

Дніпровський державний технічний університет, м. Кам'янське

ОГЛЯД ІСНУЮЧИХ МЕТОДІВ ПІДВИЩЕННЯ МІЦНОСТІ ЗВАРНИХ З'ЄДНАНЬ (ЧАСТИНА II. ЗАСТОСУВАННЯ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ПОЛІВ В ЗВАРЮВАЛЬНИХ ТА СПОРІДНЕНИХ ПРОЦЕСАХ)

Вступ. Електромагнітне переміщення (ЕМП) рідкого металу зварювальної ванни застосовують для безпосереднього впливу на її кристалізацію і управління на цій основі структурою та службовими властивостями зварних з'єднань. Відомо про високі техніко-економічні показники виробничого впровадження методів зварювання з ЕМП (дугового, імпульсно-дугового, електрошлакового і ін.), однак обсяги їх застосування для вдосконалення технологічних процесів електродугового зварювання плавленням все ще недостатні. Це пов'язано з відсутністю устаткування для ЕМП, що випускається серійно [1, 2].

Постановка задачі. Виникнення основних дефектів литої структури швів, що знижують службові властивості зварних з'єднань, відбувається на стадії кристалізації рідкого металу в зварювальній ванні. Тому успішне вирішення завдань управління якістю з'єднань, одержуваних зварюванням плавленням, вимагає розробки методів і засобів активного впливу саме на цю стадію зварювального процесу. Традиційні методи впливу на структуру і властивості зварних швів, які ґрунтуються на використанні відомих металургійних або технологічних прийомів (легування, модифікування, регулювання погонної енергії, вібрації зварювальної ванни тощо), не завжди прийнятні з причин неоднозначного впливу як на властивості з'єднань, так і на продуктивність зварювання, а також труднощів практичного застосування. Принципово нові можливості для управління формуванням і кристалізації зварних швів створюються при використанні зовнішніх магнітних полів для переважного впливу на джерело зварювального нагріву, наприклад, дугу або на гідродинаміку зварювальної ванни.

Результати роботи. Магнітне управління здійснюється без безпосереднього контакту керуючих пристроїв з зоною зварювання, легко піддається автоматизації, і його застосування не вимагає істотної зміни стандартного устаткування і техніки зварювання. Це створює хороші передумови для широкого застосування електромагнітних впливів в управлінні якістю зварних з'єднань, в тому числі на основі систем автоматичного регулювання [1, 3].

У загальному обсязі робіт, виконуваних зварювання плавленням, більше 60% складають технології дугового, імпульсно-дугового і електрошлакового зварювання. 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.

Аналіз виявив, що технологічне застосування поздовжніх (ПДМП), поперечних (ПОМП) або комбінованих (КМП) магнітних полів визначається вибором об'єкта керування. При цьому дуга, зварювальна ванна або краплі розплавленого металу на торці електрода можуть бути самостійними об'єктами ЕМД або, що більш характерно, об'єктами одночасного впливу. В останньому випадку ефективність ЕМД визначається ступенем проявлення позитивної дії факторів, відповідальних за технологічний резуль-

тат в обраному об'єкті керування, і, навпаки, зменшенням їх негативного проявлення у інших [1, 4].

Розглянемо механізми дії і технологічні можливості відомих способів зварювання і наплавлення з ЕМД.

Зовнішні магнітні поля при зварюванні можуть використовуватися для безпосереднього створення у ванні рідкого металу поля певним чином орієнтованих сил, що впливають на формування шва. При використанні ПДМП однієї полярності можливо подрібнення структури металу шва за рахунок нереверсивного руху розплаву із головної до хвостової частини ванни. Однак у цьому випадку позитивні зміни відбуваються з одного боку швів, на протилежній їх стороні вплив ЕМД не спостерігається [2, 5]. При цьому внаслідок асиметрії теплового поля відбувається зміщення від центральної осі лінії зрощування кристалітів.

Магнітне поле, яке створюється трифазним індуктором і перетинає ванну в площині, взаємно перпендикулярній до всієї її поверхні, призводить до взаємодії цього магнітного поля з магнітними полями вихрових та зварювального струмів в розплаві. При цьому в ванні виникає комплекс магнітогідродинамічних явищ, що спричиняє переміщення рідкого металу уздовж осі шва в тому чи іншому напрямку [4]. Управління таким рухом шляхом вибору напруженості зовнішнього магнітного поля дозволяє змінювати умови динамічної рівноваги рідкого металу в ванні і, як наслідок, умови формування швів. Встановлено, що при використанні описаного методу можна підвищити критичну швидкість одно- і багатодугового зварювання до таких значень, при яких шви формуються без подрізів та інших дефектів, а рідкий метал ванни добре утримується при зварюванні швів, розташованих на негоризонтальних поверхнях.

На думку авторів робіт [1, 2], при реалізації ЕМД важливе значення має вибір раціональних видів і форм руху дуги та розплавленого металу зварювальної ванни. З одного боку, вони повинні чинити найефективніший вплив на процеси, що визначають кристалізацію швів, а з іншого – бути реалізованими простими технічними засобами. Для досягнення хімічної і температурної однорідності розплаву за об'ємом визначено схеми перемішування мають «провокувати» деформації у потоці розплаву при зіткненні його зі стінками або з потоками, що виникли в різних зонах ванни.

Аналіз різних схем перемішування показав, що в основі більшості з них лежить обертання розплаву в тій чи іншій площині під дією пондеромоторних сил, а для задоволення умов раціонального перемішування при організації вимушеного руху рідкого металу в малих об'ємах, характерних для дугових процесів як його основи, доцільно створення кругових потоків розплаву шляхом зворотно-обертального переміщення його частинок в площинах, паралельних дзеркалу ванни. Такі потоки доповнюють природні, орієнтовані в площині зварювальних кромок, рухи з головної частини ванни в хвостову. Взаємодія потоків призводить до створення досить різноманітних картин течій розплаву, усунення зон недостатнього перемішування на стику головної і хвостової частин ванни та інтенсифікації тепло- і масообмінних процесів в ній [4].

Саме наявність інтенсивних природних потоків розплаву в зварювальній ванні, що визначаються тиском стовпа дуги, різницею гідростатичних тисків в головній і хвостовій частинах ванни і конвективним обміном в ній, забезпечує перемішування розплаву. Тому необхідно визначити, в якій мірі може бути корисним примусове перемішування розплаву зварювальної ванни для управління кристалізацією, на які параметри процесу кристалізації має бути при цьому направлено вплив і чи можна здійснити таке перемішування електромагнітним способом [3].

Таким чином, виявлено наявність різних точок зору на процеси, що відбуваються у ванні, та механізми поліпшення показників якості швів. На нашу думку, максимальна результативність при всіх відомих способах зварювання і наплавлення з ЕМД досягається при комплексному використанні схем з впливом КМП.

Одним з важливих результатів застосування перемішування розплавів є подрібнення литої структури, що підтверджується досвідом ливарного виробництва. У свою чергу, подрібнення литої структури зварних швів впливає на стійкість проти утворення гарячих тріщин при зварюванні аустенітних сталей і на підвищення механічних властивостей при зварюванні титану. У зв'язку з цим, отримання дрібнозернистої структури є однією з основних задач управління кристалізацією зварних швів і застосування для цієї мети примусового перемішування розплаву зварювальної ванни.

Відомо, що отриманню дрібнозернистих структур (при інших рівних умовах) сприяють максимальні швидкості кристалізації, які, в свою чергу, є функцією переохолодження розплаву. Тому, змінюючи величину переохолодження розплаву перед фронтом кристалізації, можна управляти швидкістю зростання кристалітів і, як наслідок, подрібненням структури швів.

При зварюванні сплавів і металів, що містять домішки, перед фронтом кристалізації існує зона так званого концентраційного переохолодження, обумовлена невідповідністю рівноважних температур в розплаві фактичним. Концентраційне переохолодження спостерігається, якщо виконується нерівність [4]

$$\frac{G}{V_{кр}} \leq \frac{mC_0(1-k_0)}{Dk_0},$$

де G – градієнт температури у розплаві перед фронтом кристалізації;

$V_{кр}$ – швидкість переміщення фронту кристалізації;

m – тангенс кута нахилу ліквідусу до осі абсцис відповідної діаграми;

C_0 – початкова концентрація домішок у розплаві;

k_0 – рівноважний коефіцієнт розподілу домішок;

D – коефіцієнт дифузії домішок у розплаві.

Величина правої частини нерівності залежить від фізичних властивостей сплаву, що визначаються його хімічним складом, який регламентований умовами наступної експлуатації зварного з'єднання і не може бути довільно змінений.

Регулювання швидкості переміщення фронту кристалізації шляхом зміни швидкості зварювання малоефективне, оскільки при цьому змінюється форма ванни, і середня швидкість кристалізації залежить від положення ділянки ванни, яка кристалізується. Тому управляти кінетикою кристалізації, змінюючи ступінь концентраційного переохолодження відповідно до нерівності, можна лише шляхом регулювання градієнта температури перед фронтом кристалізації. Для вирішення цього завдання використовується перемішування розплаву зварювальної ванни.

З кінетикою кристалізації пов'язана також зміна хімічної неоднорідності литої структури. При кристалізації системи перед міжфазною поверхнею утворюється дифузний шар домішок, розподіл концентрацій в якому по товщині шару визначається залежністю

$$C_{жс} = C_0 \left(1 + \frac{1-k}{k} e^{-\frac{v_{кр}}{D} x} \right),$$

де $C_{жс}$ – концентрація домішок у розплаві;

x – відстань від відповідної точки до міжфазної поверхні;

k – коефіцієнт розподілу домішок.

Зміна швидкості кристалізації призводить до перерозподілу домішок перед фронтом кристалізації відповідно до нового значення. Чим більше прискорення переміщення фронту кристалізації, тим інтенсивніше він буде поглинати накопичені в розплаві домішки і, відповідно, тим менше їх буде залишатися перед фронтом. Тому для зменшення кількості домішок в дифузійному шарі і більш рівномірного розподілу їх в твер-

дій фазі доцільно в процесі перемішування розплаву створювати умови для періодичної прискореної кристалізації. Це призведе до збільшення ефективного коефіцієнта розподілу домішок, що може бути визначено за формулою:

$$k_{\text{эф}} = \frac{1}{1 + \left(\frac{1-k_0}{k_0}\right) e^{-\frac{\delta x V_{\text{кр}}}{D}}}$$

Примусове перемішування при відповідному виборі схем керування потоками розплаву може бути використано для отримання більш плавних обрисів і збільшення радіусу хвостової частини зварювальної ванни, що, як відомо, сприяє підвищенню стійкості зварних швів проти утворення гарячих тріщин.

Вимушений рух, що доповнює природні потоки розплаву в зварювальній ванні, може використовуватися для усунення зон недостатнього перемішування на стику головної і хвостової (де йде кристалізація) частин ванни, які можуть бути причиною локалізації газових пор за лінією сплавлення.

Таким чином, застосування примусового перемішування рідкого металу зварювальної ванни з метою доповнення природних форм руху розплаву, поліпшення масопереносу і управління термоконцентраційними процесами, що визначають структуру і властивості зварних швів, фізично обґрунтоване і практично доцільне.

Оскільки при дуговому зварюванні в малих об'ємах розплаву протікають відносно великі електричні струми, для його перемішування доцільніше використовувати кондукційний спосіб. Густина об'ємних пондермоторних сил, створюваних в розплаві при цьому способі

$$\bar{F} = \bar{j} \cdot \bar{B},$$

де \bar{j} – вектор густини електричного струму в розплаві;

\bar{B} – вектор індукції зовнішнього магнітного поля.

Тобто, необхідний для перемішування рівень сил F при великих значеннях j може бути досягнутий при менших значеннях індукції зовнішнього магнітного поля B . Це, в свою чергу, дозволяє застосовувати для перемішування малопотужні і, відповідно, малогабаритні електромагнітні пристрої, які не знижують маневреності зварювального інструменту.

Звичайним для природного стану ванни є рух рідкого металу з головної частини в хвостову уздовж об'ємно-криволінійної ізотермічної поверхні фронту кристалізації і потім – із хвостової частини в центральну уздовж поверхні ванни. Швидкість такого руху визначається тиском стовпа дуги, гідростатичним опором, пов'язаним з крутизною заднього фронту ванни і іншими силами опору, зумовленими в'язкістю розплаву і особливостями форми ванни як ділянки гідравлічного каналу. За даними різних робіт [1-4, 7] ця швидкість перевищує швидкість зварювання не більше, ніж в 1,1...2,2 рази.

При зварюванні з електромагнітним впливом взаємодія зовнішнього ПДМП з радіальною (поперечною) складовою зварювального струму призводить до відхилення заряджених частинок в одному і тому ж напрямку в площинах, паралельних дзеркалу зварювальної ванни. Заряджені частинки захоплюють при своєму русі нейтральні, приводячи таким чином весь розплав в обертання навколо центру введення зварювального струму в ванну. Однак складна об'ємно-криволінійна просторова форма зварювальної ванни і наявність в ній власних потоків рідкого металу істотно ускладнюють реальну картину течій у ванні при зварюванні з ЕМП [7].

Якщо при зварюванні в звичайних умовах найбільш інтенсивний рух розплаву відбувається уздовж осі ванни, то при зварюванні зі змінним ЕМП розвиток отримує рух розплаву з частотою його дії в хвостовій її частині. Середня швидкість переміщення розплаву при зварюванні з таким ЕМП перевищує швидкість зварювання більш ніж

в 2,5...5,8 рази. Зі збільшенням індукції ЕМП інтенсивність руху розплаву зростає. Однак, у зв'язку із зменшенням швидкості потоку розплаву в глибині ванни перемішування рідкого металу в хвостовій частині з переходом через подовжню осьову площину, як правило, не спостерігається. При зміні полярності ЕМП перемішування відбувається шляхом просування окремих порцій перегрітого металу з головної частини ванни в середню уздовж лівої або правої бічної поверхні, в залежності від полярності. Такий характер руху розплаву сприяє «розмиванню» бічних країв ванни і, як наслідок, збільшенню ширини шва з ростом індукції МП.

Зі збільшенням інтервалу реверсування (при індукції $B=const$) у ванні можуть бути створені умови, за яких потік, що рухається уздовж однієї з бічних поверхонь, зустрічається в хвостовій її частині з потоком, який утворюється після зміни полярності та спрямований вздовж іншої поверхні [6]. Це призводить до появи турбулентного ефекту та інтенсифікує перемішування металу у зварювальній ванні. Проте застосування такого прийому інтенсифікації перемішування обмежується в реальних умовах у зв'язку з погіршенням якості формування шва та підвищенням ризиків утворення дефектів у вигляді пор та свищів.

Закономірності зміни кожного із показників у функції параметрів МП мають, як правило, вигляд кривих з екстремумом, що вказує на неоднозначність поліпшення властивостей металу швів при зварюванні з ЕМД [2, 6]. Наявність на осі індукцій зсувів екстремумів пояснюються відмінностями умов проведення досліджень, зокрема, різними хімічними композиціями основних і зварювальних матеріалів, способами і режимами зварювання.

Узагальнення експериментальних даних і аналіз закономірностей зміни вказують на однозначну кореляцію між змінами показників властивостей і параметрами, які залежать від особливостей кристалізації металу швів при зварюванні з ЕМД. Позитивна роль подрібнення структури і підвищення її однорідності полягає у збільшенні опору швів гарячим тріщинам, поліпшенні механічних і корозійних властивостей металу швів. Пригнічення ліквідаційних процесів і зменшення розміру зерен при зварюванні з ЕМД сприяє підвищенню здатності до деформування і в'язкості їх пограничних ділянок як при звичайних, так і при низьких температурах, чим і пояснюється збільшення пластичних властивостей металу швів.

Екстремальні співвідношення, які визначають ймовірність утворення пор при зварюванні, також пояснюються закономірностями кінетики кристалізації і розподілу температур у ванні. Основну роль у зниженні пористості швів при зварюванні з ЕМД відіграє вирівнювання температур у ванні, яке сприяє її дегазації і зменшенню концентрації газів у рідкому металі біля фронту кристалізації унаслідок зменшення товщини концентраційного ущільнення і розвитку процесів вирівнювальної дифузії.

Таким чином, особливості температурного стану ванни і кінетики її кристалізації є основними чинниками, які визначають розміри первинних форм твердіння і, як наслідок, властивості металу швів.

Зовнішнім проявом особливостей стану ванни при зварюванні з ЕМП є посилення рельєфності поверхні швів. При використанні односпрямованого МП спостерігається поперечне зміщення шва з осі стику в напрямку, який визначається поєднанням полярності дуги і МП. Практично це є головною причиною обмеженого застосування таких магнітних полів для здійснення ЕМП при дуговому зварюванні. Реверсування МП (понадмоментних сил в розплаві) призводить до періодичного в поперечному напрямку переміщенню розплаву з хвостової частини ванни до осі стику. Недостатнє перекриття таких зон у ванні при малих частотах реверсування МП супроводжується асиметричністю формування шва. Крім того, підвищення індукції МП (з метою інтенсифікації згаданих процесів) призводить до формування надмірної опуклості валиків, несплавлення та підрізів. Проте підвищення частоти реверсування МП сприяє повнішому взаєм-

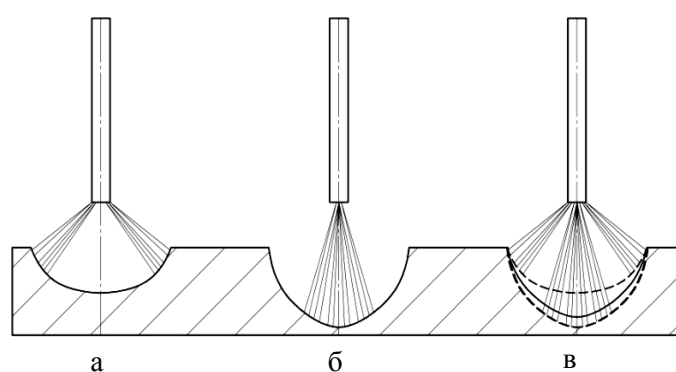
ному перекриттю миттєвих положень ванни і отримання симетричних, добре сформованих швів з дрібнолускуватою поверхнею.

Такий зв'язок між параметрами МП і формуванням швів свідчить про визначальний вплив на якість поверхні швів періодичного (з частотою реверсування МП) переміщення рідкого металу зварювальної ванни в процесі перемішування уздовж бічних кромek. Неминучі в цих умовах коливання рівня розплаву в хвості ванни фіксуються при швидкій кристалізації у вигляді напливів (лусок), питома кількість гребенів яких на одиницю довжини шва залежить від швидкості зварювання й інтервалу реверсування МП. Шви, виконані з ЕМП, мають, як правило, більш плавні обриси проплавлення зі зниженою глибиною в порівнянні зі швами, сформованими за тих самих умов зварювального режиму, але без ЕМП.

Ступінь впливу індукції й інтервалу реверсування МП на зміну геометричних розмірів ванни порівнювалася зі ступенем впливу на них головних параметрів зварювального режиму. Для цього бралися результати багатофакторних експериментів при зварюванні з ЕМП низьковуглецевих та легованих сталей і титану під флюсом і неплавким електродом в аргоні [3, 5, 7]. Аналіз отриманих за результатами цих дослідів рівнянь регресії показав, що при зварюванні під флюсом з ЕМП вплив індукції МП на зміну глибини проплавлення є близьким за значенням, але протилежним за напрямом впливу на цей параметр струму дуги і швидкості зварювання. У зв'язку з цим деяке зниження швидкості зварювання при підвищених індукціях МП є одним із шляхів стабілізації глибини провару в окремих випадках зварювання з ЕМП.

Застосування ЕМП при зварюванні плавленням, зокрема під флюсом, може супроводжуватись помітним зниженням глибини проплавлення, в несприятливих випадках досягає 25% вихідної величини, отриманої до його включення [1, 7]. Оскільки причиною цього є дестабілізація просторового положення дуги, обумовлена переміщенням обох її активних плям на виробі і на розвиненій поверхні краплі, що формується на торці електрода, застосування систем автоматичної підтримки параметрів зварювального режиму не може дати значного ефекту щодо попередження зниження глибини проплавлення. Тому ймовірність отримання меншого фактичного проплавлення при зварюванні плавленням з ЕМП повинно враховуватися в процесі вирішення конкретних технологічних завдань.

Зварювання з ЕМП має ряд особливостей, які можуть протилежно впливати на



а – розподільчасті плями нагріву при обертанні дуги в ПДМП; б – природна форма дуги; в – коливання глибини проплавлення (пунктирні лінії) та її результуюче значення (суцільна лінія) при зварюванні з накладанням імпульсного ПДМП

Рисунок 1 – Вплив ступеня концентрації дуги на її проплавляючу здатність

процеси, що визначають щільність, газонасиченість металу шва і наявність в ньому пор. Характерні для цього методу зварювання підвищення коефіцієнта форми провару, зменшення кута нахилу кристалітів до осі поперечного перерізу шва і деяке збільшення площі дзеркала ванни можуть сприяти більш повній дегазації розплаву ванни і, таким чином, сприяти зниженню пористості металу швів. З іншого боку, збільшена рухливість дуги в аксіальному магнітному полі при ЕМП може супроводжуватися порушенням за-хисту

зони зварювання і бути причиною додаткової пористості в зв'язку з насиченням ванни газами з навколишнього середовища. Характерне для швів, зварених ЕМП, подрібнення структури і порушення її транскристалітності також може бути причиною збільшення кількості мікропор у металі.

Висновки.

1. При аналізі науково-технічної інформації встановлено, що існує можливість керування механічними властивостями зварного з'єднання вже на етапі його формування.
2. Досягти максимальної ефективності використання додаткового електромагнітного впливу на механічні характеристики зварного з'єднання у кожному конкретному випадку можна погодженим вибором параметрів технологічного процесу та обладнання.
3. Найбільш перспективним та ефективним способом підвищення міцності зварних з'єднань при дуговому зварюванні та наплавленні є застосування зовнішніх електромагнітних полів.
4. Електромагнітне перемішування рідкого металу зварювальної ванни застосовують для безпосереднього впливу на її кристалізацію і управління на цій новій основі структурою і механічними властивостями зварних з'єднань.
5. Вплив ЕМП на формування зварного шву неоднозначний.
6. Виникнення основних дефектів литої структури швів, що знижують службові властивості зварних з'єднань, відбувається на стадії кристалізації рідкого металу в зварювальній ванні. Тому успішне вирішення завдань управління якістю з'єднань, одержуваних зварюванням плавленням, вимагає розробки методів і засобів активного впливу саме на цю стадію зварювального процесу.
7. Застосування примусового перемішування рідкого металу зварювальної ванни з метою доповнення природних форм руху розплаву, поліпшення масопереносу і управління термоконцентраційними процесами, які визначають структуру і властивості зварних швів за допомогою МП, обгрунтоване і є практично доцільним.

ЛІТЕРАТУРА

1. Рыжов Р.Н. Применение комбинированных электромагнитных воздействий для улучшения качества швов при сварке. *Автоматическая сварка*, 2005. №7. С.159-161.
2. Березовский Б.М. Математические модели дуговой сварки: в 3-х томах. Челябинск: изд-во ЮУрГУ, 2002. Т. 1. 625с.
3. Nosov D.G., Peremitko, V.V., Barashkin, M.H. Effect of Some Overlay Welding Regime with Longitudinal Magnetic Field on Hardness, Phase Composition and Welded Layer Wear by Arc Method with Flux Metal Wire. *OP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 142 (2016) 012016. P.1-6.
4. Березовский Б.М. Математические модели дуговой сварки: в 7 т. Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2006. Том.4. Основы тепловых процессов в свариваемых изделиях. 547с.
5. Nosov D., Razmyshlyayev A. Effectiveness of application of combined magnetic fields in submerged arc welding. *The Paton Welding Journal*, 2009. № 4 (April). P.16-20.
6. Nosov D., Maltsev V. The influence of magnetic fields by a melting rate of wire for arc surfacing under flux. *Applied. Mechanics and Materials*, Vol. 379 (2013). P.178-182.
7. Improving a resource-saving surfacing technology using two ribbon electrodes with a controlled transfer of electrode's metal / E.Lavrova, V.Ivanov, V.Royanov and oth. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2019. № 1/12 (97). P.28-34. doi: 10.15587/1729-4061.2019.154681.

Надійшла до редколегії 03.03.2020.