

УДК 621.791/792 : 537.84

Кузнецов В. Д., Пащенко В. М., Рижов Р. М.

## СТАН ТА ПЕРСПЕКТИВИ РОЗВИТКУ МАГНІТНОГО КЕРУВАННЯ У ЗВАРЮВАННІ ТА СПОРІДНЕНИХ ТЕХНОЛОГІЯХ

На цей час опубліковано значну кількість робіт, присвячених розгляду особливостей застосування різних зовнішніх електромагнітних дій (ЕМД) у процесах дугового зварювання. Головним чином їх використовують у випадках, коли для забезпечення заданого рівня якості швів традиційних технічних і технологічних заходів недостатньо. Ефективне застосування ЕМД потребує систематизації відомих результатів і визначення шляхів перспективного розвитку використання електромагнітних дій.

Аналіз опублікованих робіт у даному напрямку дозволив виділити основні ознаки, що якісно відрізняють всі відомі види ЕМД [1–2]. Основним із них є напрям вектору магнітної індукції КМП по відношенню до об'єкту керування. За цією ознакою КМП розділяють на аксіальні (поздовжні) і радіальні (поперечні). У перших вектор індукції паралельний, а у других – перпендикулярний вісі електроду. Додатковими, не менш важливими відзначними ознаками зазначених двох груп КМП, є їх частотні і амплітудні характеристики.

При аналізі аксіальних КМП виявлено, що незалежно від форми імпульсів (синусоїдальних або прямокутних) умовно їх можна розділити на однополярні, низькочастотні 1–25 Гц і високочастотні (від 200 Гц і вище). При цьому низькочастотні у більшому ступені характеризуються діапазоном індукцій 5–50 мТл, а високочастотні – 50–200 мТл. У групі радіальних КМП за частотними характеристиками виділяють пульсуючі, низькочастотні і постійні. Для усіх характерний діапазон індукцій 5–20 мТл. КМП першої групи (з аксіальними векторними характеристиками) частіше застосовують у випадках, коли об'єктом керування є зварювальна ванна і масопереносу електродного металу, другої (з радіальними) – дуга як джерело нагріву.

Характерно, що у публікаціях останніх років частіше розглядають особливості використання комбінованих ЕМД. На відміну від традиційних двополюсних пристроїв при їх реалізації застосовують багатопольсні електромагнітні системи (ЕМС), до складу яких входить  $n$ -а кількість електромагнітів з автономними системами живлення. Залежно від сполучення полярностей струмів намагнічування у їх котушках у зоні зварювання генеруються різні по відношенню до об'єкту керування КМП. При почергових змінах полярності струмів намагнічування, що одночасно протікають через полюси ЕМС, у зоні зварювання формуються центральносиметричні радіальні КМП. Послідовне підключення протилежних по відношенню до осі електроду пар полюсів із різною полярністю струмів намагнічування дозволяє отримувати обертові радіальні магнітні поля. Одночасне генерування КМП різної частоти формує модульовані аксіальні і радіальні магнітні поля. Мультивекторні ортогональні магнітні поля отримують почерговим генеруванням у зоні зварювання аксіальних низькочастотних і радіальних центральносиметричних КМП.

Аналіз виявив, що технологічне застосування аксіальних, радіальних або комбінованих КМП визначається вибором об'єкта керування. При цьому дуга, зварювальна ванна або краплі розплавленого металу на торці електроду можуть бути самостійними об'єктами ЕМД, або, що більш характерно, об'єктами одночасного впливу. У останньому випадку ефективність ЕМД визначається ступенем проявлення позитивної дії факторів, відповідальних за технологічний результат у обраному об'єкті керування, і навпаки, зменшенням їх негативного проявлення у інших.

Метою даної роботи є визначення за результатами аналізу літературних джерел найбільш перспективних напрямків застосування електромагнітних дій у зварюванні та споріднених технологіях.

Специфіка поведінки дуги у аксіальному КМП при зварюванні струмом прямої полярності – її обертання навкруги вертикальної осі і набування форми, близької до конусу. Це сприяє стабілізації її положення у просторі і дозволяє регулювати практично без зміни потужності її силовий вплив на розплав ванни.

Процеси MIG/MAG – зварювання з використанням аксіальних КМП характеризуються обертанням з великими швидкостями крапель на торці електроду, що спричинює виникнення у їх об'ємах відцентрових сил. Під їх впливом форма крапель змінюється із сферичної до еліптичної, що обумовлює зменшення на торці електроду товщини теплоізолюючого рідкого прошарку. У свою чергу це сприяє збільшенню на 25–30 % швидкості розплавлення електродного дроту при практично незмінній тепловій потужності дуги.

ЕМД при MIG/MAG- зварюванні доцільно використовувати при створенні з'єднань малої товщини, коли індукція КМП дозволяє поліпшувати процеси кристалізації і не спричинює підвищений рівень розбризкування, що є суттєвим технологічним обмеженням. Більшість опублікованих робіт щодо застосування ЕМД при зварюванні плавким електродом орієнтовані на процес зварювання під шаром флюсу. При цьому перенос електродного металу стінками шлакового пузиря збільшує час взаємодії металу зі шлаком, що у свою чергу збільшує коефіцієнт переходу у шов легуючих елементів.

ЕМД з використанням високочастотних аксіальних КМП ґрунтуються на індукуванні у ванні або краплях електродного дроту горизонтальних вихрових струмів. При їх взаємодії з радіальною складовою КМП утворюється об'ємна сила, яка діє у напрямку, що співпадає з поздовжньою віссю циліндричного електромагніта і спрямована від нього. Величина цієї сили пропорційна добутку  $M \frac{\partial M}{\partial Z}$ , де  $M$  – взаємна індуктивність об'єкту керування і електромагніту у напрямку осі  $Z$ . Для її створення необхідні як осьова, так і радіальна складові КМП. Відоме використання зазначених ЕМД для керування масопереносом електродного дроту, збільшення густини струму у хвостовій частині ванни, поліпшення параметрів формування швів при зварюванні на вису.

Загальний недолік ЕМД з використанням аксіальних високочастотних КМП і низькочастотних з підвищеною індукцією – труднощі їх практичної реалізації. У обох випадках максимальний ефект від їх застосування досягається при великих струмах намагнічування через котушки електромагнітів. Це обумовлює необхідність інтенсивного охолодження їх котушок, виготовлених із намотувальних матеріалів збільшеного перерізу, що призводить до погіршення масогабаритних показників спеціалізованих пальників і їх маневрових можливостей. До того, при використанні високочастотних КМП ефективні ЕМД можливі тільки при низькій індуктивності котушок електромагнітів, що вимагає оптимізації їх конструктивних параметрів залежно від конкретних умов зварювання.

При застосуванні ЕМД, що ґрунтуються на використанні некомбінованих радіальних КМП зміни гідродинаміки розплаву ванни відбуваються у наслідок відхилень або коливань дуги з частотою магнітного поля у напрямку, нормальному його силовим лініям, на відстань, пропорційну амплітудному значенню його індукції. При таких маніпулюваннях дугою, що тисне і прогинає поверхню ванни з силою, прямо пропорційною зварювальному струму, на прилеглі до дуги об'єми розплаву діє відштовхуюча сила, що спричинює формування його потоків у відповідному напрямку.

При відхиленні дуги постійним КМП у напрямку фронту кристалізації спостерігається збільшення, а у напрямку фронту плавлення – зменшення глибини бічних підрізів. Зварювання

з ЕМД «кутом уперед» характеризується збільшеним радіусом фронту плавлення, що сприяє зменшенню швидкості центрального струменю розплаву у напрямку хвостової частини ванни, чим і пояснюється зазначений вище ефект. При цьому створюється горизонтальна складова тиску дуги, яка утримує рідкий метал в області фронту плавлення ванни. Це призводить до збільшення під дугою товщини рідкого прошарку, що сприяє підвищенню здатності ванни поглинати випадкові відхилення тиску дуги і теплового потоку. Результатом цього є різке зниження кількості пропалювань. До того, факел дуги, відхиленої до холодного металу перед фронтом плавлення, зачищає поверхню з'єднання від різних забруднень і окисів, що випаровуються у атмосфері дуги. Якісно однакові, але вищі і більш стабільні у зрівнянні з відхиленнями дуги результати поліпшення процесів формування швів досягаються при застосуванні знакозмінних радіальних КМП, які спричинюють коливання дуги вздовж ванни. При цьому, періодична зміна швидкості потоку розплаву у напрямку фронту кристалізації призводить до усунення дендритної і утворення рівновісної структури швів.

Недоліком таких імпульсних дій є те, що при їх реалізації позитивні зміни відбуваються не у всьому перерізі швів, а лише у їх центральних частинах. Підвищення ефективності впливу на процеси кристалізації ванни можливо шляхом перемінного формування потоків її розплаву як у бік центральної, так і периферійних зон фронту кристалізації. Цього можна досягти при змінах у процесі зварювання напрямків коливань або відхилень дуги.

При застосуванні радіальних знакозмінних КМП з магнітним потоком, паралельним поздовжній осі шву, з підвищенням індукції відбувається експоненціальне збільшення амплітуди поперечних коливань дуги (до 9–12 мм). Це спричинює стабілізацію процесу горіння дуги, усуваються напливи на підсиленні шву, забезпечується більш рівномірне формування його зворотного валика. До того, збільшується у 1,5–2,5 рази коефіцієнт форми шву  $\Psi = b/h$  при відповідному збільшенні на 20–25 % його ширини  $b$  і зменшенні на 10–50 % глибини проплавлення  $h$ . При цьому, збільшенню частоти коливань відповідає зменшення  $h$ , що пояснюється відповідними змінами тиску дуги на розплав зварювальної ванни.

Окремо слід виділити ЕМД, що ґрунтуються на використанні комбінованих КМП. Їх сутність полягає у одночасному або почерговому генеруванні у зоні зварювання КМП з різними характеристиками. Розглянемо технологічні особливості відомих ЕМД на цій основі.

Комбіновані постійні і змінні поперечні КМП використовують для керування формуванням швів при зварюванні на підвищених швидкостях тонкостінних кабельних оболонок. При цьому постійним КМП відхиляють дугу до фронту плавлення, чим досягають зменшення глибини підрізів, а змінним КМП коливають дугу вздовж шву. Це дозволяє здійснювати періодичне «скидання» надлишку рідкого металу з фронту плавлення до фронту кристалізації і підвищувати стабільність процесу формування швів.

При взаємодії у об'ємі зварювальної ванни поперечного КМП із зварювальним струмом створюються об'ємні електродинамічні сили, спрямованні вертикально по відношенню до поверхні зварюваних швів. Цей ефект використовують для керування процесами формування швів. Однак для його реалізації необхідне застосування підвищених індукцій КМП, що негативно відбивається на стабільності дугового процесу. У наслідок суперпозиції КМП, генерованих різними електромагнітами, можливо досягнення такого результуючого їх розподілу, коли на поздовжній осі дуги поперечна складова індукції дорівнює нулю і збільшується при віддаленні до фронтів плавлення і кристалізації. При цьому, за певної інтенсивності ЕМД, без зниження стабільності горіння дуги досягається компенсація гравітаційних сил, які погіршують формування швів при зварюванні на вису.

Підвищення ефективності зазначеного способу досягається збільшенням густини струму у об'ємі хвостової частини ванни. Для цього у зоні зварювання додатково генерують

вихрові струми індукційним способом. Тобто, у даному випадку використовується суперпозиція постійного поперечного і високочастотного аксіального КМП для утримання розплаву ванни при зварюванні у стельовому положенні.

Таким чином, розглянувши особливості основних способів зварювання з об'ємними і поверхневими ЕМД виявлено наявність різних точок зору на процеси, що відбуваються у ванні, і механізми поліпшення показників якості швів. Максимальна результативність при застосуванні всіх відомих способів зварювання і наплавлення з ЕМД досягається при оптимальних параметрах використаного КМП [2].

Зовнішні поздовжні (аксіальні), поперечні та обертальні електромагнітні поля достатньо давно використовуються в елементах обладнання методів інженерії поверхні для стабілізації положення дуги в межах дугового каналу плазмотронів, організації переміщення плям прив'язування дуги по поверхні електродів для зниження рівня теплових потоків у елементи конструкції плазмотрона і, значно рідше, для зміни напруженості електричного поля дуги з метою впливу на енергетичні характеристики генераторів плазми [3].

Осьова складова зовнішнього аксіального магнітного поля взаємодіє із радіальною ділянкою дуги і примушує її переміщуватись у азимутальному напрямку. Це призводить до скорочення часу перебування плями прив'язування дуги в нерухомому стані і, відповідно, до зменшення перегрівання поверхні під плямою та зниження питомої ерозії електродного матеріалу, а також рівномірному розподілу зони ерозії по поверхні. Крім того, зовнішнє магнітне поле, напрямлене вздовж осі довгого дугового розряду викликає вигинання дуги по спіралі, бо на неї завжди діє невелика радіальна складова сили. Дуга починає обертатися навколо своєї осі, при цьому значно збільшується напруженість електричного поля через інтенсифікацію охолодження у відносно холодному шарі газу, що її охоплює [4].

Магнітна фіксація прив'язки електричної дуги у певному перерізі електрода, що здійснюється з метою підтримки заданого значення довжини дуги, потребує наявності неоднорідного вздовж осі магнітного поля. Взаємодія створеного магнітного поля, що має радіальну складову, із тангенційною складовою струму дуги обумовлює появу сили, яка протидіє зносу дуги потоком газу [5].

Магнітна стабілізація, як головний стабілізуючий фактор застосовується в плазмотронах коаксіальної схеми. Магнітне поле, яке створюється соленоїдами, розміщеними коаксіально відносно електродів, є у цьому випадку *поперечним* по відношенню до дуги. Теплообмін дугового стовпа із газовим потоком при поперечному обдуванні дуги є значно інтенсивнішим порівняно із поздовжнім. Це дозволяє реалізовувати більші значення напруженості електричного поля. Наприклад, якщо в плазмотроні осьової схеми характерне значення напруженості повітряної дуги становить 1,0–1,5 В/мм, то в коаксіальному – 5–10 В/мм.

Суттєво впливає *поздовжнє* магнітне поле і на дугу, що горить у закрученому потоці газу в плазмотронах лінійної схеми. Експериментально встановлений факт зміни профілю розподілу температур у перерізі дугового каналу зі зменшенням значення максимальної температури на осі каналу та рівня випромінювання дуги [6]. Навіть порівняно слабе магнітне поле  $2 \cdot 10^{-2}$ – $20 \cdot 10^{-2}$  Тл при високих швидкостях закручування газу дозволяє у 2–3 рази підвищити напруженість електричного поля дуги, значно зменшити тепловий потік у стінку між електродної вставки (МЄВ) та на порядок зменшити випромінювання дуги [7].

Можливості впливу на електричну дугу плазмотрона значно розширюються із застосуванням зовнішнього *обертального* магнітного поля [8, 9]. Це є дієвим способом просторової стабілізації дуги і ефективного впливу на електричні параметри дуги. Стовп дуги при накладанні магнітного поля обертається навколо своєї осі і прецесіє навколо осі магнітного поля. Швидкість прецесії практично співпадає із швидкістю обертання магнітного поля. Зі збільшенням швидкості обертання радіус прецесії зменшується і, починаючи із деякого значення,

дуга жорстко стабілізується на осі магнітного поля. Дослідження впливу обертального магнітного поля на узагальнені вольт-амперні характеристики електричної дуги доводять можливість значного підвищення напруги на дузі [10].

Застосування магнітних полів у процесах інженерії поверхні не обмежується впливом на енергетичні і ресурсні характеристики плазмових генераторів. На кафедрі інженерії поверхні НТУУ «КПІ» проводяться дослідження впливу зовнішніх магнітних полів на процеси формування газопорошкових потоків та покриттів при плазмовому напиленні [11, 12].

Виходячи з того, що високотемпературний газовий струмінь є продуктом взаємодії плазмоутворювального газу з електричною дугою, яка розміщена в межах дугового каналу генератора плазми, магнітне керування просторовим положенням електричної дуги в плазмовому розпилювачі може бути засобом впливу на просторове положення струменя плазми, який формується. Асиметричне розміщення частини стовпа дуги і примусове прив'язування анодної плями на визначеній ділянці дугового каналу сприяє перебудові температурних і швидкісних полів потоку високотемпературного газу в межах дугового каналу, а витікання газового потоку із асиметричним температурним і швидкісним полем викликає несиметричне його розширення на виході із соплового отвору (відхилення струменя газу від поздовжньої осі дугового каналу розпилювача). Кут відхилення струменя плазми відносно поздовжньої осі дугового каналу в умовах дії поперечного магнітного поля сягає 5–6° на сторону.

Просторове узгодження високотемпературного потоку газу із каналом масоперенесення дисперсного матеріалу при радіальному подаванні порошку призводить до потрапляння більшої частини порошку в область високих температур і швидкостей потоку плазми. За цих умов суттєво зростає максимальна товщина плями напилення при збереженні, в цілому, ступеня зосередженості профілю. Аналіз плям напилення для діамантного та феромагнітного матеріалів доводить загальну тенденцію щодо зростання їх площі та об'єму: площа в поперечному перетині збільшується на 27–53 %, площа в плані на 20–43 % і об'єм на 21–75 % за рахунок зростання коефіцієнта використання матеріалу (КВМ) у 1,3–1,5 рази (залежно від продуктивності напилення, гранулометричного складу дисперсної фази і фізико-хімічних властивостей матеріалу, що напилюється).

Враховуючи наявність прямого зв'язку між КВМ і якісними характеристиками покриття, зокрема пористістю матеріалу покриття та міцністю зчеплення покриття з основою, підвищення КВМ на 30–50 % знижує пористість на 26–40 % і підвищує міцність зчеплення покриття з основою на 23–52 %.

У випадку застосування знакозмінного поперечного магнітного поля, зміна параметрів плями напилення відбувається за рахунок циклічного переміщення об'єму високотемпературного газу відносно твердої фази, що сприяє підвищенню коефіцієнта тепловіддачі від газу до дисперсного матеріалу та інтенсифікує процес нагрівання порошку.

У разі напилення порошків феромагнітного типу певні корективи у процес формування плями напилення вносить взаємодія поперечного магнітного поля з частинками вихідного матеріалу (за умови їх перебування в тепловому стані нижче точки Кюрі): вихідний потік дисперсного матеріалу розпушується, рівномірно розміщуючись в межах високотемпературного газового потоку.

Перехід від поперечного магнітного поля до обертального дозволяє, через циклічне просторове переміщення із заданою частотою високотемпературної області газового потоку, одночасно інтенсифікувати теплообмін дисперсної фази гетерогенного потоку з нагрітим газом і вирівняти температурний профіль зони взаємодії порошку і потоку газу.

Для створення обертального магнітного поля була застосована 8-и полюсна магнітна система, в якій із заданим темпом у певній послідовності вмикається пара протилежно розміщених обмоток електромагніта, що призводить до появи змінного у просторі напрямку індукції магнітного поля.

## ВИСНОВКИ

Дослідженнями встановлено, що при накладанні обертого магнітного поля збільшується із підвищенням частоти обертання поля видимий об'єм високотемпературної зони плазмового струменя. Характерною особливістю досліджуваних процесів є залежність зміни об'єму високотемпературної зони плазмового струменя від взаємного напрямку обертання зовнішнього магнітного поля і початкового закручування плазмоутворювального газу.

Якщо напрямок обертання поля співпадає з напрямком початкового закручування газу, значної видимої зміни об'єму високотемпературної області плазмового струменя не спостерігається в усьому дослідженому діапазоні зміни частоти обертання зовнішнього магнітного поля. При цьому, ширина області шунтування дуги на вихідному електроді значно (у 2–3 рази) скорочується і дещо переміщується вгору по потоку. Позитивним моментом для плазмових розпилювачів дисперсних матеріалів є вирівнювання температурного профілю потоку плазми.

Зміна напрямку обертання поля на протилежний, при збереженні напрямку початкового закручування плазмоутворювального газу, змінює умови теплообміну частини дуги із газом. Суттєво (на 15–20 %) зростає інтегральне значення напруги на дузі за рахунок локального підвищення напруженості на частині стовпа і приелектродній ділянці дуги. Підвищення інтегрального значення напруги на дузі призводить, при сталому струмі дуги, до зростання загальної потужності дугового розряду і збільшення об'єму високотемпературної області плазмового струменя. Додатковий позитивний ефект дає вирівнювання поля температур в межах потоку плазми, який генерується.

## ЛІТЕРАТУРА

1. Рыжов Р. Н. Электромагнитные воздействия в процессах дуговой сварки и наплавки / Р. Н. Рыжов, В. Д. Кузнецов // Автоматическая сварка. – 2006. – № 10. – С. 36–44.
2. Рыжов Р. М. Магнитное керування якістю зварних з'єднань / Р. М. Рыжов, В. Д. Кузнецов. – К. : Еко-технологія, 2010. – 288 с.
3. Магнитное управление электрическими дугами в высокотемпературных установках для нагрева газа / П. В. Сергеев, Б. К. Локиша, Г. А. Шепель, Ш. Ш. Ибраев // Тез. докл. V Всесоюзной конференции по генераторам низкотемпературной плазмы. – Новосибирск : Институт теплофизики СО АН СССР, 1972. – Т. I. – С. 131–132.
4. Даутов Г. Ю. Плазмотроны со стабилизированными электрическими дугами / Г. Ю. Даутов, В. Л. Дзюба, И. Н. Карп. – К. : Наук. думка, 1984. – 168 с.
5. Электродуговой подогреватель газа с жесткой фокусировкой зоны горения разряда / В. И. Алферов, О. Н. Витковская, Ю. С. Устинов, Г. И. Щербаков // Физика, техника и применение низкотемпературной плазмы : сб. науч. тр. – Алма-Ата, 1977. – С. 378–381.
6. Мельникова Т. С. Экспериментальное исследование стабилизированной вихрем электрической дуги в продольном магнитном поле / Т. С. Мельникова, В. Г. Попенко, И. М. Уланов // Изв. Сиб. Отд. АН СССР. – 1978. – № 8. – Вып. 2. – С. 31–33. – (Серия «Технические науки»).
7. Мотовилов В. В. Динамика преобразования параметров электрической дуги вращающимся магнитным полем / В. В. Мотовилов, В. Ф. Петько // Тез. докл. XI Всесоюзной конференции по генераторам низкотемпературной плазмы. – Новосибирск : Ин-т теплофизики СО АН СССР, 1989. – Т. I. – С. 186–187.
8. Исследование движения электрической дуги во вращающемся магнитном поле / В. М. Егоров, О. Я. Новиков, В. Ф. Петько, В. С. Соболев // Тез. докл. VIII Всесоюзной конференции по генераторам низкотемпературной плазмы. – Новосибирск : Ин-т теплофизики СО АН СССР, 1980. – Ч. I. – С. 149–152.
9. Мотовилов В. В. Динамика преобразования параметров электрической дуги вращающимся магнитным полем / В. В. Мотовилов, В. Ф. Петько. // Тез. докл. XI Всесоюзной конференции по генераторам низкотемпературной плазмы. – Новосибирск : Ин-т теплофизики СО АН СССР, 1989. – Т. I. – С. 186–187.
10. Обобщенные вольтамперные характеристики электрической дуги во вращающихся магнитных полях / А. Г. Гаврилов, О. Я. Новиков, В. Ф. Петько, В. С. Соболев // Тез. докл. IX Всесоюзной конференции по генераторам низкотемпературной плазмы. – Фрунзе : Илим, 1983. – С. 52–53.
11. Пащенко В. Н. Магнитное управление потоками низкотемпературной плазмы в процессах нанесения газотермических покрытий / В. Н. Пащенко, С. П. Солодкий // Автоматическая сварка. – 2006. – № 6 (638). – С. 53–55.
12. Пащенко В. М. Підвищення ефективності процесу повітряно-плазмового нанесення покриттів магнітним керуванням газопорошковим потоком / В. Н. Пащенко, С. П. Солодкий // Наукові вісті НТУУ «КПІ». – 2006. – № 3 (47). – С. 71–75.