



Рижов Р.М.¹, Сидоренко П.Ю.¹, Кузнецов В.Д.¹, Золотовський А.О.², Болотов Г.П.³

¹ Національний технічний університет „КПІ”. Україна, м. Київ.

² Інститут фізики напівпровідників НАН України. Україна, м. Київ.

³ Чернігівський державний технологічний університет. Україна, м. Чернігів.

РОЗПОДІЛ ІНДУКЦІЇ КЕРУЮЧОГО МАГНІТНОГО ПОЛЯ В РОБОЧОМУ ЗАЗОРІ ПРИ ЕЛЕКТРОШЛАКОВОМУ ЗВАРЮВАННІ З ЕЛЕКТРОМАГНІТНИМ ПЕРЕМІШУВАННЯМ РОЗПЛАВУ

Анотація

Наведені результати досліджень розподілу індукції керуючого магнітного поля в робочому зазорі при електрошлаковому зварюванні з електромагнітним перемішуванням розплаву. За допомогою методу вторинних джерел створена математична модель, яка дозволяє аналізувати ефективність використання різноманітних пристроїв генерування в робочому зазорі керуючих магнітних полів. Розрахунковим шляхом показані особливості розподілу індукції при різних схемах комутації полюсів спеціалізованих електромагнітних систем.

Abstract

This simulation data of induction parameters using magnetic control field in a machining gap at electroslag welding with the electromagnetic melt mixing are shown. A mathematical model using secondary source method allows to analyze efficiency of different generation devices in a machining gap of magnetic control fields is created. Calculated way shows this induction parameter features at the different schemes of commutation poles in specialized electromagnetic systems.

Вступ

Електрошлакове зварювання (ЕШЗ) широко застосовують при виготовленні конструкцій із товстолистового металу. Цей процес характеризується високою продуктивністю і економічністю. Однак його стабільність досягається при значній тепловій потужності, яка виділяється у шлаковій ванні. Часто це призводить до надмірного проплавлення кромки, перегріву пришовної зони і обумовлює утворення крупнокристалічної структури металу шва. При цьому механічні і експлуатаційні властивості електрошлакових з'єднань після зварювання зазвичай гірші ніж у основного металу. Одним із найбільш розповсюджених способів вирішення даної проблеми є застосування термообробки, яка здорожує виробництво і може спричинювати порушення проектних розмірів

виробів. Тому зменшення її об'єму – актуальна для електрошлакових технологій проблема.

Для вирішення зазначеної проблеми часто застосовують металургійні методи, які ґрунтуються на раціональному легуванні зварюваних сталей, електродних дротів і зварювальних флюсів. Іншим перспективним напрямом є використання фізичних методів впливу на кристалізацію швів, одним із яких є електромагнітне перемішування розплаву (ЕМП). Існують дані, що застосування даного технологічного заходу при ЕШЗ спричинює збільшення на 30–40% коефіцієнта плавлення витратного електроду [1]. При цьому відбуваються позитивні структурні зміни в швах із углеродистих і аустенітних сталей [2].

Постановка задачі

Ефективність застосування зовнішніх електромагнітних дій при зварюванні значною мірою залежить від розподілу в робочій зоні індукції керуючого магнітного поля (КМП). При ЕШЗ від її амплітудних і векторних характеристик залежить характер гідродинаміки шлакової і металічної ванн. Накопичений в НТУУ “КПІ” досвід застосування ЕМП в технологічних процесах електрошлакового зварювання і переплавлення свідчить, що для генерування КМП в даних умовах найбільш доцільно використовувати багатополісні електромагнітні системи. Однак для раціонального вибору конструктивних параметрів їх складових необхідно проведення вельми складних експериментальних досліджень розподілу індукції КМП. Інший, найбільш перспективний, шлях вирішення даної проблеми – побудова відповідної математичної моделі.

Виходячи із зазначеного, метою даної роботи є створення для умов ЕШЗ математичної моделі розподілу в робочому зазорі індукції КМП, що генерується багатополісними електромагнітними системами.

Методика проведення досліджень

Електромагнітні системи (ЕМС) для реалізації процесу ЕШЗ повинні забезпечувати як локальне генерування КМП, так і його різні векторні харак-

теристики у зоні зварювання. Даним умовам задовольняють двополюсні ЕМС із стрижневими електромагнітами прямокутного перерізу з обмотками намагнічування барабанного типу (рис. 1). Конструктивно їх розміщують на поверхнях переднього і заднього формуючих пристроїв один на проти другого. При цьому зміною полярностей струмів намагнічування можна здійснювати ЕШЗ як у аксіальному, так і поперечному КМП. Геометричні розміри осердь електромагнітів визначаються параметрами зварюваних з'єднань (при моделюванні їх довжина дорівнювала 50 мм; ширина – 25 мм; висота – 30мм).

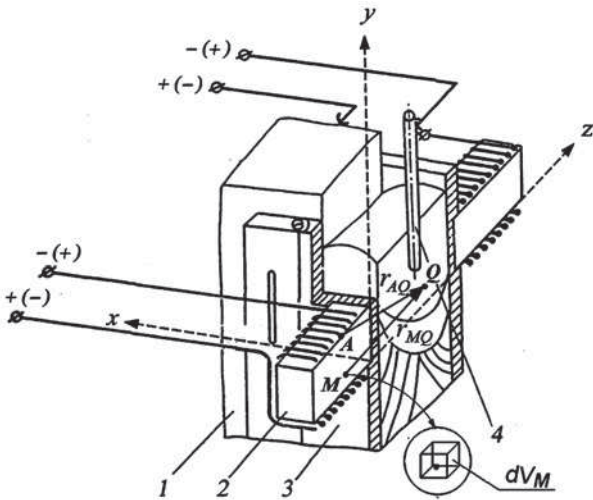


Рис. 1. Електромагнітна система для електрошлакового зварювання із зовнішніми електромагнітними діями

Математичну модель створено з використанням методу вторинних джерел [3]. Вважали, що осердя полюсів ЕМС складені із мікрооб'ємів з вторинними еквівалентними об'ємними і поверхневими джерелами магнітного поля (dV_M на рис. 1). Також було зроблено припущення, що витки багатополосових котушок намагнічування є плоскими і складеними із сукупності дуже коротких діляниць.

Сумарна напруженість магнітного поля ЕМС дорівнює:

$$H_{\Sigma}(Q) = \sum_{n=1}^N H_n(Q),$$

де N – кількість полюсів ЕМС (в умовах даних досліджень $N = 2$).

Напруженість еквівалентного магнітного поля, що генерується одним полюсом в точці Q робочої зони дорівнює:

$$H(Q) = \frac{1}{4\pi} \int_{V_k} \frac{[J(A) \cdot r_{AQ}]}{r_{AQ}^3} dV_A + \frac{1}{4\pi\mu_0} \int_{V_M} \rho_M(M) \frac{r_{MQ_n}}{r_{MQ_n}^3} dV_M + \frac{1}{4\pi\mu_0} \oint_{S_M} \sigma_M(M) \frac{r_{MQ_n}}{r_{MQ_n}^3} dS_M, \quad (1)$$

де: $J(A)$ – густина струму намагнічування в точці A ; r_{MQ_n} і r_{AQ} – вектори, що з'єднують точку Q з точками A і M , в яких знаходяться відповідно первинний і еквівалентний вторинний джерела магнітного поля; V_k і V_M – об'єми відповідно котушки намагнічування і магнітопроводу з площею поверхні S_M .

Об'ємну і поверхневу густину вторинних джерел визначали із співвідношень:

$$\rho_M(Q) = -\mu_0 H(Q) \frac{\nabla_Q \mu'}{\mu'_Q}, \quad (2)$$

$$\sigma_M(Q) = 2\mu_0 \lambda_M(Q) \cdot H(Q) \cdot n_Q, \quad (3)$$

де $\lambda_M(Q) = \frac{\mu_Q - 1}{\mu_Q + 1}$; μ_Q – магнітна проникність в точці Q ; n_Q – одинична нормаль до поверхні осердя.

Підставивши вираз (1) в (2) і (3), отримували систему інтегральних рівнянь:

$$\left\{ \begin{aligned} \rho_M(Q) - \int_{V_M} \rho_M(M) \frac{r_{MQ} \cdot \nabla_Q \mu'}{4\pi \cdot \mu_Q \cdot r_{MQ}^3} dV_M - \\ - \int_{S_M} \sigma_M(M) \frac{r_{MQ} \cdot \nabla_Q \mu'}{4\pi \cdot \mu_Q \cdot r_{MQ}^3} dS_M = \mu_0 \int_{V_k} \frac{[J(A) \cdot r_{AQ}] \cdot \nabla_Q \mu'}{4\pi \cdot \mu_Q \cdot r_{AQ}^3} dV_A; \\ \sigma_M(Q) - \int_{V_M} \rho_M(M) \frac{r_{MQ} \cdot n_Q}{4\pi \cdot r_{MQ}^3} dV_M - \\ - \int_{S_M} \sigma_M(M) \frac{r_{MQ} \cdot n_Q}{4\pi \cdot r_{MQ}^3} dS_M = \mu_0 \int_{V_k} \frac{[J(A) \cdot r_{AQ}] \cdot n_Q}{4\pi \cdot r_{AQ}^3} dV_A, \end{aligned} \right. \quad (4)$$

При вирішенні даної системи методом блочної ітерації за умови рівняння нулю додатку всіх магнітних зарядів знаходили густина вторинних еквівалентних джерел магнітного поля. Після підстановки їх значень в (1) розраховували сумарну напруженість КМП в заданій точці Q . Враховуючи, що розрахункова область обмежена об'ємом розчину зварювальної ванни, в якому відносна магнітна проникність близька до одиниці, індукцію КМП вважали рівною $B(Q) = \mu_0 \cdot H(Q)$, де μ_0 – магнітна стала.

Перевірка адекватності розробленої математичної моделі реальним умовам ЕШЗ показала, що розрахункові і експериментальні значення поперечної складової індукції КМП в робочій зоні відрізняються не більше ніж на 6% (рис. 2). Це свідчить про достатню точність розробленої математичної моделі і можливість її використання в даних дослідженнях.

Результати досліджень

Дослідження показали, що при струмі в котушках полюсів $I_n = 50$ А внаслідок ефекту “замагнічування” осередь полюсів ЕМС порушується пропорційність приросту індукції КМП в робочій зоні (рис. 2 – рис. 4). За цих обставин при практичній реалізації технологічного процесу ЕШЗ з ЕМП потреби в джерелах живлення котушок полюсів, розрахованих на більші струми, немає.

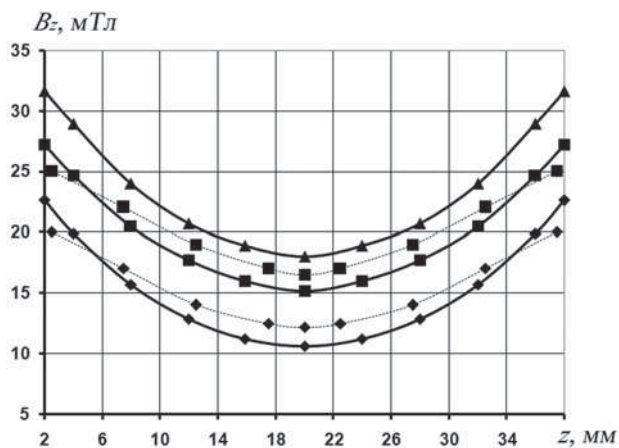


Рис. 2. Розподіл індукції КМП у площині між формуючими пристроями при узгодженій комутації полюсів ЕМС

Виявлено, що при різній полярності полюсів ЕМС (узгоджене ввімкнення) сумарний магнітний потік має один напрямок і орієнтований по нормалі до торцевих поверхонь формуючих пристроїв. З віддаленням від поверхонь швів до їх центральної частини індукція КМП зменшується і досягає мінімуму на відстані, яка дорівнює половині товщини зварюваних заготовок (рис. 2). Від цього параметру з'єднання залежить і ступінь зменшення індукції, яка, у свою чергу, в значно меншій мірі змінюється при коректуванні струмів намагнічування. Так при товщині зварюваних деталей 40 мм індукція КМП в центральній області з'єднання на 40% менша ніж на його бічних поверхнях. Слід очікувати, що аналогічно буде змінюватись і інтенсивність магнітогідродинамічних процесів у ванні.

У випадку зустрічної комутації полюсів ЕМС найбільших значень індукція КМП також набуває поблизу кожного з формуючих пристроїв (рис. 3).

Однак їх значення дещо менші за ті, що отримано при узгодженому ввімкненні. До того, індукція дорівнює нулю у центральній частині зазору. За такої комутації полюсів градієнти індукції є найбільшими і можуть досягати 2 мТ/мм. Характер наведених на рис. 2 і рис. 3 залежностей свідчить про те, що зміною способу комутації полюсів ЕМС можна суттєво змінювати гідродинаміку металевої і шлакової ванн.

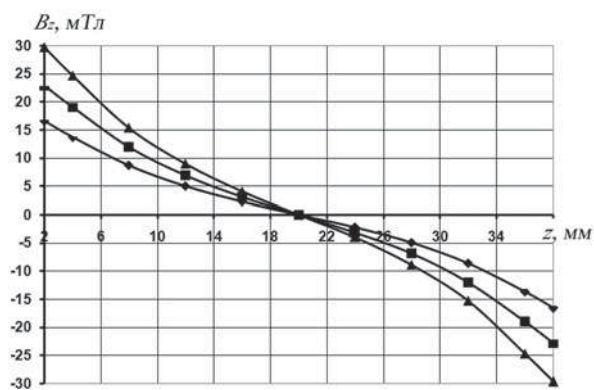


Рис. 3. Розподіл індукції КМП у площині між формуючими пристроями при зустрічній комутації полюсів ЕМС

Розрахунковим шляхом виявлено, що поблизу лінії сплавлення зварного з'єднання індукція КМП істотно менша ніж у його центральній частині (рис. 4). Так при ширині швів 25 мм

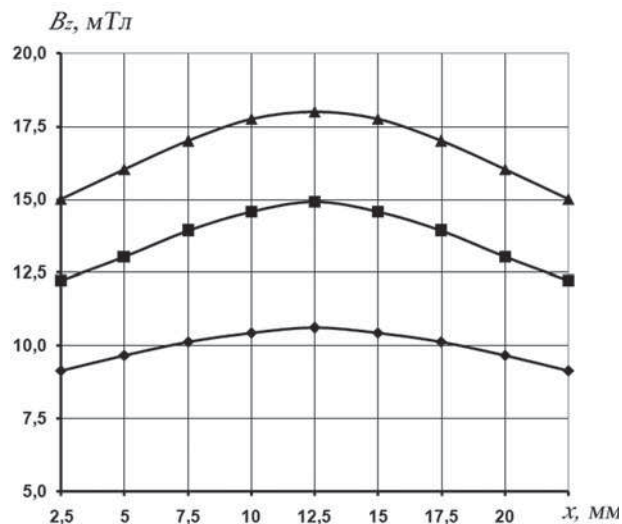


Рис. 4. Розподіл індукції КМП у площині між зварюваними кромками

зазначене зменшення становить 17%. З урахуванням того, що надмірне зближення зварюваних кромок найчастіше призводить до погіршення стабільності процесу ЕШЗ, зазначений негативний ефект можна значно послабити збільшенням ширини осередь полюсів ЕМС.

Висновки

1. Застосування зовнішніх електромагнітних дій в технологічних процесах електрошлакового зварювання з метою поліпшення показників якості з'єднань можливе при використанні багатополіусних електромагнітних систем з автономними системами керування струмами намагнічування окремих полюсів.

2. Спосіб комутації полюсів електромагнітних систем є визначальним фактором, що впливає на розподіл індукції керуючого магнітного поля у робочому зазорі і, відповідно, на магнітогідродинамічні переміщення розплавів металевої і шлакової ванн.

3. Для підвищення ефективності зовнішніх електромагнітних дій при електрошлаковому зварюванні необхідно застосовувати більш складні електромагнітні системи, конструктивні схеми яких характеризуються розташуванням декількох полюсів з кожного боку зварного з'єднання.

Література

1. Дудко Д.А., Рублевский И.Н. Электро-магнитное перемешивание шлаковой и металлической ванны при электрошлаковом процессе // Автомат. сварка. – 1960. – № 9. – С. 12–16.
2. Рижов Р.М., Кузнецов В.Д. Магнітне керування якістю зварних з'єднань // Київ. – Екотехнологія. – 2010. – 287 с.
3. Рижов Р.М., Сидоренко П.Ю. Принципи вибору структури багатополосних електромагнітних систем для керування процесами дугового зварювання // Наукові вісті НТУУ “КПІ”. – 2006. – № 3. – С. 76–82.