

# ЛАЗЕРНАЯ СВАРКА СТАЛЕЙ

## МОЩНЫМИ CO<sub>2</sub>-ЛАЗЕРАМИ. ЧАСТЬ 2\*

**П**родолжаем публикацию результатов исследований лазерной сварки сталей различных классов. Во второй части приведены данные механических испытаний сварных соединений.

Локальность воздействия лазерного излучения при сварке сталей разных классов определяет особые свойства сварных соединений. Анализируя результаты металлографических и механических исследований соединений, выполненных при разных условиях, можно обнаружить, что химический состав (табл.1) сварных швов по сравнению с основным металлом практически не изменяется, а прочностные свойства (табл.2) выше или на уровне свойств основного металла (при статических нагрузках).

Измерения твердости зон сварного соединения (рис.18) проводили при температуре 20°C, без термообработки сварных соединений, по методу Роквелла, при нагрузке 10 кгс, с

шагом 0,5 мм, выполняя 3–5 параллельных линий через 2–3 мм. На рис.19, 20 показаны результаты замеров твердости по Виккерсу на сварных соединениях. Высокая прочность зон сварного соединения объясняется высокой скоростью сварки и, соответственно, высокими скоростями кристаллизации металла сварочной ванны, в результате чего возникает мелкозернистая, мелкодисперсная структура.

Образование такой структуры объясняет повышенную коррозионную стойкость швов. Высокий положительный результат показали образцы из коррозионно-стойкой высоколегированной стали 08X18H10T (рис.21) при проверке на межкристаллитную коррозию (МКК). Поэтому некоторые зарубежные исследователи используют лазерную обработку для прида-

\* Часть 1 см.: Фотоника, 2008, №6.

**Таблица 1.** Результаты анализа химического состава основного металла и металла шва сталей и сплавов, использованных автором настоящей работы при проведении экспериментов по сварке сталей разных классов

Марка стали	Вид анализа	Химический состав											
		C	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Si	V	Cu	Ti	Co
22К	Шов*	0,20	0,76	0,008	0,012	0,21	0,14	–	0,37	–	0,18	–	–
	Осн.металл*	0,21	0,76	0,008	0,016	0,20	0,14	–	0,34	–	0,17	–	–
10ГН2МФА	Шов*	0,08	0,95	0,017	0,021	0,23	2,30	0,45	0,20	0,05	0,25	–	–
	Осн.металл*	0,09	0,97	0,016	0,017	0,24	2,30	0,47	0,24	0,05	0,26	–	–
09Г2С	Шов*	0,12	1,61	0,029	0,024	0,15	0,30	–	0,70	–	0,16	–	–
	Осн.металл*	0,12	1,65	0,025	0,024	0,14	0,29	–	0,66	–	0,17	–	–
Ст 3КП	Шов пропл.*	0,21	0,66–0,67	0,021	0,041	0,37–0,38	0,22–0,23	–	0,22–0,30	–	0,20–0,22	–	–
	Осн.металл*	0,21	0,67	0,021	0,039	0,38	0,23	–	0,20	–	0,21	–	–
08X18H10T	Шов*	0,08	1,36	0,029	0,015	18,08	10,55	–	0,46	–	0,15	0,42	0,074
	Осн.металл*	0,08	1,40	0,029	0,015	18,10	10,55	–	0,45	–	0,15	0,43	0,072
08X18H10T + X17H	Шов	Не определялся											
	Осн.металл* 08X18H10T	0,08	1,40	0,030	0,015	18,10	10,30	–	0,45	–	0,15	0,43	0,072
	Осн.металл* X17H	0,07	1,24	0,023	0,008	16,80	1,00	–	0,60	–	0,08	–	–
12ХН4МДА	Шов	Не определялся											
	Осн.металл (по ГОСТу)	0,09–0,16	0,30–0,60	0,035	0,035	0,60–0,90	1,50–1,90	–	0,17–0,37	–	0,30	–	–

\* Анализ выполнялся ЦЗЛ ПО "Ижорский завод".

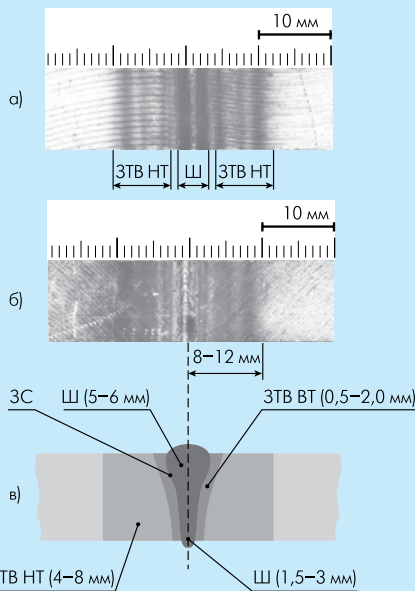
Таблица 2. Механические свойства металла сварных соединений, выполненных лазерной сваркой на стали разных классов марок

Марка стали	Зона сварного соединения	Микротвердость (по Роквеллу)	Прочность		Пластичность		Вязкость разрушения	
			МПа, 20°	Место разрушения	Угол загиба, град.	Место разрушения	КСУ, КДж/м <sup>2</sup> 20°	КСУ, КДж/м <sup>2</sup> 20°
22К	ОМ	160–240	50,4–51,2	+	180, 127, 124	+	3,9–4,1	не опр.
	ЗТВ НТ	160–240	50,7–51,7	нет		нет	не опр.	
	ЗТВ ВТ	до 300		нет		нет	3,6–4,9	
	ЗС	не опр.		нет		нет	5,1–6,7	
	Ш	до 410		нет		нет	6,7–7,0	
10ГН2МФА	ОМ	200–290	67,5–68,2	+	126, 83, 74	нет	6,7–10,0	9,1
	ЗТВ НТ	200–290	58,2–67,6	нет		+	3,4–4,0	не опр.
	ЗТВ НТ	до 400		нет		нет	4,3–6,5	не опр.
	ЗС	не опр.		нет		нет	5,0–5,8	17,9–18,6
	Ш	до 360		нет		нет	7,4–17,9	9,3
09Г2С	ОМ	до 320	57,0–57,5	+	180, 180, 180	нет	6,7–9,0	8,9–21,5
	ЗТВ НТ	до 320	57,9–59,0	нет		нет	3,4–4,4	не опр.
	ЗТВ ВТ	до 560		нет		нет	4,9–17,3	не опр.
	ЗС	не опр.		нет		нет	6,7–11,5	13,4
	Ш	до 360		нет		нет	6,7–9,6	12,3
08Х18Н10Т	ОМ	300–320	59,0–59,5	+(33%)	180	нет	15,6–17,8	не опр.
	ЗС	не опр.	57,0–61,0	нет			13,9–18,1	
	Ш	до 310		+(67%)			12,4–13,9	
12ХН4МДА [20]	ОМ	не опр.	не опр.	+	180	нет	не опр.	не опр.
	ЗТВ НТ	не опр.	не опр.					
	ЗТВ ВТ	не опр.	не опр.					
	ЗС	не опр.	не опр.					

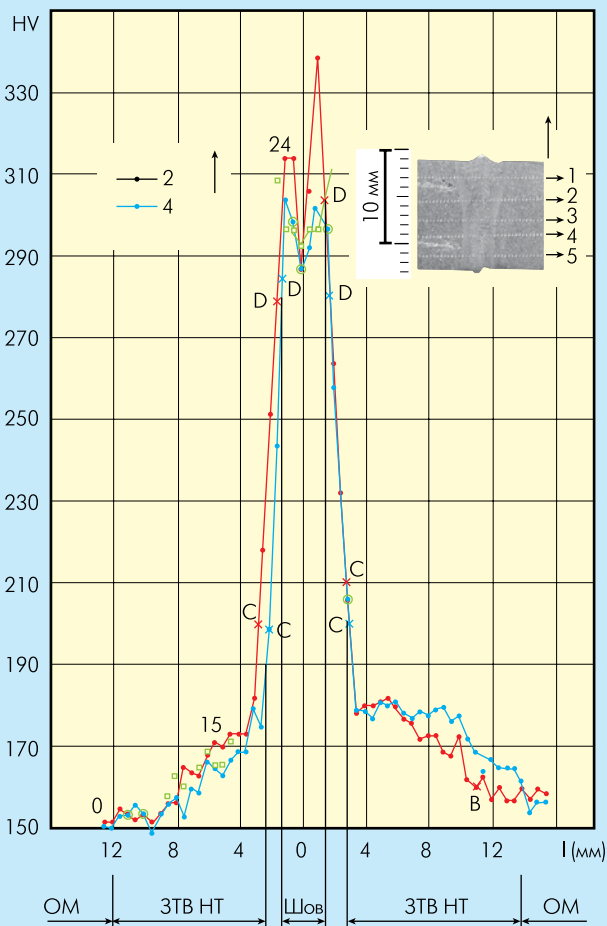
ОМ – основной металл, ЗТВ ВТ – зона термического влияния – высокотемпературная, ЗТВ НТ – зона термического влияния – низкотемпературная, ЗС – зона сплавления, Ш – шов. не опр. – не определено

ния антикоррозионной стойкости изделиям и сварным швам. Испытаниями на разрыв (рис.22, 23) и ударную вязкость (рис.24.) (ГОСТ 6996-66), а так же на статический изгиб определяли прочностные и пластические свойства сварных соединений. Разрушение образцов происходило по основному металлу (ЗТВ НТ). Результаты испытаний показали высокие прочностные и пластические свойства сварных соединений, часто превосходящие результаты испытаний сварных соединений, выполненных традиционными способами сварки. Исключением была сталь 08Х18Н10Т, когда до 30% образцов при испытании на статическое растяжение и ударный изгиб, разрушались по сварному шву (рис.23). Определенное влияние режимов сварки на прочностные свойства сварных швов было отмечено и для стали марки 12ХН4МДА. Наличие пор в шве понизило прочностные свойства только при сварке сталей марок 08Х18Н10Т и 12ХН4МДА.

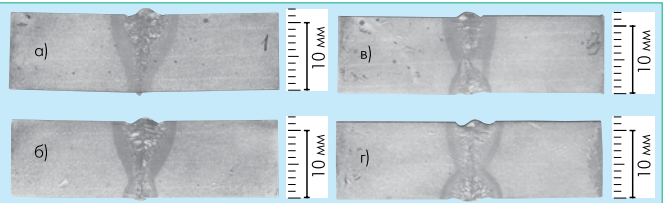
На стали марки 09Г2С разрушение ударного образца с острым надрезом (по Шарпи) происходило в обход, по основному металлу (ЗТВ НТ) (рис.24) даже при наличии крупного дефекта в шве. На образце стали 10ГН2МФА самой слабой зоной сварного соединения оказалась зона синеломкости (ЗТВ НТ), именно здесь происходило разрушение всех испытанных на этой стали образцов. По ЗТВ ВТ ни один из образцов рассматриваемых сталей не был разрушен. Связано это, прежде всего с тем, что высокотемпературная зона термического влияния имела мелкозернистую, мелкодисперсную структуру.



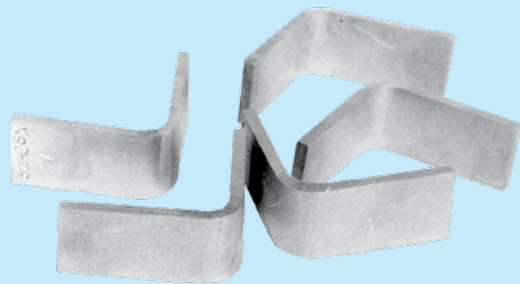
**Рис.18** Зоны сварного соединения, сталь 22К. Внешний вид поверхности сварного соединения: а) лицевая сторона, б) обратная сторона, в) схема зон сварного соединения на поперечном сечении шва. (Условные обозначения: ОМ – основной металл, 3ТВ ВТ – зона термического влияния – высокотемпературная, 3ТВ НТ – зона термического влияния – низкотемпературная, 3С – зона сплавления, Ш – шов)



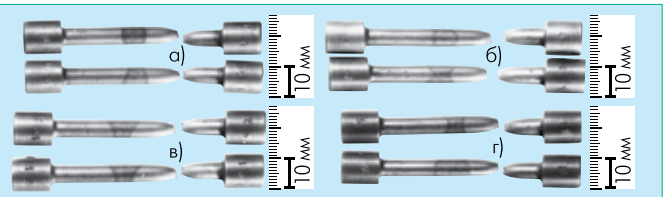
**Рис.20** Твердость (по Виккерсу) по макрошлифу сварного соединения, сталь 22К. (Условия: сварка в гелии лазерным пучком  $P = 10,5$  кВт, скорость сварки  $V_{св} = 10$  мм/с и  $\Delta = 0$ )



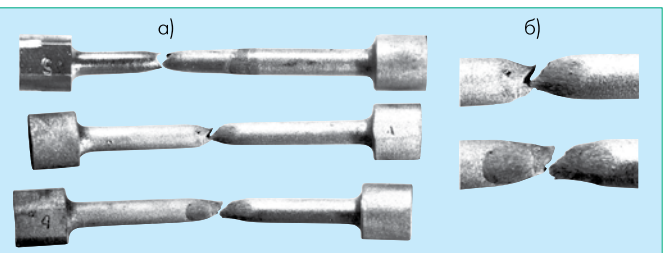
**Рис.19** Макрошлифы сварных соединений на стали 12ХН4МДА после выполнения замеров твердости по Виккерсу. Условия: сварка в гелии, лазерный пучок переменной мощности излучения ( $P$ ), скорости сварки ( $V_{св}$ ) и положения фокального пятна ( $\Delta$ ) на режимах: а)  $P = 10$  кВт,  $V_{св} = 10$  мм/с,  $\Delta = 0$ ; б)  $P_1 = 10$  кВт,  $V_{св} = 12$  мм/с,  $\Delta = 0$ ; в)  $P_1 = 10$  кВт,  $V_{св} = 12$  мм/с,  $\Delta = 0,6$ ; г)  $P_1 = 10$  кВт,  $V_{св} = 12$  мм/с,  $\Delta = 0$



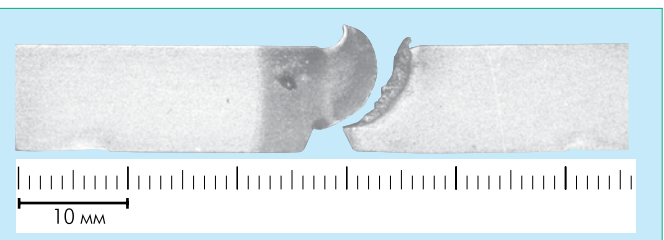
**Рис.21** Внешний вид образцов из коррозионно-стойкой нержавеющей высоколегированной стали 08Х18Н10Т после испытания на межкристаллитную коррозию (МКК)



**Рис.22** Внешний вид образцов после испытаний на статическое растяжение. Сталь 12ХН4МДА. (а), б), в) и г) соответствуют режимам а), г), б) и в) на рис.19)



**Рис.23** Внешний вид образцов после испытаний на статическое растяжение, сталь 08Х18Н10Т (а – общий вид, б – увеличенное изображение разрыва)



**Рис.24** Внешний вид после испытания ударного образца с надрезом по Шарпи (с крупным дефектом в шве в виде поры), сталь 09Г2С

Вопросы дефектообразования мы обсудим в следующей части обзора.