

ОСОБЕННОСТИ ПОЛУЧЕНИЯ КАЧЕСТВЕННЫХ СВАРНЫХ ШВОВ ПРИ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОЙ СВАРКЕ ВЫСОКОПРОЧНЫХ СТАЛЕЙ БОЛЬШОЙ ТОЛЩИНЫ

В. Я. БЕЛЕНЬКИЙ, д-р техн. наук, **Д. Н. ТРУШНИКОВ**, канд. техн. наук,
чл.-кор. АН Болгарии **Г. М. МЛАДЕНОВ**, **Т. В. ОЛЬШАНСКАЯ**, канд. техн. наук
(Перм. нац. исслед. политехн. ун-т, г. Пермь, РФ)

Исследованы особенности формирования и кристаллизации металла шва при электронно-лучевой сварке высокопрочных сталей с глубоким проплавлением. Показана возможность повышения степени структурной однородности и предупреждения появления специфических дефектов при сварке с осцилляцией электронного пучка.

Ключевые слова: электронно-лучевая сварка, высокопрочные стали, большие толщины, металл шва, первичная структура, дефекты швов, X-образная траектория

При изготовлении ответственных изделий для тяжелого и транспортного машиностроения (оси, валы и другие тяжело нагруженные детали) широко применяют высокопрочные легированные стали перлитного класса 34ХН1М, 38Х2НМ, 40ХН2МА. Однако их плохая свариваемость при использовании дуговых способов сварки значительно ограничивает возможности конструирования сварных изделий.

В настоящее время большое распространение находит электронно-лучевая сварка (ЭЛС), которая позволяет не только получать швы с высокими значениями отношения глубины сварного шва к его ширине, но и обеспечивает минимальные размеры зоны термического влияния и высокий уровень механических характеристик сварных соединений. Для прогнозирования режимов ЭЛС применяют статистическое и численное моделирование [1–3]. В то же время ЭЛС имеет ряд недостатков: образование специфических дефектов в корневой части сварного шва, нестабильность глубины проплавления, сложность воспроизведения режима фокусировки электронного пучка.

В настоящей работе исследованы особенности получения качественных сварных швов при ЭЛС высокопрочных сталей большой толщины.

На первом этапе исследований сваривали цилиндрические образцы из стали 38Х2НМ с толщиной стенки 30 мм на электронно-лучевой установке с энергетическим агрегатом ЭЛА-60/60 статическим электронным пучком при мощности 12 кВт на скорости 14 м/ч.

Для контроля и воспроизведения параметров фокусировки электронного пучка использовали разработанный авторами метод, основанный на регистрации высокочастотной составляющей тока несамостоятельного разряда в плазме. Этот разряд возбуждается в плазме, формируемой в зоне воздействия на металл мощного концентрированного электронного пучка, с помощью коллектора электронов, который расположен над зоной сварки и имеет положительный потенциал 20...30 В относительно свариваемого изделия [4, 5]. В процессе экспериментов из спектра тока несамостоятельного разряда в плазме выделялась составляющая с частотой 10...20 кГц. По экстремальным значениям амплитуды этой составляющей устанавливали «острую» фокусировку электронного пучка, обеспечивающую максимальную глубину проплавления при заданных значениях ускоряющего напряжения и тока пучка.

На рис. 1 показаны макрошлифы зоны проплавления, полученные при сварке статическим электронным пучком. На макрошлифе видна характер-

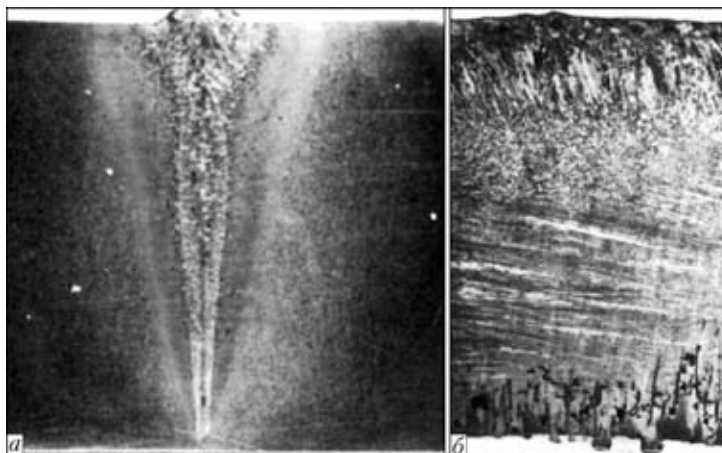


Рис. 1. Макроструктура ($\times 2$) металла шва в поперечном (а) и продольном (б) сечениях



ная для режима сварки с «острой» фокусировкой кинжальная форма проплавления с расширенной верхней и сужающейся в средней и корневой частях шва. На продольном шлифе имеются специфические корневые дефекты — пикообразование и пустоты в корневой части зоны проплавления.

По результатам исследований первичной структуры металла сварного шва установлено наличие четырех характерных зон, расположенных по высоте шва, которые характеризуются различными направлениями и геометрической формой первичных кристаллитов (см. рис. 1, б).

Первая зона (валик сварного шва) состоит из крупных полиэдрических кристаллитов. Средний диаметр кристаллитов, определенный методом секущих, составил в поперечном сечении 0,25, в продольном — 0,32 мм, глубина этой зоны 1,5...2,0 мм.

Первая и вторая структурные зоны формируются в верхней расширенной части сварного шва. Макроструктура этих зон незначительно отличается от структуры, образующейся при дуговых способах сварки.

Вторая зона состоит из столбчатых кристаллитов, направленных перпендикулярно линии сплавления в поперечном сечении шва и практически вертикально к его поверхности в продольном направлении. Средний размер кристаллитов в поперечном сечении шва составляет 0,9×0,3, в продольном — 2,5×0,3 мм; глубина второй зоны — 3,5...5,5 мм.

Третья зона в поперечном сечении шва состоит из столбчатых кристаллитов, которые срастаются в центре шва. Их оси направлены параллельно поверхности шва и перпендикулярно линии сплавления. В продольном сечении эти кристаллиты имеют полиэдрическое строение (рис. 2, а). Средний диаметр кристалла составляет 0,15 мм, его длина 0,66 мм, угол сходимости фронтов кристаллизации с обеих сторон минимальный. Таким образом, срастание кристаллитов в центре шва, уменьшение их размеров по сравнению с кристаллитами первой и второй зон показывают, что скорость кристаллизации в этой части шва

значительно выше. Увеличение скорости кристаллизации, безусловно, связано с более интенсивным теплоотводом, зависящим от объема расплавленного металла в различных зонах сварного шва. Глубина третьей зоны составляет 3,75...4,75 мм.

Отличие четвертой зоны от третьей состоит в том, что, кроме столбчатых кристаллитов, имеющих такую же направленность, в центральной части этой зоны в поперечном сечении появляются мелкие полиэдрические кристаллиты (рис. 2, б). В продольном сечении в центре шва эти кристаллиты имеют столбчатое строение — длинные и узкие с максимальной длиной по направлению сварки до 15 мм. Оси кристаллитов направлены практически параллельно. В четвертой зоне зафиксировано значительное измельчение структуры по высоте шва. Так, в нижней части шва в поперечном сечении длина и ширина кристаллитов изменяются соответственно от 0,97 до 0,27 и от 0,13 до 0,08 мм. В продольном сечении по центру шва длина кристаллитов уменьшается от 15 до 1,6 мм, а ширина — от 0,41 до 0,12 мм. Глубина этой зоны составляет 12,5...15,0 мм. Таким образом, приведенные результаты свидетельствуют о том, что скорость кристаллизации с увеличением глубины зоны повышается.

В швах, выполненных ЭЛС, выявлены специфические дефекты (пикообразование и полости), которые образуются только в четвертой зоне, наиболее крупные — на границе третьей и четвертой зон.

Исследования металла сварного шва показали, что его структура представляет мелкодисперсную ферритно-карбидную смесь с оторочкой доэвтектидного феррита по границам дендритов. Первичная структура по зонам шва также значительно отличается. В верхней расширенной части сварного шва структура металла имеет явно выраженный дендритный характер с довольно широкой сеткой феррита (рис. 3, а). В середине шва структура его металла ячеисто-дендритная, размер зерна уменьшается практически в два раза (рис. 3, б). В корневой части шва образуется мелкозернистая структура, которая по типу приближается к ячеистой (рис. 3, в).

Измерения размера зерна (ширина дендритов и ячеек) по высоте шве показали, что в первых трех зонах существенного уменьшения размера дендритов не выявлено. Среднее значение ширины дендритов в этих зонах находится в пределах 21...24 мкм. Резкое измельчение структуры происходит по глубине четвертой зоны — от 6 до 20 мкм.

В целом можно отметить, что при ЭЛС статическим остророфокусированным электронным пучком металл свар-

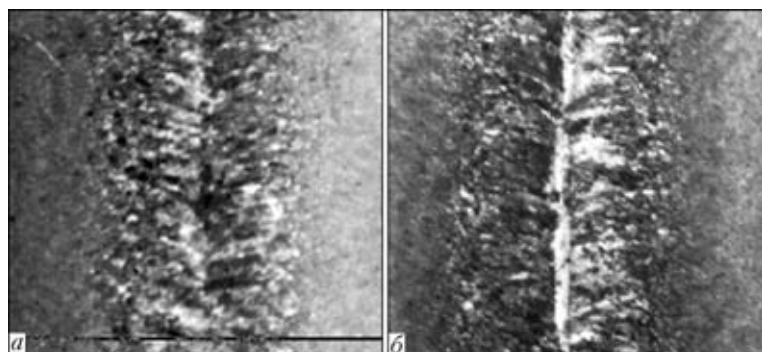


Рис. 2. Характер срастания кристаллов (×7) в третьей (а) и четвертой (б) зонах

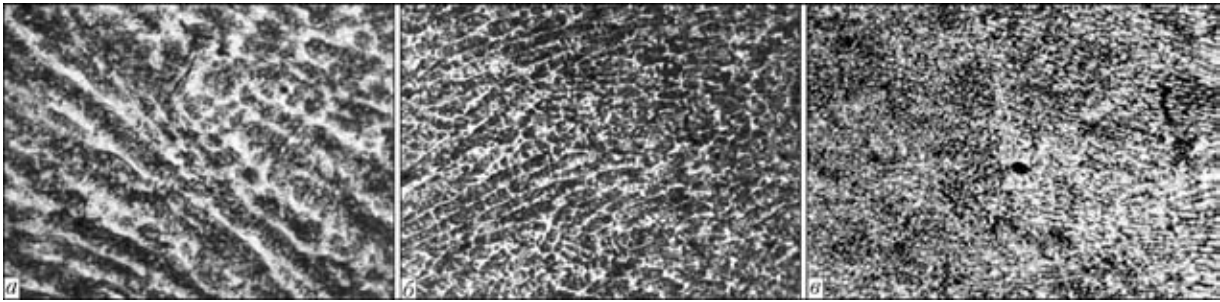


Рис. 3. Микроструктуры ($\times 300$) металла в верхней (а), средней (б) и нижней (в) частях сварного шва

ного шва характеризуется значительной структурной и механической неоднородностью. Кроме того, в корневой части шва формируются специфические дефекты, резко снижающие эксплуатационные характеристики сварного соединения.

Второй этап включал исследование формирования сварного соединения при ЭЛС стали 38Х2НМ с осцилляцией электронного пучка, которую осуществляли с целью оказания управляющего воздействия на процессы кристаллизации металла и получение более качественных сварных соединений. При выборе параметров осцилляции (частоты и амплитуды развертки) использовали теоретические оценки, предложенные в работе [6].

Изучение сварных швов, полученных при сварке с колебаниями электронного луча поперек и вдоль шва, а также с вращением электронного луча, показало, что указанные траектории развертки электронного пучка не обеспечивают существенного повышения структурной однородности металла сварного шва, а отсутствия корневых дефектов достигают только при большой амплитуде осцилляции, что приводит к значительному снижению глубины проплавления и увеличению ширины сварного шва.

Значительный интерес с точки зрения формирования сварных швов с однородной структурой и отсутствием корневых дефектов при оптимальной конфигурации зоны проплавления представляют осцилляции электронного пучка по Х-образной траектории [7]. В связи с этим исследовали формирование сварных швов при ЭЛС стали 38Х2НМ с разверткой электронного пучка по Х-образной траектории.

Сварку выполняли на параметрах режима, аналогичных используемым при экспериментах по сварке этой стали статическим электронным пучком. Фокусировка электронного пучка так же, как и в экспериментах со статическим пучком, оптимизировалась по параметрам высокочастотной составляющей тока несамостоятельного разряда в плазме, формируемой в зоне воздействия пучка.

Развертку электронного пучка по Х-образной траектории осуществляли путем изменения фазового сдвига φ гармоничес-

ких колебаний пучка в двух взаимно перпендикулярных плоскостях по закону

$$\Delta\varphi = \frac{\pi}{2} \left[1 - \text{sign} \left(\sin \frac{1}{2} \omega t \right) \right],$$

где $\text{sign}(U) = \begin{cases} 1 & \text{при } U \geq 0 \\ -1 & \text{при } U < 0 \end{cases}$; ω — частота колебаний; t — время.

Частота развертки выбрана в соответствии с теоретическими оценками, взятыми из работы [6], и составляла 600 Гц, а амплитуда развертки исходя из условия обеспечения оптимальной конфигурации зоны проплавления с минимальным увеличением ширины сварного шва — 1,8 мм.

Исследование макроструктуры сварного шва, полученного при ЭЛС с Х-образными колебаниями, показало существенное изменение конфигурации зоны проплавления, что проявляется в уменьшении уширения в верхней части сварного шва и формировании зоны проплавления практически постоянной ширины. Зона проплавления имеет такие же характерные зоны, как и при сварке без осцилляции электронного пучка, но при этом резко уменьшается уровень колебаний глубины проплавления, полностью отсутствуют специфические корневые дефекты, изменяется структура третьей и четвертой зон (рис. 4). В третьей зоне кристаллиты приобретают овальную форму, почти полиэдрическую, а в четвертой — увеличивается центральный участок с полиэдрическими кристаллитами. Столбчатые кристаллы этой зоны изменяют свою форму и становятся овальными. По всей длине шва размеры кристаллитов уменьшаются (рис. 4, б).

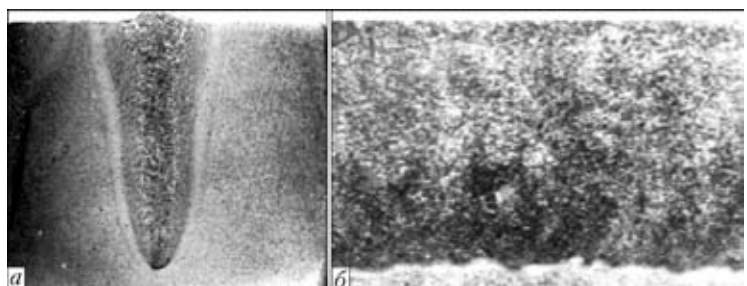


Рис. 4. Макроструктуры ($\times 1$) сварного шва, полученные в поперечном (а) и продольном (б) сечениях при сварке с Х-образными колебаниями



Таким образом, при ЭЛС высокопрочных сталей эффективным технологическим приемом является осцилляция электронного пучка по X-образной траектории при «острой» фокусировке пучка. В этом случае обеспечивается получение металла сварного шва с высоким уровнем структурной и механической однородности, а также отсутствуют специфические дефекты в корне шва.

Работа выполнена при поддержке гранта Российского Фонда фундаментальных исследований РФФИ-Урал № 11-08-96016 и финансовой поддержке Министерства образования Пермского края (РФ).

1. *Mladenov G., Vutova K., Wojcicki S.* Experimental investigation of the weld depth and thermal efficiency during electron beam welding // *Vacuum*. — 1998. — **51**, iss. 2, Oct. — P. 231–233.

2. *Koleva E.* Electron beam weld parameters and thermal efficiency improvement // *Ibid.* — 2005. — **77**, iss. 4, 11 March. — P. 413–421.
3. *Ерофеев В. А., Логвинов Р. В., Нестеренков В. М.* Особенности использования эквивалентного источника теплоты при учете деформаций и напряжений в процессе электронно-лучевой сварки // *Сварка и диагностика*. — 2010. — № 4. — С. 22–26.
4. *Yazovskikh V. M., Trushnikov D. N., Belen'kii V. Y.* The mechanism of secondary emission processes in electron beam welding with the modulation of the electron beam // *Welding Intern.* — 2004. — **18**, iss. 95. — P. 724–729.
5. *Formation of a secondary-emission signal in electron beam welding with continuous penetration / D. N. Trushnikov, V. Ya. Belen'kii, V. M. Yazovskikh, L. N. Krotov // Ibid.* — 2007. — № 21. — P. 384–386.
6. *Беленький В. Я.* Оценка оптимальной частоты осцилляции электронного луча при сварке // *Физ. и химия обраб. материалов*. — 1989. — № 1. — С. 106–111.
7. *Беленький В. Я.* Развертка электронного пучка по X-образной траектории как средство уменьшения дефектов в корне шва при электронно-лучевой сварке // *Автомат. сварка*. — 1986. — № 9. — С. 35–37.

Features of formation and solidification of weld metal in electron beam welding of high-strength steels with deep penetration were investigated. Both the possibility of increasing the degree of structural inhomogeneity and prevention of appearance of specific defects in welding with electron beam oscillation are shown.

Поступила в редакцию 20.12.2011



СВАРКА и РЕЗКА - 2012

12-я Международная специализированная выставка

10–13 апреля 2012

Минск
ЗАО «Минск-Экспо»

Тематика выставки:

- материалы для сварки, наплавки и пайки
- оборудование и технологии сварки, резки, наплавки, пайки и термообработки
- источники питания и системы управления сварочным оборудованием
- оборудование для орбитальной сварки и обработки труб
- электронно-лучевая, лазерная, плазменная сварка и резка
- автоматизированные комплексные системы и агрегаты для сварки и резки
- приборы для неразрушающего контроля сварных соединений
- научное и информационное обеспечение сварки
- система подготовки, переподготовки и аттестации сварщиков
- охрана труда и экологическая безопасность в сварочном производстве
- сертификация сварочного оборудования

Одновременно с выставкой «Сварка и Резка» будут работать выставки «Защита от коррозии. Покрытия» и «Машиностроение».

Контакты: тел./факс: +375 17 226 98 58, E-mail: e_fedorova@solo.by