

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ АУСТЕНИТНЫХ НЕРЖАВЕЮЩИХ СТАЛЕЙ С ВОДЯНЫМ ПАРОМ В ОБЛАСТИ ТЕМПЕРАТУР 350...1200 °С

Н.И. Ищенко, И.А. Петельгузов, Е.А. Слабоспицкая
Научно-технический комплекс «Ядерный топливный цикл»
ННЦ «Харьковский физико-технический институт», Харьков, Украина
E-mail: ishchenko@kipt.kharkov.ua

Исследовано взаимодействие сталей 08X18N10T и 0X16N15M3B (ЭИ-847) с водяным паром при повышенных температурах от 450 до 1200 °С, а также, для сравнения, при коррозии в воде при 350 °С. Изучены кинетика коррозии, структура оксидных слоев; измерены их толщина и толщина неокисленного металла; определены механические свойства сталей после коррозионных испытаний. При повышении температуры до 700...800 °С отмечены отслаивание верхних оксидных слоев и нерегулярная кинетика привесов, хотя на образцах нарастают и сохраняются оксидные слои. Проанализирован возможный состав оксидных слоев. Окисленные образцы сталей после испытаний при высоких температурах сохраняют прочность и пластичность. Результаты могут представлять интерес при изучении возможности применения сталей в качестве оболочек ТВЭЛОВ.

ВВЕДЕНИЕ

Аустенитные нержавеющие стали известны своей хорошей коррозионной стойкостью при относительно невысоких температурах. Считается, что повышенное сопротивление окислению таких сталей обусловлено в основном легированием сплавов хромом и никелем. Однако представляет интерес исследование окисления таких материалов при более высоких температурах. Также имеет важность максимально длительная пластичность материала оболочек ТВЭЛОВ при аварийных перегревах для сохранения их целостности при послеаварийной выгрузке. Высокотемпературные исследования коррозии аустенитных сталей различного химического состава проводили авторы [1–4].

Целью данной работы является изучение взаимодействия отечественных сталей 08X18N10T и 0X16N15M3B (ЭИ-847) с водяным паром в области температур 350...1200 °С. Исследована кинетика коррозии, определены структура оксида и толщины оксидных слоев, механические характеристики материалов после окисления и степень окисления оболочек. Полученные результаты позволили описать и объяснить коррозионное поведение в водяном паре широко распространенных сталей как одного из возможных вариантов оболочек ТВЭЛОВ для работы при высоких температурах.

1. ИСПЫТАНИЯ И ИССЛЕДОВАНИЯ

1.1. МЕТОДИКА

Для коррозионных испытаний металлов в парах воды при высоких температурах использовали установку, показанную на рис. 1. Она представляет собой электрическую печь с кварцевой трубкой, через которую пропускается пар, образующийся в колбе с кипящей водой. Образцы помещались в кварцевую трубку, периодически взвешивались и исследовались.

Изучали образцы аустенитных нержавеющих сталей 08X18N10T (0,08% С; 17...19% Cr; 9...11% Ni; 2,0% Mn; 0,6% Ti) и ЭИ-847 (0,09% С;

15...17% Cr; 14...16% Ni; 0,8% Mn; 2,5...3,0% Mo; 0,6...0,9% Nb) в виде труб с наружным диаметром соответственно 8,2 и 6,5 мм.

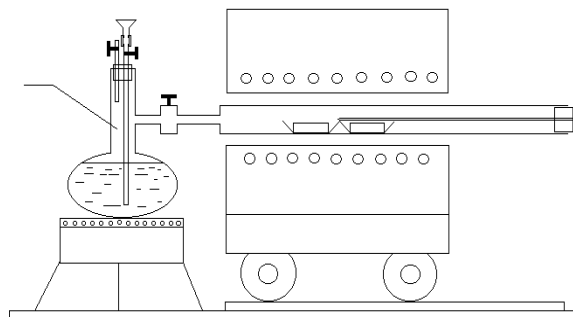


Рис. 1. Установка для коррозионных испытаний образцов нержавеющей сталей

Результаты коррозионных испытаний сталей представлены измерениями массы в течение эксперимента, визуальным наблюдением внешнего вида поверхности образцов и металлографическими данными о структуре и толщине оксидных пленок.

Механические свойства сталей после высокотемпературных испытаний определяли на кольцевых образцах с помощью разрывной машины МР-0,5.

1.2. КИНЕТИКА КОРРОЗИИ И СТРУКТУРА ОКСИДНЫХ СЛОЕВ

1.2.1. Коррозия сталей 08X18N10T и ЭИ-847 в воде при 350 °С

На рис. 2 показаны зависимости изменения массы образцов от времени окисления, которые имеют нерегулярный характер: сначала происходит прирост массы образцов обоих типов сталей, а затем прирост массы снижается. Кинетическая кривая изменения массы для стали ЭИ-847 расположена немного выше, чем кривая для стали 08X18N10T.

На поверхности образцов обеих марок за время испытания образуются оксидные пленки золотистого оттенка. Заметных дефектов поверхности или разрушений пленок на образцах не отмечено.

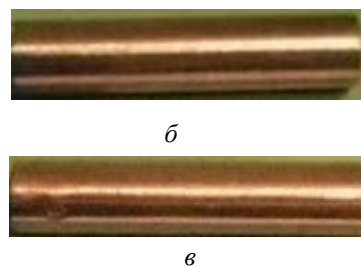
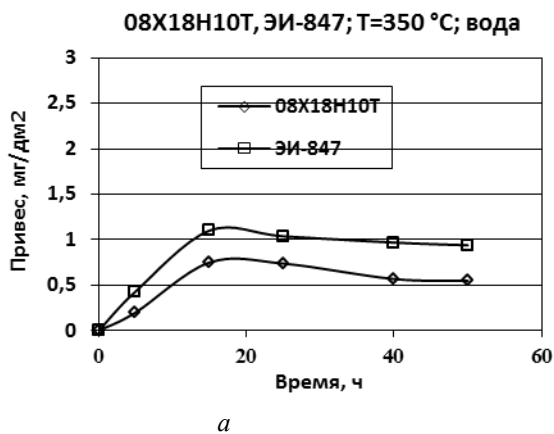


Рис. 2. Кинетика коррозии сталей (а) и внешний вид образцов 08X18H10T (б) и ЭИ-847 (в), выдержка в водяном паре при 350 °C в течение 50 ч

1.2.2. Коррозия сталей 08X18H10T и ЭИ-847 в водяном паре при 450 °C

Кинетика коррозии сталей ЭИ-847 и 08X18H10T при 450 °C (рис. 3,а) в целом сходна с кинетикой при 350 °C. Аналогично расположены и кривые изменения массы – кривая для стали ЭИ-847 проходит выше, чем кривая для стали 08X18H10T, хотя разница невелика.

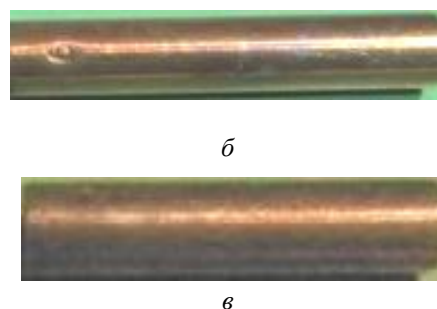
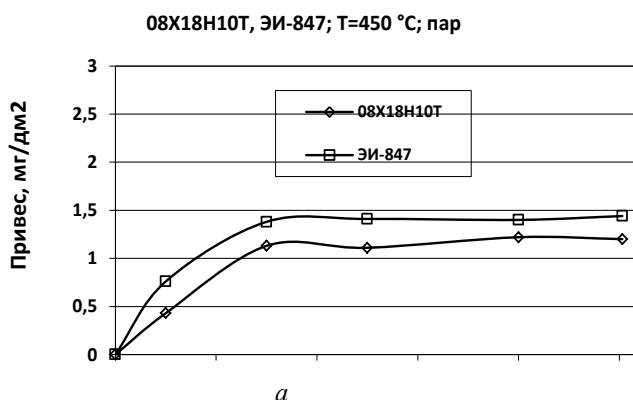


Рис. 3. Кинетика коррозии сталей (а) и внешний вид образцов 08X18H10T (б) и ЭИ-847 (в), выдержка в водяном паре при 450 °C в течение 50 ч

1.2.3. Коррозия сталей 08X18H10T и ЭИ-847 в водяном паре при 800 °C

Кинетика коррозии сталей при 800 °C показана на рис. 4,а. Длительность испытаний 10 ч. Окисление при 800 °C характеризуется сначала прибавкой массы, а после 2...3 ч выдержки

начинается убыль массы окисленных образцов с последующей некоторой стабилизацией изменения массы. Для стали ЭИ-847 кривая изменения массы в данном случае расположена выше, чем кривая для стали 08X18H10T; ход кривых со временем подобный.

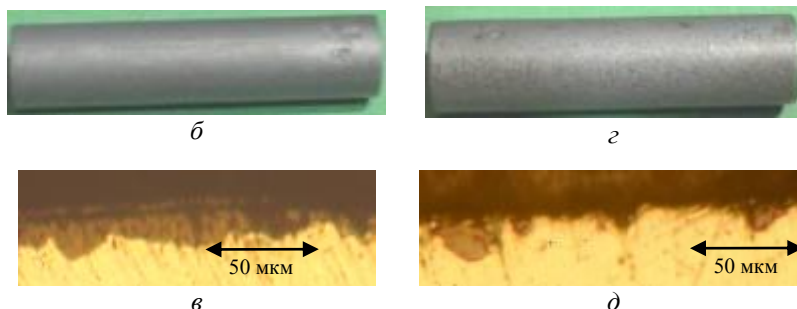
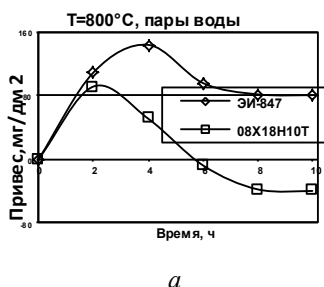


Рис. 4. Испытания образцов сталей при 800 °C в течение 10 ч: кинетика изменения массы образцов (а), их внешний вид и структура оксида на сталях ЭИ-847 (б, в) и 08X18H10T (г, д)

1.2.4. Коррозия сталей 08X18H10T и ЭИ-847 в водяном паре при 900 °С

Проведены испытания сталей ЭИ-847 и 08X18H10T в водяном паре при 900 °С. Результаты испытаний показаны на рис. 5.

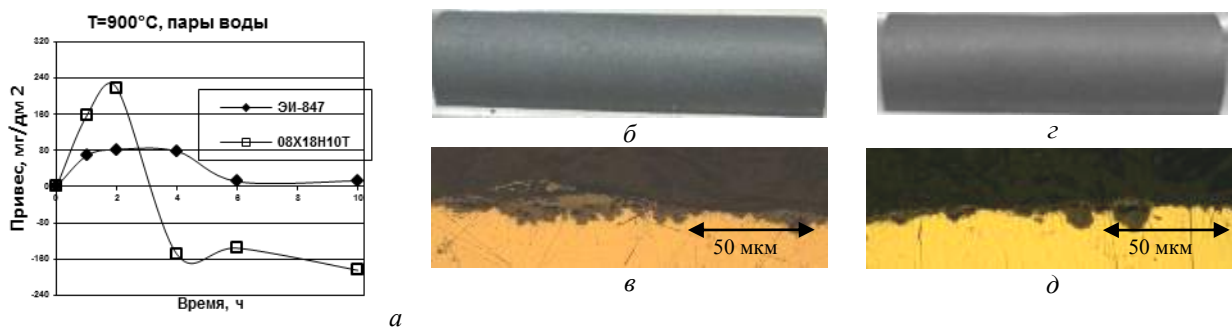


Рис. 5. Испытания образцов сталей при 900 °С в течение 10 ч: кинетика изменения массы образцов (а), их внешний вид и структура оксида на сталях ЭИ-847 (б, в) и 08X18H10T (г, д)

1.2.5. Коррозия сталей 08X18H10T и ЭИ-847 в водяном паре при 1000 °С

Проведены испытания сталей ЭИ-847 и 08X18H10T в водяном паре при 1000 °С. Результаты испытаний приведены на рис. 6.

1.2.6. Коррозия сталей ЭИ-847 и 08X18H10T в водяном паре при 1100 °С

Результаты испытания сталей ЭИ-847 и 08X18H10T в водяном паре при 1100 °С приведены на рис. 7. При этой температуре оксид сохраняет неравномерность, хотя уже образуется как бы «фронт» оксида, который при окислении в течение

Окисление имеет неравномерный характер. Оксид состоит, как минимум, из двух различных фазовых слоев: внутренний более темный, чем внешний, и как бы «внедренный» в подложку, тогда как внешний выступает над ней.

10 ч становится практически ровным, что видно на рис. 8. При визуальных осмотрах наблюдались осыпания оксидов, однако за время испытания происходит увеличение привеса.

1.2.7. Коррозия сталей 08X18H10T и ЭИ-847 в водяном паре при 1200 °С

Проведены испытания сталей ЭИ-847 и 08X18H10T в водяном паре при 1200 °С. Результаты испытаний приведены на рис. 9. Время испытаний составляло 0,5; 1 и 3 ч. Здесь видим сначала увеличение привесов, а затем убыль. Также наблюдалось скалывание и осыпание оксидных слоев.

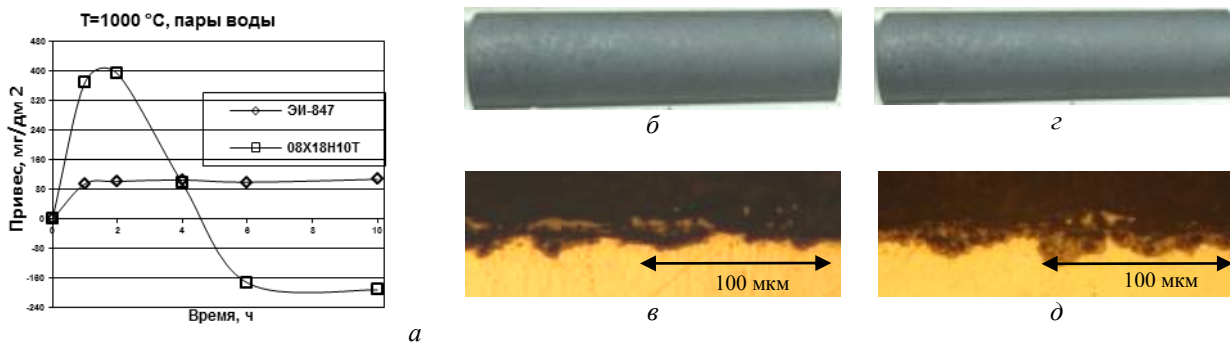


Рис. 6. Испытания образцов сталей при 1000 °С в течение 10 ч: кинетика изменения массы образцов (а), их внешний вид и структура оксида на сталях ЭИ-847 (б, в) и 08X18H10T (г, д)

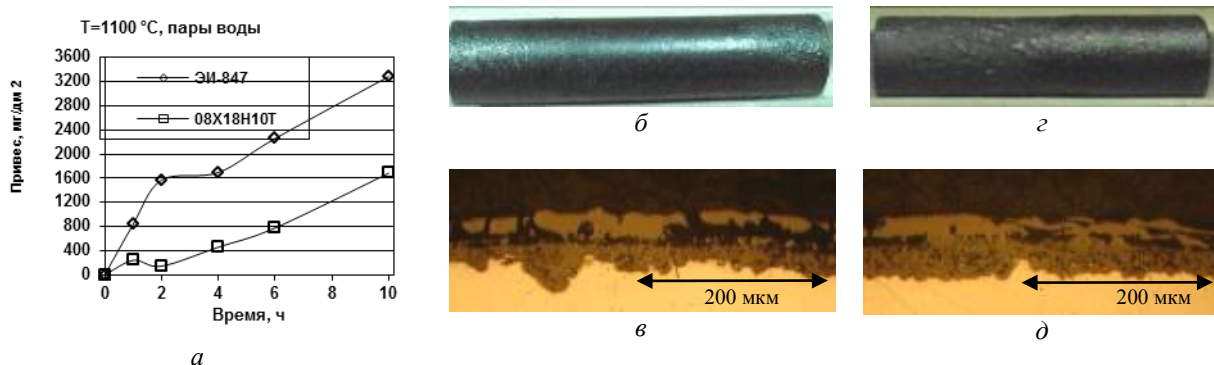


Рис. 7. Испытания образцов сталей при 1100 °С в течение 10 ч: кинетика изменения массы образцов (а), их внешний вид и структура оксида на сталях ЭИ-847 (б, в) и 08X18H10T (г, д). Фотографии внешнего вида и микроструктуры образцов (б–д) приведены после их окисления в течение 1 ч

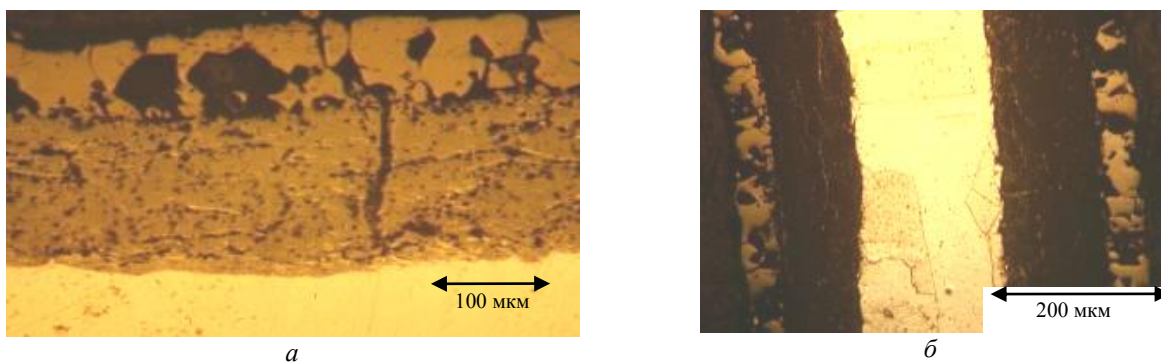


Рис. 8. Оксидный слой (а) и поперечное сечение окисленной трубы (б) из стали 08X18H10T после выдержки в водяном паре при 1100 °С в течение 10 ч. Толщина оксидного слоя до 300 мкм. Толщина непрокорродировавшей части образца 200 мкм

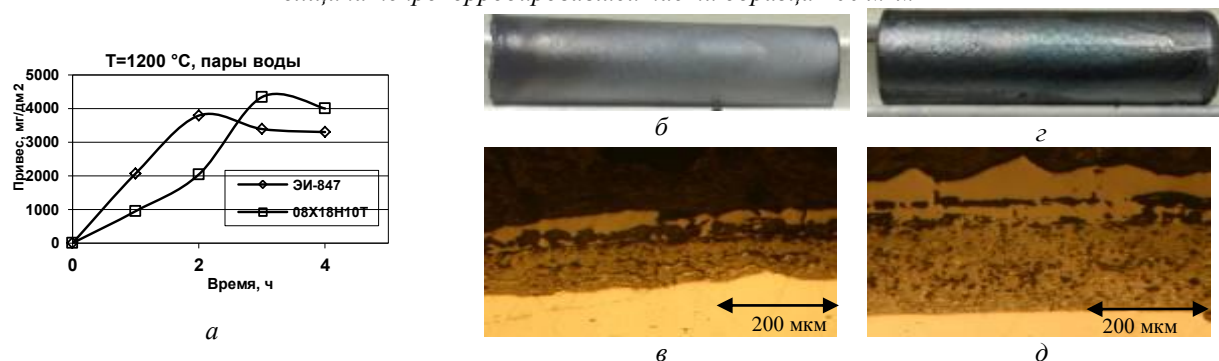


Рис. 9. Испытания образцов сталей при 1200 °С в течение 10 ч: кинетика изменения массы образцов (а), их внешний вид и структура оксида на сталях ЭИ-847 (б, в) и 08X18H10T (г, д). Фотографии внешнего вида и микроструктуры образцов (б–д) приведены после их окисления в течение 0,5 ч

1.2.8. Дополнительное исследование микроструктуры

Были исследованы микроструктуры сталей в исходном состоянии и после испытаний. При температурах до 1000 °С микроструктура близка к исходной, однако можно видеть (рис. 10,а), что после выдержки в паре при 1100 °С в течение 10 ч микроструктура стали 08X18H10T существенно изменилась, и размер зерна практически достиг

толщины оставшейся неокисленной оболочки (более 200 мкм (см. рис. 10,б)). Такой рост зерен может быть связан с растворением карбидов в стали при повышенных температурах.

Также были измерены толщина оксидного слоя на образцах и остаточная толщина непрореагировавшей оболочки. Результаты приведены в табл. 1 и 2.

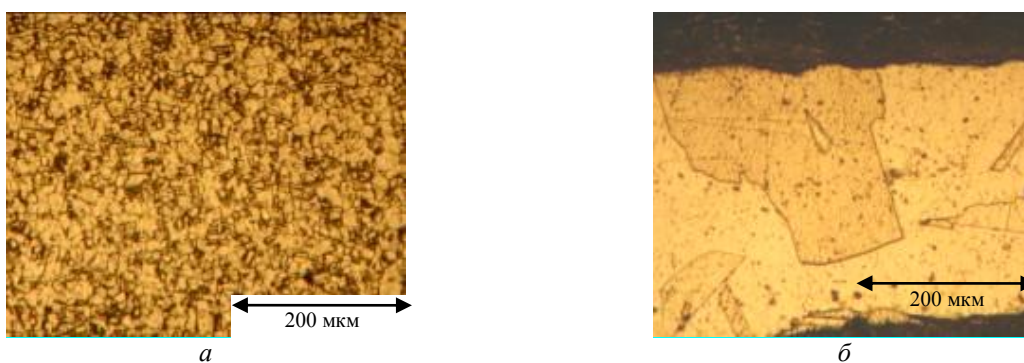


Рис. 10. Микроструктуры стали 08X18H10T после выдержки в паре в течение 10 ч при 1000 (а) и 1100 °С (б)

Таблица 1

Толщина оксидного слоя на образцах после окисления в парах воды по данным металлографии

| Параметры окисления | Сталь 08X18H10T | Сталь ЭИ-847 |
|---------------------|-----------------|---------------|
| 800 °С, 10 ч | до 15 мкм | 20 мкм |
| 900 °С, 10 ч | до 20 мкм | 20 мкм |
| 1000 °С, 10 ч | 65 мкм | 50 мкм |
| 1100 °С, 1ч | до 60 мкм | до 60 мкм |
| 1100 °С, 10 ч | 300 мкм | Нет данных |
| 1200 °С, 0,5 ч | Около 200 мкм | 100...120 мкм |

Таблица 2

Оценка остаточной толщины и степени окисления оболочки при двустороннем окислении

| Параметры окисления | Остаточная толщина оболочки*, мкм (степень окисления, %) | |
|---------------------|--|-----------|
| | 08X18H10T | ЭИ-847 |
| Неокисл. | 650 | 350 |
| 1100 °С, 1ч | 500 (23%) | 240 (31%) |
| 1200 °С, 0,5 ч | 450 (31%) | 200 (42%) |
| 1000 °С, 10 ч | – | 280 (20%) |
| 1100 °С, 10 ч | 320 (51%) | – |

*Остаточная толщина оболочки $\delta = |h - h_0|$; степень окисления (локальная глубина окисления), %, ЛГО (%) = $|h - h_0| / h_0 \cdot 100$, где h_0 – исходная толщина оболочки, h – толщина оставшейся неокисленной части оболочки после окисления.

1.3. ОПРЕДЕЛЕНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ СТАЛЕЙ 08X18H10T И ЭИ-847 ПОСЛЕ ОКИСЛЕНИЯ

Данные о механических испытаниях окисленных образцов в широком диапазоне температур приведены в табл. 3, 4. Из приведенных данных видно, что для стали 08X18H10T механические свойства мало изменились после высоко-

температурного окисления по сравнению с исходными, до испытания, данными: прочностные – от 62,0 до 49,1 кг/мм² (на 21%), пластические – от 23,1 до 21,1% (на 9%). Свойства стали ЭИ-847 изменились таким образом: прочность уменьшилась от 58,6 до 20,0 кг/мм², а пластичность мало изменилась – от 20,8 до 13,8%.

Таблица 3

Механические свойства окисленных образцов стали 08X18H10T в зависимости от условий окисления

| Сплав | Параметры окисления | Механические испытания, кратковременная прочность | | | | | |
|-------------------|---------------------|---|-------------------------------------|--------------|---------------------------------|-------------------------------------|--------------|
| | | при 20 °С | | | при 350 °С | | |
| | | σ_B , кг/мм ² | $\sigma_{0,2}$, кг/мм ² | δ , % | σ_B , кг/мм ² | $\sigma_{0,2}$, кг/мм ² | δ , % |
| 08X18H10T, трубка | Исходное состояние | 64,4 | 42,7 | 65 | 49,5 | 39,2 | 23,0 |
| 08X18H10T | 450 °С, 10 ч | 62,0 | 44 | 61,0 | 42,0 | 36,4 | 24,0 |
| То же | 800 °С, 10 ч | 52,1 | 36,6 | 41,6 | 39,2 | 31,3 | 21,2 |
| –“– | 900 °С, 10 ч | 55,0 | 37,5 | 49,0 | 37,0 | 29,7 | 24,0 |
| –“– | 1000 °С, 1 ч | 52,1 | 39,1 | 42,2 | 32,5 | 28,7 | 21,4 |
| –“– | 1100 °С, 1 ч | 52,1 | 33,7 | 40,3 | 33,0 | 30,0 | 20,0 |
| –“– | 1200 °С, 0,5 ч | 32,1 | 24,8 | 24,7 | 21,8 | 20,3 | 21,3 |
| –“– | 1000 °С, 30 с | 53,8 | 37,1 | 53,1 | 36,2 | 33,0 | 22,2 |
| –“– | 1100 °С, 30 с | 51,5 | 38,1 | 43,2 | 35,6 | 33,15 | 19,1 |
| –“– | 1200 °С, 30 с | 49,1 | 34,3 | 55,0 | 32,4 | 28,5 | 21,1 |

Таблица 4

Механические свойства окисленных образцов стали ЭИ-847 в зависимости от условий окисления

| Сплав | Параметры окисления | Механические испытания, кратковременная прочность | | | | | |
|--------|---------------------|---|-------------------------------------|--------------|---------------------------------|-------------------------------------|--------------|
| | | при 20 °С | | | при 350 °С | | |
| | | σ_B , кг/мм ² | $\sigma_{0,2}$, кг/мм ² | δ , % | σ_B , кг/мм ² | $\sigma_{0,2}$, кг/мм ² | δ , % |
| ЭИ-847 | Исходн. состояние | 58,5 | 41,5 | 39,0 | 48,2 | 36,5 | 20,8 |
| То же | 450 °С, 10 ч | 58,8 | 43,1 | 26,6 | 44,0 | 33,6 | 21,3 |
| –“– | 800 °С, 10 ч | 56,1 | 43,5 | 24,6 | 41,2 | 37,0 | 19,0 |
| –“– | 900 °С, 10 ч | 57,6 | 37,7 | 39,1 | 43,0 | 34,0 | 19,6 |
| –“– | 1000 °С, 30 с | 47,6 | 37,0 | 35,8 | 42,0 | 34,2 | 19,2 |
| –“– | 1000 °С, 0,5 ч | 47,6 | 37,0 | 35,8 | 38,8 | 34,8 | 18,5 |
| –“– | 1000 °С, 1 ч | 48,1 | 39,2 | 32,6 | 35,8 | 34,8 | 13,0 |
| –“– | 1100 °С, 30 с | 39,0 | 34,3 | 28,6 | 35,0 | 32,2 | 16,0 |
| –“– | 1100 °С, 0,5 ч | 39,0 | 34,3 | 28,6 | 34,9 | 31,0 | 25,0 |
| –“– | 1100 °С, 1 ч | 20,5 | 21,2 | 17,8 | 19,3 | 18,7 | 18,6 |
| –“– | 1200 °С, 30 с | 29,3 | 28,0 | 28,7 | 21,1 | 19,0 | 15,5 |
| –“– | 1200 °С, 0,5 ч | 29,0 | 28,0 | 28,7 | 22,0 | 20,8 | 14,7 |
| –“– | 1200 °С, 1 ч | 20,2 | 18,3 | 18,2 | 19,15 | 18,5 | 13,8 |

2. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Коррозионные исследования сталей были проведены в широком диапазоне: от температуры при эксплуатации в реакторах ВВЭР (350 °С) [5–9] до температуры максимальной проектной аварии в водо-водяных реакторах (1200 °С) [1–4, 10–12].

Исследования показали, что стали обладают высокой коррозионной стойкостью при рабочих температурах эксплуатации, хотя их коррозия сопровождается некоторой потерей массы в виде осыпающихся или растворяющихся продуктов коррозии. По данным [8], при таких температурах на внешней поверхности образуется рыхлый слой α -(Fe,Cr)₂O₃ (оксид со структурой гематита, промежуточный между Fe₂O₃ и Cr₂O₃) в виде кристаллитов, который мог образоваться в результате повторного осаждения железа, растворенного в воде, а вблизи поверхности с металлом – слой шпинели (возможно FeCr₂O₄ [9]).

При повышении температуры нагрева образцов сталей скорость коррозии повышается, но и увеличивается склонность к потере окалины и ее осыпанию. При всех температурах в диапазоне 800...1200 °С на фотографиях общего вида большинства образцов (см. рис. 5–9) оксидная пленка имеет как бы «зернистую» поверхность, что может говорить как о неоднородности по структуре пленки, так и о ее рыхлости и отслоении.

Тем не менее, до температур порядка 800...900 °С оба вида сталей сохраняют достаточно высокую стойкость. При испытаниях в области температур 900...1100 °С в течение 1 ч и при 1200 °С в течение 0,5 ч трубки-оболочки сохраняли свою форму, но с частичным осыпанием оксидных слоев.

При температурах 800...900 °С граница раздела между подложкой и сталью является неравномерной. В основном наблюдали участки локальной усиленной коррозии. В промежутках между ними расположена более тонкая (1...2 мкм) оксидная пленка. Она, как правило, состоит из двух слоев с различной структурой. Внешний слой более светлый, чем внутренний. Подобный рост оксида на сталях наблюдали в работах [10, 11]. Авторы [10] выявили, что углубления в основном образуются на отдельных зернах, в то время как в местах выхода границ зерен на поверхность металла, пленка значительно более тонкая. Согласно данным [11] в оксиде в основном представлены соединения Cr₂O₃ и Fe₃O₄, причем, наибольшее содержание Cr₂O₃ (73%) наблюдалось вблизи границы с металлом. Внешний же, светлый, оксид имеет наибольшее содержание Fe₃O₄ (79%). По данным авторов [11], зоны усиленного окисления обогащены железом, а более коррозионно-стойкие зоны – хромом.

При 1000 °С участки локальной коррозии начинают сливаться между собой, а при температурах 1100 °С и выше коррозионный фронт становится равномерным. Возможно, вблизи поверхности сталей первоначально возникает оксид с обогащением по хрому и защитными свойствами, особенно выраженными вблизи границ зерен (из-за

сегрегации хрома на границах), однако со временем кислород преодолевает этот барьер, его защитные свойства деградируют, и фронт окисления становится равномерным.

Коррозионная пленка на ЭИ-847 при 1100...1200 °С состоит из трех слоев: внутреннего мелкозернистого темного цвета и двух внешних, более светлых и однородных, разделенных образованиями, похожими на поры. Во внутреннем, ближайшем к металлу, слое имеются светлые, возможно металлические, прослойки.

Авторы [4] методом платиновой метки показали, что внутренний темный массивный слой растет в результате диффузии кислорода внутрь, а внешние светлые слои – за счет диффузии ионов металла наружу.

Авторы [12] идентифицируют фазы (слои), образующиеся на аустенитной стали 316 после окисления при 1200 °С, следующим образом: вблизи поверхности раздела со сталью образуется тонкий слой оксида хрома, далее идет слой с мелкозернистой рыхлой структурой, представляющий собой Cr-Fe-шпинель, затем идут два крупнозернистых слоя, которые на полированном шлифе могут выглядеть практически гладкими и разделяться только цепью пор. Один из этих слоев обогащен никелем, а внешний слой представляет собой смесь такого железоникелевого оксида (шпинели) с максимально чистым оксидом железа (гематитом Fe₂O₃).

По-видимому, наружные слои, обогащенные фазами оксидов железа типа гематита, склонны к постоянному растворению в воде, отслаиванию или осыпанию при коррозии в паре. В связи с последним обстоятельством окисление образцов сталей сопровождается убылью массы образцов.

Образец из стали ЭИ-847 за 10 ч окисления при 1100 °С разрушился, а на образце из стали 08X18H10T за такое же время образовалась оксидная пленка толщиной до 300 мкм.

Важные сведения дают механические испытания. Проведенные после окисления в широком температурном диапазоне (450...1100 °С) испытания выявили высокие прочностные и пластические свойства в условиях окисления и сохранение их после выдержек при высоких температурах (до 1200 °С) в течение 0,5...1 ч, что превышает длительность возможного аварийного перегрева.

Поскольку коррозионной средой в аварийных ситуациях является вода или пар, то продуктом коррозионного взаимодействия сталей со средой будут оксиды в разной форме и водород. В случае коррозии сталей «коррозионный» водород не может поглощаться материалом сталей в больших количествах, а будет выделяться в реакторное пространство.

Из-за низкой растворимости водорода в сталях весь коррозионный водород практически уйдет в газовую среду. С другой стороны, малая растворимость водорода в сталях способствует тому, что свойства сталей почти не меняются, не наблюдается водородного охрупчивания.

Наблюдающиеся некоторые снижения прочности и пластичности с повышением температуры и длительности испытаний, возможно, связаны с процессами окисления, ростом зерен и термическим старением сталей при высоких температурах.

Особенностью окисления нержавеющей сталей в воде и паре является то, что образующиеся на них оксидные пленки способны в водной среде к частичному растворению, а в паровой коррозионной среде склонны к осыпанию, отслаиванию, причем в значительных количествах. Проведенные нами взвешивания в связи со сказанным не дают полной информации о скорости коррозии или приросте слоев оксида, а являются вспомогательным методом. Поэтому в таких случаях для определения скорости окисления или скорости разрушения металла мы применили дополнительно металлографический способ оценки толщины оксидного слоя и степени окисления.

ВЫВОДЫ

1. Коррозионная стойкость сталей в водной среде при рабочей температуре поверхности твэлов (350 °С) в режиме нормальной эксплуатации является высокой, хотя наблюдается незначительная убыль массы образцов за счет потери продуктов коррозии. На стали ЭИ-847 оксидные пленки более плотные, чем на стали 08X18N10T, при рассмотренных условиях испытаний в течение 5000 ч. Однако, с точки зрения обеспечения коррозионной стойкости, обе стали могут применяться в качестве оболочек твэлов в реакторах типа ВВЭР.

2. При повышении температуры выдержки в водно-паровой среде скорость коррозии повышается. Закономерности окисления характеризуются нестабильной кинетикой, что объясняется возможным растворением слоев с поверхности в воде, слабой адгезией с нижележащими слоями оксидных пленок, приводящей к их откалыванию или осыпанию, и слабой спекаемостью (взаимосцеплением) продуктов коррозии.

3. Коррозионные характеристики сталей 08X18N10T и ЭИ-847 обеспечивают сохранение формы трубчатых образцов при нагреве до 1200 °С и выдержке не менее получаса. При нагреве до 1100 °С образцы сохраняют форму и при выдержке в течение 3 ч, а при более низких температурах (1000 °С и ниже) образцы сохраняют форму в течение 10 ч (по данным испытаний).

4. Образцы сталей 08X18N10T и ЭИ-847 сохраняют высокие механические свойства при нагреве и выдержке в паре до 1100...1200 °С. Прочность стали 08X18N10T после выдержки при 1100 °С в течение 1 ч составляла 33,0 кг/мм², а относительное удлинение не снизилось ниже 20%. Сталь ЭИ-847 имеет близкие к стали 08X18N10T прочностные и пластические характеристики и сохраняет их при высоких температурах продолжительное время.

5. С точки зрения обеспечения целостности труб из сталей 08X18N10T и ЭИ-847, в случае перегревов

до высоких температур такие трубы могут успешно выдерживать нагревы до 1100...1200 °С, пребывание при этих температурах в течение более 30...60 мин и охлаждение до комнатных температур без разрушения оболочек с сохранением достаточной пластичности.

При более высоких температурах и длительностях пребывания в данной области температур, по-видимому, возможно полное окисление оболочек с их охрупчиванием и разрушением.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. В.А. Pint, К.А. Terrani, М.Р. Brady, et al. High temperature oxidation of fuel cladding candidate materials in steam-hydrogen environments // *J. Nucl. Mater.* 2013, v. 440, p. 420-427.

2. Т. Cheng, J.R. Keiser, М.Р. Brady, et al. Oxidation of fuel cladding candidate materials in steam environments at high temperature and pressure // *J. Nucl. Mater.* 2012, v. 427, p. 396-400.

3. Y. Yan, J.R. Keiser, К.А. Terrani, et al. Post-quench ductility evaluation of Zircaloy-4 and select iron alloys under design basis and extended LOCA conditions // *J. Nucl. Mater.* 2014, v. 448, p. 436-440.

4. S. Leistikow, G. Schanz, Z. Zurek. Comparison of high temperature steam oxidation behavior of zircaloy-4 versus austenitic and ferritic steels under light water reactor safety aspects Kernforschungszentrum Karlsruhe, Institut für Material- und Festkörperforschung: *Projekt Nukleare Sicherheit KfK 3994, 1985 paper presented to the polish-German Seminar on "Properties of High Temperature Alloys"*, Cracow, Poland, July 3–6, 1985.

5. В.С. Красноруцкий, И.А. Петельгузов, В.М. Грицина, Е.А. Слабоспицкая, В.А. Зук, М.В. Третьяков, Р.А. Рудь, Н.И. Ищенко. Исследование процессов коррозии материалов активной зоны реакторов типа ВВЭР // *Проблеми корозії та протикорозійного захисту матеріалів*. Львів, 2010, №8, с. 667-674.

6. В.С. Красноруцкий, И.А. Петельгузов, В.М. Грицина, В.А. Зук, М.В. Третьяков, Р.А. Рудь, Н.В. Свичкар, Е.А. Слабоспицкая, Н.И. Ищенко. Коррозия нержавеющей сталей в условиях имитирующих теплоноситель первого контура реакторов ВВЭР-1000. Коррозионное поведение смешанных загрузок топлива // *Вопросы атомной науки и техники. Серия «Физика радиационных повреждений и радиационное материаловедение»*. 2011, №2(72), с. 80-87.

7. В.С. Красноруцкий, И.А. Петельгузов, В.М. Грицина, В.А. Зуйок, М.В. Третьяков, Р.О. Рудь, О.О. Слабоспицкая, Н.И. Ищенко, Н.В. Свичкар. Вплив на корозію нержавіючих сталей і цирконієвих сплавів добавки Zn до складу теплоносія першого контура реакторів ВВЕР-1000 // *Вопросы атомной науки и техники. Серия «Физика радиационных повреждений и радиационное материаловедение»*. 2014, №2(90), с. 53-61.

8. W. Kuang, X. Wu, E.-H. Han. The oxidation behaviour of 304 stainless steel in oxygenated high

temperature water // *Corrosion Science*. 2010, v. 52, p. 4081-4087.

9. Y.-J. Kim. Effect of variations in simulated BWR water chemistry on ECP and electrochemistry of structural materials // *EPRI FRP WG-4 Meeting*, Freeport, ME, July 26, 2006.

10. H.G. Simms. Oxidation behaviour of austenitic stainless steels at high temperature in supercritical plant // *A thesis submitted to the University of Birmingham for the degree of MASTER of RESEARCH*. The University of Birmingham, 2011.

11. K.A. Habib, M.S. Damra, J.J. Saura, et al. Breakdown and Evolution of the Protective Oxide Scales of AISI 304 and AISI 316 Stainless Steels under High-Temperature Oxidation // *International Journal of Corrosion*. 2011, v. 2011, article ID 824676.

12. M. Jepson, R.L. Higginson. The use of EBSD to Study the Microstructural Development of Oxide Scales on 316 Stainless Steel // *High Temperature Materials*. 2005, v. 22, p. 195-200.

Статья поступила в редакцию 17.09.2015 г.

ВЗАЄМОДІЯ АУСТЕНІТНИХ НЕРЖАВІЮЧИХ СТАЛЕЙ З ВОДЯНИМ ПАРОМ В ОБЛАСТІ ТЕМПЕРАТУР 350...1200 °С

Н.І. Іщенко, І.А. Петельгузов, О.О. Слабоспицька

Досліджено взаємодію сталей 08X18H10T и 0X16H15M3Б (EI-847) з водяним паром при підвищених температурах від 450 до 1200 °С, а також, для порівняння, при корозії у воді при 350 °С. Вивчені кінетика корозії, структура оксидних шарів; виміряні їх товщина і товщина неокисленого металу; визначені механічні властивості сталей після корозійних випробувань. При підвищенні температури до 700...800 °С відзначено відшарування верхніх оксидних шарів і нерегулярна кінетика прибутку маси, хоч на зразках наростають і зберігаються оксидні шари. Проаналізовано можливий склад оксидних шарів. Окислені зразки сталей після випробувань при високих температурах зберігають міцність і пластичність. Результати можуть бути корисними при дослідженні можливості застосування сталей в якості оболонок твелів.

INTERACTION OF AUSTENITIC STAINLESS STEELS WITH STEAM IN TEMPERATURE RANGE 350...1200 °C

N.I. Ishchenko, I.A. Petelguzov, O.O. Slabospyska

Interaction of steels 08Cr18Ni10Ti і 0Cr16Ni15Mo3Nb (EI-847) with steam at elevated temperatures from 450 to 1200 °C and for comparison water corrosion at 350 °C were investigated. Corrosion kinetics and oxide layer structure were studied, thicknesses of oxide layers and of unoxidized metal were measured, mechanical properties of steels after corrosion tests were determined. After tests at temperatures up to 700...800 °C the exfoliating of the top oxide layers and irregular mass gain kinetics were observed, despite oxide layers grew and were preserved on samples. The possible composition of oxide layers was analyzed. The oxidized samples of steels after high-temperature tests still had strength and plasticity. The results can be of interest when examining the possibility of using steels as fuel cladding.