілебудуванні.

Висновки. Сучасне автомобілебудування нині немислиме без використання ефективних зварювальних технологій, що гарантують високу міцність, надійність та безпеку автотранспортних засобів. Розмаїття методів зварювання – від класичного ручного дугового до високотехнологічного лазерного чи фрикційного – дозволяє оптимально адаптуватись до різних матеріалів, конструктивних особливостей та обсягів виробництва. Автоматизація та роботизація зварювальних процесів значно підвищують продуктивність, стабільність якості та повторюваність результатів, що є вкрай важливим для великосерійного випуску автомобілів. З розвитком новітніх матеріалів, зростанням попиту на електротранспорт та посиленням екологічних вимог значення інноваційних зварювальних технологій тільки зростатиме. Для майбутніх досліджень надзвичайно важливо сфокусуватись на оптимізації процесів для роботи з новими легкими і композитними матеріалами, покращенні систем контролю якості та забезпеченні екологічної безпеки виробництва. Це дасть змогу не тільки поліпшити якість та надійність автомобілів, а й укріпити конкурентоспроможність та технологічний рівень автомобільної промисловості в цілому.

Список використаних джерел:

1. Советченко Я. В. Оптимізація технології контактного точкового зварювання в умовах дії промислових факторів : магістерська дис. : 131 Прикладна механіка / Ярослав Вадимович Советченко. – Київ, 2021. – 104 с.
2. Максимов Д. М. Розробка автоматизованого технологічного процесу зварювання металевих виробів : пояснювальна записка до атестаційної роботи здобувача вищої освіти на другому (магістерському) рівні, спеціальність 174 – Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка / Д. М. Максимов ; М-во освіти і науки України, Харків. нац. ун-т радіоелектроніки. – Харків, 2025. – 94 с.
3. González-Gonzále C., Los Santos-Ortega J. Environmental and Economic Analyses of TIG, MIG, MAG and SMAW Welding Processes / Department of Mechanical Engineering, Mechanical Area of Continuous Media and Theory of Structures, University of La Rioja, Logroño, Spain, 2023.
4. Costa G. C. da Silva, Resende A. A. de. Evaluation of the TIG–MIG/MAG welding process in direct polarity // Springer Nature Link. 2020. Vol. 2. P. 164.
5. Kumar K., Kumar Ch S. A review on TIG welding technology variants and its effect on weld geometry // Materials Today. 2022. Vol. 50, Part 5. P. 999–1004.
6. Zhao H., Zhang S., Chen H., Li Y. Methods to Improve TIG Welding Efficiency // Transactions of the Indian Institute of Metals. 2024. Vol. 77. P. 2231–2245.
7. Коржик В. М., Хаскін В. Ю., Ілляшенко Є. В. та ін. Гібридне лазерно-плазмове зварювання: ефективність і нові можливості // Гібридні процеси зварювання. Автомат. зварювання. 2023. № 12.
8. Ковальчук Ю. О. Метод лазерно-плазмової обробки матеріалів // Solving Scientific Problems Using Innovative Concepts. 2024. С. 192–195.
9. Gook S., El-Sari B., Biegler M., Rethmeier M., Lichtenthäler F., Stark M. Багатодротове дугове зварювання високоміцних дрібнозернистих сталей під флюсом // Металургія і технологія дугового зварювання та наплавлення. 2022. № 1. С. 9–13.
10. Тараборкін Л. А., Головко В. В. Розрахунково-експериментальна модель розподілу неметалевих включень за розмірами в металі зварних швів // Автоматичне зварювання. 2021. С. 27–32.

© В.М. Франчук, Л.М. Самчук