

Г.А. Береснев, Н.Г. Поспелов

Пермский государственный технический университет

ТЕРМОЦИКЛИРОВАНИЕ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ МАРТЕНСИТОСТАРЕЮЩЕЙ СТАЛИ

Представленные в статье исследования доказывают, что термоциклирование с последующим печным нагревом позволяют улучшить качество сварного соединения. Введение термоциклирования сварных соединений в технологию изготовления сварных емкостей из стали МС-200 позволило реализовать ее высокую прочность в условиях нагружения емкостей.

Реализация высокой прочности мартенситостареющей стали в сварных конструкциях ограничена относительно низкими механическими свойствами металла сварных соединений вследствие крупнозернистости околошовной зоны (ОШЗ) и ликвационной неоднородности литой структуры металла шва. Так в сварных соединениях листа стали МС-200 (химический состав – табл. 1) размер зерна металла ОШЗ достигал 4–5 баллов (по сравнению с 12–13 баллами зерна основного металла), вследствие чего после упрочняющей термообработки на прочность $\sigma_b = 2000$ МПа (закалка с 850 °С, старение при 480 °С, 6 ч) ударная вязкость, определяемая испытаниями образцов 8×2,8×55 с трещиной (КСТ), снизилась с 16,5 до 13,0 Дж/см³. В микроструктуре металла шва выделялись участки с повышенным содержанием Мо (до 6 %) и Тi (до 2,5 %), микротвердость которых была в 1,5–2 раза меньше микротвердости соседних участков.

Таблица 1

Химический состав стали МС-200 (08Ж8К9М5Т-ВИ)

Элемент	C	Ni	Co	Mo	Ti	Al	Si	S+P
Содержание, %	0,007	17,4	9,0	5,0	0,65	0,010	0,005	0,006

$A_{с3}$ 720 °С; $M_{и}$ 250 °С; $M_{к}$ 70 °С

При изготовлении емкостей Ø 1000 мм из листа стали МС-200 ($\delta = 2,8$ мм) проводилась предварительная термообработка сварных соединений – термоциклирование: многократная структурная перекристаллизация металла вследствие $\alpha \leftrightarrow \gamma$ -превращений при нагреве и охлаждении. При термоциклировании осуществляли местный индукционный нагрев с наложением индуктора (медная труба, выгнутая по контуру шва) непосредственно на сварное соединение. Отрабатывая режим термоциклирования, учитывали, что высо-

коскоростной индукционный нагрев ($V_n \approx 200$ °/с) значительно повышает температуру $\alpha \rightarrow \gamma$ -превращения и завершения структурной перекристаллизации, а также принимали во внимание повышенную склонность стали МС-200 к росту аустенитного зерна при высоких температурах. Была проведена серия экспериментов и определен режим термоциклирования, обеспечивший эффективное уменьшение крупнозернистости металла ОШЗ (до ~ 9 баллов) и степени неоднородности металла шва: температура нагрева 980–1000 °С, выдержка 7 ± 2 с, охлаждение до ≈ 50 °С, количество циклов 5.

Механические свойства металла листа и сварных соединений оценивали по результатам испытаний образцов, вырезанных из сварных пластин, с определением прочности при растяжении (σ_b) и ударной вязкости образцов с трещиной (КСТ) наносимой или в основном металле, или в ОШЗ, или в металле шва.

Поскольку в емкостях, нагружаемых внутренним давлением, сварные соединения находятся в двухосном напряженном состоянии, эти условия воспроизводились испытанием сварных пластин, зажатых по контуру ($\varnothing 320$ мм, рис. 1) и нагружаемых методом гидростатического выпучивания. При этом определяли истинное напряжение разрушения $\sigma_{ист} = RP/2\delta$ и предельную пластическую деформацию $\epsilon_{кр} = \ln(\delta_0/\delta)$, где R – радиус кривизны в вершине выпучивания пластины, мм; P – давление в момент разрушения, МПа; δ_0 и δ – толщина пластины в месте разрушения до и после испытания, мм.

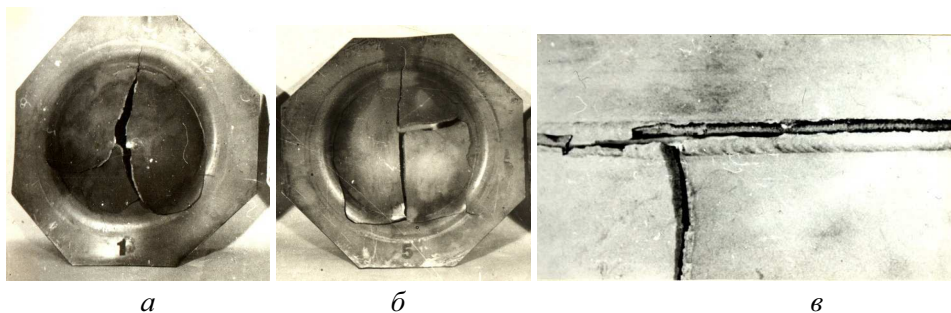


Рис. 1. Характер разрушения пластин при двухосном нагружении: *а* – основной металл; *б* – сварные пластины; *в* – линия разрушения сварного соединения

Испытания образцов и сварных пластин показали низкую прочность и ударную вязкость металла сварных соединений стали МС-200 по сравнению со свойствами основного металла листа (табл. 2). Линия разрушения пластин проходила по шву и околошовной зоне. Термоциклирование сварных соединений (как предварительная термообработка) значительно повысило комплекс их механических свойств в термоупрочненном состоянии.

**Механические свойства листа и сварных соединений стали МС-200
в термоупрочненном состоянии (закалка с 850 °С + старение 480 °С, 6 ч)**

№ п/п	Состояние	Испытание образцов			Испытания пластин*			
		$\sigma_{в}$, МПа	КСТ, Дж/см ²		$\epsilon_{кр}$	$\sigma_{ист}$ МПа	P, атм	Место раз- рушения
			шов	ОШЗ				
1	Основной металл листа	2000	16,5		0,220	2300	605	
2	З-проходная сварка с при- садкой**	2000	9,8	13,0	0,078	2170	518	По ОШЗ
3	З-проходная сварка с при- садкой и термоциклирование	2000	13,5	16,0	0,147	2280	607	Поперек шва

*Среднее значение результатов испытаний четырех пластин.

** Автоматическая сварка вольфрамовым электродом; присадка-проволока стали МС-200.

Термоциклирование с последующим печным нагревом под закалку (850 °С) обеспечило получение в ОШЗ мелкого аустенитного зерна, сравнимого по размеру с зерном основного металла листа (12–13 баллов), и значительную гомогенизацию и дробление литой структуры металла шва (рис. 2). Локальный химический анализ металла термоциклированных швов показал уменьшение неоднородности металла по Ti и Mo. Гомогенизирующий эффект термоциклирования можно объяснить спецификой индукционного нагрева, проявившейся в значительной неравномерности разогрева границ ликвационных участков, что было отмечено металлографически.

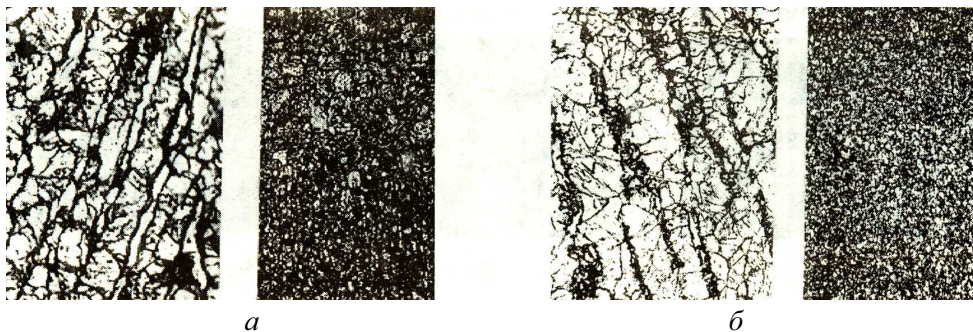


Рис. 2. Микроструктура металла шва и околошовной зоны сварного соединения стали МС-200 ($\times 100$): *a* – после сварки и упрочняющей термообработки (закалка + старение); *б* – после сварки, термоциклирования и упрочняющей термообработки

Введение термоциклирования сварных соединений в технологию изготовления сварных емкостей из стали МС-200 позволило реализовать ее высокую прочность в условиях нагружения емкостей.