

ВИСОКОШВИДКІСНЕ НАПЛАВЛЕННЯ НА НИЗЬКІЙ ЕНЕРГІЇ ШИЙОК ЧАВУННИХ ВАЛКІВ

При електродуговому наплавленні, під дією теплового збудження, в наплавленому металі виникають вакансії, оскільки енергія активації виникнення вакансій менша за енергію утворення міжузельних атомів. У зоні виникнення вакансій порушується статична рівновага сил міжатомної взаємодії, що призводить до зміщення сусідніх атомів з їх рівноважних положень, мікрспотворень кристалічної решітки та мікронапруг. Мікронапруги призводять до інтенсивного утворення і зростання тріщин, механізм яких зв'язують з дислокаціями. Підвищення енергії призводить до зростання мікрспотворень кристалічної решітки, мікронапруг, щільності дислокацій, зварювальних напруг і утворення тріщин.

Для запобігання утворення тріщин необхідно знижувати енергію. Енергія знижується, шляхом підвищення швидкості наплавлення, при якому посилюється охолодження, зменшуються розміри активних плям, погонна енергія і тепловкладання, глибина проплавлення і ширина шва, частка участі основного металу в наплавленому, вміст вуглецю, мікрспотворення кристалічної решітки, мікронапруги і щільність дислокацій, зварювальні напруги і подрібнюється структура, що приводить до підвищення тріщиностійкості.

Природа утворення тріщин електромагнітна. Тріщини утворюються, коли зварювальні напруги стають більше за межу міцності, тому для підвищення тріщиностійкості необхідно забезпечити мінімальні зварювальні напруги, які визначаються енергією, тепловкладанням і деформаціями. Тріщиностійкість, зносостійкість і корозійна стійкість при високошвидкісному аргонодуговому наплавленні чавуну на низькій енергії хромонікелевим дротом підвищуються, в результаті утворення карбідів хрому, мінімуму вуглецю, зменшення енергії, зростання пластичності та ударної в'язкості, що характеризує тріщиностійкість, за рахунок нікелю, підвищення швидкості наплавлення та кристалізації, подрібнення мікроструктури, модифікації титаном зменшення тиску дуги, глибини проплавлення, і частки участі основного металу в наплавленому. Мінімум вмісту вуглецю запобігає утворенню тріщин, через випадання карбідів хрому і розшарування по межах зерен, забезпечує підвищення зносостійкості та корозійної стійкості. Енергозберігаюче аргонодугове наплавлення на низькій енергії, за рахунок низького катодного падіння напруги, забезпечує мінімум енергії, стабільність процесу, максимальний коефіцієнт легування, низький тиск дуги, низьку частку участі основного металу в наплавленому і зниження енергії в 1,5 – 2 рази в порівнянні зі зварюванням під флюсом. Підвищення ефективності високошвидкісного наплавлення на низькій енергії підтверджує закон мінімуму енергії.

Розроблено енергозберігаючий процес аргонодугового високошвидкісного наплавлення на низькій енергії шийок чавунних валків з підігрівом низьковуглецевим хромонікелевим дротом Зв06Х19Н9Т, що забезпечує утворення карбідів хрому, аустеніту, максимальний перехід легуючих елементів, модифікацію, зростання пластичності, швидкості зварювання і кристалізації, подрібнення мікроструктури, зменшення енергії, вмісту вуглецю, мікрспотворень кристалічної решітки, мікронапруг, зварювальних напруг, щільності дислокацій, міжатомної відстані, підвищення міжатомних зв'язків, тріщиностійкості, зносостійкості та корозійної стійкості.

Ключові слова: Чавунні валки, високошвидкісне наплавлення на низькій енергії, аргонодугове наплавлення низьковуглецевим хромонікелевим дротом, зварювальні напруги, тріщиностійкість, зносостійкість, корозійна стійкість.

Постановка проблеми. Чавун, що містить більш ніж 2% вуглецю, домішки, сірки та фосфору характеризується низькою пластичністю, схильністю до утворення тріщин і відноситься до важкозварюваних сплавів. Тому, підвищення тріщиностійкості, зносостійкості та корозійної стійкості чавунних валків є важливою науково-технічною проблемою.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Високий вміст вуглецю в чавуні призводить до зниження пластичності, утворення холодних і гарячих тріщин. При збільшенні вмісту вуглецю, енергії, тепловкладання і зварювальних напруг схильність до утворення тріщин зростає. Механізм утворення тріщин не встановлено [1]. Однак, Н. М. Прохоров відмічає, що при значному зменшенні погонної енергії тріщиностійкість зростає. Вплив енергії та хімічного складу наплавленого металу на структуру, тріщиностійкість, зносостійкість та корозійну стійкість чавуну досліджено недостатньо [1–9].

Мета досліджень. Встановити механізм утворення тріщин і розробити процес високошвидкісного наплавлення на низькій енергії, що забезпечує підвищення тріщиностійкості, зносостійкості та корозійної стійкості чавуна.

Основний матеріал дослідження. При електродуговому наплавленні, під дією теплового збудження в наплавленому металі виникають вакансії [1], оскільки енергія активації виникнення вакансій менша за енергію утворення міжузельних атомів. У зоні виникнення вакансій порушується статична рівновага сил міжатомної взаємодії, що призводить до зміщення сусідніх атомів з їх рівноважних положень, мікрспотворень кристалічної решітки та мікронапруг:

$$\sigma = E \frac{\Delta a}{a}, \text{ МПа}, \quad (1)$$

де E – модуль пружності, $19,68 \cdot 10^4 \text{ МПа}$,
 $\frac{\Delta a}{a}$ – мікрспотворення кристалічної решітки.

Дослідження впливу погонної енергії на мікрспотворення кристалічної решітки проводили рентгеноструктурним аналізом на рентгенівському дифрактометрі ДРОН–3.

Мікронапруги призводять до інтенсивного утворення і зростання тріщин, механізм яких зв'язують з дислокаціями. Щільність дислокацій досліджено по уширенню рентгенівських ліній [2]:

$$\rho = 3,46 \cdot 10^{19} \beta_{211}^2 (\text{рад}), \text{ м}^{-2}. \quad (2)$$

В результаті встановлено, що при наплавленні на низьких погонних енергіях щільність дислокацій знижується. Це відповідає впливу погонної енергії на мікрспотворення кристалічної решітки, оскільки джерелом дислокацій є сукупність вакансій та неметалеві включення.

Підвищення енергії призводить до зростання мікрспотворень кристалічної решітки, мікронапруг, щільності дислокацій, зварювальних напруг і утворення тріщин. При зменшенні тепловкладання і прискореному охолодженні знижується рівень пластичної деформації, що запобігає руйнуванню.

Ступінь забрудненості наплавленого металу з підвищенням швидкості наплавлення знижується, внаслідок інтенсивних конвективних потоків та швидкості руху рідкого металу. Основними неметалевими включеннями є марганець та кремній. Встановлений вплив погонної енергії на ступінь забрудненості наплавленого металу неметалевими включеннями добре узгоджується з впливом на щільність дислокацій.

Для запобігання утворенню тріщин і відшарувань наплавленого металу, при наплавленні чавуну, необхідно забезпечити мінімальний вміст вуглецю, глибину проплавлення і частку

Машинобудування і зварювальне виробництво

участі основного в наплавленому металі γ (рис.1), якою називається відношення площі проплавлення $F_{\text{ПР}}$ до площі шва F :

$$\gamma = \frac{F_{\text{ПР}}}{F} \quad (3)$$

Глибина проплавлення і ширина валика визначають хімічний склад і властивості шва, особливо при наплавленні чавунів, високий вміст вуглецю яких призводить до утворення тріщин, зниження тріщиностійкості, зносостійкості та корозійної стійкості. Для отримання міжатомних зв'язків, які виникають на міжатомній відстані 10-19 м, необхідно мінімум енергії та проплавлення основного металу, що забезпечує мінімальні мікроступорення кристалічної решітки, мікронапруги, зварювальні напруги, щільність дислокацій, підвищення тріщиностійкості, зносостійкості та корозійної стійкості.

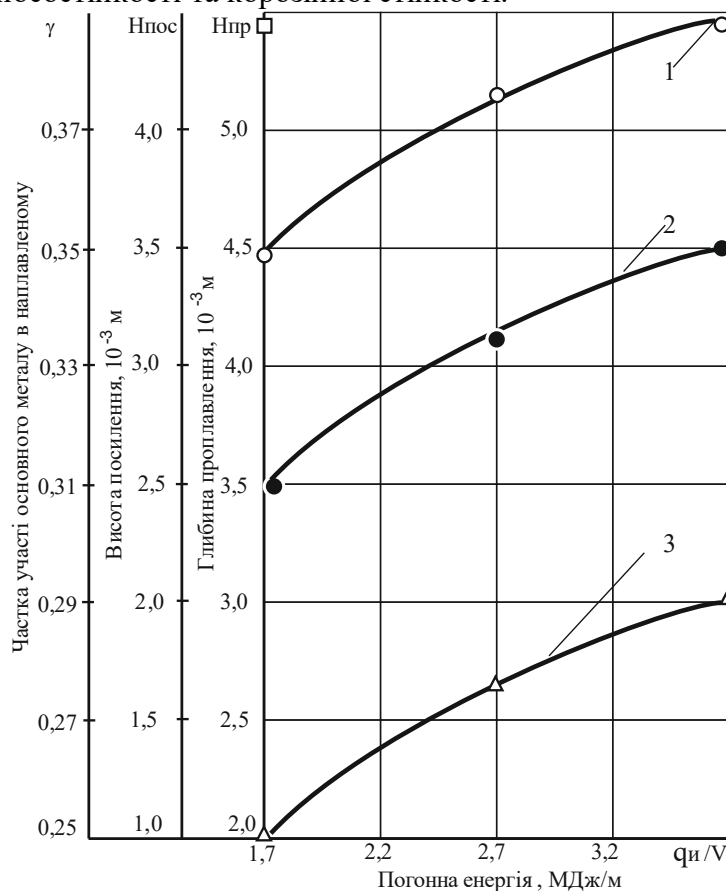


Рисунок 1 – Залежність частки участі основного металу в наплавленому (1), висоти посилення (2) і глибини проплавлення (3) від погонної енергії

Для зменшення частки участі основного металу в наплавленому, рекомендується проводити високошвидкісне наплавлення на низькій погонній енергії, що забезпечує зменшення енергії, тепловкладання, глибини та ширини валиків, вмісту вуглецю та підвищення тріщиностійкості.

Ефективним способом зменшення енергії є підвищення швидкості зварювання, що забезпечує зниження тепловкладання, ширини, висоти валика і глибини проплавлення, мікроступорень кристалічної решітки, мікронапруг, щільності дислокацій, підвищення тріщиностійкості, зносостійкості та корозійної стійкості чавуну. При зменшенні енергії, частка участі основного металу в наплавленому, висота посилення і глибина проплавлення

Машинобудування і зварювальне виробництво

зменшується (рис.1), що забезпечує зниження вмісту вуглецю, підвищення пластичності, тріщиностійкості, зносостійкості та корозійної стійкості чавуну. При підвищенні швидкості нагріву та охолодження, зростає дисперсність мікроструктури, скорочується міжатомна відстань, підвищуються міжатомні зв'язки, тріщиностійкість, зносостійкість і корозійна стійкість чавуну.

Найбільш ефективно проводити наплавлення чавуну зварювальним дротом Зв06Х19Н9Т, що містить: вуглець (не більш 0.08%), кремній (0.40-1.00%), марганець (1.00-2.00%), хром (18.00-20.00%), нікель (8.00-10.00%), і титан (0.50-1.00%). Вуглець впливає на міцність і твердість. Мінімум вмісту вуглецю забезпечує корозійну стійкість. Хром утворює карбіди хрому, підвищує зносостійкість, тріщиностійкість і корозійну стійкість. Нікель підвищує пластичність, ударну в'язкість і тріщиностійкість. Титан здрібнює структуру, поліпшує зварюваність металу і стійкість до міжкристалічної корозії.

Тріщиностійкість, зносостійкість і корозійна стійкість, при високошвидкісному аргондуговому напавленні чавуну хромонікелевим дротом, підвищується в результаті зменшення енергії, мінімуму вмісту вуглецю, утворення карбідів хрому, зростання пластичності та ударної в'язкості, що характеризує тріщиностійкість, за рахунок нікелю, швидкості наплавлення та кристалізації, подрібнення мікроструктури, модифікації титаном зменшення тиску дуги, глибини проплавлення, вмісту вуглецю і частки участі основного металу в наплавленому.

Утворення тріщин, через випадання карбідів хрому по межах зерен, є наслідком міжкристалічної корозії. При напавленні хромонікелевими електродами, хром зв'язується з вуглецем, утворюючи карбіди хрому по межах зерен. Це призводить до збіднення прилеглих областей зерна хромом, який необхідний для забезпечення корозійної стійкості. В результаті збідненні хромом ділянки призводять до корозії, утворення тріщин і розшарування по межах зерен. Мінімум вмісту вуглецю забезпечує підвищення зносостійкості та корозійної стійкості.

Найбільш ефективно проводити наплавлення в середовищі аргону, який є нейтральним газом і забезпечує максимальний перехід легуючих елементів в наплавлений метал, струйний переніс електродного металу і стабільність процесу. В.І. Дятлов пояснює перехід до струйного перенесення збільшенням діаметра стовпа, коли активна пляма охоплює бічну поверхню краплі та збільшуються стискаючі сили. Кінець електрода загострюється, крапля витягується в конус, і виникає струйне перенесення.

Наплавлення в аргоні характеризується низьким значенням суми приелектродних падінь напруги U_{K+A} і градієнта потенціалу в стовпі дуги E , В/мм (табл.1)

В результаті низького значення катодного падіння напруги, при напавленні в аргоні, зменшується глибина проплавлення та частка участі основного металу у наплавленому, що підвищує тріщиностійкість. Внаслідок низького градієнта потенціалу в стовпі, дуга в аргоні "м'яка", еластична і забезпечує стабільність процесу.

Таблиця 1 – Енергетичні характеристики дуги

Захисний газ і флюс	Градієнт потенціалу в стовпі дуги, E , В/мм	Сума приелектродних падінь напруги, U_{K+A} , В
Аргон	2,2 – 2,4	16–18
Вуглецевий газ	2,4–2,8	17–19
Гелій	2,2-2,4	10–12
Флюс АН-348А	3,8–4,2	20–22

Енергозберігаюче аргонодугове наплавлення на низькій енергії, за рахунок низького катодного падіння напруги, забезпечує мінімум енергії, стабільність процесу, струйний переніс електродного металу, максимальний коефіцієнт легування, низький тиск дуги, мінімум частки участі основного металу в наплавленому і зниження енергії в 1,5 – 2 рази, в порівнянні зі зварюванням під флюсом. Підвищення ефективності високошвидкісного наплавлення на низькій енергії підтверджує закон мінімуму енергії.

Аргонодугове наплавлення проводиться на зворотній полярності, так як на електроді розташовується менш рухливий анод і забезпечується стабільність процесу. При електродуговому наплавленні тріщиностійкість чавунів визначається вмістом вуглецю та енергією. Для підвищення тріщиностійкості, зі зростанням вмісту вуглецю, погонну енергію необхідно зменшувати.

Тріщини утворюються, коли зварювальні напруги стають більше межі міцності, тому для підвищення тріщиностійкості необхідно забезпечити мінімальні зварювальні напруги, які визначаються енергією, тепловкладанням і деформаціями.

Встановленні закономірності і розроблений спосіб високошвидкісного наплавлення на низькій енергії хромонікелевим електродом чавунних валків можуть бути використані при високошвидкісному наплавленні занурювальних барабанів агрегату цинкування.

Подальші дослідження в даному напрямку є перспективними, так як дозволять розробити нові процеси високошвидкісного наплавлення на низькій енергії чавунів низьковуглецевими хромонікелевими дротами, які забезпечують підвищення тріщиностійкості, зносостійкості та корозійної стійкості.

ВИСНОВКИ

При електродуговому наплавленні, під дією теплового збудження, в наплавленому металі виникають вакансії, оскільки енергія активації виникнення вакансій менша за енергію утворення міжузельних атомів. У зоні виникнення вакансій порушується статична рівновага сил міжатомної взаємодії, що призводить до зміщення сусідніх атомів з їх рівноважних положень, мікрспотворень кристалічної решітки та мікронапруг. Мікронапруги призводять до інтенсивного утворення і зростання тріщин, механізм яких зв'язують з дислокаціями. Підвищення енергії призводить до зростання мікрспотворень кристалічної решітки, мікронапруг, щільності дислокацій, зварювальних напруг і утворення тріщин. Для запобігання утворення тріщин необхідно знижувати енергію.

Енергія знижується шляхом підвищення швидкості наплавлення, при якому посилюється охолодження, зменшуються розміри активних плям, погонна енергія і тепловкладання, глибина проплавлення і ширина шва, частка участі основного металу в наплавленому, вміст вуглецю, мікрспотворення кристалічної решітки, мікронапруги щільність дислокацій, зварювальні напруги і подрібнюється структура, що призводить до підвищення тріщиностійкості. Природа утворення тріщин електромагнітна. Тріщини утворюються, коли зварювальні напруги стають більше за межу міцності, тому для підвищення тріщиностійкості необхідно забезпечити мінімальні зварювальні напруги.

Тріщиностійкість, зносостійкість і корозійна стійкість, при високошвидкісному аргонодуговому наплавленні чавуну на низькій енергії хромонікелевим дротом, підвищуються в результаті утворення карбідів хрому, мінімуму вуглецю, зменшення енергії, зростання пластичності та ударної в'язкості, що характеризує тріщиностійкість, за рахунок нікелю, підвищення швидкості наплавлення та кристалізації, подрібнення мікроструктури, модифікації титаном, зменшення тиску дуги, глибини проплавлення і частки участі основного металу в наплавленому. Мінімум вмісту вуглецю запобігає утворенню тріщин через

Машинобудування і зварювальне виробництво

випадання карбідів хрому і розшарування по межах зерен, забезпечує підвищення зносостійкості та корозійної стійкості.

Енергозберігаюче аргонодугове наплавлення на низькій енергії, за рахунок низького катодного падіння напруги, забезпечує мінімум енергії, стабільність процесу, максимальний коефіцієнт легування, низький тиск дуги, низьку частку участі основного металу в наплавленому і зниження енергії в 1,5 – 2 рази, в порівнянні з наплавленням під флюсом. Підвищення ефективності високошвидкісного наплавлення на низькій енергії підтверджує закон мінімуму енергії.

Розроблено енергозберігаючий процес аргонодугового високошвидкісного наплавлення на низькій енергії шийок чавунних валків, з підігрівом низьковуглецевим хромонікелевим дротом Зв06Х19Н9Т, що забезпечує утворення карбідів хрому, аустеніту, максимальний перехід легуючих елементів, модифікацію, зростання пластичності, швидкості зварювання і кристалізації, подрібнення мікроструктури, зменшення енергії, вмісту вуглецю, мікроспотворень кристалічної решітки, мікронапруг, зварювальних напруг, щільності дислокацій, міжатомної відстані, підвищення міжатомних зв'язків, тріщиностійкості, зносостійкості та корозійної стійкості.

Список використаних джерел

1. Прохоров Н.М. Фізичні процеси у металі при зварюванні / Н.М. Прохоров. - Т.П. - К.: Металургія, 1996. - 600 с.
2. Порівняльне визначення щільності дислокацій у напівкристалах по ширині рентгенівських ліній та електронномікроскопічно / О.М.Іванов, Ю.О. Меженний, А.Е. Острів та інших. // Заводська лабораторія. - 1997. - №2. - С.43 - 48.
3. Фінкель В.М. Фізика руйнування / В.М. Фінкель. - К.: Металургія, 2000. - 376с.
4. Уайт Р.М. Квантова теорія магнетизму. - К.: Світ, 1992. - 306с.
5. Вплив погонної енергії на утворення відколів при наплавленні високовуглецевої сталі аустенітним дротом / В.К. Каленський, Я.П. Черняк, В.Г. Васильєв, Т.Г. Соломійчук // Автоматичне зварювання. - 2001. - №11. - С. 11–14.
6. Технологія, матеріали, обладнання / І.А. Рябцев, І.А., Кондратьєв, Є.Ф. Переплетчиков, Ю.М. Кусков. – Київ, ІЕЗ ім. О.О. Патона НАНУ, 2015. – 402 с.
7. Рябцев І.А. Наплавлення деталей машин та механізмів. - Київ: Екотехнологія, 2004. - 160 с.
8. Стійкість наплавленого шару проти відшаровування у водневмісних середовищах / О.І. Стеклов, А.П. Алексєєв, О.А. Александров та ін. // Зварювальне виробництво. - 2009. - №12. - С.8 - 10.
9. Кархін В.А. Напружено-деформаційний стан зварного з'єднання з м'яким та твердими прошарками / В.А. Кархін, В.І. Михайлов, Г.П. Петров // Зварювальне виробництво. – 2004. – №3. – С.6 – 7.

HIGH-SPEED LOW-ENERGY SURFACING OF CAST IRON ROLLS

At the electric arc surfacing, under the influence of thermal excitation, vacancies appear in the deposited metal, since the activation energy for the formation of vacancies is less than the energy for the formation of interstitial atoms. In the zone where vacancies occur, the static balance of interatomic interaction forces is disrupted, which leads to displacement of neighboring atoms from their equilibrium positions and microdistortions of the crystal lattice and microstresses. Microstresses lead to intense formation and growth of cracks, the initiation mechanism of which is associated with dislocations. Increasing energy leads to increased microdistortion crystal lattice, microstresses, dislocation density, welding stresses and the occurrence of cracks. To prevent the formation of cracks, it is necessary to reduce the energy.

Energy is reduced by increasing the deposition rate, at which the cooling rate increases, the size of active spots, heat input and heat input, penetration depth and weld width, the share of the base metal in the deposit, carbon content, microdistortion of the crystal lattice, microstresses, dislocation density, welding stresses are reduced and the structure is refined, which leads to increased crack resistance. The nature of crack formation is electromagnetic; therefore, to increase crack resistance, it is necessary to ensure minimal welding voltages.

Crack resistance, wear resistance and corrosion resistance during high-speed argon-arc surfacing of cast iron at low energy with chromium-nickel wire are increased as a result of the formation of chromium carbides, a minimum of carbon, a decrease in energy, an increase in ductility and impact toughness, which characterizes crack resistance, due to nickel, an increase in the rate of deposition and crystallization, changes in the microstructure, modification with titanium, a decrease in arc pressure, penetration depth and the share of the base metal in the deposit. Minimum carbon content prevents the formation of cracks due to precipitation of chromium carbides and delamination along grain boundaries, provides increased wear resistance and corrosion resistance.

Energy-saving argon-arc surfacing at low energy due to the low cathode voltage drop provides minimal energy, process stability, maximum alloying coefficient, low arc pressure, low share of the base metal in the deposit and energy reduction by 1.5 - 2 times compared to submerged arc surfacing. The increase in the efficiency of high-speed surfacing at low energy confirms the law of minimum energy.

An energy-saving process of argon-arc high-speed surfacing at low energy of cast iron roll journals with heating with a low-carbon chromium-nickel wire Sv06Kh19N9T has been developed, which ensures the formation of chromium carbides, austenite, maximum transfer of alloying elements, modification, increased ductility, welding and crystallization speeds, microstructure refinement, reduction in energy, carbon content, crystal lattice microdistortions, microstresses, welding stresses, dislocation density, interatomic distance, increased interatomic bonds, crack resistance, wear resistance and corrosion resistance.

Keywords: *Cast iron rolls, high-speed surfacing at low energy, argon-arc surfacing with low-carbon chromium-nickel wire, welding stresses, crack resistance, wear resistance, corrosion resistance.*

Стаття надійшла 08.12.2025р.