

**ИЗМЕНЕНИЕ СТРУКТУРЫ И ФАЗОВОГО СОСТАВА В МАТЕРИАЛЕ СВАРНОГО ШВА  
СТАЛИ 12X18H10T ПОД ДЕЙСТВИЕМ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ\***

Н.В.Абабков<sup>1,2</sup>, Е.Л. Никоненко<sup>3,4</sup>, Н.А. Попова<sup>3</sup>, А.Н. Смирнов<sup>1,2</sup>

Научный руководитель: профессор, д.т.н. А.Н. Смирнов<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Кузбасский государственный технический университет, Россия, г. Кемерово, ул. Весенняя, 28, 650000

<sup>2</sup>ООО «Кузбасский центр сварки и контроля», Россия, г. Кемерово, пр. Ленина, 33/2, 650055

<sup>3</sup>Томский государственный архитектурно-строительный университет,

Россия, г. Томск, пл. Соляная, 2, 634003

<sup>4</sup>Национальный исследовательский Томский политехнический университет,

Россия, г. Томск, пр. Ленина, 30, 634050

E-mail: [natalya-popova-44@mail.ru](mailto:natalya-popova-44@mail.ru)

**WELDING MATERIAL STRUCTURE AND PHASE COMPOSITION IN 0.12C-18Cr-10Ni-1Ti-Fe  
STEEL MODIFIED BY PLASTIC DEFORMATION**

N.V. Ababkov<sup>1,2</sup>, E.L. Nikonenko<sup>3,4</sup>, N.A. Popova<sup>3</sup>, A.N. Smirnov<sup>1,2</sup>

Scientific Supervisor: Prof., Dr. A.N. Smirnov<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Kuzbass State Technical University, Russia, Kemerovo, Vesennaya street, 28, 650000

<sup>2</sup>LLC “Kuzbass Center of Welding and Control”, Russia, Kemerovo, Lenin avenue, 33/2, 650055

<sup>3</sup>Tomsk State University of Architecture and Building, Russia, Tomsk, Solyanaya square, 2, 634003

<sup>4</sup>National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russia, Lenin avenue, 3, 0634050

E-mail: [natalya-popova-44@mail.ru](mailto:natalya-popova-44@mail.ru)

**Abstract.** The paper presents the transmission electron microscopy (TEM) investigations of the structure and phase composition of the heat-affected zone (HAZ) in welded joint obtained by electrode welding. The type 12C-18Cr-10Ni-1Ti-Fe steel is used for welding which then subjected to plastic deformation. Quasi-static tensile tests are performed on a test machine Instron-1185. The acoustic emission and acoustic decay are respectively recorded and measured using the acoustic surface wave technique before and after the load application. TEM investigations are carried out within HAZ between the deposited and base metal at a 0,5 mm distance from the weld joint at 0, 5 and 37% deformation degrees. Thus, it is shown that in the area of the heat-affected zone, the plastic deformation leads to the martensite transformation as follows:  $\gamma \rightarrow \varepsilon \rightarrow \alpha$ .

**Введение.** Известно, что наиболее опасными местами в сварных соединениях являются места стыков наплавленного и основного металлов. Именно такие места являются наиболее опасными концентраторами напряжений, которые приводят к образованию трещин и различных дефектов, что существенно снижает прочность и надежность сварного изделия. Знание структурно-фазового состояния материала сварного шва позволит не только оценить прочностные свойства сварного изделия в целом, но и даст возможность прогнозировать поведение сварного соединения в процессе его эксплуатации, а

---

\* Работа выполнена при финансовой поддержке гранта № 14-19-00724 Российского Научного Фонда

особенно при деформации, которой часто подвергаются сварные изделия. Поэтому качеству сварных соединений и их надежности до сих пор уделяется большое внимание.

Целью настоящей работы явилось исследование структурно-фазового состояния материала сварного шва на расстоянии 0,5 мм от стыка наплавленного и основного металлов после пластической деформации.

**Материал и методы исследования.** Объектом исследования являлся материал сварного соединения, выполненного ручной дуговой сваркой. Свариваемый металл – сталь аустенитного класса 12X18H10T. Сварка проведена сварочным электродом ЦЛ-11. Изучение структуры металла сварного шва проводилось на расстоянии 0,5 мм от границы сплавления. Механические испытания на квазистатическое активное растяжение проводились при комнатной температуре на универсальной испытательной машине Instron 1185 со скоростью  $1,7 \times 10^{-4} \text{ с}^{-1}$  до степеней деформации  $\varepsilon = 0, 5$  и  $37\%$  на плоских образцах с размером рабочей части  $200 \times 15 \times 5 \text{ мм}^3$ . Сварной шов был перпендикулярен оси растяжения и находился в середине рабочей части образца. Изучение проводилось методом просвечивающей дифракционной электронной микроскопии на тонких фольгах с применением электронного микроскопа ЭМ-125 при ускоряющем напряжении 125 кВ. Рабочее увеличение в колонне микроскопа составляло 25000 крат.

Определение всех количественных параметров структуры и фазового состава проводилось по известным методикам с использованием изображений, подтвержденным микродифракционными картинками и темнопольными изображениями, полученными в рефлексах соответствующих фаз.

**Полученные результаты.** Было установлено, что в исходном состоянии ( $\varepsilon = 0$ ) матрица материала представляет собой  $\gamma$ -фазу (аустенит) – твердый раствор одновременно замещения и внедрения на основе  $\gamma$ -Fe, имеющий гранецентрированную кубическую кристаллическую (ГЦК) решетку. Аустенит ( $\gamma$ -фаза) присутствует в виде зерен разного типа: 1) зерна с механическими (или деформационными) микродвойниками (рис.1а), обладающими ГЦК кристаллической решеткой с параметром, равным параметру кристаллической решетки  $\gamma$ -фазы (аустенита); 2) зерна с пластинчатыми выделениями  $\varepsilon$ -мартенсита (рис.1б), который обладает гексагональной плотноупакованной (ГПУ) кристаллической решеткой и 3) зерна, содержащие одновременно микродвойники и  $\varepsilon$ -мартенсит (рис.1в).

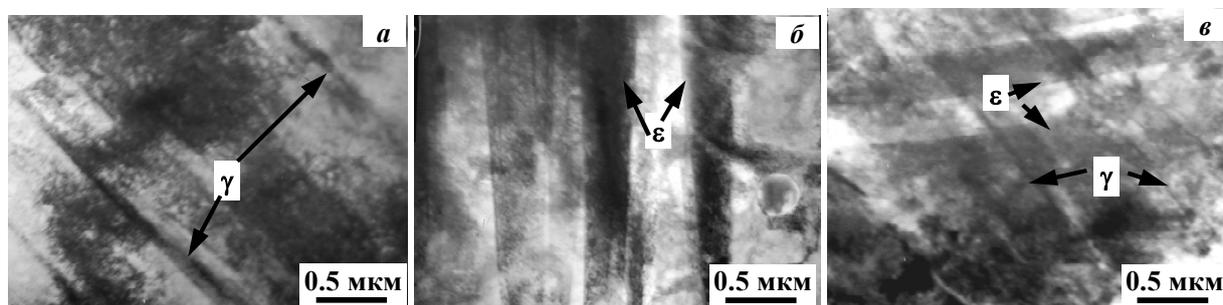


Рис.1. Электронно-микроскопическое изображение аустенитного зерна с микродвойниками (а), с пластинами  $\varepsilon$ -мартенсита (б) и с микродвойниками и  $\varepsilon$ -мартенситом (в),  $\varepsilon = 0$

Как микродвойники, так и  $\varepsilon$ -мартенсит имеют вид пакетов из плоских пластин правильной геометрической формы с четкими границами, которые располагаются параллельно друг другу в

определенном направлении и имеют плоскость габитуса типа  $\{111\}$  аустенита. Объемная доля зерен первого типа в объеме материала составляет 10%, второго – 40% и третьего – 50%.

Дислокационная структура стали во всех зернах имеет вид плотных дислокационных сеток. Средняя скалярная плотность дислокаций равна  $2,6 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}$ . Самым высоким значением скалярной плотности дислокаций ( $3,4 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}$ ) обладают зерна, содержащие механические микродвойники, самым низким ( $2,4 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}$ ) – зерна, содержащие одновременно микродвойники и  $\varepsilon$ -мартенсит.

*Деформация материала* сварного шва привела к существенному изменению структуры материала. Уже при  $\varepsilon = 5\%$  в материале сварного шва не обнаруживается зерен первого типа, то есть зерен  $\gamma$ -фазы, содержащих пакеты микродвойников. Присутствуют зерна  $\gamma$ -фазы второго типа (содержащие пакеты пластин  $\varepsilon$ -мартенсита) и зерна третьего типа (одновременно содержащие, как правило, пересекающиеся пакеты микродвойников и  $\varepsilon$ -мартенсита). При этом доля зерен, второго типа уменьшилась до 30% от объема материала, а доля зерен третьего типа увеличилась до 70%.

Дислокационная структура, по-прежнему, во всех зернах имеет вид плотных дислокационных сеток. Скалярная плотность дислокаций возросла как во всех типах зерен, так и в среднем по материалу ( $3,5 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}$ ).

Увеличение степени пластической деформации до  $\varepsilon = 37\%$  привело к дальнейшему изменению структуры материала. Теперь, наряду с зернами  $\gamma$ -фазы третьего типа, объемная доля которых составляет, как и при  $\varepsilon = 5\%$ , от объема материала 70% и зерен  $\gamma$ -фазы с пластинами  $\varepsilon$ -мартенсита, объемная доля которых уменьшилась до 10%, в материале сварного шва присутствуют зерна  $\alpha$ -мартенсита, обладающего ОЦК кристаллической решеткой. Объемная доля таких зерен составляет 20%, размер –  $\sim 1,5$  мкм. Типичные изображения структуры сварного шва после пластической деформации при  $\varepsilon = 37\%$  представлены на рис.2.

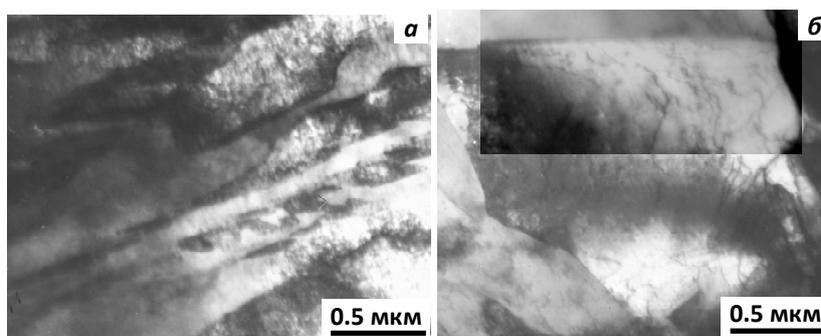


Рис.2. Электронно-микроскопические изображения зерна  $\gamma$ -фазы с микродвойниками и  $\varepsilon$ -мартенситом (а) и зерна  $\alpha$ -мартенсита (б),  $\varepsilon = 37\%$

Дислокационная структура, как и прежде, имеет вид плотных дислокационных сеток. Скалярная плотность дислокаций в  $\gamma$ -зернах продолжает увеличиваться ( $3,9 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}$ ), в зернах  $\alpha$ -мартенсита  $\rho = 1,6 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}$ , то есть более чем в 2 раза меньше, чем в  $\gamma$ -фазе. Средняя скалярная плотность дислокаций по материалу в целом несколько уменьшилась ( $3,3 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}$ ).

**Заключение.** Проведенные исследования методом просвечивающей электронной дифракционной микроскопии показали, что пластическая деформация сварного соединения приводит в материале сварного шва к мартенситному превращению в такой последовательности:  $\gamma \rightarrow \varepsilon \rightarrow \alpha$ .