В. Н. Арисова, А. Ф. Трудов, А. И. Богданов, А. Е. Биришбаева, М. А. Разуваев
**РЕНТГЕНОСТРУКТУРНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ КОМПОЗИЦИОННОГО
МАТЕРИАЛА СТАЛЬ 20 – НЕРЖАВЕЮЩАЯ СТАЛЬ 50X15M2Ф
ПОСЛЕ СВАРКИ ВЗРЫВОМ И НОРМАЛИЗАЦИИ**

**Волгоградский государственный технический университет
e-mail: mv@vstu.ru**

Приведены результаты исследований характеристик тонкой структуры биметалла из нержавеющей стали 50X15M2Ф и углеродистой стали 20 после сварки взрывом и последующей термической обработки. Установлено, что нормализация при температурах выше 900 °С приводит к мартенситному превращению в стали 50X15M2Ф, которое сопровождается повышением твердости и развитием тонкой структуры: увеличением уровня упругой деформации кристаллической решетки и дроблением областей когерентного рассеяния.

Ключевые слова: композит, сварка взрывом, сталь, термическая обработка, нормализация, рентгеноструктурный анализ, упругая деформация кристаллической решетки, микронапряжения, области когерентного рассеяния.

V. N. Arisova, A. F. Trudov, A. I. Bogdanov, A. E. Birshbaeva, M. A. Razuvaev
**X-RAY STUDIES OF COMPOSITE MATERIAL STEEL 20 - STAINLESS
STEEL 50Cr15Mo2V AFTER EXPLOSION WELDING AND NORMALIZATION**

Volgograd State Technical University

The results of studies of the characteristics of the fine structure of a bimetal made of stainless steel 50Kh15M2F and carbon steel 20 after explosion welding and subsequent heat treatment in the joint zone are presented. It was found that normalization at temperatures above 900 °C leads to a martensitic transformation in steel 50Cr15Mo2V, which is accompanied by an increase in hardness and the development of a fine structure: an increase in the level of elastic deformation of the crystal lattice and fragmentation of coherent scattering regions.

Keywords: composite, explosion welding, steel, heat treatment, normalization, X-ray structural analysis, elastic deformation of the crystal lattice, microstresses, coherent scattering regions.

В области сварки взрывом (СВ) однородных и разнородных материалов накоплен значительный теоретический и экспериментальный материал [1–12], однако, ряд вопросов, касающихся изменений в тонкой структуре в околошовной зоне композиционных материалов из углеродистых и легированных сталей при термической обработке, изучен недостаточно.

В [13,14] установлено, что нормализация сваренного взрывом биметалла сталь 20 – нержавеющая сталь 50X15M2Ф при высоких температурах (более 1000 °С) приводят к повышению твердости легированной стали до 5 ГПа, связанному с образованием мартенсита в высоколегированной зоне при охлаждении на воздухе, и существенное изменение перлитно-ферритной структуры стали 20 в структуру видманштеттова феррита.

Целью данной работы явилось исследование характеристик тонкой структуры – относительной деформации решетки и блоков мозаики – областей когерентного рассеяния (ОКР) в околошовной зоне стали 50X15M2Ф и стали 20 после сварки взрывом и последующей нормализации при разных температурах.

Материалы и методика проведения исследований

Биметалл получен с помощью сварки взрывом: основой являлась низкоуглеродистая сталь

20 (толщиной 20 мм), на которую приваривалась высоколегированная нержавеющая мартенситная сталь 50X15M2Ф (толщиной 6 мм).

Термическую обработку осуществляли в печи ШОЛ-1.6.2.51/11-ИЗ при температурах 800, 900 и 1100 °С с выдержкой в течение 1 часа и охлаждением на воздухе.

Для определения фазового состава и характеристик тонкой структуры образцов использовался рентгеноструктурный анализ. Съемки проводились на дифрактометре BRUKER D8 ADVANCE ECO (Германия) в медном K_{α} -излучении с Ni фильтром. Идентификацию фаз осуществляли с помощью программы «DIFRACT EVA», использующей лицензионную базу данных ICDD PDF-2. Для определения изменений характеристик тонкой структуры осуществляли рентгеносъемки профилей дифракционных линий (110) и (220) в сечениях перпендикулярных толщине биметалла, начиная с поверхности стали 50X15M2Ф до зоны соединения и от нее в сталь 20 путем последовательного удаления слоев (рис. 1).

Для выделения из общей ширины рентгеновских линий физического уширения (β), определения относительной деформации решетки ($\Delta a/a$) и размера областей когерентного рассеяния (ОКР) – блоков мозаики использовали метод аппроксимации [15].

Рис. 1. Схема рентгеновских съемок при последовательном снятии слоев от стали 50X15M2Ф к стали 20

Результаты исследований и их обсуждение

На рис. 2 приведены микроструктуры зоны соединения и распределение микротвердости по сечению биметалла в околошовной зоне после СВ и термической обработки. Как было показано в [13], исходная структура после сварки взрывом представляла собой: в стали 20 – феррит с равномерно-распределенными зернами перлита; в нержавеющей стали – мелкие рав-

номерно распределенные включения карбидов на ферритном поле. Значения твердости после сварки взрывом в стали 5X15M2Ф – 3,5–4 ГПа, в стали 20 около 2 ГПа. Нагрев и последующая выдержка при 800 °С в течение 1 ч при охлаждении на воздухе привели к существенным изменениям в структуре: в стали 20 образовался обезуглероженный слой толщиной до 500 мкм, содержание перлита в котором не превышает 5 %, что свидетельствовало о диффузии угле-

рода из стали 20 в сталь 50X15M2Ф. При этом несколько изменяется распределение твердости (рис. 3): твердость стали 50XM2Ф снижается до 1,5–2 ГПа. Нагрев до 900 °С привел к уменьшению толщины обезуглероженной зоны в стали 20 до 300 мкм и увеличению объемной доли перлита до 12 %. Твердость околосшовной зоны в коррозионностойкой стали увеличилась по сравнению с термообработкой при температуре 800 °С и составила 2,5–2,8 ГПа. Увеличение твердости можно объяснить частичным протек-

анием мартенситного превращения при нагреве до данной температуры с последующим охлаждением на воздухе. При термической обработке биметалла при 1100 °С обезуглероженный слой в стали 20 уже не наблюдался, а твердость увеличилась до 4–5 ГПа, что свидетельствовало о полном мартенситном превращении при нагреве до данной температуры, которая выше критической A_3 , а охлаждение на воздухе обеспечило скорость, соответствующую критической скорости закалки.

После СВ ×200

CB+800 °C ×100

CB+900 °C ×100

CB+1100 °C

а

б

Рис. 2. Микроструктуры и распределение микротвердости околосшовной зоны биметалла сталь 20+сталь 50X15M2Ф после СВ и нормализации при разных температурах

В стали 20 также произошло существенное изменение перлитно-ферритной структуры стали 20 в структуру видманшеттова феррита, имеющего твердость 1,2 ГПа [13].

На рис. 3 представлены графики распределе-

ния характеристик тонкой структуры – размера ОКР (блоков мозаики) и упругой деформации кристаллической решетки $\Delta a/a$ по сечению биметалла после сварки взрывом и последующей нормализации при разных температурах.

Рис. 3. Распределение по сечению биметалла характеристик тонкой структуры: размера ОКР – D и относительной упругой деформации кристаллической решетки $\Delta a/a$ после сварки взрывом (а) и нормализации при нагреве до разных температур (б, в, г). Окончание см. также на с. 30

Рис. 3. Окончание

После СВ (рис. 3, а) на расстоянии до 0,5 мм от зоны соединения в обеих сталях биметалла имеет место низкий уровень относительной упругой деформации кристаллических решеток, $\Delta a/a$ имеет значения всего 0,005, соответственно и уровень микронапряжений в этих зонах незначительный, при этом размер ОКР достигает 900–950 Å (блоки мозаики крупные). Такие характеристики тонкой структуры соответствуют равновесному состоянию сталей, связанному с выделением тепла при соударении пластин при СВ. При удалении от границы раздела уровень микронапряжений увеличивается — $\Delta a/a$ в стали 20 незначительно до 0,01, а в стали 50X15M2Ф до больших значений — до 0,017, при этом размер ОКР в стали 20 остается на уровне 900 Å, а в стали 50X15M2Ф значительно мельче — 400 Å.

Нормализация при 800 °C (рис. 3, б) выравнивает уровень микронапряжений на всем протяжении от зоны соединения: в стали 20 $\Delta a/a$ составляет 0,01, а в стали 50X15M2Ф несколько уменьшается до 0,013 при одновременном увеличении размера ОКР до 800 Å, структура становится более равновесной по сравнению с состоянием после СВ.

Дальнейшее увеличение температуры термообработки до 900 °C (рис. 3, в) приводит в стали 20 на расстоянии до 0,3 мм к некоторому увеличению $\Delta a/a$ до 0,012 и измельчению блоков мозаики до 500 Å, что связано, как было отмечено в [13], с обратной диффузией углерода из стали 50X15M2Ф в сталь 20. При увеличении расстояния более 0,3 мм от зоны соединения структура равновесная — с низким уровнем микронапряжений $\Delta a/a=0,008$, а размер блоков 800 Å. В стали же 50X15M2Ф характер

изменения характеристик тонкой структуры иной: относительная деформация решетки $\Delta a/a$ увеличивается до 0,016 при уменьшении размера ОКР до 500 Å. Развитие характеристик тонкой структуры в стали 50X15M2Ф объясняется частичным протеканием мартенситного превращения при этой температуре.

Нормализация при 1100 °C (рис. 3, г) приводит к резкому градиенту уровня микронапряжений и размеров ОКР в сталях исследуемого биметалла. В стали 50X15M2Ф, в которой произошло полное мартенситное превращение, и образовалась неравновесная структуры, уровень $\Delta a/a$ увеличился до 0,03 (в 3 раза выше, чем при температуре 800 °C), а ОКР измельчились до 200 Å. При этом в стали 20 сохраняется равновесная структура: $\Delta a/a$ находится на уровне 0,001, а размер ОКР более 800 Å.

Выводы

1. Установлено, что после СВ в композите из сталей 50X15M2Ф и 20 на расстоянии до 0,3 от зоны соединения уровень относительной деформации кристаллической решетки и, соответственно, микронапряжения существенно ниже, чем в при удалении от границы на расстояние более 0,3 мм, что связано с выделением тепла при соударении пластин в процессе сварки взрывом

2. Установлено, что нормализация при температурах более 900 °C обеспечивает мартенситное превращение в стали 50X15M2Ф, что приводит к повышению твердости и развитию характеристик тонкой структуры: увеличивает уровень микронапряжений — относительная деформация решетки $\Delta a/a$ достигает 0,03, при этом происходит измельчение блоков мозаики (ОКР) до 200 Å.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Конон, Ю. А.* Сварка взрывом / Ю. А. Конон, Л. Б. Первухин, А. Д. Чудновский. – М. : Машиностроение, 1987. – 216 с.
2. *Кудинов, В. М.* Сварка взрывом в металлургии / В. М. Кудинов, А. Я. Коротеев. – М. : Металлургия, 1978. – 168 с.
3. *Трыков, Ю. П.* Свойства и работоспособность слоистых композитов : монография / Ю. П. Трыков, В. Г. Шморгун ; ВолгГТУ. – Волгоград, 1999. – 190 с.
4. *Трыков, Ю. П.* Свойства сваренных взрывом соединений из углеродистых сталей при пластической деформации / Ю. П. Трыков, А. Ф. Трудов, И. Б. Степанищев // Изв. вуз. Черная металлургия, 2002, № 6. – С. 52.
5. *Трыков, Ю. П.* Неоднородность свариваемых взрывом соединений из углеродистых сталей и пути ее направленного регулирования / Ю. П. Трыков, А. Ф. Трудов, И. Б. Степанищев // Изв. вуз. Черная металлургия, 2002, № 7. – С. 76–77.
6. *Степанищев, И. Б.* Тонкая структура композиционного соединения из углеродистых сталей / И. Б. Степанищев, Ю. П. Трыков, В. Н. Арисова // Изв. вуз. Черная металлургия, 2002, № 11. – С. 75.
7. *Трыков, Ю. П.* Структура и свойства биметалла сталь 50X15M2Ф + сталь 09Г2С, полученного сваркой взрывом / Ю. П. Трыков, А. Ф. Трудов, И. Б. Степанищев // Изв. вуз. Черная металлургия, 2003, № 1. – С. 76–77.
8. *Трыков, Ю. П.* Исследование влияния нагревов на формирование тонкой структуры биметалла углеродистая сталь-нержавеющая сталь / Ю. П. Трыков, А. Ф. Трудов, В. Н. Арисова // Известия ВолгГТУ : межвуз. сб. науч. ст. № 9(96) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2012. – (Серия «Проблемы материаловедения, сварки и прочности в машиностроении»). – С. 67–61.
9. *Трудов, А. Ф.* Исследование влияния режимов термической обработки на структуру и свойства сваренного взрывом биметалла 16Г2С+50X15M2Ф / А. Ф. Трудов, В. Н. Арисова // Известия ВолгГТУ : научный журнал № 4(96) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2019. – (Серия «Проблемы материаловедения, сварки и прочности в машиностроении»). – С. 23–27.
10. *Арисова, В. Н.* Структура и свойства биметаллоа из сталей 50X15M2Ф и 09Г2С после технологических переделов / В. Н. Арисова, Ю. П. Трыков, А. Ф. Трудов, И. А. Пономарева // Упрочняющие технологии и покрытия, № 12, 2006. – С. 43–46.
11. *Шляхова, Г. В.* Исследование структуры биметалла конструкционная углеродистая сталь – нержавеющая сталь / Г. В. Шляхова, С. А. Баранникова, А. В. Бочкарева, Ю. В. Ли, Л. Б. Зуев // Изв. вузов. Черная металлургия, 2018. – № 61 (4). – С. 300–305.
12. *Гельман, А. С.* Плакирование стали взрывом / А. С. Гельман. – М. : Машиностроение, 1978. – 191 с.
13. *Трудов, А. Ф.* Трансформация структуры в сваренном взрывом биметалле сталь 20+50X15M2Ф после термической обработки / А. Ф. Трудов, В. Н. Арисова, Л. М. Гуревич, А. Е. Биршбаева // Известия ВолгГТУ : научный журнал № 2(237) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2020. – (Серия «Проблемы материаловедения, сварки и прочности в машиностроении»). – С. 7–12.
14. Исследование диффузионных процессов в биметалле сталь 20 – нержавеющая сталь 50X15M2Ф после сварки взрывом и термообработки / А. Ф. Трудов, В. Н. Арисова, Л. М. Гуревич, А. Е. Биршбаева, В. О. Харламов // Известия ВолгГТУ : научный журнал № 4 (239) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2020. – (Серия «Проблемы материаловедения, сварки и прочности в машиностроении»). – С. 18–22.
15. Рентгенографический и электронно-оптический анализ : учеб. пособие для вузов / С. С. Горелик, Ю. А. Скаков, Л. Н. Расторгуев. – 4-е изд. доп. и перераб. – М. : МИСИС, 2002. – 360 с.