

А. Игнатов, ген.директор ЗАО «ЛазерИнформСервис», laseris-spb@peterlink.ru;  
 В. Криворотов, технический директор ООО «СварКон-Сервис», kvi@svarcon.ru;  
 В.Миргородский, вед.технолог НТЦ «Синтез» НИИЭФА им.Д.В.Ефремова,  
 mirgorodsky@sintez.niiefa.spb.su

# ЛАЗЕРНЫЕ СВАРНЫЕ СОЕДИНЕНИЯ ИЗ КОРРОЗИОННО-СТОЙКИХ СТАЛЕЙ

**К**варным металлоконструкциям, используемым в атомной энергетике, предъявляют жесткие требования по коррозионной стойкости. Кроме того сварной шов должен иметь высокую однородность металлографической структуры и физико-механических свойств. Установлено, что лазерная сварка аустенитных сталей обеспечивает эти условия.

Процесс лазерной сварки основан на применении высококонцентрированного источника энергии – лазерного пучка. Его удельная плотность мощности  $10^6 - 10^7$  Вт/см<sup>2</sup> значительно превосходит источники энергии, используемые при традиционных способах дуговой сварки плавлением. Стабильность этого процесса характеризуется временем и интенсивностью взаимодействия лазерного излучения со свариваемым материалом [1–3].

Поэтому теплофизические явления массопереноса в процессе образования сварочной ванны существенно влияют на структурные превращения сварного соединения. Структурные превращения определяют значения физико-механических характеристик металла шва и эксплуатационных свойств сварного соединения в целом. Это, в определенной степени, относится и к сварным соединениям из коррозионно-стойких аустенитных сталей. Настоящая работа посвящена металлографическому исследованию выполненных волоконными лазерами сварных соединений из аустенитных сталей 316L и ХМ-19, широко используемых в атомной энергетике. Химический состав сталей представлен в табл. 1.

## ИССЛЕДОВАНИЕ МАКРОСТРУКТУРЫ

Исследование макроструктуры сварных соединений проводили на подготовленных образцах стыковых сварных соединений из аустенитных сталей 316L и ХМ-19 толщиной 7 и 9 мм после однопроходной лазерной сварки. Их изучали визуально и на микроскопе МБС-9 по методике, основанной на требованиях ГОСТ 30242 «Дефекты соединений при сварке металлов плавлением».

Макрошлифы поперечного сечения получали на темплетях (7–9)×20×20 мм, полученных электроэрозионной резкой из

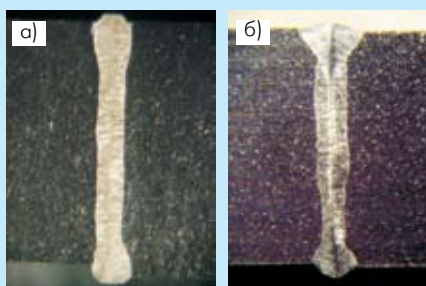


Рис.1 Макрошлифы, выполненные из сварных соединений из нержавеющей аустенитных сталей 316L толщиной 7 мм (а) и ХМ-19 толщиной 9 мм (б)

Табл.1 Химический состав аустенитных сталей

Марка стали	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Другое	Cu	Co	N	Ti	Al
316L	0,018	0,47	0,85	0,024	0,001	16,82	10,09	2,02	Nb 0,006	0,31	0,17	0,044	нет	нет
ХМ-19	0,037	0,48	4,78	0,023	0,006	21,09	12,10	2,23	V 0,13	0,32	0,15	0,255	0,01	0,01

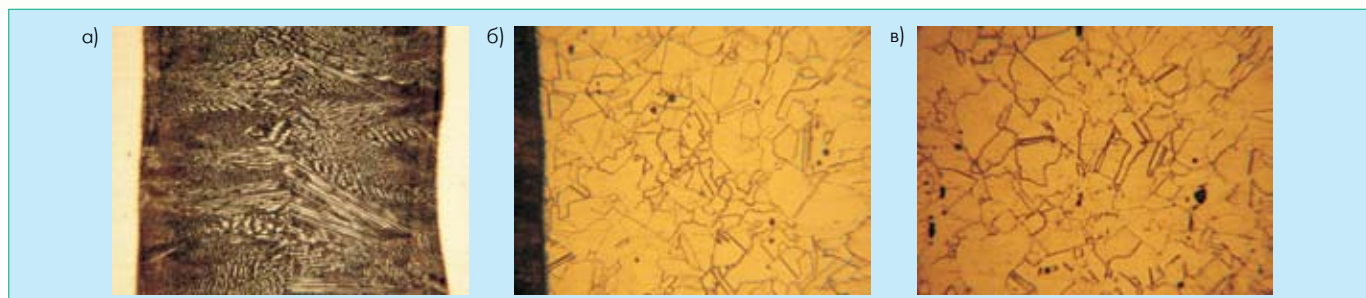


Рис.2 Микроструктура ( $\times 100$ ) шва (а), околошовной зоны (б) и зоны основного металла (в) на стали 316L

заваренных образцов соответствующих сварных соединений. Для повышения контрастности фотоснимков после травления макрошлифов выполняли их легкую поверхностную электрополировку на «щадящих» режимах. На рис.1 представлена макроструктура сварного соединения из сталей 316L и ХМ-19.

По расположению сварного шва стыкового соединения относительно оси сварки видно, что проплавление обеспечено полностью, по всей толщине металлопроката, с усилением обратного валика 0,2 – 0,4 мм. Ширина литого металла в сердцевине шва менее 1,5 мм. Кристаллиты металла сварного шва ориентированы преимущественно перпендикулярно стенкам сварочной ванны, затем плавно сопрягаются у оси шва. Отмечены небольшие по протяженности участки прямолинейного встречного роста кристаллитов. В целом характер роста кристаллитов и их ориентация в металле шва благоприятны с точки зрения обеспечения высокой технологической прочности сварных соединений.

Грубозернистой литой структуры в металле шва не обнаружено. Отмечено также присутствие отдельных участков, имеющих микроскопические раковины с инородными включениями, а также единичные газовые поры. Других дефектов сварного шва в исследуемых образцах не найдено. Образцы сварных соединений по геометрическим размерам, величине

зерна (шкала ГОСТ 5639) и локализации линии сплавления шва в целом удовлетворяют требованиям по обеспечению равнопрочности металла шва с основным металлом.

### ИССЛЕДОВАНИЕ МИКРОСТРУКТУРЫ

На втором этапе выполняли исследование микроструктуры. Определение микроструктуры проводили на микрошлифах с использованием микроскопа Neophot-21 при стократном увеличении. После изготовления микрошлифов их поверхность подвергали электролитическому травлению в течение 5 мин в 10%-ном растворе щавелевой кислоты. На рис.2 представлены микрошлифы сварного соединения из стали 316L: основной металл; металл шва; околошовная зона.

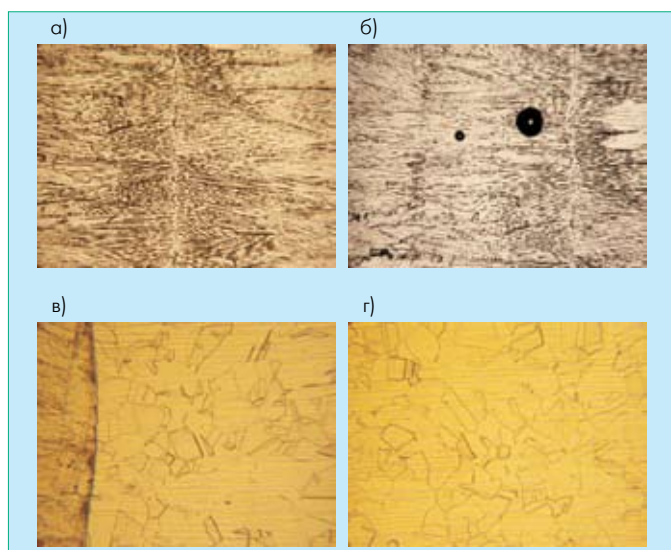


Рис.3 Микроструктура ( $\times 100$ ) шва (а,б) околошовной зоны (в) и зоны основного металла (г) на стали ХМ-19

Табл.2 Результаты измерения микротвердости

№ п/п	Место замера Нц	Значения твердости, Нц	
		Текущее	Среднее
1	Основной металл	228, 238, 238	235
2	Металл шва	260, 266, 254	260
3	Околошовная зона-1	238, 233, 248	240
4	Околошовная зона-2	260, 243, 260	254
5	Основной металл	203, 183, 194	193
6	Металл шва	223, 206, 228	219
7	Околошовная зона-1	206, 223, 206	212
8	Околошовная зона-2	203, 198, 198	200

Микроструктура сварного соединения достаточно однородна: околошовная зона и основной металл имеют практически одинаковую структуру, которая представляет собой полиэдрические зерна аустенита, соответствующие 5–6 баллу по ГОСТ 5639. В микроструктуре сварного шва отмечена направленная ориентация дендритов с локализацией встречных фронтов кристаллизации металла к центру шва. На поверхности шлифов основного металла наблюдаются включения серого цвета вытянутой формы (сульфиды), а также желтовато-розового цвета (предположительно нитриды). На рис.3 представлены микрошлифы сварного соединения из стали ХМ-19: основной металл; металл шва; околошовная зона.

Микроструктура околошовной зоны и зоны основного металла практически одинаковая и представляет собой полиэдрические зерна аустенита, соответствующие 5–6 баллу по ГОСТ 5639. Микроструктура сварного шва также характеризуется направленной к центру шва ориентацией дендритов, с локализацией встречных фронтов кристаллизации металла к оси шва.

Неметаллических включений в сварном соединении практически не наблюдается, в основном металле встречаются лишь единичные включения сульфидов и нитридов. В сварном шве наблюдаются единичные поры размером не более 0,05 мм. Очевидно, что обнаруженные микродефекты в виде пор и неметаллических включений по размерам, форме и локализации не окажут существенного влияния на снижение механических характеристик сварных соединений.

100 г и времени выдержки под нагрузкой в течение 5 с [4]. На каждом характерном участке проводили 3–4 измерения микротвердости. Статистическая обработка результатов показала, что этого количества измерений вполне достаточно для того, чтобы погрешность измерения не превышала установленный с 90%-ной вероятностью доверительный интервал отклонения среднего значения Нц от истинного [5].

На рис.4 представлены микрошлифы исследуемых образцов после замера микротвердости. На поверхности микрошлифов четко видны отпечатки пирамиды индентора микротвердомера, расположенные вблизи характерных зон исследуемых сварных соединений. Результаты измерений представлены в табл. 2. По результатам замеров строили графики средних значений микротвердости в основных зонах сварного соединения (рис.5).

Из графика следует, что характер распределения значений микротвердости по зонам сварных соединений из сталей 316L и ХМ-19 качественно одинаков. Микротвердость основного металла имеет минимальные значения, максимальная микротвердость обнаружена у сварного шва. Околошовная зона вблизи линии сплавления (или зона сплавления) име-

### ИССЛЕДОВАНИЕ ОДНОРОДНОСТИ

Исследование физико-механической однородности сварных соединений в целом оценивали методом измерения микротвердости основных его составляющих: основного металла, металла шва и околошовной зоны. Замеры микротвердости (Нц) проводились на микротвердомере ПМТ-3 при нагрузке

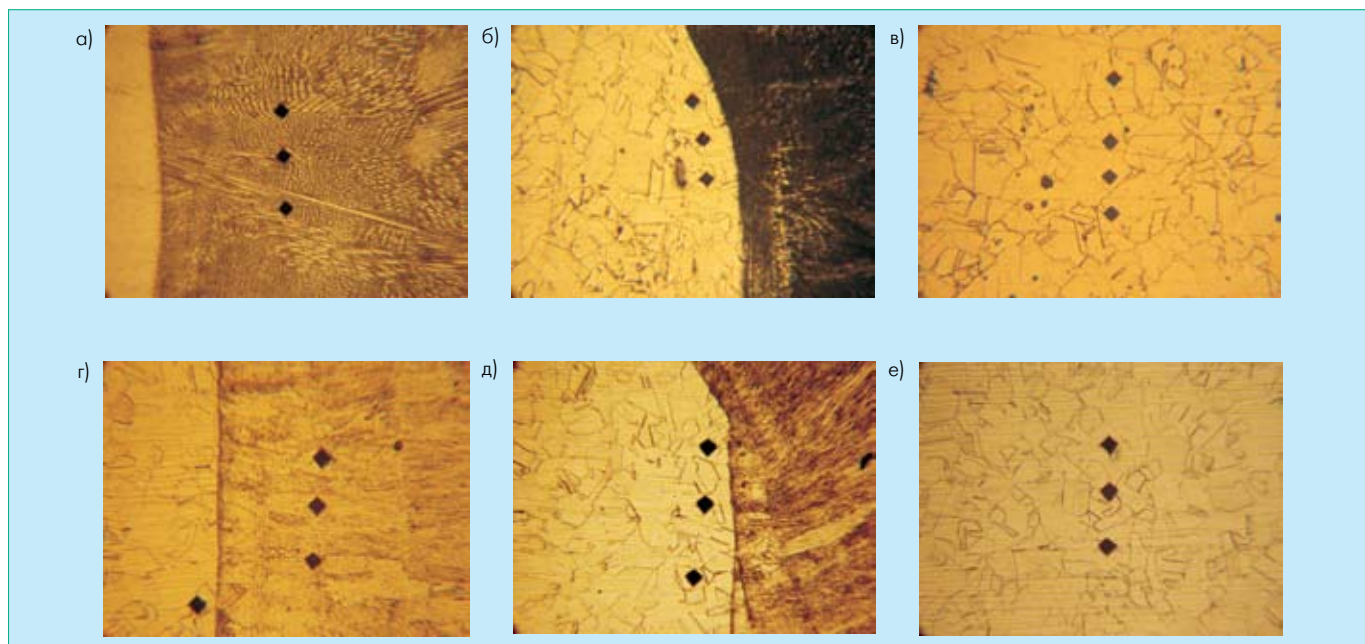
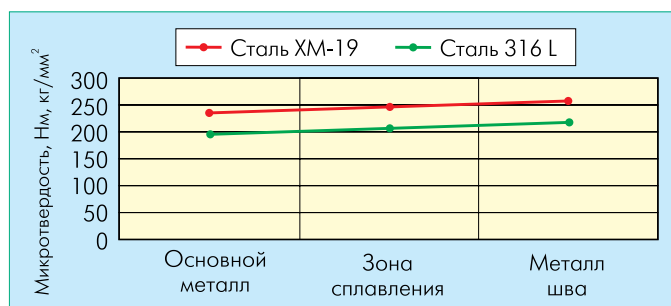


Рис.4 Микроструктура (×100) шва (а) околошовной зоны (б) и зоны основного металла (в) на стали 316L



**Рис. 5** Оценка макронеоднородности сварного соединения методом измерения микротвердости

ет промежуточные значения микротвердости. Отсутствие ярко выраженной, характерной зоны термического влияния (ЗТВ) на исследуемых образцах свидетельствует о достаточно высокой структурной и физико-механической однородности сварных соединений из исследуемых сталей. Такие же результаты получены и при проведении металлографических исследований указанных образцов.

Повышенные абсолютные средние значения микротвердости на образцах стали 316L по сравнению с ХМ-19 получены потому, что химический состав стали 316L при сварке плавлением обеспечивает получение металла шва вблизи аустенитно-мартенситной области на диаграмме Шеффлера [6]. Чтобы воспользоваться диаграммой Шеффлера, рассчитаем эквиваленты сталей 316L и ХМ-19 по хрому (Cr) и никелю (Ni) по известным формулам:

- Cr-эквивалент = %Cr + %Mo + 1,5 x %Si + 0,5 x %Nb;
- Ni-эквивалент = %Ni + 30 x %C + 0,5 x %Mn.

Расчет ведем по данным химического состава сталей 316L и ХМ-19, приведенного в табл. 1.

Для стали 316L:

$$\text{Cr-эквивалент} = 16,82 + 2,02 + 1,5 \times 0,47 + 0,5 \times 0,006 = 19,55;$$

$$\text{Ni-эквивалент} = 10,09 + 30 \times 0,18 + 0,5 \times 0,85 = 11,05.$$

Для стали ХМ-19:

$$\text{Cr-эквивалент} = 21,09 + 2,23 + 1,5 \times 0,48 = 24,04;$$

$$\text{Ni-эквивалент} = 12,1 + 30 \times 0,037 + 0,5 \times 4,78 = 15,6.$$

Используя полученные значения соответствующих коэффициентов, определяем, что точка, соответствующая стали 316L, гораздо ближе расположена к «мартенситной» области на диаграмме Шеффлера, чем аналогичная точка для стали ХМ-19. Это объясняет более высокие значения микротвердости, полученные на сварных образцах из стали 316L.

За помощь в проведении экспериментов и исследований авторы выражают глубокую признательность и благодарность Петровскому В.Н. (МИФИ), Стрельцову А.П. (НТО «ИРЭ-Полюс», IPG), Смирнову С.Н. (ЛРСЗЦ, ООО «СП»Лазертех»), Горному С.Г. (ЛРСЗЦ, ООО «ЛЦ») и НТЦ «Синтез» НИИЭФА им.Д.В.Ефремова.

Выполненные исследования подтвердили, что в результате лазерной сварки аустенитных сталей 316L и ХМ-19 получают сварные соединения, обладающие высокой однороднос-

тью металлографической структуры и физико-механическими свойствами. Сварные соединения, выполненные лазерной сваркой, отвечают на микро- и макроуровнях основным требованиям по обеспечению равнопрочности и работоспособности, предъявляемым к сварным металлоконструкциям ответственного назначения.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Рэди Дж. Действие мощного лазерного излучения – М.: Мир, 1974.
2. Игнатов А., Суздаев И. Состояние и перспективы применения лазерного технологического оборудования. – Судостроительная промышленность. Сер. Сварка, 1989, вып. 7.
3. Игнатов А. О лазерной сварке сталей и сплавов разных классов мощными лазерами: до 10–30 кВт // Сб. докладов российско-германского семинара-совещания по вопросам внедрения лазерных технологий в отечественную промышленность, 2008 год. – СПб, 2008.
4. Глазов В., Вигдорович В. Микротвердость металлов и полупроводников. – М., Металлургия, 1969.
5. Криворотов В., Тынтарев А., Чашников Д. Исследование процесса деформации бесшовной порошковой проволоки. – Судостроительная промышленность. Сер. Металлургия, 1979, вып. 27.
6. Schaeffler A. Constitution Diagram of Stainless Steel Weld Metal. – Metal Progress, 1949, v.56.