



УДК 621.791:669.14.15

## КОРРОЗИОННАЯ СТОЙКОСТЬ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ СУДОКОРПУСНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Е. В. КОЛОМИЙЦЕВ

ПАО «ММК им. Ильича». 87504, г. Мариуполь, ул. Левченко, 1.

E-mail: natalya.rassokhina@ilyichsteel.com

Опыт эксплуатации морских паромов свидетельствует о неравномерной общей коррозии корпусов в области сварных соединений. Целью данной работы было исследование коррозионной стойкости судокорпусных сталей и их сварных соединений применительно к условиям эксплуатации паромов серии «Сахалин» второго поколения. Методика исследования предусматривала оценку коррозионных характеристик судокорпусных материалов в различных условиях: определение стационарных электродных потенциалов и скорости общей коррозии низколегированных судокорпусных сталей, исследование коррозионной стойкости сварных соединений этих сталей в быстро движущейся морской воде. Полученные результаты позволяют рекомендовать в качестве основного металла для корпусов паромов серии «Сахалин» второго поколения следующие стали: для ледового пояса — стали марок 15ГБ и 10ГНБ, для наружной обшивки подводной части корпуса, второго дна и переборок — стали марок А27 и Д32 по ТУ 14-1-4264–87. Сварку сталей 15ГБ, 10ГНБ и А27 следует выполнять как никельсодержащими, так и безникелевыми материалами. Сталь Д32 может свариваться безникелевыми материалами. Библиогр. 10, табл. 6, рис. 1.

*Ключевые слова:* коррозионная стойкость, судокорпусные стали, сварные соединения, электродные потенциалы, морская вода, продолжительность испытаний

За последние десятилетия условия эксплуатации судов значительно ужесточились. Возросла скорость движения, расширилась география и интенсивность их плавания. К таким судам, в частности, относятся паромы серии «Сахалин», эксплуатирующиеся в Татарском проливе. Корпуса паромов, изготовленные из марганцовистых сталей 09Г2 и 10Г2С1Д (ледовый пояс), подвержены неравномерной коррозии, особенно в околосшовной зоне. Это приводит к необходимости подварки поврежденных мест, замене листов обшивки, что увеличивает продолжительность и стоимость доковых ремонтов, снижая эффективность эксплуатации.

Поскольку корпуса судов более 70 лет изготавливаются сварными, а не клепаными и коррозионная стойкость сварных соединений очень часто значительно уступает коррозионной стойкости основного металла, возникает необходимость коррозионных испытаний сварных соединений.

Имеется достаточно обширный материал по коррозионной стойкости углеродистых и низколегированных свариваемых корпусных сталей в морской воде [1–5].

Коррозия стали 09Г2 характеризуется значительной неравномерностью поражений поверхности. Средняя скорость коррозии составляет 0,16...0,25 мм/год. С увеличением скорости течения морской воды до 10 м/с в районах с умеренным климатом скорость коррозии низколеги-

рованных сталей может возрастать до 1 мм/год [3, 4].

Коррозионный износ листов наружной обшивки корпусов паромов «Сахалин» составлял 0,3...0,5 мм/год. Наибольшее относительное утонение наблюдалось у листов днищевой и скуловой обшивки. Значительные коррозионные разрушения имели место в районах монтажных швов, выполненных ручной сваркой, а также в местах пересечения сварных швов и в районе отстойной цистерны.

Усиленную избирательную коррозию в виде борозд вдоль сварных швов (с обеих сторон) наблюдали в металле ЗТВ пазовых, стыковых швов и швов приварки основного набора — до 1 мм/год, в ряде случаев были сквозные проржавления (свищи), которые хорошо видны на рисунке. Бороздковые разрушения металла ЗТВ являются следствием усиленной коррозии анодной (подкаленной) зоны, примыкающей к сварному шву [4].

Из-за усиленного коррозионного износа наружной обшивки паромов «Сахалин» через 8-10 лет эксплуатации приходилось проводить замену листов общей площадью до 1800 м<sup>2</sup> и подварку сварных швов до 2000 м.

Причинами повышенного коррозионного износа подводной части паромов «Сахалин» являются:

— неэффективность рекомендованных средств противокоррозионной защиты при эксплуатации в ледовых условиях;



Коррозионные повреждения (свищи) наружной обшивки подводной части паромов «Сахалин» первого поколения

— недостаточная коррозионно-эрозионная стойкость сталей 10Г2С1Д, 10ХСНД и особенно 09Г2.

Одним из путей решения данной проблемы является применение новых корпусных материалов с повышенной коррозионной стойкостью, а также строгое соблюдение технологии сварочных работ, включая выбор сварочных материалов.

Целью настоящей работы являлось исследование коррозионной стойкости новых и существующих корпусных сталей и их сварных соеди-

нений, а также выбор оптимального сочетания основных и сварочных материалов для повышения стойкости (долговечности) корпусов паромов «Сахалин» второго поколения. При выборе низколегированных корпусных сталей исходили из того, что их коррозионная стойкость должна превышать коррозионную стойкость стали марки 09Г2, при этом стойкость сварных соединений должна быть на уровне стойкости основного металла, т. е. необходимо оптимальное сочетание марок стали, сварочных материалов и технологии их сварки.

Для исследования коррозионной стойкости основного металла и сварных соединений изготовили стандартные по ОСТ 5.9255–76 [6] сварные образцы размерами (10...14)×80×200 мм из стали марок 09Г2, А27, Д32, 15ГБ, 10ХСНД, 10ГНБ.

Стали марок 09Г2, А27, 15ГБ прошли нормализацию, Д32 (ТУ 14-1-4264–87) [7], 10ХСНД, 10ГНБ (ТУ 14-1-4603–89) [7] — закалку с отпуском.

Химический состав и механические свойства исследуемых сталей представлены в табл. 1 и 2 соответственно.

Сварные соединения выполняли ручной, полуавтоматической и автоматической сваркой с применением безникелевых и никельсодержащих сварочных материалов. Сварочные материалы и режимы сварки приведены в табл. 3.

Каждый вариант марки стали, способа сварки, сварочного материала представлен тремя образцами. Исследования включали:

определение стационарного электродного потенциала основного металла и показателей скорости коррозии массовым методом в спокойной морской воде;

определение показателей коррозии сварных соединений в быстродвижущейся синтетической морской воде (СМВ) профилографированием.

Таблица 1. Химический состав корпусных сталей, мас. %

Марка стали (категория), ГОСТ, ТУ	C	Mn	Si	S	P	Ni	Cr	Cu	Al	Ti	Nb
09Г2 ГОСТ 5521–93	0,10	1,65	0,32	0,022	0,032	0,03	0,02	0,05	0,014	—	—
Д32 ТУ 14-1-4264-87	0,09	1,24	0,28	0,035	0,023	0,20	0,11	0,30	0,050	0,017	—
15ГБ (Е36) ГОСТ 5521–93	0,16	1,30	0,31	0,012	0,017	0,08	0,06	Следы	0,021	0,009	0,020
10ХСНД (Е40) ГОСТ 5521–86	0,10	0,53	0,84	0,023	0,015	0,65	0,70	0,50	0,021	—	—
10ГНБ (Е40) ТУ 14-1-4603–89	0,10	1,37	0,33	0,005	0,02	0,77	0,05	0,12	—	—	0,034
А27 ТУ 14-1-4264–87	0,11	0,47	0,22	0,029	0,012	0,23	0,10	0,38	—	—	—



Таблица 2. Механические свойства исследуемых сталей

Марка стали (категория), ГОСТ, ТУ	Толщина листа, мм	Временное сопротивление $\sigma_B$ , МПа	Предел текучести $\sigma_T$ , МПа	Относительное удлинение $\delta$ , %	Работа удара KV, Дж, при T, °C		
					0	-40	-60
09Г2 ГОСТ 5521-86	15	523	363	34,0	—	62; 38; 50	—
Д32 (Е32) ТУ14-1-4264-87	20	510	345	27,0	—	180; 190; 180	—
15ГБ ГОСТ 5521-86	16	517	365	33,6	—	62; 38; 50	—
10ХСНД ГОСТ 5521-86	32	540	405	31,6	—	74; 69; 64	—
10ГНБ ТУ14-1-4603-89	10	570	468	29,3	—	—	215; 251
A27 ТУ14-1-4264-87	18	435	295	35,0	124; 103	—	—

Таблица 3. Сварочные материалы и режимы сварки

Способ сварки	Сварочные материалы	Диаметр электрода, мм	Режимы сварки		
			$I_{св}$ , А	$U_d$ , В	$v_{св}$ , м/ч
Ручная	Электроды: ИТС-4 С, УОНИ-13/45	4	140...160	—	—
	Э-138/50Н	5	180...200	—	—
Полуавтоматическая в CO <sub>2</sub>	Сварочная проволока марок Св-08Г2С, Св-08ГСНТ	1,2	140...160	22...24	—
	Св-08ГСМТ	1,6	180...200	22...24	—
Автоматическая под флюсом	Сварочная проволока марок Св-08А, Св-10ГН, флюс ОСЦ-45	5	850...900	40...42	28...30

Определение стационарного электродного потенциала проводили в спокойной СМВ океанского состава [9] на образцах размером 5×30×50 мм. Замеры проводили с применением цифрового вольтметра Ц-1413, в качестве электрода сравнения использовали насыщенный каломельный электрод, а затем результаты замеров пересчитывали относительно водородного электрода.

Определение скорости коррозии в спокойной СМВ (база испытаний 3000 ч) проводили массовым методом. Затем, учитывая относительно равномерный характер коррозии данных сталей, пересчитывали в глубинный показатель и усредняли по трем образцам.

Результаты замеров потенциалов и скорости коррозии низколегированных сталей представлены в табл. 4.

Как видно из таблицы, значения электродных потенциалов сталей 10ХСНД, 10ГНБ, 15ГБ, А27, Д32 близки между собой и составляют от -0,45 до -0,48 В, а стали 09Г2 более отрицательны — от -0,48 до -0,50 В. Скорости коррозии распределяются примерно таким же образом, а именно: у сталей 15ГБ, 10ХСНД, 10ГНБ глубинный показатель — 0,069...0,071 мм/год, у стали 09Г2 —

Таблица 4. Стационарные электродные потенциалы и скорости коррозии исследуемых сталей в спокойной среде (СМВ)

Марка стали	Стационарный электродный потенциал $\phi$ , В	Глубинный показатель скорости коррозии $I$ , мм/год
09Г2	-0,48...-0,50	0,074
A27	-0,45...-0,46	—
Д32	-0,45...-0,46	—
15ГБ	-0,46...-0,47	0,070
10ГНБ	-0,47...-0,48	0,071
10ХСНД	-0,45...-0,47	0,069

0,074 мм/год. Испытания в спокойной воде сталей категории А27 и Д32 не проводились.

Таким образом, на основании полученных результатов можно отметить, что стали А27, Д32, 15ГБ, 10ХСНД и 10ГНБ имеют повышенную коррозионную стойкость по сравнению со сталью 09Г2. Для сталей А27, Д32, 10ХСНД и 10ГНБ это можно объяснить более высоким содержанием в них никеля и меди. Для стали 15ГБ вопрос остался не выясненным.



Таблица 5. Максимальная и средняя скорости коррозии основного металла сварных соединений исследуемых сталей

Марка стали	Скорость коррозии $I$ , мм/год		Показатель неравномерности коррозии
	максимальная	средняя	
09Г2	1,46	0,97	1,51
Д32	1,95	0,94	2,07
15ГБ	1,46	0,98	1,49
10ГНБ	1,06	0,62	1,71
10ХСНД	1,26	0,70	1,80
А27	2,03	1,00	2,03

Коррозионные испытания сварных образцов проводили в быстро движущейся среде в соответствии с требованиями ОСТ 5.9255–76.

Параметры испытаний: среда — СМВ, температура среды  $32 \pm 2$  °С, скорость 10 м/с, продолжительность испытаний 1000 ч.

После испытаний поверхности образцов, подвергшихся коррозии, профилографировали методом непрерывного сканирования с применением электронно-механического профилографа ЭМП-1. Профилограммы поверхности образца снимали по четырем дорожкам в масштабе по оси абсцисс 1:1, по оси ординат 200:1.

Результаты испытаний усреднены по трем образцам и представлены в табл. 5.

Как видно из табл. 5, значения средних скоростей коррозии основного металла сталей А27, Д32, 09Г2, 15ГБ существенно не отличаются друг от друга и составляют 0,94...1,00 мм/год при максимальной 1,49...2,03 мм/год.

Средняя скорость коррозии основного металла сталей 10ХСНД и 10ГНБ составляет 0,62...0,70 мм/год, что существенно выше коррозионной стойкости сталей 09Г2, А27, Д32, 15ГБ.

Значение показателей коррозионной стойкости различных зон сварных соединений исследованных сталей в быстро движущейся среде представлены в табл. 6.

Коррозионную стойкость зон сварных соединений оценивали относительно коррозионной стойкости основного металла, считая ее удовлетворительной, когда скорость коррозии шва или металла ЗТВ находилась в пределах 0,8...1,2 скорости коррозии основного металла [10].

На основании анализа данных табл. 6 можно отметить следующее:

коррозионная стойкость швов, выполненных безникелевыми сварочными материалами (ИТС-4С, УОНИ-13/45, Св-08Г2С, Св-08А) для всех сталей, как правило, равна или ниже коррозионной стойкости основного металла;

коррозионная стойкость швов, выполненных никельсодержащими сварочными материалами

(Э-138/50Н, Св-08ГСНТ, Св-10ГН), выше или равна коррозионной стойкости основного металла.

Рассматривая коррозионную стойкость металла ЗТВ, можно отметить, что усиленная коррозия металла ЗТВ наблюдается у стали 09Г2 для всех способов сварки. В остальных случаях коррозионная стойкость металла ЗТВ равна или выше коррозионной стойкости основного металла. Так, для сварных соединений стали марок 15ГБ и 10ГНБ наблюдается равностойкость металла ЗТВ по сравнению с основным металлом, а для сталей 10ХСНД, А27 и Д32 — повышенная коррозионная стойкость металла ЗТВ.

Таким образом, оптимальную коррозионную стойкость металл ЗТВ имеет при сварке стали Д32 безникелевыми материалами; для сталей 15ГБ и 10ГНБ при сварке как никельсодержащими, так и безникелевыми материалами; для стали А27 при ручной сварке двумя видами материалов, а при автоматической сварке — безникелевой проволокой.

Из анализа данных коррозионной стойкости металла шва следует, что наибольшая однородность коррозии металла шва и основного металла отмечается в случае сочетания основного и сварочного материала с близким химическим составом. При использовании никельсодержащих сварочных материалов наиболее благоприятные результаты получены для стали марок 10ХСНД и 10ГНБ. Для стали марок 09Г2, 15ГБ, А27, Д32 лучшие результаты получены при применении безникелевых сварочных материалов.

Проводя интегральную оценку коррозионной стойкости как металла ЗТВ, так и металла шва, можно сделать заключение, что только стали А27, Д32, 15ГБ и 10ГНБ удовлетворяют требованиям равностойкости зон сварных соединений.

Учитывая требования проектантов о том, что для ледового пояса необходимы стали класса прочности 36 или 40, а для наружной обшивки подводной части — 27 или 32, для паромов «Сахалин» второго поколения были рекомендованы следующие материалы:

— для ледового пояса: стали марок 15ГБ (Е36, ГОСТ 5521–86) и 10ГНБ (Е40, ТУ 14-1-4603–89), причем автоматическая сварка может выполняться как никельсодержащими, так и безникелевыми материалами, а ручная — для стали 15ГБ безникелевыми, для стали 10ГНБ никельсодержащими материалами;

— для наружной обшивки подводной части, второго дна, переборок: стали А27 и Д32, сварные соединения которых должны выполняться безникелевыми материалами. Монтажный стык ледового пояса с нижней частью судна должен выполняться безникелевыми материалами при сварке стали 15ГБ со сталями А27 и Д32 или ни-

Т а б л и ц а 6. Показатели коррозионной стойкости металла зон сварных соединений исследуемых сталей в быстро движущейся среде

Марка стали	Способ сварки	Марка и тип сварочного материала	Показатель скорости коррозии зон сварного соединения $I$ , мм/год						Показатели неравномерности коррозии		
			основной металл		ЗТВ		металл шва		$I_{\text{ом}}^{\text{max}}$	$I_{\text{ЗТВ}}^{\text{cp}}$	$I_{\text{ш}}^{\text{cp}}$
			max	средний	max	средний	max	средний	$I_{\text{ом}}^{\text{cp}}$	$I_{\text{ом}}^{\text{cp3}}$	$I_{\text{ом}}^{\text{cp}}$
09Г2	Ручная	ИТС-4С Э-138/50Н	1,24	0,83	1,49	1,18	0,74	0,53	1,49	1,42	0,64
			1,31	0,86	1,46	1,16	0,71	0,41	1,52	1,35	0,48
	Полуавтоматическая	Св-08Г2С Св-08ГСНТ	1,70 1,28	1,18 0,94	1,66 1,82	1,28 1,55	1,74 0,38	1,32 0,25	1,44 1,36	1,08 1,65	1,12 0,27
Д32	Полуавтоматическая	Св-08Г2С Св-08ГСНТ	2,07	0,98	1,24	0,74	1,98	1,15	2,11	0,76	1,17
			1,86	0,99	1,29	0,83	0,90	0,51	1,88	0,84	0,52
А27	Ручная	ИТС-4С Э-138/50Н	1,78	0,86	1,25	0,81	1,62	0,81	2,07	0,94	0,94
			2,07	0,94	0,84	0,60	0,92	0,48	2,20	0,64	0,51
А27	Полуавтоматическая	Св-08Г2С Св-08ГСНТ	1,75	0,83	1,24	0,79	1,78	0,83	2,11	0,95	1,00
			3,19	0,99	1,15	0,74	1,39	0,11	2,21	0,75	0,72
	Автоматическая	Св-08А Св-10ГН	1,75 3,19	0,83 0,99	1,24 1,15	0,79 0,74	1,78 1,39	0,83 0,11	2,11 2,21	0,95 0,75	1,00 0,72
10ГНБ	Ручная	УОНИ-13/45	1,03	0,55	0,77	0,57	1,30	0,77	1,81	1,04	1,40
15ГБ (Е36)	Ручная	ИТС-4С4 Э-138/50Н	1,24	0,81	1,04	0,83	1,14	0,78	1,53	1,02	0,96
			1,25	0,88	0,98	0,72	0,79	0,53	1,42	0,82	0,60
	Полуавтоматическая	Св-08Г2С Св-08ГСНТ	1,18 1,75	0,82 1,30	0,90 1,49	0,72 1,25	1,61 0,98	1,25 0,77	1,44 1,35	0,88 0,96	1,52 0,59
10ГНБ (Е40)	Ручная	Э-138/50Н	1,58	1,14	1,42	1,02	1,81	1,25	1,39	0,89	1,10
			1,73	0,94	1,41	1,10	1,35	0,98	1,84	1,17	1,04
10ГНБ (Е40)	Полуавтоматическая	Св-08ГСМТ	1,08	0,59	0,78	0,54	1,20	0,66	1,83	0,92	1,12
			0,95	0,57	0,55	0,42	0,84	0,53	1,67	0,74	0,93
	Автоматическая	Св-10ГН Св-10ГН	1,08 0,95	0,59 0,57	0,78 0,55	0,54 0,42	1,20 0,84	0,66 0,53	1,83 1,67	0,92 0,74	1,12 0,93
10ХСНД (Е40)	Ручная	ИТС-4С Э-138/50Н	1,24	0,65	0,69	0,39	1,02	0,63	1,91	0,60	0,97
			1,26	0,72	0,73	0,43	0,89	0,53	1,75	0,60	0,74
	Полуавтоматическая	Св-08Г2С Св-08ГСНТ	1,25 1,29	0,72 0,70	0,97 0,70	0,51 0,51	1,32 0,77	0,96 0,58	1,74 1,84	0,71 0,73	1,33 0,83
10ХСНД (Е40)	Автоматическая	Св-08А Св-10ГН	1,41	0,76	0,58	0,43	1,27	0,94	1,86	0,57	1,24
			1,16	0,65	0,58	0,43	0,64	0,51	1,78	0,66	0,78

кельсодержащими при сварке стали 10ГНБ с А27 и Д32.

В дальнейшем целесообразно провести исследование коррозионной стойкости сварных соединений сталей в таком сочетании, как сталь Д32 со сталью марок 15ГБ и 10ГНБ.

### Выводы

1. Стали 09Г2, 10Г2С1Д (ГОСТ 5521–86) в составе наружной обшивки корпуса паромов «Сахалин» первого поколения имеют недостаточную коррозионную стойкость, что приводит к необходимос-

ти замены через 8-10 лет до 2000 м<sup>2</sup> обшивки на каждом пароме.

2. Из исследованных марок сталей коррозионную стойкость, превышающую стойкость стали 09Г2, имеют стали А27, Д32 (ТУ 14-1-4264–87), Е36 (15ГБ), 10ХСНД и 10ГНБ.

3. С позиции стойкости к коррозии сварных соединений для работы в составе корпуса паромов «Сахалин» могут быть рекомендованы следующие материалы:

— для ледового пояса — стали 15ГБ (Е36, ГОСТ 5521-86) и 10ГНБ (Е40, ТУ 14-1-4603–89);



— для наружной обшивки подводной части корпуса, второго дна и переборок — стали А27 и Д32 по ТУ 14-1-4264-87.

4. Сварка сталей 15ГБ, 10ГНБ и А27 при ручном и автоматическом способах может выполняться как никельсодержащими, так и безникелевыми материалами. Сталь Д32 должна свариваться безникелевыми материалами.

5. Изложенные выше рекомендации по применению проката из конкретных марок стали (А27, Д32 и Е36) по ГОСТ 5521-86 и ТУ 14-1-4264-87 относятся также ко всем маркам в пределах соответствующих класса прочности (27, 32 и 36).

1. Богорад И. Я., Искра Е. В. Коррозия и защита морских судов. — Л.: Судостроение, 1973. — 392 с.
2. Коррозия. Справочник / Под ред. Л. Л. Шрайера. — М.: Металлургия, 1981. — 632 с.

3. Коррозия и защита судов. Справочник / Под ред. Е. Я. Люблинского и В. Д. Пирогова. — Л.: Судостроение, 1987. — 376 с.
4. Черток Ф. К. Коррозионный износ и долговечность сварных соединений. — Л.: Судостроение, 1977. — 144 с.
5. Семенова И. В., Флорианович Г. М., Хорошилов А. В. Коррозия и защита от коррозии / Под ред. И. В. Семеновой. — М.: Физматлит, 2002. — 336 с.
6. ОСТ 5.9255-76. Металлы и покрытия для судостроения. Методы ускоренных коррозионных испытаний.
7. ТУ 14-1-4264-87. Прокат толстолистовой для судостроения.
8. ТУ 14-1-4603-89. Прокат толстолистовой свариваемый корпусной из низколегированной стали для конструкций судов и морских технических сооружений.
9. Томашов Н. Д. Теория коррозии и защиты металлов. — М.: Изд-во АН СССР, 1959. — 591 с.
10. Маркович Р. А. Ускоренные коррозионные испытания сварных соединений // Тр. ЦНИИ МФ. — 1980. — Вып. 257. — С. 25-36.

Поступила в редакцию 15.10.2012

## КОНФЕРЕНЦИЯ «Ti-2013 в СНГ»

26–29 мая 2013

Украина, Донецк



**Межгосударственная ассоциация «Титан» и Национальная академия наук Украины приглашают принять участие в XI Международной конференции «Ti-2013 в СНГ».**

### Тематика конференции:

*Обзор рынка титана в странах СНГ и мире*

*Национальные программы развития отрасли*

*Динамика развития сфер применения титана*

*Новые достижения в области металлургии и металлургии титана*

*Анализ рынка ферротитана*

[www.titan-association.com](http://www.titan-association.com)