

УДК 541.183.5

КРИСТАЛЛОГРАФИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ФАЗОВЫХ ПРЕВРАЩЕНИЙ В ОБЛАСТИ СОЕДИНЕНИЯ СРЕДНЕУГЛЕРОДИСТЫХ СТАЛЕЙ, ПОЛУЧЕННОГО РОТАЦИОННОЙ СВАРКОЙ ТРЕНИЕМ

© 2023 г. Академик РАН В. М. Счастливцев¹, И. Л. Яковлева¹,
М. Л. Лобанов^{1,2}, Е. Ю. Приймак^{3,4,*}

Поступило 13.02.2023 г.
После доработки 13.02.2023 г.
Принято к публикации 04.05.2023 г.

Методами ориентационной (EBSD) и просвечивающей электронной микроскопии исследованы структура и ориентационные соотношения α' и γ -фаз в среднеуглеродистых сталях при ротационной сварке трением. Показано, что в результате фазовой перекристаллизации в структуре сварного шва образуется мартенсит с прослойками γ -фазы. По виду спектра угловых отклонений межфазных границ установлено образование вторичного (ревертированного) аустенита. Показано, что между кристаллами α - и γ -фаз в этом случае реализуется ориентационное соотношение, близкое к Бейновскому.

Ключевые слова: ротационная сварка трением, аустенит, мартенсит, ориентационные соотношения
DOI: 10.31857/S2686740023040132, **EDN:** VAUNIB

Ротационная сварка трением (РСТ) – это высокотехнологичный процесс соединения деталей как из одноименных, так и разноименных металлов и сплавов [1–3]. Несмотря на промышленное внедрение данной технологии в 70-х годах прошлого века, вопросы, связанные с механизмами деформации и фазовых превращений в сварных соединениях среднеуглеродистых легированных сталей в процессе РСТ, остались недостаточно изученными. Сварной шов, в зоне которого происходит горячая деформация (вариант термомеханической обработки с одноосным нагружением) и фазовая перекристаллизация в условиях сверхбыстрого охлаждения за счет теплопроводности [4], является интересным для исследования объектом.

Формирование микроструктуры сварного шва среднеуглеродистых легированных сталей при РСТ происходит в результате двух последовательно реализованных процессов: горячей деформации аустенита и фазового превращения при охлаждении [5]. Очевидно, что образующиеся в процессе сверхбыстрых нагрева и охлаждения α' - и

γ -фазы должны быть связаны определенными ориентационными соотношениями (ОС).

Повышенный интерес исследователей к ОС между исходной и конечной фазами связан прежде всего с тем, что ОС, как некие “следы”, оставленные превращением, отражают механизм трансформации кристаллических решеток [6–8]. Также ОС в совокупности с морфологией продуктов распада указывают на определенные особенности превращений, реализующиеся при различных условиях. С практической точки зрения интерес к кристаллографии фазовых превращений определяется открывающимися возможностями по управлению текстурой, и, соответственно, анизотропией физико-механических свойств конструкционных и функциональных материалов и изделий [9]. Задача исследования состояла в установлении кристаллографических особенностей фазового превращения в области соединения среднеуглеродистых сталей, полученного ротационной сваркой трением.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Материалами исследования служили среднеуглеродистые стали 32Г2 и 40ХН. Трубные заготовки (диаметром 63.5 мм и толщиной стенки 4.5 мм) из указанных сталей были соединены на сварочном оборудовании Thompson-60.

Измерения ориентировок кристаллитов α' - и γ -фаз в сварных соединениях проводили с помощью электронной микроскопии и анализа EBSD

¹ Институт физики металлов им. М.Н. Михеева Уральского отделения Российской академии наук, Екатеринбург, Россия

² Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, Екатеринбург, Россия

³ АО “Завод бурового оборудования”, Оренбург, Россия

⁴ Оренбургский государственный университет, Оренбург, Россия

*E-mail: elena-pijmak@yandex.ru

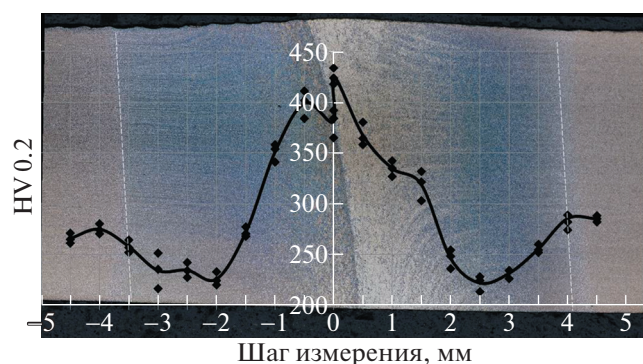


Рис. 1. Панорамное изображение микроструктуры сварного соединения сталей 32Г2 и 40ХН с распределением микротвердости по протяженности 3ТМВ (штриховыми линиями помечены границы 3ТМВ).

(Electron Back-Scattering Diffraction). Анализ проводился на растровом электронном микроскопе ThermoScience Scios 2 LoVac с приставкой Oxford Instrument Symmetry EBSD Detector с использованием программного комплекса AZtec. Параметры микроскопа в момент съемки были следующие: ускоряющее напряжение 20 кВ, ток зонда 410 нА. Шаг сканирования 0.1 мкм. Погрешность определения ориентации кристаллической решетки – не более $\pm 1^\circ$ (в среднем $\pm 0.6^\circ$).

Межкристаллитные границы строились на ориентационных картах при разориентациях 8° . Анализ границ решетки совпадающих узлов (PCY) между отдельными зернами осуществляли построением их на ориентационных картах с учетом заложенного в программное обеспечение стандартного критерия Брендона $\pm \Delta\Theta$. Для каждой границы он составляет конкретную величину: $\Delta\Theta = 15^\circ / (\Sigma n)^{1/2}$, где Σn – количество совпадающих узлов в элементарной ячейке, образующейся при наложении трехмерных кристаллических решеток.

В качестве действующих ориентационных соотношений (ОС) при обработке полученных ориентационных карт использовались ОС Курдюмова–Закса (К–3): $(111)\gamma \parallel (110)\alpha'$, $[-101]\gamma \parallel [-1-11]\alpha'$ [10].

Исследование тонкой структуры в зоне сварного стыка проводили методом просвечивающей электронной микроскопии с использованием микроскопа Tescan G²30 Twin с системой GATAN EELS, оснащенного энергодисперсионным спектрометром EDAX для элементного анализа и другими приставками, при ускоряющем напряжении 300 кВ. В необходимых случаях использовали темнопольный и микродифракционный анализ.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

При металлографическом изучении структуры сварного соединения, включающего измерения микротвердости поперек области шва, были вы-

явлены зоны: сварного стыка, термомеханического влияния и основного металла (рис. 1). В зоне сварного стыка зафиксировано существенное повышение микротвердости, которое обусловлено образованием мартенсита при прохождении сдвигового γ - α' -превращения. При этом в мартенсиде было зафиксировано образование однокомпонентной текстуры [11].

Анализ микроструктурных характеристик методом EBSD области сварного стыка (рис. 2а) показал, что спектры межзеренных (межкристаллитных) границ соответствовали мартенситной структуре: все высокоугловые границы сосредоточены в углах разориентации от 49° до 60° (рис. 2б); в спектрах специальных границ преимущественно фиксировали границы решетки совпадающих узлов – $\Sigma 3$, $\Sigma 11$, $\Sigma 25b$, $\Sigma 33c$ и $\Sigma 41c$ (рис. 2в). В работе [12] показано, что появление данного спектра является результатом сдвигового фазового превращения в соответствии с ОС промежуточными между ОС К–3 и ОС Нишиямы–Вассермана, которые реализуются в сталях.

Проведенный ориентационный межфазный анализ (рис. 2г) показал, что очень малая часть γ -фазы находится с кристаллитами α' -фазы в ОС, близких к ОС К–3 (максимум около 5°). При этом в спектре угловых отклонений межфазных границ от ОС присутствуют выраженные максимумы на углах, близких к 12.0 (очень слабый), 19.5 , 28.5 , 32.5 и 42.0° (рис. 2г). Также важно подчеркнуть, что спектр отклонений от ОС К–3 является дискретным.

Вид спектра угловых отклонений межфазных α' - γ -границ от ОС К–3 может быть объяснен в предположении, что частицы γ -фазы не являются остаточным (сохраненным) при полиморфном превращении аустенитом, а являются вторичными образованиями в соответствии с ОС К–3 из кристаллов α' -фазы, сформировавшихся при фазовом $\gamma \rightarrow \alpha'$ -превращении. Для проверки предположения по методикам, аналогичным описанным в [8], рассчитывались все возможные ориентации γ - и α' -фаз, образующиеся в результате превращения γ (1 ориентация) $\rightarrow \alpha'$ (24 ориентации в соответствии с ОС К–3) $\rightarrow \gamma_2$ (24 \times 24 ориентации в соответствии с ОС К–3). Затем анализировались все возможные разориентации между всеми ориентациями α' - и γ_2 -фаз.

Расчет показал, что экспериментально полученные отклонения от ОС на углах, близких к 12.0 , 19.5 , 28.5 и 32.5° в пределах $\pm 2^\circ$, также соответствуют ОС К–3. Такие углы разориентации должны наблюдаться между α' -зернами, образовавшимися при прямом $\gamma \rightarrow \alpha'$ -превращении, и кристаллами γ -фазы, выделяющимися при обратном $\alpha' \rightarrow \gamma_2$ -превращении. Другими словами, эти разориентации не являются какими-то новыми ОС, а являются кристаллографическими эквива-

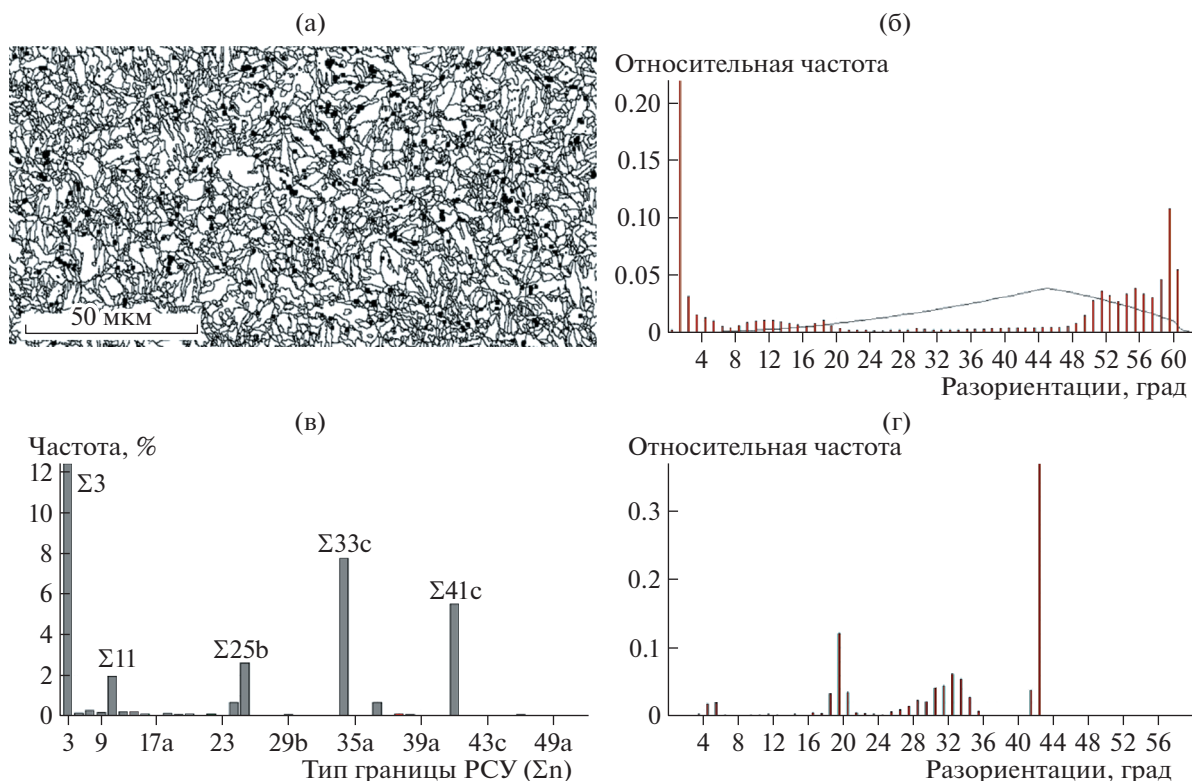


Рис. 2. Микроструктурные характеристики стали 40ХН в зоне сварного шва, полученные методом EBSD: а – ориентационная карта с нанесением межкристаллитных границ $\alpha(\alpha')$ -фазы (белый цвет) и указанием мест выделения γ -фазы (серый цвет, величина выделений увеличена для наглядности за счет толщины межфазных границ); б – спектр разориентаций межкристаллитных границ α' -фазы; в – спектр РСУ-границ в α' -фазе; г – спектр угловых отклонений межфазных α' - γ -границ от ОС К-3.

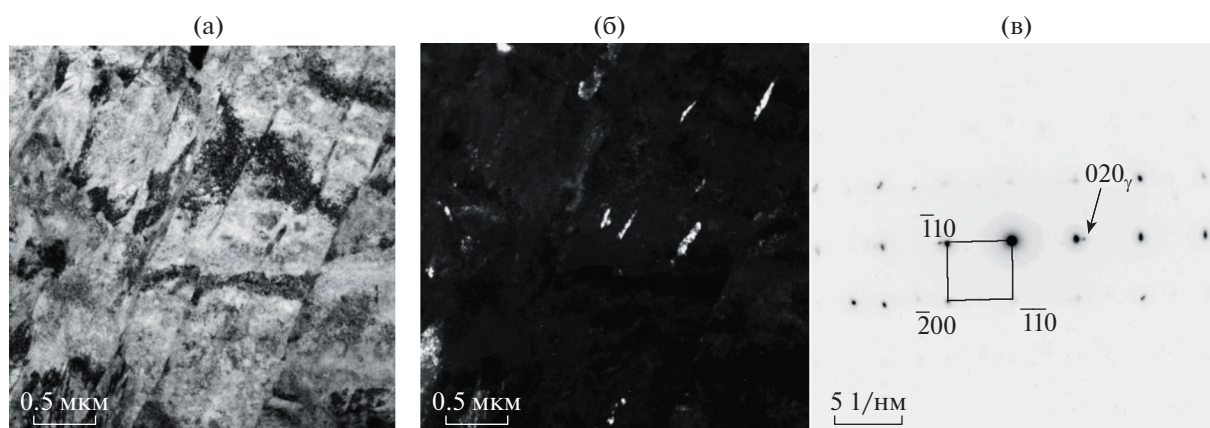


Рис. 3. Реечный мартенсит в структуре сварного стыка: а – светлопольное изображение; б – темнопольное изображение в рефлексе $(002)_{\gamma}$; в – электронограмма.

лентами ОС К-3. При этом основное количество аустенита оказывается не остаточным, а вновь выделенным (или вторичным).

Электронно-микроскопическое исследование области сварного шва (рис. 3) также показало, что его основной структурной составляющей является мартенсит (α'). Толщина реек α' составляет от 0.2 до 0.5 мкм. Между мартенситными рейками расположены прослойки γ -фазы (темно-

польное изображение, рис. 3б). Как показано в работе [13], при наличии остаточного аустенита между γ - и α' -фазами должны реализоваться ОС К-3. Однако было установлено, что основное количество γ -фазы отклонено примерно на 20° – 30° от идеальных ОС К-3. Проведенный электронно-микроскопический анализ показал, что между кристаллами α -фазы и аустенитом наблюдаются ОС, близкие к ОС Бейна: $(001)_{\gamma} \parallel (001)_{\alpha}$, $[100]_{\gamma} \parallel [-110]_{\alpha}$.

Следует отметить, что отклонение на углы 10° – 20° от идеальных ОС К-3 почти точно соответствует ОС Бейна, а отклонения на 20° – 30° являются более близкими к ОС Бейна, чем к ОС К-3. Важно отметить, что наблюдающиеся кристаллы γ -фазы, по-видимому, не являются восстановленным аустенитом, от последних они отличаются морфологически.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Методами просвечивающей электронной микроскопии и EBSD-анализа впервые изучено структурно-текстурное состояние сварного стыка при ротационной сварке трением в среднеуглеродистых сталях. Показано, что в структуре сварного шва сформировался мартенсит с прослойками γ -фазы, основная часть которого образовалась в результате $\gamma \rightarrow \alpha' \rightarrow \gamma_2$ превращения и представляет собой вторичный аустенит.

ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Работа выполнена в рамках государственного задания по теме “Структура” (№ госрегистрации 122021000033-2).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Виль В.И. Сварка металлов трением. М.: Машиностроение, 1970. 176 с.
2. Li W.Y., Vairis A., Preuss M., Ma T.J. Linear and rotary friction welding review // Int. Mater. 2016. Rev. 61. P. 71–100.
3. Shete N., Deokar S.U. A review, paper on rotary friction welding, Int. Conf. on Ideas // Impact and Innovation in Mechanical Engineering. (ICIME). 2017. V. 5. P. 1557–1560.
4. Табатчикова Т.И. Фазовые и структурные превращения при лазерном нагреве стали / В сб. Развитие идей академика В.Д. Садовского. Екатеринбург: ИФМ УрО РАН, 2008. С. 123–143.
5. Amborish Banerjee, Michail Ntovas, Laurie Da Silva, Salaheddin Rahimi, Bradley Wynne. Inter-relationship between microstructure evolution and mechanical properties in inertia friction welded 8630 low-alloy steel // Archives of Civil and Mechanical Engineering. 2021. <https://doi.org/10.1007/s43452-021-00300-9>
6. Ray R., Jonas J.J. Transformations textures in steels // Int. Materials Rev. 1990. V. 35. P. 1–36.
7. Гундырев В.М., Зельдович В.И., Счастливцев В.М. Кристаллографический анализ мартенситного превращения в среднеуглеродистой стали с пакетным мартенситом // ФММ. 2016. Т. 117. № 10. С. 1052–1062.
8. Лобанов М.Л., Пастухов В.И., Редикольцев А.А. Влияние специальных границ на $\gamma \rightarrow \alpha$ -превращение в аустенитной нержавеющей стали // ФММ. 2021. Т. 122. № 4. С. 424–430. <https://doi.org/10.31857/S0015323021040057>
9. Yang X., Xu Y., Yan X., Wu D. Influences of crystallography and delamination on anisotropy of Charpy impact toughness in API X100 pipeline steel // Mater. Sci. and Eng. A. 2017. V. 607. № 23. P. 53–62.
10. Эндрюс К., Дайсон Д., Киоун С. Электронограммы и их интерпретация. М.: Мир, 1971. 256 с.
11. Приймак Е.Ю., Лобанов М.Л., Беликов С.В., Карабанапов М.С., Яковлева И.Л. Закономерности формирования структуры и кристаллографической текстуры в сварных соединениях среднеуглеродистых легированных сталей в процессе ротационной сварки трением // Физика металлов и металловедение. 2022. Т. 123. № 6. С. 596–603. <https://doi.org/10.31857/S0015323022060122>
12. Штремель М.А., Андреев Ю.Г., Козлов Д.А. Структура и прочность пакетного мартенсита // Металловедение и термическая обработка металлов. 1999. № 4. С. 10–15.
13. Счастливцев В.М., Калетина Ю.В., Фокина Е.А. Остаточный аустенит в легированных сталях. Екатеринбург: РИО УрО РАН, 2014. 236 с.

CRYSTALLOGRAPHIC CHARACTERISTICS OF PHASE TRANSFORMATIONS IN THE FIELD OF MEDIUM-CARBON STEELS JOINT OBTAINED BY ROTARY FRICTION WELDING

Academician of the RAS V. M. Schastlivtsev^a, I. L. Yakovleva^a,
M. L. Lobanov^{a,b}, and E. Yu. Priymak^{c,d}

^a M.N. Miheev Institute of Metal Physics of Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Yekaterinburg, Russia

^b Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin, Yekaterinburg, Russia

^c ZBO Drill Industries, Orenburg, Russia

^d Orenburg State University, Orenburg, Russia

Orientation (EBSD) and transmission electron microscopy have been used to study the structure and orientation relationships of α' and γ -phases in medium-carbon steels during rotational friction welding. It is shown that, as a result of phase recrystallization, martensite with interlayers of the γ phase is formed in the structure of the welded joint. The formation of secondary (reverted) austenite was established by the form of the spectrum of angular deviations of interfacial boundaries. It is shown that, in this case, an orientation relation close to the Bein one is realized between the crystals of the α and γ phases.

Keywords: rotary friction welding, austenite, martensite, orientation relationships