

РАЗМИШЛЯЄВ О.Д.¹, д.т.н, професор
АГЕСВА М.В.², к.т.н, доцент
ШОЛ Т.Л.¹, магістр

¹ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Маріуполь
²Донбаська державна машинобудівна академія, м. Краматорськ

ПРО КЛАСТЕРНИЙ МЕХАНІЗМ КРИСТАЛІЗАЦІЇ ШВІВ ПРИ ДУГОВОМУ ЗВАРЮВАННІ МЕТАЛІВ І СПЛАВІВ

Вступ. В оглядовій статті [1] показано, що при дуговому зварюванні металів і сплавів з дією керуючих магнітних полів спостерігається подрібнення структурних складових у шві. Проте немає єдиної думки про механізм ефекту, який спостерігається. В роботі [2] відмічається, що ці явища відбуваються на стадії первинної кристалізації металу шва. Підкреслюється, що механізм кристалізації, прийнятий в літературі зі зварювання і широко висвітлений у навчальній літературі [1,4,5], пояснюють з позиції дифузійного механізму. У відомих роботах, короткий огляд яких наведено в роботі [1], механізм росту кристалів представляється як приєднання атомів речовини з розплаву до твердої фази (підкладки), тобто як дифузійний процес. При цьому процес кристалізації трактується як періодичний, із зупинками в період виділення прихованої теплоти кристалізації. На межі металу ванни, що твердіє, з рідким металом утворюється тонкий твердо-рідкий прошарок, в якому розвиваються дифузійні процеси (рух атомів з розплаву до твердого металу шва, що закристалізувався). У цьому шарі виділяють ділянку концентраційного ущільнення [5] і розглядають дифузійні процеси в цій ділянці (δ), а також в рідкій та твердій фазі. Такий підхід використаний у всіх роботах, які присвячені вивченню дії магнітних полів (МП) при дуговому зварюванні на подрібнення структури швів. У роботі [1] показано, що існує багато гіпотез про механізм подрібнення структури швів при зварюванні з керуючими магнітними полями. Встановлено, що подрібнення структурних складових металу швів при зварюванні з дією МП відбувається на стадії їх первинної кристалізації [2].

У той же час, у літературі в області ливарного і металургійного виробництва для пояснення властивостей злитків широко використовується кластерний механізм процесу їх кристалізації. Між процесами кристалізації металу в зварювальній ванні і процесами кристалізації злитків є схожість.

Постановка завдання. У даній роботі поставлено завдання дослідити особливості кристалізації розплаву у ванні при електродуговому зварюванні та наплавленні металів і сплавів з дією керуючих магнітних полів.

Результати роботи. Огляд існуючих уявлень про механізм кристалізації злитків в ливарному та металургійному виробництві викладено в роботах [6-18]. Слід зазначити, що наведений список публікацій відображає лише малу частину величезного числа робіт, в яких висловлені уявлення про процеси кристалізації металів і сплавів в галузі ливарного та металургійного виробництв. Наведений список літератури дає лише представлення про стан питання в цій області. У роботах з кристалізації злитків виходять з кластерної будови рідких металів і сплавів. Шляхом дифракції відбитих від рідких металів і сплавів (в тому числі і на основі заліза) рентгенівських променів, електронів і нейтронів встановлено, що в рідині є кристалоподібні складові-кластери. В одному кластері рідкого металу (сплаві на основі заліза) міститься близько $10^2 \dots 10^3$ атомів. Кластери виникають при плавленні кристалічних тіл. Час життя кластерів становить

$10^{-7} \dots 10^{-8}$ с, який набагато більше періоду коливання атомів у кристалічній решітці ($10^{-14} \dots 10^{-13}$ с). Кластери – це короткоживучі, але досить стійкі угруповання атомів. Навколо кластерів існує знеміцнена зона (тобто атоми рідкого металу). Об'єм знеміцненої зони становить для багатьох рідких металів і сплавів близько 2...5%. Знеміцнена зона є проміжним середовищем. Дифузійний механізм кристалізації, що використовувався раніше, не витримує критики, оскільки процес кристалізації металу протікає приблизно на 2-3 порядки швидше, ніж швидкість дифузії (самодифузії) атомів у рідких металах. У роботі [6] стверджується, що при кристалізації металу в середньому близько 50% свободи руху атомів «виморожується», тобто пропонується враховувати ступінь квантування атомарної системи. У роботах [7-18] виходять з того, що при плавленні металів вже утворені кластери. При кристалізації два кластери стикаються, оскільки їх атоми здійснюють теплові коливання. Зростання кристалу за рахунок приєднання кластерів до твердої фази не виключає одночасного приєднання окремих атомів з рідини, що оточує кластери. Але цей процес є як би додатковим. Новий підхід до проблеми кристалізації сплавів викладено в роботі [7]. Автор роботи стверджує, що як в твердому, так і в рідкому стані метал – це суміш атомів і частинок вакуумного простору, в якому атоми розміщені рівномірно. Виходячи з цього положення, автор пояснив багато відомих властивостей як рідких, так і твердих металів і сплавів. У роботі [13] показано, що формування кластерів відбувається лише в прикордонному перехідному шарі розплаву, що формується перед фронтом кристалізації. Однак це постулюється (без доказів) при виконанні комп'ютерного моделювання процесу кристалізації металу з розплаву. В роботі [14] висловлено аналогічне припущення про наявність прикордонного шару, в якому в міру наближення до твердої фази в'язкість рідини збільшується і це робить найбільш імовірним дислокаційний механізм кристалізації. Автори роботи [15] на основі аналізу термічного охолодження розплавів висунули гіпотезу про існування мезофази вище точки плавлення, яка характеризується наявністю кристалоподібних кластерів. Загальноновизнаним є те, що при підвищенні температури рідкого металу кількість кластерів збільшується, а їх розміри зменшуються [7,17,18]. При кристалізації рідкого металу не виникають нові поверхні розділу, а закриваються існуючі межкластерні поверхні розділу. Будівельним матеріалом при цьому є не атоми, а кластери. Більші кристали можуть поглинати дрібніші (конкурентна теорія кристалізації). Зрощення кластерів, нанокристалів, кристаликів автори зазначених робіт пояснюють по-різному. Однак, усі автори згодні з тим, що такі зрощення термодинамічно вигідні, оскільки через закриття поверхонь розділу зменшується вільна енергія. Це дозволяє, зокрема, пояснити той факт, що якщо вилівок охолоджується швидко, то часу на зрощення сусідніх кристалів (кластерів, наноструктур) не вистачає, й у виливках спостерігається дрібнозерниста первинна структура.

На наш погляд, ці уявлення можна використовувати для опису процесу кристалізації зварних швів при дуговому зварюванні металів і сплавів, в тому числі й при дії керуючих магнітних полів. Для підтвердження цього припущення виконували наплавлення на постійному струмі зворотної полярності на пластини зі сталі 12X18H10T товщиною 12 мм дротом Св-06X19H9Т діаметром 4 мм під флюсом АН-26П. Режим наплавлення: $I_n = 600 \dots 650$ А, $U_d = 34 \dots 36$ В, $V_n = 24$ м/год. Один валик наплавляли без дії магнітного поля, а інший – з дією знакозмінного поперечного магнітного поля (ПОМП). При цьому використовували пристрій введення ПОМП, описаний в роботі [16]. Поперечна компонента індукції ПОМП становила 20...25 мТл, частота цього знакозмінного магнітного поля – 6 Гц. Мікроструктури наплавлених валиків (в їх поперечному перерізі) наведені на рис.1: а – наплавка без дії магнітного поля; б – наплавка з дією ПОМП. Дані показали, що при дії магнітного поля розміри структурних складових в наплавленому металі зменшилися в 2 рази. Оскільки розміри валиків при двох цих

варіантах наплавлення і умови охолодження не змінювалися, то подрібнення структурних складових можна пояснити, виходячи з уявлень про кластерний механізм кристалізації наступним чином. Рідкий метал в головній частині ванни має більш високу температуру (приблизно на 1000 °С) і більш дрібні кластери, ніж в хвостовій частині ванни, де більші кластери (і де метал кристалізується). Під дією електромагнітних сил ПОМП рідкий метал періодично (примусово) переміщується в хвостову частину ванни, поставляючи туди більш дрібні кластери, що забезпечує при кристалізації в наплавленому валіку з дією ПОМП формування більш дрібних зерен.

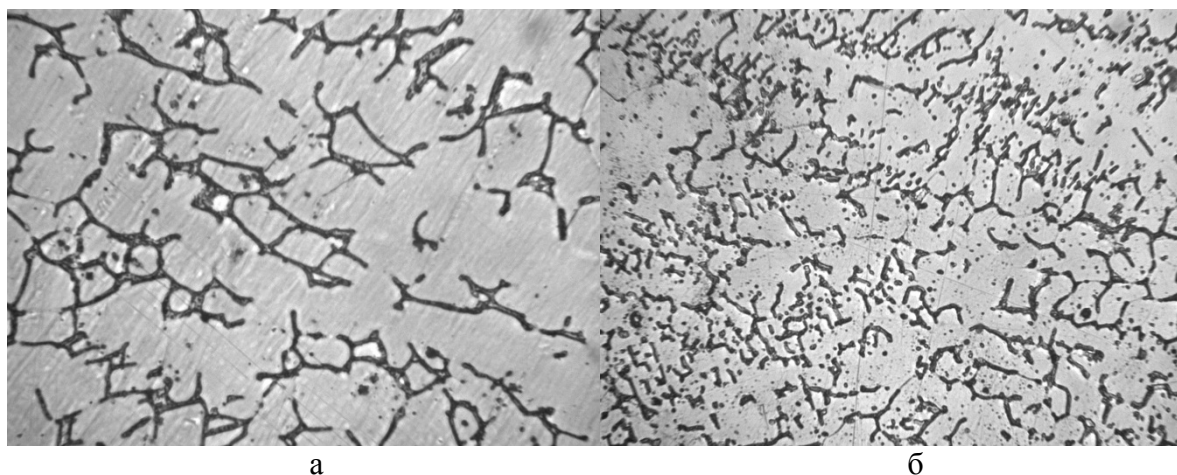


Рисунок 1 – Мікроструктури ($\times 500$) валіків, наплавлених без дії магнітного поля (а) і з дією ПОМП (б)

Слід зазначити, що теорія кластерного механізму кристалізації сплавів в ливарному та металургійному виробництві ще знаходиться на стадії становлення, багато питань залишаються дискусійними. Стосовно дугового зварювання та наплавлення як із зовнішніми (наприклад, магнітних полів) діями, так і без них, в подальшому необхідно виконати дослідження з вивчення особливостей кристалізації для з'ясування можливості використання при цьому кластерного механізму кристалізації металів і сплавів.

Висновки. 1. У ливарному та металургійному виробництві для пояснення багатьох властивостей виливків застосовують кластерний механізм їх кристалізації. При цьому виходять з того, що в рідкому металі вже є кластери (аналоги кристаликів, наноструктур, центрів кристалізації), що оточені безструктурними утвореннями з атомів. Процес кристалізації розплавів представляється як приєднання до більших кристалів більш дрібних.

2. Для процесу дугового зварювання та наплавлення металів і сплавів доцільно виходити з кластерного механізму кристалізації металу в зварювальній ванні, проте для цього необхідне виконання в подальшому спеціальних досліджень.

ЛІТЕРАТУРА

1. Размышляев А.Д., Агеева М.В. (2018) О механизме измельчения структуры металла шва при дуговой сварке с воздействием магнитных полей (Обзор). *Автоматическая сварка*. 2018. №3. С. 29-33.
2. Размышляев А.Д., Агеева М.В. Первичная кристаллизация металла при дуговой наплавке с воздействием продольного магнитного поля. *Сварочное производство*. 2020. №3. С. 9-13.

3. Размышляев А.Д., Агеева М.В. О кластерном механизме кристаллизации швов при дуговой сварке с воздействием управляющих магнитных полей. *Автоматическая сварка*. 2019. №1. С. 1-4.
4. Багрянский К.В., Добротина З.А., Хренов К.К. *Теория сварочных процессов*. Киев, Вища школа. 1976. 424 с.
5. Фролов В.В. *Теория сварочных процессов*. Москва, Высшая школа. 1988. 559 с.
6. Павлов В.В. Кризис классической кинетической теории. Екатеринбург. Изд-во УГГУ. 2017. 423 с.
7. Гаврилин И.В. *Плавление и кристаллизация металлов и сплавов*. Владимир, Владимир. гос. ун-т. 2000. 249 с.
8. Бестужев Н.И., Бестужев А.Н. Кластерный механизм образования зародышей и закономерности первичной кристаллизации литейных сплавов (на примере высокохромистых чугунов). *Литье и металлургия*. 2005. №3. С. 37-42.
9. Толочко Н.К., Андрушевич А.А. Кластерная структура расплавов. *Литье и металлургия*. 2013. №4(73), С. 59-63.
10. Найдек В.Л., Мельник С.Г. Кластеры – структурные составляющие металлических расплавов. *Металл и литье Украины*. 2015. № 7(266). С. 21-33.
11. Стеценко В.Ю. Кластеры в жидких металлах – стабильные нанокристаллы. *Литье и металлургия*. 2015. №2(79). С. 33-35.
12. Марукович Е.И., Стеценко В.Ю. Основные трудности современной теории металлических расплавов. Пути преодоления. *Литье и металлы*. 2018. №3(84), С. 24-27.
13. Иванов И.А. (2007) Кинетический фазовый переход при кристаллизации металлов из расплава: автореферат дис. канд. физ.-мат. наук. Москва. 23 с.
14. Межидов В.Х., Нурадинов А.С., Эльдараханов А.С. О механизме образования и роста кристаллических зародышей из расплава. *Процессы литья*. 2010. №6. С. 3-7.
15. Александров В.Д., Фролова С.А., Зозуля А.П. Этапы развития кластерно – коагуляционной модели кристаллизации переохлажденных металлов. *Металлические конструкции*. 2019. Том. 25. №1. С. 5-15.
16. Размышляев А.Д., Выдмыш П.А., Агеева М.В. *Автоматическая электродуговая сварка под флюсом с воздействием внешнего магнитного поля*: Монография. Мариуполь, Изд-во ПГТУ. 2017. 2009 с.
17. Скребцов А.М., Иванов Г.А., Секачев А.О., Кузьмин Ю.Д., Назаренко Е.А. Новый способ определения числа атомов в кластере металлического расплава. *Вісник ПДТУ. Зб. наук. пр.* 2006. №16. С. 1-7.
18. Скребцов А.М. Структура жидких металлов в интервале температуры ликвидус-кипения. *Процессы литья*. 2009. №3. С. 3-7.

Надійшла до редколегії 19.10.2020.