

## ВЛИЯНИЕ МАГНИТНОГО ПОЛЯ НА КРИСТАЛЛИЗАЦИЮ ШВОВ ПРИ ДУГОВОЙ СВАРКЕ

А. Д. РАЗМЫШЛЯЕВ<sup>1</sup>, М. В. АГЕЕВА<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ГВУЗ «Приазовский государственный технический университет». 87500, г. Мариуполь, ул. Университетская, 7.  
E-mail: razmyshljaev@gmail.com

<sup>2</sup>Донбасская государственная машиностроительная академия. 84313, г. Краматорск, ул. Академическая, 72.  
E-mail: maryna\_ah@ukr.net

Обзор публикаций по металлургическому и литейному производству показал, что многие авторы при анализе свойств жидких металлов и сплавов исходят из представлений о кластерном их строении. Кластерное строение жидкости является гипотезой, но она подтверждена исследованиями дифракций отраженных от ее поверхности рентгеновских лучей, электронов и нейтронов. В работе рассмотрены существующие представления о том, что кластер — это кристаллоподобное сгущение атомов. Вокруг кластеров существует разупрочненная зона, которая состоит из неупорядоченных атомов, объем которой не превышает 3...5 %, и это обеспечивает жидкотекучесть многих расплавов. Авторы публикаций достигли успехов в объяснении формирующейся структуры слитков, исходя из кластерного механизма процесса кристаллизации жидких металлов и сплавов. Авторы данной работы высказали предположение, что перегретый жидкий металл в головной части ванны, имеющей более мелкие кластеры, перемещается под действием магнитных полей в хвостовую ее часть, и обеспечивает измельчение первичной структуры металла шва. Библиогр. 20, рис. 1.

*Ключевые слова:* сварка, сварочная ванна, магнитное поле, кластер, структура шва, кристаллизация

Использование управляющих воздействий продольных магнитных полей (ПРМП), либо поперечных магнитных полей (ПОМП) при дуговой сварке повышает производительность процесса, измельчает структуру швов, повышает служебные характеристики сварных изделий [1–3]. В работе [4] показано, что существует много гипотез о механизме измельчения структуры швов при сварке с управляющими магнитными полями (МП). Измельчение структурных составляющих металла швов при сварке с воздействием МП, вероятно, происходит на стадии их первичной кристаллизации. Известные работы о механизме кристаллизации металла в процессе его затвердевания относятся к литейным процессам, либо к получению сверхчистых монокристаллов [5, 6]. Условия кристаллизации металла в сварочной ванне, как известно [7, 8], отличаются от условий, приведенных в работах [5, 6]. Следует также отметить, что в работах [5, 6] и в работах [7, 8] процесс кристаллизации расплавов представляется как процесс присоединения атомов расплавов к твердой подложке. Во всех известных работах, краткий обзор которых приведен в работе [4], процесс кристаллизации различных металлов и сплавов рассматривают из представлений, высказанных в работах [5–8]. Механизм роста кристаллов представляется как присоединение атомов вещества из расплава к твердой фазе (подложке), т. е. как диффузионный процесс. При этом процесс кристаллизации трактуется как периодический, с остановками в период

выделения скрытой теплоты кристаллизации. На границе затвердевающего металла ванны с жидким металлом образуется тонкая твердо-жидкая прослойка, в которой развиваются диффузионные процессы (движение атомов из расплава к твердому закристиализовавшемуся металлу шва). В этом слое выделяют участок концентрационного уплотнения  $\delta$  [8] и рассматривают диффузионные процессы в этом участке ( $\delta$ ), а также в жидкой и твердой фазе [5, 6]. Такой подход использован во всех работах, которые посвящены изучению воздействия МП при дуговой сварке на измельчение структуры швов.

Следует отметить, что кристаллизация металла сварных швов имеет сходство с кристаллизацией слитков при обычных процессах литья в литейном и металлургическом производствах. В настоящее время имеется огромное число работ (исследований) по литейному и металлургическому производству, в которых по-иному рассматривается механизм кристаллизации слитков.

Целью работы является анализ литературных данных о кластерной модели строения жидких металлов и сплавов применительно к кристаллизации металла ванны при дуговой сварке с воздействием управляющих магнитных полей.

В работах по кристаллизации слитков исходят из модели кластерного строения жидких металлов и сплавов. Данные этих работ, на наш взгляд, являются перспективными при рассмотрении кристаллизации швов при дуговой сварке с воздействием МП.

Рассмотрим подробнее существо вопроса. Путем дифракции отраженных от жидких металлов и сплавов (в том числе и на основе железа) рентгеновских лучей, электронов и нейтронов установлено, что в жидкости имеются кристаллоподобные составляющие — кластеры [9–14].

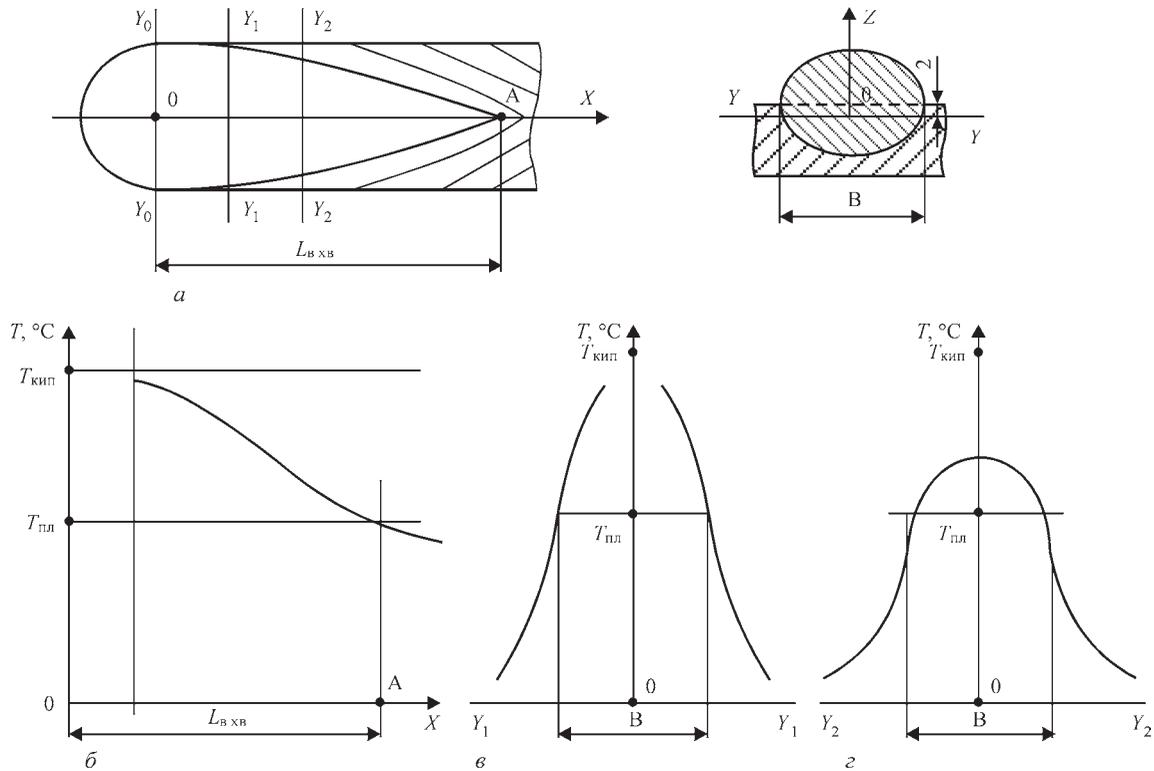
Кластер — это кристаллоподобное сгущение атомов [13]. Кластеры возникают при плавлении кристаллических тел [9, 10]. Время жизни кластеров составляет  $10^{-7} \dots 10^{-8}$  с, которое гораздо больше периода колебания атомов в кристаллической решетке ( $10^{-14} \dots 10^{-13}$  с). Кластеры — это короткоживущие, но достаточно устойчивые группировки атомов [10, 11]. Вокруг кластеров существует разупрочненная зона (т. е. атомы жидкого металла). В одном кластере жидкого металла (сплава на основе железа) порядка  $10^2 \dots 10^3$  атомов [12, 13]. Объем разупрочненной зоны составляет для многих жидких металлов и сплавов порядка 2...5 % [9, 10, 19]. Разупрочненная зона является промежуточной средой, посредством которой атомы из одних кластеров переходят к другим [12]. В литературе по литейному и металлургическому производству подробно рассматриваются процессы «твёрдо-жидкий металл», исходя из гипотезы о кластерном строении жидкого металла [9, 14–18].

Механизм кристаллизации жидких металлов рассматривается следующим образом. Исходят из того, что в жидкости уже имеются кристаллоподобные группировки (кластеры). Убедительно показано, что ранее использовавшийся диффузи-

онный механизм кристаллизации не выдерживает критики, поскольку процесс кристаллизации металла протекает примерно на 2-3 порядка быстрее, чем скорость диффузии (самодиффузии) атомов в жидких металлах. Диффузионный механизм кристаллизации предполагает, что на твердой фазе образуется моноатомный слой твердой фазы. Однако доказано, что при кристаллизации атомы образуют ступеньку, величина которой на несколько порядков больше, чем атом [9]. Элементарным кирпичиком роста кристаллов является некоторое более крупное образование, чем атом, а именно: кластер [9, 10]. Рост кристаллов за счет присоединения кластеров к твердой фазе не исключает, что одновременно происходит и присоединение отдельных атомов. Но этот процесс является как бы дополнительным [10].

В работах [15–19] теоретически обоснован указанный механизм кристаллизации. В диссертации [18] математическим моделированием подтвержден этот механизм кристаллизации сплавов на основе железа. Получаемые модельные структуры объясняются наличием двух стадий процесса кристаллизации сплавов. На первой стадии происходит формирование кластеров в пограничном слое, а на второй — последующее их присоединение к кластерно-шероховатой поверхности [18].

На наш взгляд, на основе представлений о строении жидких металлов (сплавов) в виде кластеров возможно объяснить механизм влияния внешних (управляющих) МП на процесс кристал-



Вид сварочной ванны (а) и схема распределения температуры в сварочной ванне ( $Z=0$ ): б — вдоль ванны; в — вдоль оси  $Y_1-Y_1$ ; з — вдоль оси  $Y_2-Y_2$

лизации расплава в ванне при дуговой сварке следующим образом. Как известно, жидкий металл в головной части ванны при сварке сплавов на основе железа имеет температуру не менее 2500 °С (под дугой эта температура достигает температуры кипения —  $T_{\text{кип}}$ ). Температура металла плавно снижается в направлении к хвостовой части ванны до температуры плавления —  $T_{\text{пл}}$  ( $T_{\text{пл}} \approx 1500$  °С). Измеренные погружением термопар в жидкий металл ванны при дуговой сварке на глубину 2 мм от поверхности пластины данные работы [20] о температуре жидкого металла в ванне схематично приведены на рисунке. Наблюдается перепад (градиент) температуры жидкого металла в направлении к хвостовой части ванны (рис. б). Еще в большей степени наблюдается перепад (градиент) температур в поперечных сечениях ванны (рис. в, з). Следует отметить, что аналогичный перепад температур имеет место в направлении ко дну ванны (вдоль оси OZ по рис. а). То есть процесс кристаллизации жидкого металла ванны начинается на боковых стенках и у дна ванны, и продвигается в хвостовую часть ванны (до т. А на рис. а, б, где  $T = T_{\text{пл}}$ ). Как убедительно показано в работе [1] при сварке с воздействием знакопеременного ПРМП (и ПОМП по нашим исследованиям) перегретый почти до  $T = T_{\text{кип}}$  под дугой жидкий металл ванны из головной части периодически перемещается к хвостовой ее части, а потом — к головной части ванны. В работе [1] установлено, что перепад температур перед фронтом кристаллизации при некоторых частотах ПРМП достигал 350 °С.

В работах [9, 10, 12] установлено, что при перегреве жидкого металла в нем увеличивается число кластеров, а их размеры уменьшаются. Учитывая данные работ [9, 10, 14-19] о кластерном механизме кристаллизации и конкурентном их присоединении к твердой подложке ванны это должно привести к измельчению первичной структуры металла шва при сварке с воздействием МП, что и наблюдали в работах [1-4].

### Выводы

1. Анализ публикаций по металлургическому и литейному производству показал, что многие авторы поддерживают гипотезу о кластерном строении жидких металлов, которое установлено дифракцией от их поверхности рентгеновских лучей, электронов и нейтронов. При этом структура слитков формируется с участием кластеров в жидком металле.

2. Высказано предположение, что при дуговой сварке с воздействием управляющих магнитных полей, когда перегретый жидкий металл из головной части ванны, имеющей более мелкие кластеры, периодически достигает фронта кри-

сталлизации в хвостовой ее части и обеспечивает измельчение первичной структуры швов.

### Список литературы

1. Черныш В. П., Кузнецов В. Д., Брисман А. Н. и др. (1983) *Сварка с электромагнитным перемешиванием*. Киев, Техника.
2. Razmyshlyayev A. D., Ahieieva M. V. (2014) Features of arc surfacing process in a longitudinal magnetic field. *Applied Mechanics and Materials*, 682, 313–318.
3. Размышляев А. Д., Выдмыш П. А., Агеева М. В. (2017) *Автоматическая электродуговая сварка под флюсом с воздействием внешнего магнитного поля*. Мариуполь, Изд-во ПГТУ.
4. Размышляев А. Д., Агеева М. В. (2018) О механизме измельчения структуры металла шва при дуговой сварке с воздействием магнитных полей (Обзор). *Автоматическая сварка*, 3, 29–33.
5. Чалмерс Б. (1968) *Теория затвердевания*. Москва, Металлургия.
6. Флемингс М. (1977) *Процессы затвердевания*. Москва, Мир.
7. Багрянский К. В., Добротина З. А., Хренов К. К. (1976) *Теория сварочных процессов*. Киев, Вища школа.
8. Фролов В. В. (1988) *Теория сварочных процессов*. Москва, Высшая школа.
9. Гаврилин И. В. (2000) *Плавление и кристаллизация металлов и сплавов*. Владимир, Владимир. гос. ун-т.
10. Толочко Н. К., Андрушевич А. А. (2013) Кластерная структура расплавов. *Литье и металлургия*, 4 (73), 59–63.
11. Жукова Л.А. (2002) *Строение металлических жидкостей*. Учебное пособие. Екатеринбург, УГТУ-УПИ.
12. Скребиц А. М., Иванов Г. А., Секачев А. О. и др. (2006) Новый способ определения числа атомов в кластере металлического расплава. *Вісник Приазовського державного технічного університету*. Зб. наук. пр., 16, сс. 1–7.
13. Скребиц А. М. (2009) Структура жидких металлов в интервале температуры ликвидус-кипения. *Процессы литья*, 3, 3–7.
14. Найдек В. Л., Мельник С. Г. (2015) Кластеры – структурные составляющие металлических расплавов. *Металл и литье Украины*, 7 (266), 21–33.
15. Аганаев Ю. П. (2014) Формирование структуры металлических сплавов в условиях энергетической неоднородности поверхности раздела фаз при периодической кристаллизации. *Современные наукоемкие технологии*, 9, 6–10.
16. Стеценко В. Ю. (2015) Кластеры в жидких металлах – стабильные нанокристаллы. *Литье и металлургия*, 2 (79), 33–35.
17. Марукович Е. И., Стеценко В. Ю. (2015) Основные трудности современной теории металлических расплавов. Пути преодоления. *Литье и металлургия*, 3 (84), 24–27.
18. Иванов И. А. (2007) Кинетический фазовый переход при кристаллизации металлов из расплава: автореф. дис. ... канд. физ.-мат. наук. Москва.
19. Деев В. Б., Цепорина С. А., Селянин И. Ф., Приходько О. Г. (2003) Некоторые особенности кластерной модели металлических расплавов. *Ползуновский альманах*, 3, 141–149.
20. Фруммин И. И. (1961) *Автоматическая электродуговая наплавка*. Харьков, Изд-во лит-ры по черной и цветной металлургии.

### References

1. Chernysh, V.P., Kuznetsov, V.D., Briskman, A.N. et al. (1983) *Welding with electromagnetic stirring*. Kiev, Tekhnika [in Russian].
2. Razmyshlyayev, A.D., Ahieieva, M.V. (2014) Features of arc surfacing process in a longitudinal magnetic field. *Appl. Mech. Mater.*, 682, 313-318.

3. Razmyshlyayev, A.D., Vydmysh, P.A., Ageeva, M.V. (2017) *Automatic submerged-arc welding under action of external magnetic field*. Mariupol, PGTU [in Russian].
4. Razmyshlyayev, A.D., Ageeva, M.V. (2018) On mechanism of weld metal structure refinement in arc welding under action of magnetic fields (Review). *The Paton Welding J.*, **3**, 25-28.
5. Chalmers, B. (1968) *Theory of solidification*. Moscow, Metallurgiya [in Russian].
6. Flemings, M. (1977) *Processes of solidification*. Moscow, Mir [in Russian].
7. Bagryansky, K.V., Dobrotina, Z.A., Khrenov, K.K. (1976) *Theory of welding processes*. Kiev, Vyshcha Shkola [in Russian].
8. Frolov, V.V. (1988) *Theory of welding processes*. Moscow, Vyschaya Shkola [in Russian].
9. Gavrilin, I.V. (2000) *Melting and solidification of metals and alloys*. Vladimir, Vladimir. Un-t [in Russian].
10. Tolochko, N.K., Andrushevich, A.A. (2013) Cluster structure of melts. *Litio i Metallurgiya*, **4**(73), 59-63 [in Russian].
11. Zhukova, L.A. (2002) *Structure of metallic liquids: Manual*. Ekaterinburg, UGTU-UPI [in Russian].
12. Skrebtsov, A.M., Ivanov, G.A., Sekachev, A.O. et al. (2006) New method for determination of number of atoms in metal melt cluster. *Visnyk Pryazov. DTU: Transact.*, **6**, 1-7.
13. Skrebtsov, A.M. Structure of liquid metals in liquidus-boiling temperature range. *Protsessy Litiya*, **3**, 3-7 [in Russian].
14. Najdek, V.L., Melnik, S.G. (2015) Clusters – the structural constituents of metal melts. *Metall i Litio Ukrainy*, **7**(266), 21-33 [in Russian].
15. Aganaev, Yu.P. (2014) Formation of structure of metal alloys under conditions of energy inhomogeneity of phase interface in periodic solidification. *Sovrem. Naukoyomkie Tekhnologii*, **9**, 6-10 [in Russian].
16. Stetsenko, V.Yu. (2015) Clusters in liquid metals – stable nanocrystals. *Litio i Metallurgiya*, **2**(79), 33-35 [in Russian].
17. Marukovich, E.I., Stetsenko, V.Yu. (2015) Main difficulties of modern theory of metal melt. Ways to overcome. *Litio i Metallurgiya*, **3**(84), 24-27 [in Russian].
18. Ivanov, I.A. (2007) Kinetic phase transition in solidification of metals from melt. In: *Syn. of Thesis for Cand. of Phys.-Math. Sci. Degree*. Moscow [in Russian].
19. Deev, V.B., Tsetsorina, S.A., Selyanin, I.F., Prikhodko, O.G. (2003) Some peculiarities of cluster model of metal melts. *Polzunovskiy Almanakh*, **3**, 141-149 [in Russian].
20. Frumin, I.I. (1961) *Automatic electric arc surfacing*. Kharkov, Lit-ra po Chyornoj i Tsvetnoj Metallurgii [in Russian].

## ВПЛИВ МАГНІТНОГО ПОЛЯ НА КРИСТАЛІЗАЦІЮ ШВІВ ПРИ ДУГОВОМУ ЗВАРЮВАННІ

О. Д. РАЗМИШЛЯЄВ<sup>1</sup>, М. В. АГЕЄВА<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ГВУЗ «Приазовський державний технічний університет». 87500, м. Мариупіль, вул. Університетська, 7.

E-mail: razmyshljaev@gmail.com

<sup>2</sup>Донбаська державна машинобудівна академія. 84313, м. Краматорськ, вул. Академічна, 72.

E-mail: maryna\_ah@ukr.net

Огляд публікацій з металургійного і ливарного виробництва показав, що багато авторів при аналізі властивостей рідких металів і сплавів виходять з уявлень про кластерну їх будову. Кластерна будова рідини є гіпотезою, але вона підтверджена дослідженнями дифракції відбитих від її поверхні рентгенівських променів, електронів і нейтронів. В роботі розглянуті існуючі уявлення про те, що кластер — це кристалоподібні згущення атомів. Навколо кластерів існує знеміцнена зона, яка складається з неупорядкованих атомів, обсяг якої не перевищує 3...5 %, і це забезпечує рідкоплинність багатьох розплавів. Автори публікацій досягли успіхів в поясненні структури злитків, що формується, виходячи з кластерного механізму процесу кристалізації рідких металів і сплавів. Автори даної роботи висловили припущення, що перегрітий рідкий метал в головній частині ванни, що має більш дрібні кластери, переміщується під дією магнітних полів в хвостову її частину, і забезпечує подібнення первинної структури металу шва. Бібліогр. 20, рис. 1.

*Ключові слова:* зварювання, зварювальна ванна, магнітне поле, кластер, структура шва, кристалізація

## EFFECT OF MAGNETIC FIELD ON CRYSTALLIZATION OF WELDS IN ARC WELDING

A.D. RAZMYSHLJAEV<sup>1</sup>, M.V. AGEJEVA<sup>2</sup>

<sup>1</sup>State Higher Education Institute Pryazovskiy State Technical University. 7 Universitetskaya Str., 87500, Mariupil, Ukraine.

E-mail: razmyshljaev@gmail.com

<sup>2</sup>Donbass State Machine Building Academy. 72 Akademicheskaya Str., 84313, Kramatorsk, Ukraine.

E-mail: maryna\_ah@ukr.net

A review of publications on metallurgical and casting industry showed that analyzing the properties of liquid metals and alloys, many authors proceed from the notions of their cluster structure. The cluster structure of the liquid is a hypothesis, but it is confirmed by investigations of diffractions of X-rays, electrons and neutrons reflected from its surface. The work considers the existing notions about the fact, that a cluster is a crystal-like concentration of atoms. Around the clusters a softening zone exists, which consists of disordered atoms, the volume of which does not exceed 3...5 %, and this provides the fluidity of many melts. The authors of publications achieved successes in explaining the forming structure of ingots, based on the cluster mechanism of the process of crystallization of liquid metals and alloys. The authors of this work suggested that overheated molten metal at the head part of the pool, which has smaller clusters, moves under the action of magnetic fields to its tail part, and provides a refinement of the primary structure of the weld metal. 20 Ref., 1 Fig.

*Keywords:* welding, weld pool, magnetic field, cluster, weld structure, crystallization

Поступила в редакцію 23.10.2018