

## Коррозионная стойкость сталей ферритно-аустенитного класса и возможность их использования в ядерной энергетике

ГЕРАСИМОВ В. В., ГРОМОВА А. И., БЕЛОУС В. Н., ГОСТЕВА В. А.,  
ФЕЛЬДГАНДЛЕР Э. Г.

УДК 621.039.553.36; 620.193.47.7

В настоящее время широкий размах приобретает строительство АЭС. В связи с этим целесообразна замена дорогостоящей аустенитной стали 0X18H10T на более экономичные стали, не уступающие ей по коррозионной стойкости. Материалами, способными заменить сталь 0X18H10T, могут быть двухфазные стали ферритно-аустенитного класса с пониженным содержанием никеля, такие, как ЭП-53, ЭП-54, ЭП-214, ЭП-26 и пр. Известно, что эти стали по сравнению со сталью 0X18H10T обладают более высокой стойкостью к коррозионному растрескиванию, кроме того, в определенных условиях они устойчивы к межкристаллитной коррозии. По механическим свойствам, технологичности, свариваемости стали ЭП-53 и ЭП-54 не уступают, а в некоторых случаях даже превосходят сталь X18H10T [1-7].

В настоящей работе исследовано коррозионное поведение перечисленных ферритно-аустенитных сталей в условиях эксплуатации атомных энергетических установок и определена возможность их применимости в реакторостроении.

Испытывались образцы сталей ЭП-53, ЭП-54, ЭП-214, ЭП-26 (табл. 1) в состоянии поставки на сплошную, межкристаллитную коррозию и коррозионное растрескивание. Эксперименты проводились в статических условиях в автоклавах из стали 0X18H10T по известной методике [8], а также в динамических условиях в процессе эксплуатации различных атомных энергетических установок и петель. Во всех случаях при определении скорости сплошной коррозии материалов использовали весовой ме-

тод. Склонность к межкристаллитной коррозии оценивали по ГОСТ 6032—58 по методам А и АМ с провоцирующим нагревом. Стойкость сталей против коррозионного растрескивания определяли в кипящем 42%-ном растворе хлористого магния и в насыщенном паре с высокой концентрацией хлор-иона и кислорода.

### Результаты испытаний и их обсуждение

Возможность возникновения межкристаллитной коррозии и развития коррозионного растрескивания у сталей зависит от состояния самого материала и от свойств коррозионной среды. Последние зависят как от внутренних факторов (химический состав материала, термическая обработка, технология его получения), так и от внешних (состав среды, температура, величина напряжений и пр.).

Исследования показали, что стали ЭП-53 и ЭП-54 в состоянии поставки по ГОСТ 6032—58 (методы А и АМ) не склонны к межкристаллитной коррозии. Аналогичные выводы были сделаны и другими исследователями [9—15]. Изучение стойкости двухфазных сталей против коррозионного растрескивания показало, что устойчивость промышленных двухфазных сталей ЭП-53, ЭП-54 и однофазной стали ЭП-26 к этому виду разрушения не ниже, чем у стали типа 0X18H10T, а в отдельных случаях даже выше. Более высокая стойкость к коррозионному растрескиванию по сравнению со сталью 0X18H10T обнаружена у сталей ЭП-53 и ЭП-54 при испытаниях в кипящем растворе хлористого магния и хлорного железа и в паро-воздуш-

Химический состав сталей (вес.%)

Таблица 1

Сталь	C	Cr	Ni	Mn	Si	Ti	Mo	P	S	N <sub>2</sub>
ЭП-53	0,08	21	4,9	0,8	0,8	0,025	—	—	—	—
ЭП-54	0,08	21	5,5	0,8	0,8	0,3	3,4	—	—	—
ЭП-214	0,09	22	3,5	0,8	—	0,3	—	—	—	—
ЭП-26	0,1	17—20	1,5— 2,5	4—6	0,8	—	—	0,03	0,03	0,8
X18H10T	0,11	17—19	9,0— 11,0	1,0— 2,0	0,8	0,4	—	0,03	0,02	—

ной среде (табл. 2). Это подтверждается результатами и других работ [11, 16, 17].

Стойкость к сплошной коррозии исследуемых сталей в воде при температуре до 300°С в ста-

Результаты испытаний в коррозионное растрескивание сталей в лабораторных условиях Таблица 2

Марка материала	Время до появления трещин	
	А	Б
0X18H10T	5—6 мин	6 ч
ЭП-53	390 ч	900 ч
ЭП-54	—	300 ч

Примечание. Уровень приведенных напряжений  $\sim 30$  кгс/мм<sup>2</sup>.  
 А — 42% MgCl<sub>2</sub> + 5% FeCl<sub>3</sub>, кипящий раствор,  $t = 153 \div 154^\circ\text{C}$ ; Б — паро-воздушная среда (на образцы была нанесена пленка из хлорного железа),  $t = 100 \div 110^\circ\text{C}$ .

В результате исследований сталей ферритно-аустенитного класса ЭП-53 и ЭП-54 в деаэрированной воде в статических условиях при температуре до 300°С в течение 500 ч установлено, что эти стали относятся к группе весьма стойких материалов по ГОСТ 13819—68.

Наличие приложенных напряжений в металле не оказывает значительного влияния на скорость коррозии исследуемых материалов (табл. 4). В условиях эксплуатации скорость коррозии исследованных сталей в воде при температуре 50°С и потоке тепловых нейтронов до  $5 \cdot 10^{14}$  нейтр/см<sup>2</sup>·сек ( $10^{15}$  быстрых нейтронов) сопоставима со скоростью коррозии стали 0X18H10T и не превышает 0,03 г/м<sup>2</sup>·сутки за 1860 ч испытаний (табл. 5). Стали этих марок относятся к группе весьма стойких материалов (второй балл коррозионной стойкости по десятибалльной шкале ГОСТ 13819—68).

Полученные данные о коррозионной стойкости свидетельствуют о том, что в качестве материала для коммуникаций в реакторах, работающих при температуре до 80°С с обессоленной водой, вместо стали 0X18H10T могут быть использованы стали ЭП-53, ЭП-54, ЭП-214.

При увеличении температуры воды до 300—330°С несколько повышается скорость коррозии как стали 0X18H10T, так и сталей двух-

тических условиях сопоставима со стойкостью стали 0X18H10T в тех же условиях. Стали ЭП-53 и ЭП-54 корродируют практически с одинаковой скоростью и имеют равномерную коррозию (табл. 3).

Скорость коррозии сталей в статических условиях

Таблица 3

Среда	Температура, °С	Давление, кгс/см <sup>2</sup>	Продолжительность испытаний, ч	ЭП-26	ЭП-53	ЭП-54	ЭП-214	0X18H10T
Обессоленная деаэрированная вода	200	16	50	0,09	0,09	0,08	0,09	0,10
Обессоленная вода, содержащая 2 мг/л кислорода	200	16	100	0,08	0,06	0,06	0,06	0,04
			50	0,24	0,1	0,12	0,12	0,1
			500	0,13	—	—	—	—
Обессоленная деаэрированная вода рН = 3 (HNO <sub>3</sub> )	300	87	1000	0,01	—	—	—	0,01
			50	0,2	0,1	0,12	0,16	0,1
Обессоленная деаэрированная вода	300	87	50	0,25	0,20	0,27	0,27	0,2—0,3
			100	—	0,09	0,07	0,07	
			300	—	0,04	0,04	0,03	
			500	—	0,03	0,03	0,02	
Обессоленная деаэрированная вода рН = 12 (NH <sub>4</sub> OH)	300	87	1000	—	—	—	—	0,03
			50	0,21	0,13	0,14	0,15	0,15
Обессоленная вода, содержащая 5,6—6,9 мг/л кислорода	300	150	50	—	0,11	0,07	0,07	—
Деаэрированная вода, содержащая 10 мг/л Cl <sup>-</sup>	300	87	50	0,25	0,24	0,18	0,11	—

Примечание. Здесь и далее скорость коррозии выражена в г/м<sup>2</sup>·сутки.

Скорость коррозии сталей при температуре 175° С

Таблица 4

Сталь	Величина приложенного напряжения, кгс/мм <sup>2</sup>	А		Б
		Продолжительность испытаний		
		4320 ч	5000 ч	16 500 ч
0X18H10T	16	0,17	0,126	0,081
		0,14	0,155	0,094
ЭП-53	—	0,152	0,121	0,1
		0,162	0,126	0,103
ЭП-54	—	0,21	0,186	0,137
		0,17	0,187	0,138

Примечание. Давление до 20 кгс/см<sup>2</sup>; скорость потока воды 0,56 м/сек. Состав воды: А — O<sub>2</sub> = 0,15 ÷ 0,8 мг/л; H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> = 0,6 мг/л; Cl<sup>-</sup> = 0,02 мг/л; Fe = 0,1 мг/л; Al = 0,1 мг/л; pH = 6,5; Б — O<sub>2</sub> = 0,4 ÷ 0,5 мг/л; H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> = 3,3 ÷ 70 мг/л; Cl<sup>-</sup> = 0,018 ÷ 0,02 мг/л; Fe = 0,023 мг/л; Al = 0,002 ÷ 0,002 мг/л; pH = 5,5.

Скорость коррозии сталей в воде при температуре 329° С и давлении 130—132 кгс/см<sup>2</sup> за 7000 ч испытаний \*

Таблица 6

Условия испытаний	0X18H10T	ЭП-53	ЭП-54
Вода первого контура	0,0007 0,0096 **	0,0074 0,0096 **	0,0069
Активная зона [10 <sup>12</sup> тепл. нейтр/см <sup>2</sup> × × сек]	0,0144	0,0102	0,010

\* Состав воды: pH = 5,8 ÷ 7,2; O<sub>2</sub> = 0,08 ÷ 1,5 мг/л; c/o = 0,8 ÷ 2,0 мг/л; v = 1,5 м/сек.  
\*\* Скорость коррозии напряженных образцов (величина приведенных напряжений 30 кгс/мм<sup>2</sup>).

фазного типа (см. табл. 3). Однако и при этой температуре скорость коррозии сталей по абсолютной величине невелика и сопоставима между отдельными исследованными марками. Их высокая коррозионная стойкость в деаэрированной воде с высоким значением pH сохраняется и в эксплуатационных условиях как при облучении, так и без него (см. рисунок). В этих условиях стали ЭП-53, ЭП-54 по ГОСТ 13819—68 относятся к категории весьма стойких материалов за 4000 ч испытаний. По данным испытаний в воде с величиной pH, близкой к нейтральной величине, и с повышенным содержанием кислорода при температуре ~300° С

(табл. 6) стали ЭП-53, ЭП-54 по ГОСТ 13819—68 не попадают в категорию материалов, имеющих более низкую коррозионную стойкость, чем сталь 0X18H10T.

Аналогично ведут себя стали ЭП-53 и ЭП-54 в условиях эксплуатации петли кипящего типа. Так, в паро-водяной смеси, воде и насыщенном паре скорость коррозии двухфазных сталей приблизительно в два раза выше скорости коррозии стали 0X18H10T (табл. 7), при этом категория стойкости не меняется.

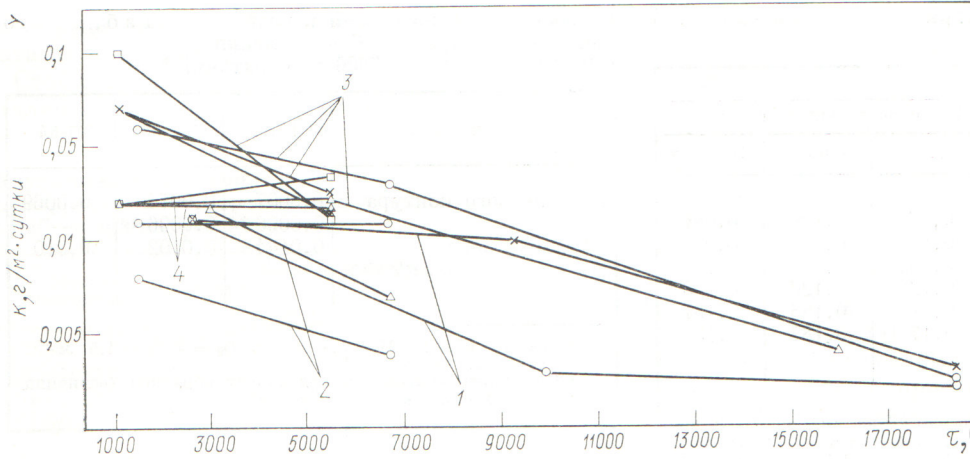
Таким образом, стали ЭП-3 и ЭП-54, так же как и сталь 0X18H10T, в условиях эксплуатации водо-водяных реакторов (обессоленная деаэрированная вода, нейтральное и высокое значение pH) и реакторов кипящего типа, согласно ГОСТ 13819—68, относятся к категории совершенно стойких материалов.

Скорость коррозии сталей в воде при температуре 50° С

Таблица 5

Среда	Условия испытаний	Скорость потока воды, м/сек	Продолжительность испытаний, ч	0X18H10T	ЭП-53	ЭП-54	ЭП-214
Обессоленная деаэрированная вода	Без облучения	—	1650	0,02	0,01	0,01	0,01
Контурная вода *	Облучение потоком тепловых нейтронов, нейтр/см <sup>2</sup> ·сек: 5·10 <sup>14</sup>	8	1650	0,08	0,01	0,01	0,01
		3	1850	0,01	0,01	0,01	0,02

\* Состав воды: Cl<sup>-</sup> отсутствует, Fe = 0,29 мг/кг; c/o = 31 мг/кг; Cu = 6÷7 мг/кг; O<sub>2</sub> = 10 ÷ 12 мг/кг; pH = 4,3 ÷ 6,5; активность 10<sup>-2</sup> юри/л воды.



Скорость коррозии ферритно-аустенитных сталей в среде с высоким значением pH:

○ — X18H10T; × — ЭП-53; △ — ЭП-54; □ — ЭП-26; I — паро-водяная смесь [O<sub>2</sub> = 0,01 мг/кг; pH = 8,8 (NH<sub>4</sub>OH); Cl<sup>-</sup> = 0,05 мг/кг; t<sub>ж</sub> = 285° C; v = 6 м/сек]; 2 — насыщенный пар (O<sub>2</sub> = 0,01 ÷ ÷ 12,3%; H<sub>2</sub> = 70,4 ÷ ÷ 78,2%; v = 30 ÷ 50 м/сек; t = 265° C; p = 30 кгс/см<sup>2</sup>); 3 — в воде при облучении 10<sup>18</sup> нейтр./см<sup>2</sup> × сек [O<sub>2</sub> ≤ 0,02 мг/кг; Cl<sup>-</sup> ≤ 0,5 мг/кг; pH = 9,2 ÷ 9,7 (NH<sub>4</sub>OH); t = 80 ÷ 330° C; v = 4 м/сек]; 4 — в воде (состав среды такой же, как указанно для кривой 3).

Ферритно-аустенитные стали после относительно длительных выдержек в интервале 400—600° C могут проявлять склонность к охрупчиванию; в связи с этим температура их эксплуатации в условиях действия агрессивных сред не должна превышать 300° C.

Таким образом, диффузионные стали ЭП-53, ЭП-54 по сравнению со сталью X18H10T имеют следующие преимущества: пониженное содержание никеля, более высокий предел текучести;

Скорость коррозии сталей в условиях эксплуатации установки кипящего типа при температуре 270—285° C и давлении 70 кгс/см<sup>2</sup> Таблица 7

Условия испытаний	Время испытаний, ч	OX18H10T	ЭП-53	ЭП-54
Вода (pH = 6,3 ÷ 7,4; O <sub>2</sub> = 0,3 ÷ 0,4 мг/кг)	2 668	0,011	0,023	0,024
	5 900	0,007	0,016	0,015
	10 000	0,013	0,017	0,01
	17 700	0,02р	0,009	0,014
Паро-водяная смесь (x = 16 ÷ 17%)	2 668	0,0085	0,019	0,024
	5 900	0,003	0,0056	—
	10 000	0,0068	0,0045	0,0054
	17 700	0,003	0,002	0,003
Насыщенный пар (O <sub>2</sub> = 7,1 мг/кг)	2 668	0,015	0,018	0,014
	5 900	0,012	0,011	0,017
	10 000	0,014	0,0108	0,010
	17 700	0,006	0,005	0,005

большую стойкость к коррозионному растрескиванию. Эти стали, обладая сопоставимой со сталью OX18H10T стойкостью к сплошной и межкристаллитной коррозии в обессоленной воде при температурах 80° — 300° C, могут быть

они рекомендованы в качестве конструкционного материала реакторов при температурах до 300° C в водных средах в тех условиях, где сталь типа X18H10T обеспечивает надежную эксплуатацию оборудования.

Поступила в Редакцию 1/II 1973 г.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Thum E. Metal Progr., 1936, № 6.
2. Шапиро М. Б., Белинский А. Л. «Металловедение и термическая обработка металлов», 1963, № 7, с. 10.
3. Одесский Д. Ф., Воздвиженский В. М. «Металловедение и термическая обработка металлов», 1962, № 2, с. 36.
4. Ковалева Е. А., Салли И. В. «Металловедение и термическая обработка металлов», 1963, № 10, с. 41.
5. Кулакова М. Н., Игнатъева Н. И. «Металловедение и термическая обработка металлов», 1965, № 3, с. 53.
6. Химушин Ф. Ф. Нержавеющие стали. М., Металлургия, 1963.
7. Либерман Л. Я., Пейсихи М. И. Свойства сталей и сплавов, применяемых в котлостроении, 1966, ч. 2, вып. 16, с. 85.
8. Герасимов В. В., Громова А. И. В сб.: «Коррозия реакторных материалов». М., Атомиздат, 1960, с. 191.
9. Левин Н. А., Кочергина Д. Г. «Защита металлов», 1965, т. 1, № 3, с. 257.
10. Черкашина Н. П. «Металловедение и термическая обработка металлов», 1967, № 3, с. 65.
11. Бабаков А. А. «Защита металлов», 1971, т. 7, № 3, с. 23а.
12. Ершова Н. И. и др. «Защита металлов», 1966, т. 2, № 1, с. 83.
13. Бабаков А. А., Приданцев М. В. Коррозионно-стойкие стали и сплавы. М., «Металлургия», 1971.
14. Одесский Д. А., Сокол И. Я. «Химическое и нефтяное машиностроение», 1970, № 2, с. 21.
15. Макарова А. В., Малахова Э. К. «Химическое и нефтяное машиностроение», 1966, № 12, с. 20.
16. Гуляев В. Н., Цыбина И. П. «Теплоэнергетика», 1965, № 10, с. 44.
17. Гуляев В. Н. и др. «Теплоэнергетика», 1967, № 12, с. 32.