

УДК 621.791.051

DOI: 10.35211/1990-5297-2025-7-302-55-58

*О. П. Бондарева, Э. В. Седов, Д. Э. Седов***ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ТЕРМИЧЕСКОГО ЦИКЛА СВАРКИ
НА СТРУКТУРУ И МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СТАЛИ 08X22H6T****Волгоградский государственный технический университет**

e-mail: tecmat@vstu.ru.

Приведены результаты исследований по влиянию термического воздействия, обусловленного имитацией термического цикла сварки на структуру и механические свойства как основного металла, так и металла зоны термического влияния в сварных соединениях стали 08X22H6T. Показано, что в результате термического воздействия происходит увеличение хрупкости зоны термического влияния за счет роста ферритного зерна, а также изменения соотношения фаз. Установлено, что стабилизирующий отпуск при температуре 900 °C увеличивает ударную вязкость и уменьшает твердость стали 08X22H6T за счет снижения общего количества выделившихся карбидов, а также увеличения их дисперсности.

Ключевые слова: феррито-аустенитная сталь, ударная вязкость, твердость, зона термического влияния, термический цикл сварки

*O. P. Bondareva, E. V. Sedov, D. E. Sedov***INVESTIGATION OF THE EFFECT OF THE THERMAL WELDING CYCLE
ON THE STRUCTURE AND MECHANICAL PROPERTIES OF STEEL 08Cr22Ni6Ti****Volgograd State Technical University**

The results of studies on the effect of thermal effects caused by the simulation of the thermal welding cycle on the structure and mechanical properties of both the base metal and the metal of the thermal influence zone in welded joints of 08Cr22Ni6Ti steel are presented. It is shown that as a result of thermal exposure, there is an increase in the fragility of the zone of thermal influence, due to the growth of ferritic grains, as well as changes in the phase ratio. It has been found that stabilizing tempering at a temperature of 900 °C increases the impact strength and reduces the hardness of 08Cr22Ni6Ti steel by reducing the total amount of released carbides, as well as increasing their dispersion.

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

Для производства емкостных сварных конструкций в химической, пищевой и нефтегазовой промышленности перспективным представляется применение двухфазных хромоникелевых феррито-аустенитных сталей [1–3]. При комнатной температуре, в двухфазных сталях, содержание каждой структурной составляющей достаточно строго регламентируется. Аустенитная γ -фаза обеспечивает сплаву высокую жаропрочность, низкий предел хладноломкости при сочетании высоких пластических и вязких характеристик. Наличие в стали фазы δ -феррита является полезным, так как существенно снижает склонность металла при сварке к образованию трещин в зоне сплавления сварного соединения и околошовной зоне (зоны термического влияния ЗТВ), увеличивает сопротивляемость металла межкристаллитной коррозии.

Однако при избыточном содержании феррита фаза начинает выделяться на границах аустенитных зерен в виде сплошной сетки, что

резко снижает показатели ударной вязкости металла [1, 3, 4]. Кроме этого, при длительной работе конструкции из хромоникелевых сталей при температурах 350–550 °C, а также в случае кратковременного нагрева до температур 600–800 °C возникает опасность охрупчивания металла, связанное с проявлением явлений отпускной 475-градусной хрупкости и вероятным образованием хрупкой интерметаллидной σ -фазы [5, 6].

Для обеспечения благоприятной структуры и высоких показателей механических характеристик данные стали подвергают закалке и последующему стабилизирующему отпуску. Время выдержки при термической обработке должно быть меньше, чем время сигматизации структуры и выделения карбидов [5].

В рамках данной работы исследования проводились на металле промышленной плавки стали 08X22H6T, выплавленной в дуговой электропечи. Химический состав исследуемой стали представлен в табл. 1.

Таблица 1

Химический состав исследуемой стали 08Х22Н6Т

Сталь марки 08Х22Н6Т	Содержание элементов, %							
	С	Si	Mn	Cr	Ni	S	P	Ti
По ГОСТ 5632–72	до 0,08	до 0,8	до 0,8	21-23	5,3-6,3	до 0,025	до 0,035	0,40-0,65
Опытная плавка	0,06	0,51	0,2	21,4	5,7	0,020	0,015	0,31

Для проведения испытаний, образцы вырезались из основного металла в состоянии поставки, а также из металла после имитации термического цикла сварки (ТЦС), с помощью установки высокоскоростного электрического контактного нагрева, при этом температура нагрева составляла 1300 °С, скорость нагрева около 100 °С/с, а скорость охлаждения 2 °С/с. Заготовки, после имитации ТЦС, подвергались отпуску в электрической печи сопротивления. Температура отпуска изменялась в пределах от 400 до 900 °С, а длительность выдержки составляла 1 и 3 часа.

На образцах определялась твердость по Виккерсу по ГОСТ 2999–75 на установке ТПП-2. Для исследования ударной вязкости изготавливались образцы тип Х1 размерами 10×10×55 мм по ГОСТ 9454–78.

Количественный структурный анализ проводился с помощью дифрактометра ДРФ-2. Микроструктуру образцов исследовали с помощью микроскопа МИМ-8.

Результаты исследования механических свойств основного металла и металла околошовной зоны приведены в табл. 2.

Таблица 2

Ударная вязкость и твердость металла сварных соединений стали 08Х22Н6Т после термической обработки

Режим термообработки		Основной металл			Металл зоны термического влияния		
Температура отпуска, °С	Время выдержки, ч	Ударная вязкость KCV, МДж/м²		Твердость HV	Ударная вязкость KCV, МДж/м²		Твердость HV
		Температура испытания, °С			Температура испытания, °С		
		–20	20		–20	20	
исходное состояние		0,86	1,80	230	0,26	1,50	257
400	1	0,76	1,74	243	0,21	1,68	260
400	3	0,65	1,68	244	0,20	1,52	261
500	1	0,55	1,51	251	0,18	1,52	264
500	3	0,41	1,50	253	0,17	1,50	265
600	1	0,25	1,00	270	0,10	1,10	285
600	3	0,17	0,80	281	0,11	1,02	283
700	1	0,30	0,85	261	0,15	1,11	279
700	3	0,31	0,90	260	0,18	1,18	276
800	1	0,56	1,20	248	0,20	1,20	264
800	3	0,68	1,25	240	0,21	1,25	250
900	1	0,85	1,80	231	0,31	1,68	249
900	3	0,91	1,80	230	0,32	1,69	245

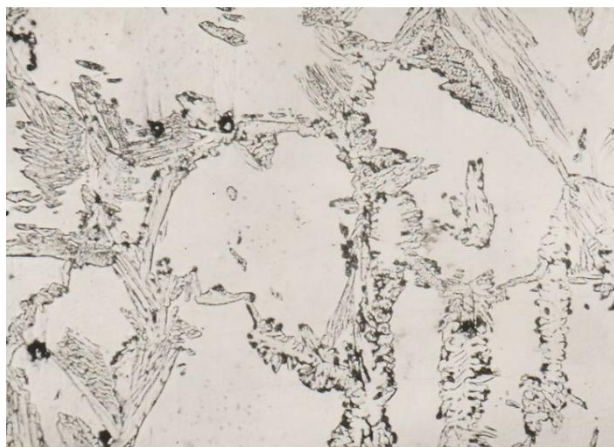
Выявлено, что в результате термического воздействия после имитации ТЦС происходит существенное охрупчивание металла в ЗТВ, выражающееся в снижении показателей ударной вязкости с 1,8 до 1,5 МДж/м² и увеличения твердости с 230 до 257 HV. Микроструктура образцов, после термического воздействия также существенно преобразуется (рисунок). Прежде

всего, исчезает выраженная анизотропия, характерная металлу после прокатки, а также появляется мартенситная фаза в количестве около 20 %, что подтверждается результатами рентгеноструктурного анализа. Кроме этого, под влиянием термического воздействия, вызванного имитацией ТЦС в металле ЗТВ происходит увеличение размера зерен и выделение вторичного ау-

стенита, который сосредотачивается преимущественно на границах крупных зерен феррита.

Выявлено, что под влиянием отпуска стали при температуре 400 °С и выдержке 1 час показатели ударной вязкости снижаются не значи-

тельно. Такие изменения характерны, как в основном металле, так и в металле ЗТВ. Увеличение длительности выдержки при отпуске до трех часов только усугубляет снижение вязкопластических характеристик (см. табл. 2).



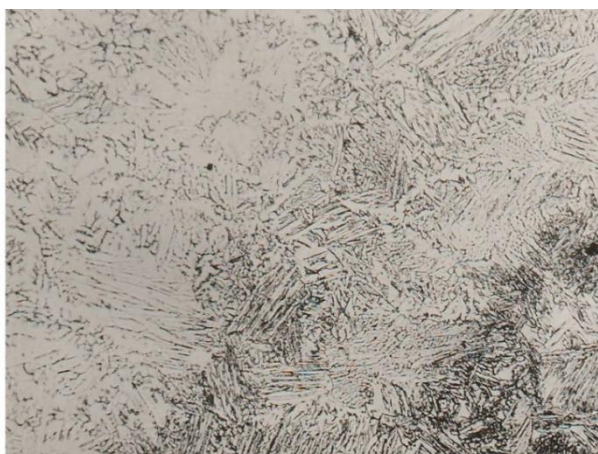
a



б



в



г

Микроструктура зоны термического влияния сварного соединения стали 08X22H6T после воздействия термического цикла сварки (*a*); после отпуска при температуре 700 °С, выдержка 1 час (*б*); после отпуска при температуре 800 °С, выдержка 1 час (*в*); после отпуска при температуре 900 °С, выдержка 1 час (*г*); х300

Повышение температуры отпуска до 500–600 °С сопровождается существенным снижением показателей ударной вязкости, достигая минимальных значений 0,10–0,11 МДж/м² в металле ЗТВ. Только после отпуска при температурах 700–900 °С вязкопластические свойства начинают увеличиваться и практически полностью восстанавливаются. Из результатов (см. табл. 2) следует, что при температуре отпуска 900 °С, уровень показателей механических свойств близок по свойствам основного металла до негативного термического воздействия. Это касается проведенных испытаний, как при отрицательных, так и положительных температур.

Видно, что после отпуска при температуре 900 °С в течении 1–3 ч ударная вязкость имеет максимальные значения (в основном металле $KCV^{20} = 0,85–0,91$ МДж/м², $KCV^{20} = 0,80$ МДж/м², а в металле ЗТВ $KCV^{20} = 0,31–0,32$ МДж/м², $KCV^{20} = 1,68–1,69$ МДж/м²).

Испытания образцов на твердость по Виккерсу позволило установить, что максимальные значения показателей наблюдаются при температуре отпуска 600 °С (в зависимости от длительности выдержки твердость варьируется в интервале от 270 до 285 HV), а минимальные значения HV обнаруживаются при температуре отпуска 900 °С (значения твердости находятся в интервале от 230 до 249 HV).

Полученные результаты измерения твердости хорошо соотносятся с исследованиями по ударной вязкости.

Изменения в показателях механических характеристик, по-видимому, возможно связать с проявлением отпускной хрупкости, которая обычно традиционно происходит в хромоникелевых сталях, при медленном охлаждении с температур порядка 650 °С [5].

Приведенные разъяснения подтверждаются микроструктурами образцов после проведенного отпуска при различных температурах (рисунков). На микроструктурах показано, что видимых изменений не происходит до температуры 800 °С. В результате проведенного отпуска при 800 °С обнаруживается увеличение количество γ' -фазы. После отпуска при температуре 900 °С структура ЗТВ становится более однородной, а количество γ' -фазы составляет примерно 80–85 %.

Проведенный рентгеноструктурный анализ показал, что изменения параметров кристаллической решетки аустенитной, возникающей мартенситной, и ферритной фаз достаточно хорошо коррелируют с выявленными изменениями механических свойств. Так после проведенного отпуска при температуре 400 °С параметры кристаллической решетки указанных фаз практически не изменяются, как в основном металле, так и в металле ЗТВ стали 08Х22Н6Т.

При температурах отпуска 500–600 °С в сталях феррито-аустенитного класса происходят процессы карбидообразования, при этом параметры кристаллической решетки обеих фаз существенно уменьшаются. Этим объясняется существенное падение ударной вязкости, так как выделяющиеся избыточные карбидные фазы, в первую очередь, в феррите приводят к его охрупчиванию. При проведении высокотемпературного отпуска избыточные фазы растворяются, а количество γ' -фазы увеличивается. Благодаря этому, за счет данных процессов показатели ударной вязкости в стали 08Х22Н6Т возрастают, а твердость снижается.

Таким образом, причинами изменения механических свойств, может являться перераспределения основных легирующих элементов, приводящего к изменению в соотношении фаз феррито-аустенитной стали, а кроме этого вы-

делениями избыточных хрупких фаз по границам зерен, что было обнаружено в ранее проведенных работах.

Выводы

1. Показано, что в результате термического воздействия, обусловленного имитацией термического цикла сварки в стали 08Х22Н6Т происходит увеличение хрупкости зоны термического влияния, за счет роста ферритного зерна, а также изменения соотношения фаз.

2. Выявлено, что отпуск в интервале температур 400–700 °С не приводит к стабилизации структуры и способствует проявлению отпускной хрупкости и процессов выделения избыточных карбидов на границах зерен ферритной и аустенитной фаз.

3. Установлено, что отпуск при температуре 900 °С увеличивает ударную вязкость и уменьшает твердость, как основного металла, так и металла ЗТВ сварных соединений стали 08Х22Н6Т за счет снижения общего количества выделившихся карбидов, а также увеличения их дисперсности.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. 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.
2. Бондарева, О. П. Влияние термического цикла сварки на трещиностойкость металла околошовной зоны сварных соединений феррито-аустенитных сталей / О. П. Бондарева, Э. В. Седов, И. Л. Гоник // Известия ВолгГТУ : научный журнал № 5(160) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2015. – (Серия «Проблемы материаловедения, сварки и прочности в машиностроении»). – С. 139–142.
3. Бондарева, О. П. Влияние термического цикла сварки и термоциклической обработки на свойства и характер разрушения стали 08Х18Г8Н2Т / О. П. Бондарева, Э. В. Седов, О. Б. Крючков // Деформация и разрушение материалов. – 2021. – № 11. – С. 28–33.
4. Бондарева, О. П. Влияние погонной энергии сварки на структуру и свойства сварных соединений феррито-аустенитных сталей 08Х18Г8Н2Т и 08Х22Н6Т / О. П. Бондарева, Э. В. Седов, Д. Э. Седов, Р. А. Бескровный // Известия ВолгГТУ : научный журнал № 7 (290) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2024. – (Серия «Металлургия»). – С. 71–76.
5. Сокол, И. Я. Двухфазные стали / И. Я. Сокол. – М. : Металлургия, 1974. – 216 с.
6. Каховский, Н. И. Сварка нержавеющей стали / Н. И. Каховский. – Киев : Техника, 1968. – 312 с.