

*О. П. Бондарева, Э. В. Седов, Д. Э. Седов, Р. А. Бескровный*

**ВЛИЯНИЕ ПОГОННОЙ ЭНЕРГИИ СВАРКИ НА СТРУКТУРУ И СВОЙСТВА СВАРНЫХ  
СОЕДИНЕНИЙ ФЕРРИТО-АУСТЕНИТНЫХ СТАЛЕЙ 08X18Г8Н2Т И 08X22Н6Т**

**Волгоградский государственный технический университет**

e-mail: tecmat@vstu.ru.

Приведены результаты исследований по влиянию погонной энергии сварки на структуру и фазовые превращения в металле зоны термического влияния сварных соединений сталей 08X18Г8Н2Т и 08X22Н6Т. Показано, что ударная вязкость участка перегрева зоны термического влияния при температуре 20 °С имеет высокие значения ударной вязкости, а при температуре испытания минус 20 °С были получены значения ударной вязкости ниже 0,4 МДж/м<sup>2</sup>. Выявлено, что понижение пластичности и прочности является следствием выделений по границам зерен карбидной и карбонитридной фаз и образования на поверхности разрушения ударных образцов вторичных трещин.

*Ключевые слова:* феррито-аустенитные стали, зона термического влияния, термический цикл сварки, ударная вязкость

*O. P. Bondareva, E. V. Sedov, D. E. Sedov, R. A. Beskrovny*

**THE EFFECT OF LINEAR WELDING ENERGY ON THE STRUCTURE  
AND PROPERTIES OF WELDED JOINTS  
OF FERRITE-AUSTENITIC STEELS 08Cr18Mn8Ni2Ti AND 08Cr22Ni6Ti**

**Volgograd State Technical University**

The results of studies on the effect of linear welding energy on the structure and phase transformations in the metal of the zone of thermal influence of welded joints of 08Cr18Mn8Ni2Ti and 08Cr22Ni6Ti steels are presented. It is shown that the impact strength of the overheating area of the thermal influence zone at a temperature of 20 °C has high impact strength values, and at a test temperature of minus 20 °C, impact strength values below 0.4 MJ/m<sup>2</sup> were obtained. It was revealed that the decrease in plasticity and strength is a consequence of the release of carbide and carbonitride phases along the grain boundaries and the formation of secondary cracks on the fracture surface of impact samples.

**Keywords:** ferrite-austenitic steels, thermal influence zone, thermal welding cycle, impact strength

Двухфазные феррито-аустенитные стали являются заменителями высоконикелевых аустенитных сталей и их использование позволяет уменьшить на 40–50 % потребление никеля. Вместе с тем у данных сталей отмечается негативная способность, которая выражается в охрупчивании металла за счет снижения пластических свойств и ударной вязкости сварных соединений (больше всего это проявляется в зоне термического влияния (ЗТВ) [1–3]).

В ЗТВ, из-за малой длительности времени

нахождения металла при повышенных температурах, происходит неполное  $\gamma - \delta$  превращение, что приводит к сохранению в структуре остаточного аустенита. Размер зерен, соотношение фаз, а также объем зоны перегрева существенно зависят от погонной энергии сварки и чувствительности двухфазных сталей к перегреву [4].

В данной работе для исследований проводилась промышленная плавка сталей в дуговой электропечи, их химический состав представлен в табл. 1.

Таблица 1

**Химический состав исследуемых сталей**

| Марка стали | Содержание элементов, % |      |      |      |      |       |       |
|-------------|-------------------------|------|------|------|------|-------|-------|
|             | C                       | Si   | Mn   | Cr   | Ni   | S     | P     |
| 08X18Г8Н2Т  | 0,06                    | 0,43 | 7,04 | 18,2 | 3,23 | 0,012 | 0,019 |
| 08X22Н6Т    | 0,06                    | 0,51 | 0,20 | 21,4 | 5,7  | 0,020 | 0,015 |

Сварку заготовок толщиной 16 мм из данных сталей осуществляли методом автоматической дуговой сварки под флюсом, используя сварочную проволоку диаметром 4 мм марки Св-06Х21Н7БТ. Применяемые технологические параметры сварки представлены в табл. 2. Термический цикл автоматической сварки (имитация) проводился с помощью разработанной установки высокоскоростного электронагрева. Особое внимание уделялось имитации температурно-временного влияния, которое происходит на участке ЗТВ сварного соединения.

После температурно-временной имитации из металла сварных соединений сталей 08Х22Н6Т и 08Х18Г8Н2Т вырезали образцы для определения механических характеристик поперек шва. Испытания осуществлялись по ГОСТ 9454-78 на образцах типа XI [3, 5].

Микроструктурные исследования проводились на шлифах, которые подвергались

электролитическому травлению в водном растворе хромового ангидрида; далее осуществляли окрашивание в реактиве Гросбека для выявления ферритной составляющей. Особенности микромеханизма разрушения металла участка перегрева ЗТВ сварного соединения стали 08Х18Г8Н2Т изучали на ударных образцах с имитированной околосшовной зоной (ОШЗ). Исследование проводили с помощью растрового электронного микроскопа «Superprobe».

По результатам испытаний на ударный изгиб образцов со сварными соединениями сталей 08Х22Н6Т и 08Х18Г8Н2Т определено, что при температурах испытания плюс 20 °C и минус 20 °C показатели ударной вязкости имели высокие значения. Однако в металле для соответствующего участка зоны перегрева ЗТВ при температуре минус 20 °C были получены значения ударной вязкости ниже 0,4 МДж/м<sup>2</sup> (такие

значения не соответствуют требованиям ОСТ 26-291-79). Ударная вязкость участков, подверг-

нутых воздействиям температур 550–800 °С и 300–500 °С, практически не меняется [3].

Таблица 2

Режимы сварки сталей 08Х22Н6Т и 08Х18Г8Н2Т

| Марка стали | Разделка кромок            | Погонная энергия сварки, Дж/см | Номер прохода | Скорость сварки $V_{св}$ , м/ч | Сварочный ток $I$ , А | Напряжение на дуге $U$ , В |
|-------------|----------------------------|--------------------------------|---------------|--------------------------------|-----------------------|----------------------------|
| 08Х22Н6Т    | V-образная разделка кромок | 628,8                          | 1             | 25–27                          | 400–420               | 29–31                      |
|             |                            |                                | 2             | 25–27                          | 400–420               | 29–31                      |
|             |                            |                                | 3             | 25–27                          | 400–420               | 29–31                      |
|             |                            |                                | 4             | 25                             | 550–600               | 38                         |
|             | Без разделки кромок        | 1183,3                         | 1             | 12                             | 600–650               | 40                         |
|             |                            |                                | 2             | 12                             | 600–650               | 40                         |
| 08Х18Г8Н2Т  | V-образная разделка кромок | 590,9                          | 1             | 25–27                          | 370–400               | 29–31                      |
|             |                            |                                | 2             | 25–27                          | 370–400               | 29–31                      |
|             |                            |                                | 3             | 25–27                          | 370–400               | 29–31                      |
|             |                            |                                | 4             | 25                             | 500–520               | 38                         |
|             | Без разделки кромок        | 1099,9                         | 1             | 25                             | 520–540               | 40                         |
|             |                            |                                | 2             | 25                             | 520–540               | 40                         |

Металлографическим анализом установлено, что под действием термического цикла сварки (ТЦС) происходит интенсивный рост ферритного зерна на участке перегрева ЗТВ (см. табл. 3).

На участке перегрева ЗТВ микроструктура представлена крупными равноосными зёрнами феррита, а по границам выделяется  $\gamma'$ -фаза вторичного аустенита. Диаметр ферритного зерна, содержание, ширина зоны крупного зерна на участке перегрева ЗТВ сварных соединений сталей 08Х22Н6Т и 08Х18Г8Н2Т при сварке с

V-образной разделкой кромок несколько меньше, чем при сварке без разделки кромок (см. табл. 3). Это связано, по-видимому, с большей погонной энергией при сварке без разделки кромок (см. табл. 2).

Анализ результатов измерения твердости показал, что твердость HV, микротвердость феррита и аустенита  $H_{20}$  в основном металле меньше, чем металла участка перегрева ЗТВ, что свидетельствует не только об изменении соотношения фаз, но и о перераспределении легирующих элементов между фазами.

Таблица 3

Результаты металлографических исследований сварных соединений сталей 08Х18Г8Н2Т и 08Х22Н6Т

| Марка стали | Основной металл              |               |                           |                | Участок перегрева ЗТВ |                               |                                 |               |                           |                |                                |
|-------------|------------------------------|---------------|---------------------------|----------------|-----------------------|-------------------------------|---------------------------------|---------------|---------------------------|----------------|--------------------------------|
|             | Содержание $\delta$ -феррита | Твердость, HV | Микро-твердость, $H_{20}$ |                | Форма разделки кромок | Диаметр ферритного зерна, мкм | Содержание $\delta$ -феррита, % | Твердость, HV | Микро-твердость, $H_{20}$ |                | Ширина зоны крупного зерна, мм |
|             |                              |               | $\delta$ -феррит          | $\gamma$ -фаза |                       |                               |                                 |               | $\delta$ -феррит          | $\gamma$ -фаза |                                |
| 08Х22Н6Т    | 50                           | 230           | 227                       | 244            | V-образная            | 180                           | 86                              | 257           | 260                       | 272            | 0,06–0,08                      |
|             |                              |               |                           |                | Без разделки          | 201                           | 87                              | 261           | 268                       | 281            | 0,07–1,00                      |
| 08Х18Г8Н2Т  | 40                           | 240           | 231                       | 257            | V-образная            | 148                           | 61                              | 287           | 277                       | 308            | 0,04–0,08                      |
|             |                              |               |                           |                | Без разделки          | 158                           | 60                              | 295           | 283                       | 321            | 0,06–1,00                      |

Установлено, что результаты измерения микротвердости феррита и аустенита  $H_{20}$ , твердости по Виккерсу металла участка перегрева

ЗТВ в случае сварки, которая осуществлялась с V-образной разделкой кромок, имеют меньшие значения, чем аналогичные показатели при

сварке без разделки кромок (см. табл. 3). Так, при сварке образцов из стали 08X22H6 (V-образная разделка кромок) на участке перегрева ЗТВ микротвердость  $\delta$ -феррита – 260 Н<sub>20</sub>; аустенита – 272 Н<sub>20</sub>, а, соответственно, на образцах без разделки кромок при сварке на аналогичных режимах микротвердость  $\delta$ -феррита 258 Н<sub>20</sub>; аустенита – 281 Н<sub>20</sub>. Выделившийся вторичный аустенит отличается по твердости от аустенита в основном металле: твердость вторичного аустенита выше, чем твердость основного металла. Значения твердости HV участка перегрева ЗТВ больше, чем в основном металле. Например, для стали 08X18Г8Н2Т твердость основного металла составляет 240 HV, а для участка перегрева ЗТВ без разделки кромок – 321 HV.

Микрорентгеноспектральным анализом, проведенным на образце сварного соединения из стали 08X18Г8Н2Т, выполненного с V-образной разделкой кромок, установлено содержание основных легирующих элементов в феррите и аустените (см. табл. 4 и 5). В основном металле феррито-аустенитных сталей  $\delta$ -феррит содержит больше хрома, чем в  $\gamma$ -фазе; в  $\gamma$ -фазе присутствует больше никеля и марганца (см. табл. 4). После высокотемпературного сварочного нагрева и быстрого охлаждения в участке перегрева ЗТВ наблюдается тенденция некоторого выравнивания концентрации хрома, никеля, марганца; однако вследствие кратковременности сварочного термического цикла разность концентраций сохраняется (см. табл. 5).

Таблица 4

Содержание основных легирующих элементов в основном металле

| Марка стали | Содержание элемента, % |                    |                  |                    |                  |                    |
|-------------|------------------------|--------------------|------------------|--------------------|------------------|--------------------|
|             | Хром                   |                    | Никель           |                    | Марганец         |                    |
|             | $\delta$ -феррит       | $\gamma$ -аустенит | $\delta$ -феррит | $\gamma$ -аустенит | $\delta$ -феррит | $\gamma$ -аустенит |
| 08X18Г8Н2Т  | 21,13±0,21             | 16,41±0,24         | 2,01±0,17        | 2,98±0,21          | 8,01±0,20        | 9,88±0,17          |

Таблица 5

Содержание основных легирующих элементов в участке перегрева ЗТВ

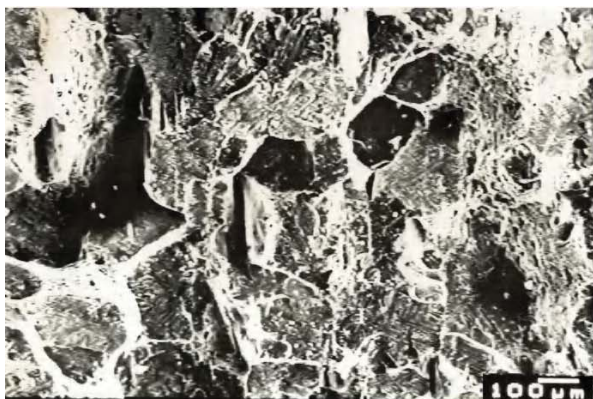
| Марка стали | Содержание элемента, % |                    |                  |                    |                  |                    |
|-------------|------------------------|--------------------|------------------|--------------------|------------------|--------------------|
|             | Хром                   |                    | Никель           |                    | Марганец         |                    |
|             | $\delta$ -феррит       | $\gamma$ -аустенит | $\delta$ -феррит | $\gamma$ -аустенит | $\delta$ -феррит | $\gamma$ -аустенит |
| 08X18Г8Н2Т  | 20,71±0,32             | 18,73±0,27         | 2,35±0,12        | 2,63±0,12          | 8,97±0,17        | 9,41±0,05          |

Фрактографический анализ поверхности разрушения ударных образцов из стали 08X18Г8Н2Т с имитированной ЗТВ, испытанных при температуре минус 20 С, свидетельствуют о том, что разрушение в основном носит межзеренный характер (см. рисунок, приведенный ниже).

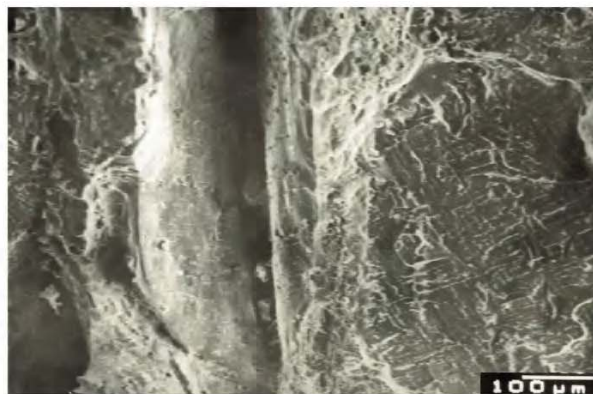
Межзеренное разрушение связано с различием механических свойств в приграничных объемах и теле зерна, оно образуется спонтанного при нестабильном распространении трещины. Данному виду разрушения способствуют выде-

ления по границам зерен карбидной и карбонитридной фаз, что приводит к падению когезивной прочности между зернами (см. рисунок, поз. б), а также сегрегация примесей по границах зерен и пленочные выделения карбидов.

Фасетки межзеренного скола содержат частицы диаметром около 30–40 мкм (см. рисунок, поз. в). Выделившийся на границе зерна карбонитрид титана при разрушении не потерял когезивной связи с матрицей (см. рисунок, поз. г). Фасетки межзеренного скола в основном гладкие с рельефом в виде тонких линий.



а



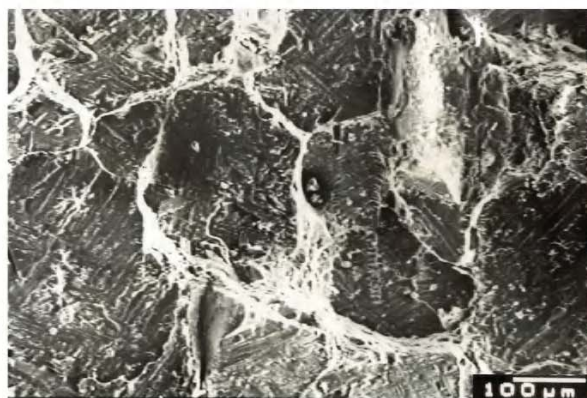
б



в



а



д

Фрактографические исследования поверхности разрушения ударных образцов из стали 08X18Г8Н2Т

Особенностью разрушения образцов является образование на поверхности излома вторичных трещин (см. рисунок, поз. д). Размеры вторичных трещин ограничиваются размерами зерна, а их длинная ось вытянута вдоль магистральной трещины. Вторичные трещины являются поперечными по отношению к поверхности первичного излома.

#### Выводы

1. Диаметр ферритного зерна, содержание  $\gamma'$ -фазы, ширина зоны крупного зерна в участке перегрева ЗТВ сварных соединений исследуемых сталей при сварке с V-образной разделкой кромок несколько меньше, чем при сварке без разделки кромок. Это связано с меньшим значением погонной энергии сварки, чем при сварке без разделки кромок.

2. Анализ результатов измерения твердости показал, что твердость HV, микротвердость феррита и аустенита  $H_{20}$  в основном металле меньше, чем в металле участка перегрева ЗТВ, что свидетельствует не только об изменении соотношения фаз, но и о перераспределении легирующих элементов между фазами.

3. Фрактографический анализ поверхности разрушения ударных образцов с имитированной ЗТВ свидетельствуют о том, что разрушение в основном носит межзеренный характер. Понижение пластичности и прочности является следствием выделений по границам зерен карбидной и карбонитридной фаз. Особенностью разрушения является образование на поверхности разрушения ударных образцов вторичных трещин.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Сокол, И. Я. Двухфазные стали / И. Я. Сокол. – М. : Металлургия, 1974. – 216 с.
2. Каховский, Н. И. Сварка нержавеющей сталей / Н. И. Каховский. – Киев : Техника, 1968. – 312 с.
3. Влияние термического цикла сварки на структуру и свойства феррито-аустенитных сталей 08X22H6T и 08X18Г8Н2Т / О. П. Бондарева, И. Л. Гоник, Э. В. Седов, Д. Э. Седов, Р. А. Бескровный // Известия ВолгГТУ : научный журнал № 7(278) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2023. – (Серия «Металлургия»). – С. 14–18.
4. Бондарева, О. П. Влияние термоциклической обработки на структуру и свойства металла околошовной зоны сварных соединений феррито-аустенитных сталей / О. П. Бондарева, Э. В. Седов, И. Л. Гоник // Химическое и нефтегазовое машиностроение. – 2016. – № 7. – С. 45–48.
5. Бондарева, О. П. Влияние термического цикла сварки и термоциклической обработки на свойства и характер разрушения стали 08X18Г8Н2Т / О. П. Бондарева, Э. В. Седов, О. Б. Крючков // Деформация и разрушение материалов. – 2021. – № 11. – С. 28–33.