

15. Oleinik D.S. Monte Carlo calculation of weakly coupled systems. — Atomic Energy, 2005, v. 99, № 4, p. 694—701.
16. Brown F., Carney S., Kiedrowski B., Martin W. Fission Matrix Capability for MCNP. Part I. Theory. Mathematics & Computation. LA-UR-13-23152, 2013.

17. Забродская С.В., Игнатюк А.В., Кошечев В.Н. и др. РОСФОНД — Российская национальная библиотека оцененных нейтронных данных. — Вопросы атомной науки и техники. Сер. Ядерные константы, 2007, вып. 1—2, с. 3—21.

Поступила в Редакцию 15.11.22

УДК 621.039.548.34

СРАВНЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЯ КОРРОЗИОННОЙ СТОЙКОСТИ СТАЛИ ЭП823 В СВИНЦОВОМ И СВИНЦОВО-ВИСМУТОВОМ ТЕПЛОНОСИТЕЛЕ

Биржевой Г.А., Троянов В.М. (АО «ГНЦ РФ — ФЭИ», г. Обнинск)

e-mail: birzhevoy@ippe.ru

Использование тяжелых жидких металлов в реакторных технологиях и прежде всего в качестве теплоносителя быстрых ядерных реакторов широко изучается во всем мире. Как правило, речь идет об использовании свинца или эвтектики свинец—висмут. В нашей стране сооружается опытно-демонстрационный реактор БРЕСТ ОД-300 со свинцовым теплоносителем, разработан проект реактора СВБР-100, теплоносителем которого является эвтектика свинец—висмут. Однако препятствием для использования тяжелых жидкометаллических теплоносителей является коррозия конструкционных материалов, в первую очередь, элементов активной зоны из-за высокой температуры.

В качестве материала оболочек твэлов, органов регулирования и защиты реакторов БРЕСТ ОД-300 и СВБР-100 выбрана 12%-ная хромистая сталь ферритно-мартенситного класса 16Х12МВСФБР (ЭП823). Марочный состав стали в соответствии с ТУ 14-1-1135—2020 [1] следующий:

C ...	0,14—0,18	V ...	0,2—0,4
Si ...	1,0—1,3	Nb ...	0,2—0,4
Mn ...	0,5—0,8	Ce + La ...	≤0,1
Cr ...	10,0—12,0	S ...	≤0,01
Ni ...	0,5—0,8	P ...	≤0,015
W ...	0,5—0,8	Fe ...	Основа
Mo ...	0,6—0,9		

Установлено, что в зависимости от концентрации кислорода, растворенного в теплоносителе $C_{[O]}$, наблюдаются три механизма взаимодействия свинца и свинца—висмута со сталью. При содержании кислорода $C_{[O]} \leq 10^{-7}\%$ по массе наблюдается жидкометаллическая коррозия стали, заключающаяся в ее растворении, при содержании $C_{[O]} \geq 10^{-5}\%$ по массе отмечается

коррозия, сопровождаемая неконтролируемым окислением стали на большую глубину. При промежуточной концентрации кислорода на поверхности стали образуется защитная оксидная пленка, препятствующая как жидкометаллической, так и кислородной коррозии. Для БРЕСТ ОД-300 и СВБР-100 в качестве рабочего выбран интервал концентрации кислорода $(1—4)10^{-6}\%$ по массе.

Атомная доля свинца в эвтектике свинец—висмут составляет 44,5%. Представляет интерес сравнение скорости коррозии стали ЭП823 в жидком свинце и эвтектике свинец—висмут. Специальных экспериментов в этой области не проводилось, однако есть возможность сравнить их влияние на сталь ЭП823, используя результаты испытаний в неизотермических циркуляционных стендах.

Скорость коррозии стали ЭП823 в жидком свинце и эвтектике свинец—висмут. Доступные данные ограничиваются 1998—2014 гг. и выполнены в АО «ГНЦ РФ — ФЭИ» [2—7]. Большая часть результатов приведена для содержания кислорода $(1—4)10^{-6}\%$ по массе. При этом в работе [4] также отмечается, что сталь ЭП823, предназначенная для использования в качестве оболочек твэлов, выплавляется из особо чистых шихтовых материалов, что обеспечивает ее эксплуатационную надежность при контакте с тяжелыми жидкометаллическими теплоносителями.

Максимальная толщина оксидной пленки на поверхности стали ЭП823 после испытаний в свинце—висмуте при различной температуре приведена в работе [2] (табл. 1). В работе [3] показано, что толщина оксидной пленки после испытаний в свинце при 650 °С и концентрации

растворенного кислорода $(1—4)10^{-6}\%$ по массе в течение 16 тыс. ч составляет 5—10 мкм. Примерно такая же по толщине оксидная пленка наблюдалась в экспериментах при концентрации растворенного кислорода $(1—4)10^{-6}\%$ по массе [4]: 1—8 и 2—10 мкм в испытаниях в свинце при 620 и 650 °С в течение 16 672 ч соответственно, 8—12 мкм — в испытаниях в свинце—висмуте при 600 °С в течение 29 917 ч.

Таблица 1. Максимальная толщина оксидной пленки на стали ЭП823 после испытаний в свинце—висмуте при разной температуре

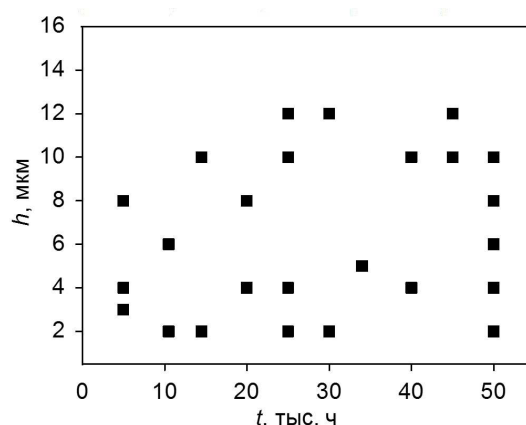
Температура, °С	Содержание кислорода, % по массе	Время испытаний, ч	Максимальная толщина, мкм
620	$8 \cdot 10^{-7}—5 \cdot 10^{-6}$	2598	5
560	$(1—7)10^{-6}$	8000	3
560	$(1—7)10^{-6}$	12 000	5

В работе [5] коррозионные испытания трубчатых образцов из стали ЭП823 в потоке теплоносителя свинец—висмут проводились при концентрации растворенного кислорода $(1—4)10^{-6}\%$ по массе. Суммарное время ресурсных коррозионных испытаний при 600 °С составило 50 135 ч. На рис. 1 приведена микроструктура стали после этих испытаний, на рис. 2 — изменение толщины оксидного слоя на поверхности исследуемых образцов в зависимости от времени испытаний.

В работе [6] приведены результаты стендовых коррозионных испытаний образцов макетов твэлов с оболочкой из стали ЭП823 суммарной длительностью 16 672 ч при 610—620 и 650 °С и содержании кислорода в теплоносителе $(1—4)10^{-6}\%$ по массе. На рис. 3 показана структура стали после испытаний в течение указанного времени, на рис. 4 — изменение толщины ок-



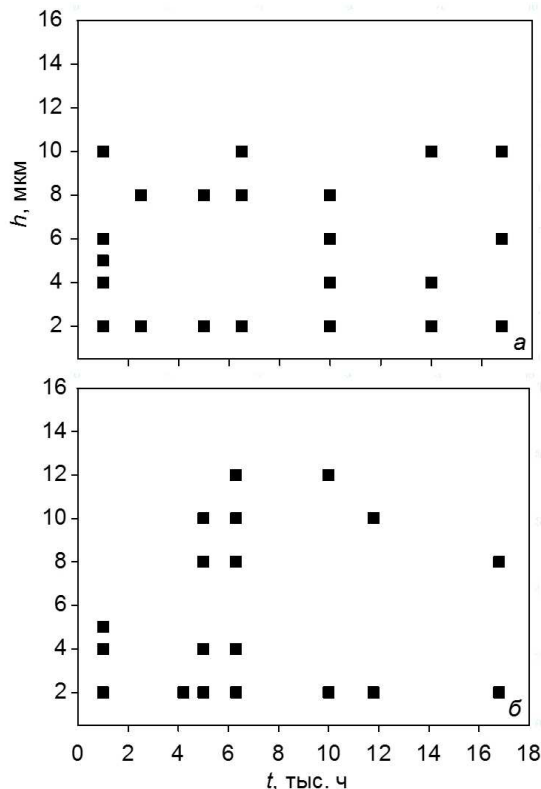
Р и с. 1. Микроструктура стали ЭП823 после коррозионных испытаний в свинце-висмутовой эвтектике длительностью 50 135 ч при $T = 600$ °С, $C_{[O]} = (1—4)10^{-6}\%$ по массе



Р и с. 2. Зависимость толщины оксидного слоя h на поверхности образцов стали ЭП823 от длительности коррозионных испытаний t в свинце-висмутовой эвтектике при $T = 600$ °С, $C_{[O]} = (1—4)10^{-6}\%$ по массе



Р и с. 3. Микроструктура стали ЭП823 после коррозионных испытаний в свинце длительностью 16 672 ч при $T = 650$ °С, $C_{[O]} = (1—4)10^{-6}\%$ по массе



Р и с. 4. Зависимость толщины оксидного слоя на поверхности образцов стали ЭП823 при 610—620 (а) и 650 °С (б), $C_{[O]} = (1—4)10^{-6}\%$ по массе от длительности коррозионных испытаний в свинце

сидного слоя на поверхности исследуемых образцов в зависимости от времени испытаний при 610—620 и 650 °С.

Приведенные в работах [2—6] и на рис. 2, 4 данные показывают, что толщина оксидного слоя на трубчатых образцах, изготовленных из стали ЭП823, при испытаниях как в эвтектике свинец—висмут, так и в жидком свинце при 600—650 °С и содержании кислорода $(1—4)10^{-6}\%$ по массе за время до 17 тыс. ч составляет 1—12 мкм независимо от вида теплоносителя и температуры (табл. 2).

Т а б л и ц а 2. Параметры испытаний и глубина коррозии стали ЭП823 в жидких свинце и свинце—висмуте при концентрации растворенного кислорода $(1—4)10^{-6}\%$ по массе

Теплоноситель	Температура, °С	Время, ч	Толщина оксидной пленки, мкм	Источник
Свинец	650	16 000	5—10	2
»	620	16 672	1—8	3
»	650	16 672	2—10	3
»	610—620	16 672	2—10	5
»	650	16 672	1—12	5
Свинец—висмут	620	2600	5	1
»	600	29 917	8—12	3
»	600	50 135	2—12	4

При испытаниях одновременно протекают два процесса: рост оксидной пленки и ее смыв теплоносителем. Поэтому толщина не может быть критерием скорости коррозии. Однако, как отмечается в работах [5, 6], даже после испытаний в течение 50 135 ч в сплаве свинец—висмут [5] и 16 772 ч в жидком свинце [6] толщина неокисленной части стенки оболочек находится в допустимых пределах для толщины трубы в состоянии заводской поставки. Для ~17 тыс. ч уменьшение толщины не превышает 5 мкм в обоих тяжелых жидкометаллических теплоносителях. Это свидетельствует о том, что скорость смывания незначительна и почти одинакова для обоих теплоносителей, что дает основание считать скорость коррозии стали ЭП823 в указанных теплоносителях близкой.

Как уже отмечалось, в работах [2—6] исследования коррозионной стойкости проводились на стали ЭП823, изготовленной с использованием особо чистых шихтовых материалов. Известно, что свойства материалов напрямую зависят от их качества. В связи с этим коррозионные свойства стали ЭП823, изготовленной с использованием менее чистых материалов, могут существенно отличаться от приведенных в настоящей статье и в каждом отдельном случае нуждаются в экспериментальной проверке.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Прутки из жаропрочной стали марки 16Х12МВБСФБР (ЭП 823-III). ТУ 14-1-1135—2020. М., ВНИИчермет, 2020.
2. Ячменев Г.С., Русанов А.Е., Громов Б.Ф. и др. Проблемы коррозии конструкционных материалов в ТЖМТ. — В сб.: Тяжелые жидкометаллические теплоносители в ядерных технологиях (ТЖМТ-1998). Обнинск, 1998, т. 1, с. 136.
3. Русанов А.Е., Певчих Ю.М., Левин О.Э. и др. Экспериментальная база ГНЦ РФ — ФЭИ по исследованиям коррозии сталей в ТЖМТ: современное состояние и пути развития. — Там же, с. 100.
4. Русанов А.Е., Троянов В.М., Беломятцев Ю.С. и др. Разработка и исследования оболочечных сталей для твэлов ЯЭУ с тяжелым теплоносителем. — Там же, с. 678.
5. Демишонков А.П., Левин О.Э., Дворяшин А.М. и др. Поведение защитных оксидных барьеров при длительных коррозионных испытаниях сталей в ТЖМТ. — В сб.: Тяжелые жидкометаллические теплоносители в ядерных технологиях (ТЖМТ-2008). Обнинск, 2009, т. 2, с. 327.
6. Русанов А.Е., Левин О.Э., Гущина А.Г. и др. Исследование коррозионной стойкости оболочек твэлов из стали ЭП823 после испытаний в потоке Pb—Bi теплоносителя. — В сб.: Тяжелые жидкометаллические теплоносители в ядерных технологиях (ТЖМТ-2013). Обнинск, 2014, т. 1, с. 287.
7. Русанов А.Е., Биржевой Г.А., Левин О.Э. и др. Результаты исследования коррозионной стойкости оболочек твэлов из стали ЭП823 после испытаний в потоке Pb теплоносителя. — В сб.: 3-я Межд. научно-техническая конф. «Инновационные проекты и технологии ядерной энергетики». М., АО «НИКИЭТ», 2014, т. 1, с. 421.

Поступила в Редакцию 19.12.22