

ХАРАКТЕР РОЗПОДІЛУ НЕМЕТАЛЕВИХ ВКЛЮЧЕНЬ В СТРУКТУРНИХ СКЛАДОВИХ МЕТАЛУ ЗВАРНИХ ШВІВ ПРИ ДУГОВИХ МЕТОДАХ ЗВАРЮВАННЯ

В. В. Головка

ІЕЗ ім. Є. О. Патона НАН України. 03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

З метою експертної оцінки службових властивостей зварних з'єднань на сьогодні розроблена велика кількість комп'ютеризованих програм для прогнозування структурного складу металу зварних швів та їх механічних властивостей. Зазвичай такі програми побудовані на базі багатофакторного аналізу процесів, які відбуваються в зварювальній дузі, термодинаміки та кінетики процесів в зварювальній ванні. Слід відзначити, що при аналізі реакцій кристалізації та перекристалізації в металі швів в таких програмах не враховують, як правило, характер розподілу неметалевих включень в структурних складових. Існує багато досліджень, які показують помітний вплив включень в залежності від того будуть вони присутні на границях чи в тілі зерен. Показана необхідність враховувати при формуванні числових моделей вірогідність знаходження неметалевих включень в тілі структурних зерен або на їх границях, що дозволить підвищити відповідність прогнозованих даних експериментальним результатам визначення механічних характеристик металу зварних швів. Бібліогр. 5, рис. 5.

Ключові слова: металознавство, низьколеговані сталі, зварні шви, мікроструктура, числове моделювання, неметалеві включення

Впливу неметалевих включень на структуру та властивості зварних швів сплавів заліза приділяється велика увага вже впродовж біля півтора століття. Слід відзначити, що з часом ця проблема залишається актуальною, і це пов'язано зі зміною уявлень про особливості впливу. Якщо перші роботи наводили переконливі докази щодо негативної ролі підвищеної об'ємної частки включень в швах на формування механічних властивостей металу, то в подальшому дослідники встановили, що треба брати до уваги розподіл за розмірами та хімічним складом включень. Наприкінці ХХ-го століття з'явилися дослідження, які показували позитивну роль певних включень в процесах вторинної кристалізації зварних швів низьколегованих сталей. В роботах останніх років приділено увагу впливу нанорозмірних включень в підвищення рівня механічних властивостей швів високоміцних низьколегованих сталей. Виходячи з результатів наукових досліджень, лабораторних випробувань і промислової практики можливо дійти висновку, що при аналізі впливу неметалевих включень на структуру і властивості зварних швів потрібно використовувати комплексний підхід, який дозволяє враховувати не тільки топологічні показники, але також і фізико-хімічні характеристики як самих включень, так і характер їх взаємодії з металевим розчином та кристалітною фазою. При цьому неодноразово відзначено, що дія включень залежить від того де саме вони розташовані – в центрі великих зерен чи на міжзеренних або внутрізеренних границях. Але якщо

питанням розподілу включень в швах за розміром та хімічним складом, їх впливу на формування структури та механічні властивості металу швів було присвячено великий обсяг досліджень, то проблемі розподілу включень в складових мікроструктури приділено значно менше уваги.

Проблема моделювання процесів, які впливають на формування мікроструктури зварного шва з метою прогнозування рівня його службових показників потребує виконання багатофакторного аналізу. Сучасні можливості комп'ютерної обробки великого обсягу баз даних, числового аналізу термодинаміки та кінетики нерівноважних процесів надають можливість для вирішення таких завдань. В останнє десятиріччя з'явилися публікації, в яких автори показують можливості такого підходу для вирішення комплексної проблеми з оптимізацією технології виготовлення зварних металоконструкцій, наприклад [1–5]. Роль неметалевих включень в цих роботах враховується з точки зору розподілу їх за розміром та хімічним складом, проте характер розподілу включень в самих структурних складових залишається поза увагою. На наш погляд, моделювання впливу неметалевих включень без врахування характеру їх розподілу в структурних складових не зможе достатньо надійно прогнозувати механічні властивості металу зварних швів.

В роботі представлено уявлення щодо процесів, які визначають характер розподілу неметалевих включень в мікроструктурі металу зварних швів низьколегованих сталей.

Формування включень. Більшість процесів зварювання супроводжуються плавленням ос-

Головка В. В. – <https://orcid.org/0000-0002-2117-0864>
© В. В. Головка, 2020

новного і присадкового металу спільно з шлакоутворюючим матеріалом у вигляді покриття електродів, осердя порошкового дроту або зварювального флюсу. Висока концентрація енергії між електродом, що плавиться, і зварювальною ванною сприяє утворенню плазмового розряду з температурою до 20000 К, в якому зварювальний дріт і флюс плавляться, випаровуються і розкладаються на складові елементи. Ці елементи переносяться від електрода в зварювальну ванну трьома основними способами (рис. 1):

- у вигляді іонів в стовпі плазми;
- у вигляді дрібних крапель на периферії плазми;
- у вигляді великих крапель, які відриваються з кінця електрода і переносяться впродовж короткого інтервалу часу через плазму.

Крім цього, відбувається втрата деяких елементів на випаровування в атмосфері зварювальної дуги.

Параметри процесу зварювання справляють сильний вплив на стабільність горіння дуги, ефективність і спосіб перенесення елементів в зварювальну ванну. Тому, незважаючи, наприклад, на те, що флюс складається практично повністю з оксидів і фторидів, вони взагалі не передаються через дугу у вигляді вихідних з'єднань, а скоріше як складові елементи. Тільки досить великі частки електродного покриття, які здатні залишитися незмінними при проходженні через зварювальну дугу, можуть потрапити в зварювальну ванну і значно погіршити механічні властивості металу шва. Литий метал зварювальної ванни ($T > 2600\text{ }^\circ\text{C}$) містить легуючі елементи (Ti, Al, Si, Mn і т.д.), які перейшли із зварювального матеріалу та основного металу, і велику кількість кисню, тому що його розчинність в рідких сплавах заліза з вуглецем висока (0,22...0,29 % в точці плавлення заліза) і підвищується (до 0,33 %) при 1700 °С.

Кисень надходить з навколишньої атмосфери або з захисного газу, до складу якого часто входить CO_2 . Цей процес повинен бути під кон-

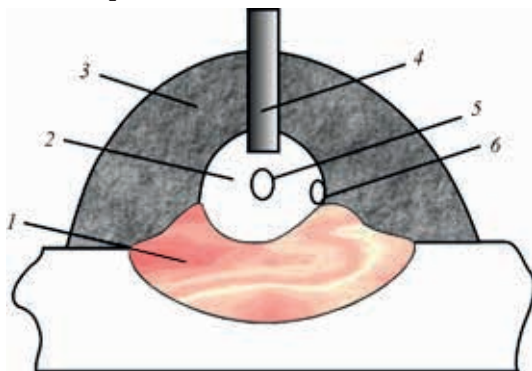


Рис. 1. Основні способи переносу хімічних елементів в зварювальній дузі: 1 – зварювальна ванна; 2 – плазма; 3 – флюс; 4 – електрод; 5 – крупні краплі в стовпі дуги; 6 – краплі на периферії

тролем, тому що вміст кисню в краплях металу на кінці електрода може досягати рівня 5000 ppm, а це вимагає великої кількості розкислювачів для видалення його зі зварювальної ванни при її охолодженні. Крім того, присутність у флюсі оксидів, які легко розкладаються (типу SiO_2), призводить до зростання вмісту кисню в металі шва, який надходить туди зі шлаку. Збільшення у флюсі вмісту сполук з підвищеною основністю (типу CaO , MgO та CaF_2) сприяє зниженню кількості кисню в зварному шві, хоча потенціал кисню і основність не обов'язково пов'язані. При зварюванні під високоосновними флюсами можливо знизити вміст кисню до рівня нижче 200 ppm, але для цього потрібне використання таких сильних розкислювачів, як алюміній. Оксиди, в залежності від їх здатності до розкладання, можливо розташувати в певній послідовності, а кисневий потенціал визначати на основі парціального тиску кисню, який знаходять, виходячи з енергії розкладання чистих оксидів. Оксиди були розташовані у напрямку зниження своєї здатності до розкладання в наступній послідовності: $\text{SiO}_2 > \text{TiO}_2 > \text{Al}_2\text{O}_3 > \text{ZrO}_2$.

При дугових методах зварювання за участю шлакової фази перехід кисню визначається умовами формування в шлаку FeO в результаті розкладання оксидів флюсу. Кількість FeO , яке переходить в зварювальну ванну, збільшується зі зменшенням вільної енергії утворення оксидів флюсу, тому MnO , SiO_2 та Cr_2O_3 суттєво впливають на окислення металу шва. Однак в більшості випадків до 90 % FeO видаляється з металу зварювальної ванни в шлак.

Розчинність кисню в залізі різко зменшується зі зниженням температури (при 1345 °С розчинність кисню в γ -залізі становить 0,003...0,007 мас.%), при цьому рушійна сила утворення оксидів збільшується. В результаті цього перед фронтом кристалізації формуються переважно оксидні частки з більш високою температурою утворення, тобто можна вважати, що тугоплавкі оксиди на базі Al, Si та Ti утворюються в розплаві металу гомогенно. Такі умови формування включень можуть бути спрогнозовані виходячи з діаграми Ellingham (рис. 2).

Процеси, що визначають розподіл включень в структурі металу швів. Найсильніші оксиди розташовані в нижній частині діаграми і формування їх відбувається при більш низькій активності кисню, якщо допустити, що його активність постійна у всьому обсязі металу. Силікати формуються при набагато нижчих температурах, ніж оксиди. Цілковито реально припустити, що вони утворюються в процесі затвердіння металу в міждендритних областях, які збагачені домішковими

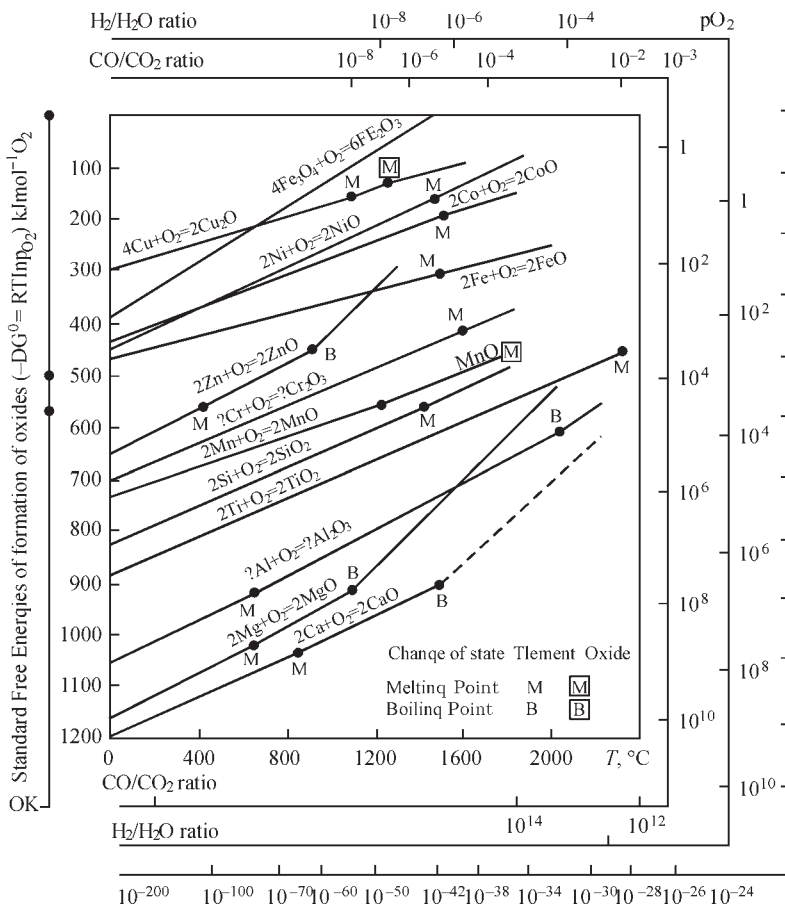


Рис. 2. Діаграма (Ellingham) зміни вільної енергії утворення оксидів

і легуючими елементами. Цьому процесу може сприяти наявність первинних високотемпературних оксидів. Такий висновок підтверджується характером розташування включень в міждендритних областях (рис. 3).

Сформований в результаті комплекс включень визначається часом дії сегрегації і зростання включень, тому оксиди в загальному випадку повинні бути більшими (> 1 мкм) ніж силікати, оскільки вони мають можливість для зростання протягом більш тривалого часу. Однак, оскільки оксиди формуються в розплаві з високими швидкостями потоків і турбулентністю, певна їх частина видаляється в шлак, інші можуть бути ви-

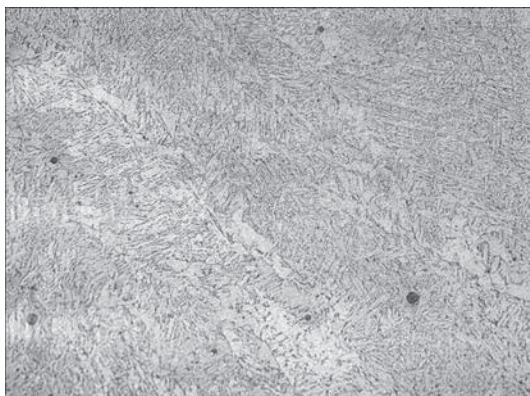


Рис. 3. Виділення крупних неметалевих включень в тілі зерен (×200)

несені в високотемпературну зону розплаву, де відбувається їх дисоціація. Процес сепарації неметалевих включень зі зварювальної ванни не досягає завершення, тому що деякі частинки захоплюються фронтом твердіючого металу і формують в ньому популяцію включень.

Закон Стокса, тобто флотація і сепарація в результаті дії підйомної сили, не поширюється на включення в металі зварювальної ванни, через недостатній час дії цієї сили, а також тому, що потоки металу мають набагато більш сильну дію. За інтенсивністю цих потоків в зварювальній ванні можна виділити дві області (рис. 4). «Гаряча» область з дуже бурхливим потоком, з якого частинки швидко виносяться, і «холодна», розташована ближче до країв ванни, швидкість руху потоків в якій набагато менше, що призводить до захоплення більшої кількості частинок рухомим фронтом кристалізації. Це дозволяє пояснити, чому вміст кисню в наплавленому металі зазвичай більше, ніж можна передбачити, виходячи з умов термодинамічної рівноваги, апроксимованої до області температур нижче температури затвердіння. Крім того, діаграма Ellingham відноситься тільки до сферичних оксидів і показує стандартну енергію їх формування, віднесена до одного молю кисню при даній температурі, хоча високотемпературні включення можуть мати в своєму складі такі карбіди і нітриди з високою температурою плавлення, як, наприклад, TiN.

Взаємодія фронту кристалізації з включеннями викликає сегрегацію твердих продуктів розкислення, пов'язану з сегрегацією легуючих елементів. Просування фронту кристаліза-

ції з включеннями викликає сегрегацію твердих продуктів розкислення, пов'язану з сегрегацією легуючих елементів. Просування фронту кристаліза-

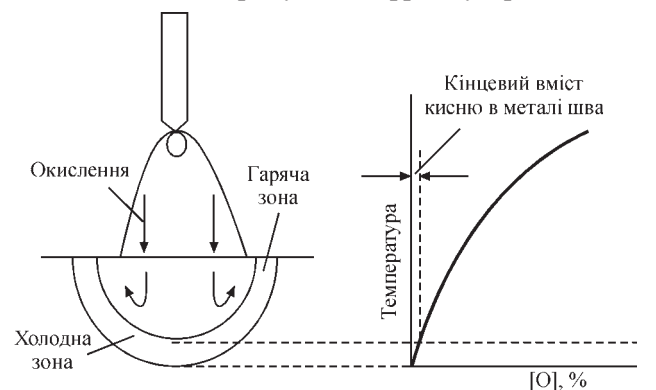


Рис. 4. «Гаряча» і «холодна» зони зварювальної ванни

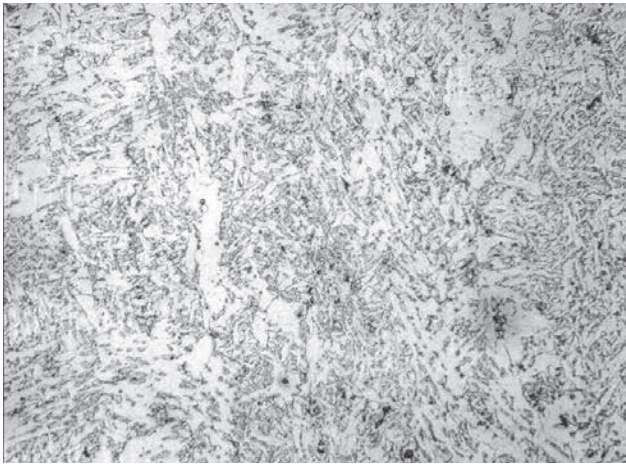


Рис. 5. Виділення силікатних включень у вигляді ланцюжків на границях зерен ($\times 500$)

ції може справляти таку дію на включення, яка змушує його рухатися вперед перед фронтом кристалізації. Можуть мати місце і інші механізми впливу, типу ефекту Marangoni, який є результатом зміни міжфазного натягу. Вплив останнього типу суттєво залежить від складу розплаву, тому що сегрегація, яка відбувається на фронті кристалізації в процесі росту твердої фази, викликається градієнтами концентрації і міжфазного натягу, які призводять до конвекції, спрямованої до межі затвердіння. Крім того, поверхневий натяг може викликати неоднорідний розподіл оксидних частинок. Великі включення характеризуються слабкою рухливістю і тому захоплюються розчином, що кристалізується, а більш дрібні включення накопичуються на міжфазному фронті і розподіляються уздовж границь зерен.

Вплив будь-яких сил, що виникають в результаті процесів, які мають місце в потоках розплаву, пропорційний області його контакту з включенням, (r^2 для сферичних включень), тоді як інерція частки пропорційна обсягу (r^3 для сферичної частинки). Тому тенденція до сегрегації повинна зменшуватися зі збільшенням співвідношення обсяг/поверхня при збільшенні радіуса сферичної частинки. Така залежність може бути порушена ефектом спливання частинок, проте, такого впливу до цих пір не виявлено. Силікати, які утворюються пізніше, мають тенденцію формувати ланцюжок включень уздовж міждендритних кордонів (рис. 5).

Експериментальна перевірка такого характеру сегрегації утруднена, тому що структура металу зазнає перетворення в процесі охолодження зварного шва, які порушують первинну структуру кристалізації. При використанні спеціальних методів травлення, що дозволяють виявляти границі первинної структури, можна встановити відповідність між ними і розподілом включень. У процесі

охолодження металу шва відбувається подальше зростання включень часто у вигляді сульфідів, які виділяються на вже існуючих включеннях. Багато дослідників відзначали наявність плівки Cu_xS , яка покриває оксидні частки в металі швів низьколегованих сталей. Збільшення вмісту сірки в металі шва призводить до заміни в поверхневому шарі включень з'єднань, багатих оксидом титану, плівкою типу $(\text{Cu}, \text{Mn})\text{S}$.

Висновок

Надійне прогнозування структурного складу металу зварних швів та їх механічних властивостей на базі багатофакторного аналізу неможливо без використання числового моделювання. З цією метою дослідниками розроблено комп'ютерні програми, які дозволяють враховувати як хімічний склад основного металу та зварювальних матеріалів, так і параметри технології зварювання. Використання таких програм засвідчило можливість значно підвищити ефективність дослідницьких розробок в галузі виготовлення зварних металоконструкцій з одного боку, але також показало присутність в певних ситуаціях помітної розбіжності між розрахованими даними і експериментальними результатами, яка може бути пов'язана з недостатньо повним описом особливостей формування структури металу швів. В роботі представлено уявлення щодо процесів, які визначають характер розподілу неметалевих включень в мікροструктурі металу зварних швів низьколегованих сталей.

Список літератури/References

1. Sarma, D.S., Karasev, A.V., Jönsson, P.G. (2009) On the Role of Non-metallic Inclusions in the Nucleation of Acicular Ferrite in Steels. *ISIJ International*, 49, 7, 1063–1074.
2. Cortés, V.H.V., Guerrero, G.A., Granados, I.M. et al. (2019) Effect of Retained Austenite and Non-Metallic Inclusions on the Mechanical Properties of Resistance Spot Welding Nuggets of Low-Alloy TRIP Steels. *Metals*, 9, 9, 1064; DOI:10.3390/met9101064.
3. Ignatova, A., Ignatov, M. (2015) The Measurement of Hardness and Elastic Modulus of non-Metallic Inclusions in Steely Welding Joints. *TEM J.*, 4, 3, 314–318.
4. Пименов А. В. (2015) О влиянии неметаллических включений на вязкость низколегированного металла шва при низких температурах. *Вопросы материаловедения*, 1, 81, 108–110.
5. Pimenov, A.V. (2015) On influence of nonmetallic inclusions on toughness of low-alloy metal at low temperatures. *Voprosy Materialovadeniya*, 1, 81, 108–110 [in Russian].
6. Карташов М. Ф., Игнатова А. М., Федосеева Е. М., Игнатов М. Н. (2014) Характеристика неметаллических включений в сварных соединениях нефтегазовых трубопроводов. *Нефтегазовое дело: электронный научный журнал*, 2, 80–94.
7. Kartashov, M.F., Ignatova, A.M., Fedoseeva, E.M., Ignatov, M.N. (2014) Characteristic of nonmetallic inclusions in welded joints of gas-and-oil pipelines. *Neftegazovoe Delo: Electron. J.*, 2, 80–94 [in Russian].

NATURE OF DISTRIBUTION OF NON-METALLIC INCLUSIONS IN STRUCTURAL COMPONENTS OF WELD METAL WHILE USING ARC WELDING METHODS

V. V. Holovko

E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine, 11 Kazymyr Malevych Str., 03150, Kyiv, Ukraine.

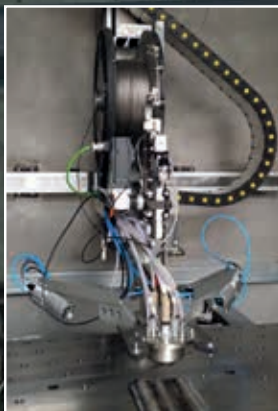
E-mail: office@paton.kiev.ua

In order to give an expert evaluation of properties of welded joints, for today, a large number of computerized programs were developed to predict the structural composition of weld metal and their mechanical properties. Usually, such programs are based on multifactor analysis of the processes occurring in the welding arc, thermodynamics and kinetics of processes in the welding pool. It should be noted that during the analysis of crystallization and recrystallization reactions in the weld metal in such programs, as a rule, the nature of the distribution of non-metallic inclusions in the structural components is not taken into account. There are many studies that show a noticeable effect of inclusions depending on whether they are present at the boundaries or in the body of the grains. The need to take into account the probability of finding non-metallic inclusions in the body of structural grains or at their boundaries during the formation of numerical models, which will increase the compliance of the predicted data with experimental results of determining the mechanical properties of weld metal. 5 Ref., 5 Fig.

Key words: metallurgical science, low-alloy steels, welds, microstructure, numerical modeling, non-metallic inclusions

Надійшла до редакції 19.10.2020

Система xBeamGrand для 3D друку металів



ПрАТ «НВО «Червона Хвиля» розробило та виготовило одну з найбільших в світі систему xBeamGrand для 3D друку металів, яка дозволяє ефективно виготовляти високоякісні металеві вироби розмірами до 1000x1500x1500 мм із звичайного дроту із сплавів титану, ніобію, нікелю, нержавіючих та інструментальних сталей, тощо.



Запрошуємо до співробітництва
 ПрАТ «НВО «Червона Хвиля»
 04114, Київ, вул. Дубровицька, 28
 Тел./факс: +38 (044) 200-89-46
 E-mail: info@xbeam3d.com

