

УДК 621.039;620.19

ОСОБЕННОСТИ КОРРОЗИОННО-ЭРОЗИОННОГО ИЗНОСА ТРУБНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ НА АЭС С ВВЭР-1000

**Л.С. Ожигов¹, А.С. Митрофанов¹, Е.А. Крайнюк¹, А.Г. Руденко¹, В.Г. Лесная¹,
А.В. Бажуков², П.Е. Мельник², А.Н. Палий²**

¹*Национальный научный центр «Харьковский физико-технический институт»*
²*ОП «Южно-Украинская АЭС», г. Южноукраинск*

С использованием металлографических методов и механических испытаний был исследован характер коррозионно-эрозионного изнашивания (КЭИ) плоскоспиральных трубных элементов (ПСТЭ) из стали 20 на ЮУАЭС. Показано, что причиной КЭИ является полосчатость феррито-перлитной структуры, реализующейся в результате пластической деформации при производстве труб. В условиях эксплуатации перлит окисляется и вымывается потоками теплоносителя. Таким образом, на поверхности образуется ямочный рельеф из ферритного каркаса, стимулирующий эрозию и непрерывный процесс КЭИ.

Введение

Коррозионно-эрозионный износ (КЭИ) является распространенным видом повреждений элементов, изготовленных из феррито-перлитной углеродистой стали. Вопросы КЭИ трубопроводов АЭС конденсатно-питательного тракта рассмотрены в ряде работ [1 - 5]. Анализ литературных данных показывает, что проблема КЭИ является сложной и определяется одновременным воздействием таких факторов, как химический состав металла, водно-химический режим, геометрия трубопроводов, гидродинамика потоков, продолжительность эксплуатации и целого ряда других. Механизм КЭИ изучен недостаточно. В некоторых случаях считается, что основной причиной износа является повышенное содержание веществ с окислительно-восстановительным воздействием, приводящее к химическому или электрохимическому взаимодействию рабочей среды с металлом и, как следствие, разрушению последнего. Альтернативой этому может быть эрозионное повреждение защитного оксидного слоя, которое в дальнейшем провоцирует прямое коррозионное воздействие водной среды на поверхность стали. В условиях эксплуатации процессы коррозии и эрозии могут протекать совместно. На практике установлено, что процессы КЭИ усиливаются в областях с высокими тепловыми и механическими нагрузками, когда происходят разрывы защитной оксидной пленки. Большую роль при этом играют механические свойства металла, от которых в значительной степени зависит сопротивляемость его коррозионно-эрозионным процессам. При решении проблем повреждаемости металла главной задачей является определение доминирующего механизма разрушения в каждом конкретном случае.

Постановка цели и задач научного исследования

Цель данной работы – получение представлений о характере и механизме износа металла труб на основании экспериментальных исследований эксплуатационных повреждений плоскоспиральных трубных элементов подогревателя высокого давления после длительной работы в составе второго контура АЭС с ВВЭР-1000.

Для достижения данной цели были поставлены следующие задачи: получение фрагментов плоскоспиральных трубных элементов с эксплуатационными повреждениями, изготовление шлифов для проведения металлографических исследований, изготовление образцов из труб и проведение механических испытаний в целях получения характеристик прочности и пластичности металла плоскоспиральных трубных элементов.

Объект исследований – механизм коррозионно-эрозионного износа плоскоспиральных трубных элементов после длительной эксплуатации.

Предмет исследований – микроструктура и механические свойства металла плоскоспиральных трубных элементов подогревателей высокого давления в составе второго контура АЭС с ВВЭР-1000.

Методика исследований

Плоскоспиральный трубный элемент (ПСТЭ) показан на рис. 1, а. Диаметр внешнего витка спирали достигает 956 мм. ПСТЭ изготовлены из труб наружным диаметром 32 мм с толщиной стенки 4 мм. Материал труб – сталь 20. Элемент вырезан из системы подогрева питательной воды парогенератора по причине сквозного износа стенок (на рис. 1, б – показан стрелкой). Условия работы ПСТЭ: наружная сторона омывается паром с температурой 210...230 °С. Питательная вода прокачивается через ПСТЭ со скоростью около 3 м/с при давлении 120 кгс/см².

Статистика повреждений показывает, что износу с утонением стенки труб в большинстве случаев подвергается внутренняя поверхность на растянутой стороне гибов ПСТЭ. Образцы стали с различным износом, вырезанные из ПСТЭ после длительной эксплуатации, были исследованы с помощью металлографии и механических испытаний. Для сопоставления механических свойств металла с различной степенью износа были проведены испытания сегментных образцов, которые изготавливали в виде полос из участков с внутренней и внешней сторон гибов ПСТЭ. Схема вырезки образцов показана на рис. 1, в.

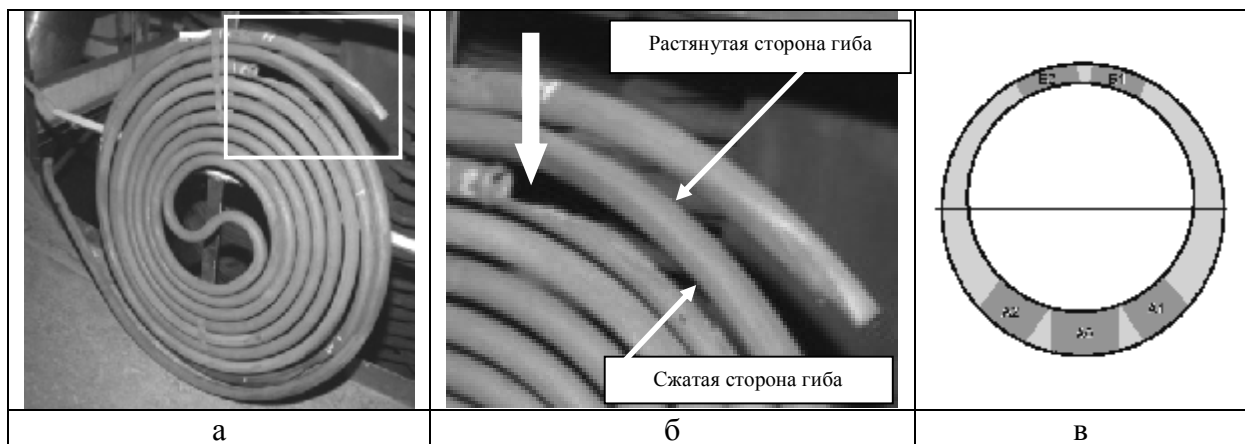


Рис. 1. Плоскоспиральный трубный элемент: а – общий вид, б – фрагмент с изношенным участком (показан стрелкой), в – схема вырезки сегментных образцов (А – сжатая, Б – растянутая сторонагиба)

Испытания образцов на растяжение проводили на испытательной машине Instron 5581, позволяющей проводить запись диаграмм нагрузка – удлинение (P–Δl) с определением механических характеристик [6]. Металлографические исследования структуры

проводились с помощью светового микроскопа ММО-1600 с тринокулярном и цифровой фотокамерой. Определение микротвердости производили с помощью микротвердомера ПМТ-3.

Результаты и их обсуждение

В результате механических испытаний были определены механические свойства стали 20 растянутых и сжатых участков гибов ПСТЭ с разной степенью износа: предел текучести ($\sigma_{0,2}$), предел прочности на разрыв (σ_B) и характеристики пластичности (относительное удлинение $\delta_{отн.уд.}$). Особенности материала обуславливали то, что испытанные сегментные образцы не были идентичны по толщине и степени износа рабочих поверхностей. Образцы не соответствовали требованиям стандартов, поэтому полученные значения (табл. 1) можно применять лишь в плане поставленной задачи – сопоставления свойств металла на разных участках ПСТЭ, но нельзя относить строго к механическим свойствам стали 20.

Т а б л и ц а 1

Свойства металла из различных участков ПСТЭ

Мех. свойства Положение образца (см. рис. 1, в)	$\sigma_{0,2}$, МПа	σ_B , МПа	$\delta_{отн.уд.}$, %
A0	266,3	420,8	25,4
A1	295,5	452,3	15,2
A2	252,3	406,5	26,3
B1	283,3	436,6	8,9
B2	296,4	438,2	13,1

По результатам механических испытаний (см. табл. 1) можно видеть, что средние значения пределов прочности и текучести стали на противоположных сторонах гибов мало различаются между собой (табл. 2).

Т а б л и ц а 2

Средние значения результатов испытаний сегментных образцов на сжатой и растянутой сторонах гибов ПСТЭ

Механические свойства Образцы	$\sigma_{0,2}$, МПа	σ_B , МПа	$\delta_{отн.уд.}$, %
Сжатая сторона гiba	265,6	417,5	22,3
Растянутая сторона гiba	283,2	428,3	11,0

Материал труб, примененных для изготовления ПСТЭ, согласно техническим условиям [11], имел следующие характеристики при комнатной температуре:

- σ_B – предел прочности – 403,8...538,0 МПа;
- $\sigma_{0,2}$ – предел текучести – 211,7 МПа;
- δ – относительное удлинение – не менее 24 %.

Прочностные характеристики, полученные на испытанных образцах, несмотря на несоответствие их стандартам, лежат в рамках требований технических условий. Относительное удлинение на сжатой стороне гибов приблизительно в два раза выше, чем на растянутой, однако, по нашему мнению, это не может быть причиной повышенного износа растянутой стороны.

Металлографические исследования выполняли на образцах, взятых из фрагментов ПСТЭ в местах с различным износом. Исследовали микроструктуру на микрошлифах, выполненных в разных сечениях труб, а также микротвердость. На микрошлифах в поперечном сечении неизношенных фрагментов ПСТЭ наблюдается однородная равноосная феррито-перлитная мелкозернистая микроструктура, свойственная низкоуглеродистой трубной стали 20 (рис. 2, а), причем микроструктура одинакова как на сжатых, так и на растянутых сторонах гибов. По величине зерна (балл 8–7, что составляет 10...20 мкм, соответственно) и наличию неметаллических включений микроструктура соответствует ТУ14-3Р-55-2001 [7].

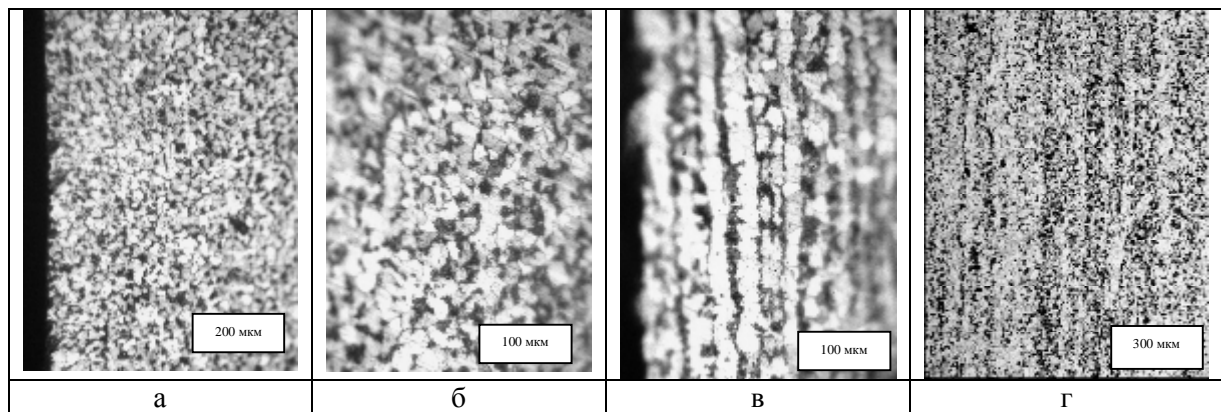


Рис. 2. Микроструктура ПСТЭ: а – внутренняя поверхность ПСТЭ, поперечный шлиф, б – внешняя поверхность, в, г – внутренняя поверхность ПСТЭ, продольные шлифы

На шлифах в продольном сечении, начиная от внешней поверхности до глубины 2...3 мм (около 3/4 толщины стенки), микроструктура также равноосная и мелкозернистая, как и на поперечных шлифах (рис. 2, б). Отклонения от равноосности наблюдаются в микроструктуре вблизи внутренней стенки ПСТЭ, где на продольных шлифах наблюдается полосчатая структура (рис. 2, в), распространяющаяся в тело труб на глубину до 0,7...0,8 мм.

Зерна феррита вытянуты и образуют сплошные волокна, разделенные прерывистыми прослойками перлита.

После шлифовки и травления внутренней (рабочей) поверхности ПСТЭ на микрошлифах видна полосчатая феррито-перлитная микроструктура (рис. 2, г). В отличие от структуры, которая видна на продольных шлифах в осевом сечении (см. рис. 2, в), здесь перлитная фаза в виде мелкодисперсных выделений рассредоточена по поверхности и образует чередующиеся полосы с ферритом. Такая анизотропия микроструктуры обусловлена технологией изготовления труб (холодная деформация при волочении), при которой примесные участки разбиваются и рассредотачиваются по поверхности, сжимаясь в тонкие слои по глубине.

Полосчатость свойственна трубной продукции из феррито-перлитных сталей с содержанием углерода до 0,25 % и допускается при изготовлении по ТУ14-3Р-55-2001 [7]. Микроструктура стали ПСТЭ соответствует этим нормам.

Микротвердость ферритной фазы составляет приблизительно 120 кг/мм². В участках перлита, позволяющих производить измерения, микротвердость достигает 149 кг/мм².

На шлифах в поперечном сечении (рис. 3) показана начальная стадия процессов износа рабочей поверхности. Видно, что коррозия проникает вглубь металла по перлитным цепочкам, отделяя зерна феррита (см. рис. 3, а), на поверхности образуются подобия неглубоких коррозионных язв (см. рис. 3, б).

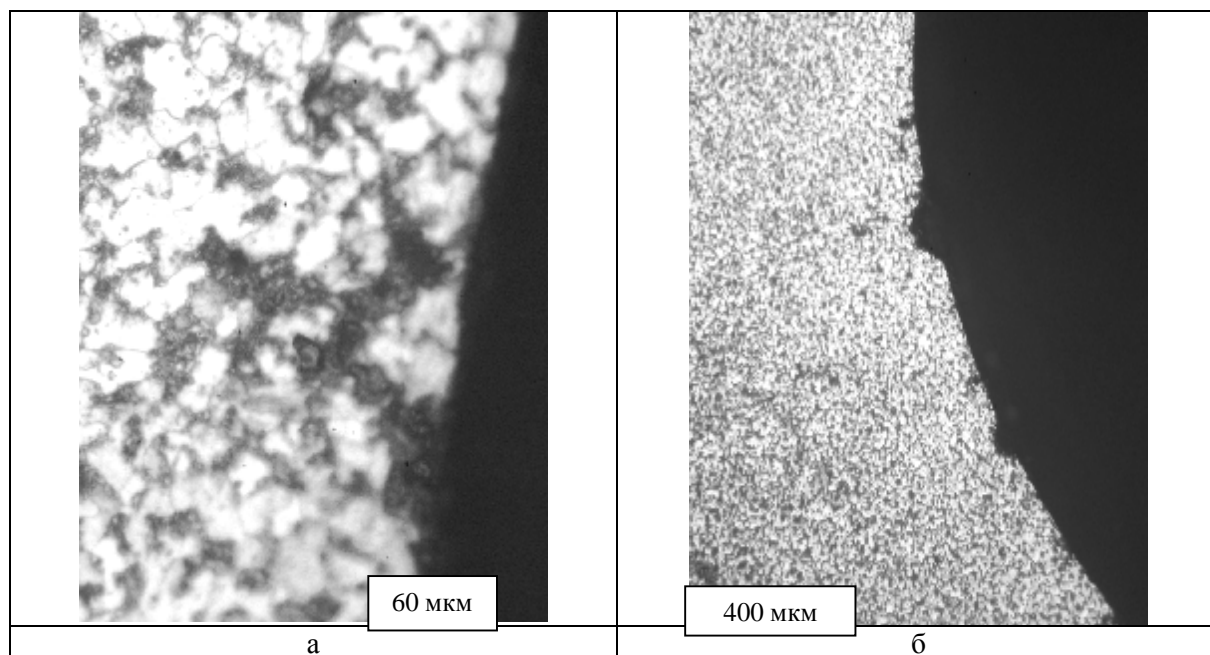


Рис. 3. Коррозия в начальной стадии: а – распространение коррозии по границам ферритных зёрен; б – внутренняя поверхность ПСТЭ с эрозийным износом

Проявлений эрозии при этом не наблюдается. Их можно видеть на последующей стадии, когда идет вымывание перлитных прослоек, откалывание отдельных зерен и групп зерен феррита (рис. 4, а, б).

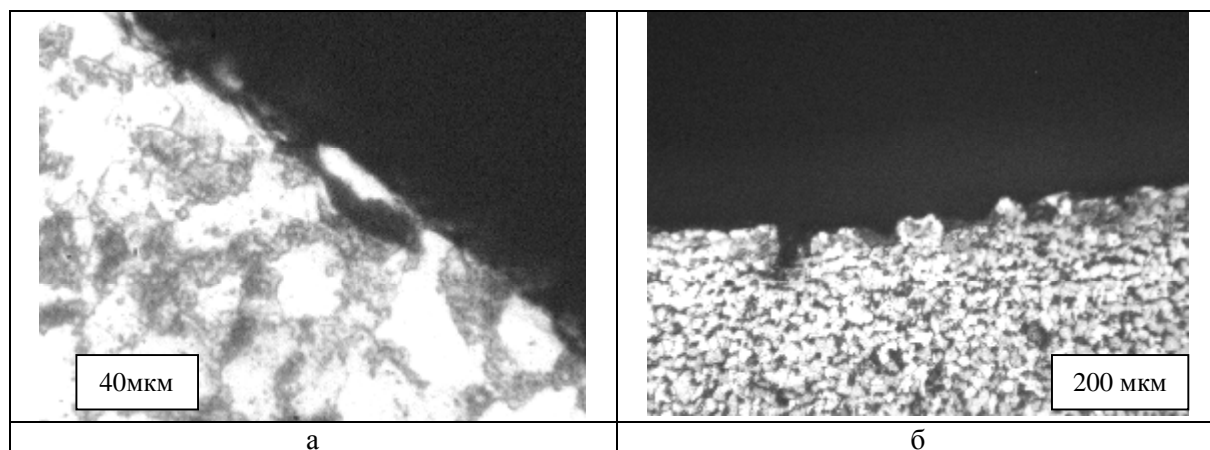


Рис. 4. Начальная стадия эрозии: а – откалывание отдельных зерен феррита; б – вымывание перлитных прослоек и откалывание групп зерен

В более общем виде картина разрушений представляется на продольных шлифах, где видно образование трещин в приповерхностном слое и отслоение ферритных волокон от поверхности металла по перлитным прослойкам (рис. 5, а, б).

Отрыв волокон разрыхляет поверхность металла, делает ее неоднородной, что интенсифицирует эрозию. В результате на поверхности образуется ямочно-мозаичный рельеф (рис. 5, в) с ямками округленной формы, величина которых увеличивается со временем эксплуатации. При износе на глубину более 1 мм и удалении слоя с полосчатой структурой на поверхности остается ямочный рельеф, способствующий эрозии и дальнейшему разрастанию ямок.

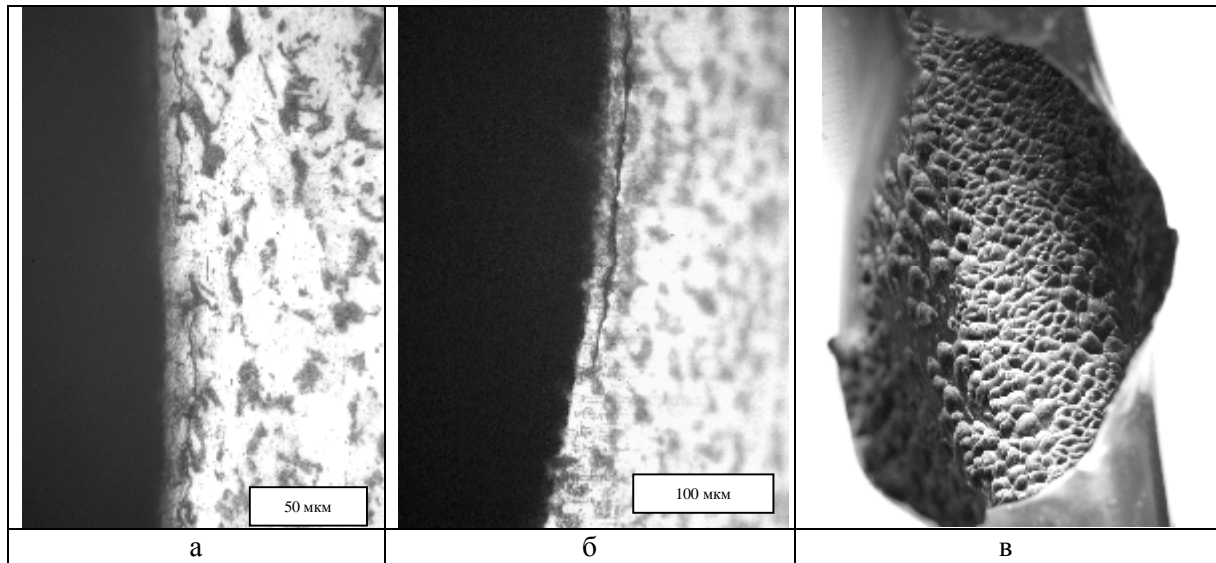


Рис. 5. Коррозионно-эрозионный износ внутренней поверхности трубы: а – образование микротрещин в приповерхностном слое, б – отделение волокна феррита по перлитным прослойкам, в – рельеф внутренней поверхности трубы с износом около 60 %

Результаты проведенных исследований позволяют уточнить представления о природе износа с точки зрения физического материаловедения.

В теплоэнергетике в основном на основании внешних признаков повреждений считается, что в условиях эксплуатации трубной системы теплообменников доминирующим механизмом разрушения металла является эрозия. Такие заключения основываются на гладкой открытой поверхности износа, тогда как при коррозии она должна быть растравленной и покрытой продуктами коррозии. В ряде работ [8, 9, 10] эксплуатационные повреждения рассматриваются с позиций гидродинамики как эрозионно-коррозионный износ (ЭКИ), причем ответственной за износ считается именно эрозия. На энергоблоках ВВЭР-1000 накоплено большое количество результатов эксплуатационного контроля по износу стенок трубопроводных систем. Проведенный анализ данных позволил выявить не только утонение стенок вследствие большой скорости ЭКИ, но и «утолщения» из-за отложений продуктов коррозии и солей [11]. Можно считать не вызывающим сомнения фактом то, что при износе трубопроводов из углеродистых сталей участвуют как эрозионные, так и коррозионные процессы. В некоторых случаях их объединяют словосочетанием «эрозия коррозии» [8]. Вопрос, какой из этих процессов является первичным, по-видимому, является несущественным с технологической точки зрения, но очень важным для выбора и разработки перспективных износостойких сталей.

По результатам проведенных металлографических исследований есть основания считать, что при эксплуатационном износе стали 20 в условиях работы ПСТЭ начальной стадией процесса является коррозия. Процессы коррозии и эрозии развиваются последовательно и, хотя они являются взаимозависимыми, найти функциональную связь между ними сложно, поскольку проходят они на разных уровнях. Коррозия осуществляется на молекулярном уровне и задается выходом химических реакций. Эрозия – процесс физический и определяется количеством отделившихся зерен металла. Если сравнивать эти процессы по выносу массы, то надо отметить, что эрозионный вынос, конечно же, больше, поскольку он включает в себя и коррозионную составляющую. С этой точки зрения название износа эрозионно-коррозионным процессом является правомочным. Но первичной стадией, без которой износ не состоится, является коррозия, поэтому, по нашему мнению, правильнее называть его коррозионно-эрозионным.

Полученные нами результаты механических испытаний подтвердили имеющиеся данные о том, что длительная эксплуатация феррито-перлитных трубных сталей практически не влияет на стандартные механические свойства, но снижает параметры сопротивления разрушению, чувствительные к локальным структурным изменениям [12].

Микроструктурные исследования показывают, что феррито-перлитная микроструктура стали 20 не способствует износостойкости труб. Коррозионные язвы и проявления коррозии (см. рис. 3) подтверждают известную склонность углеродистых сталей к язвенной коррозии в условиях работы теплоэнергетического оборудования и показывают, что коррозионные процессы предшествуют эрозии. Коррозия проникает в металл по перлитным цепочкам (см. рис. 4), вызывая микроразрушения и ослабляя связи между зёрнами феррита. Это ведет к тому, что перлитная составляющая, хотя имеет большую твердость по сравнению с ферритом, окисляясь, вымывается с поверхности потоками воды и теряет роль связующего. Последующие эрозионные процессы вымывают потерявшие связь с матрицей зёрна феррита. Этот эффект усугубляется в случае полосчатой феррито-перлитной структуры, когда эрозии подвергаются не отдельные зёрна, а микрофрагменты металла. На растянутых сторонах гибов вследствие большей скорости потоков имеют место повышенная эрозия и результирующий процесс КЭИ по сравнению со сжатыми сторонами.

Таким образом, на основании проведенных исследований поврежденных трубных элементов, длительное время проработавших в подогревателях воды высокого давления на энергоблоках ВВЭР-1000, можно предположить, что причиной КЭИ феррито-перлитной стали 20 явилась низкая коррозионная стойкость перлитной составляющей, что инициирует последующие процессы эрозии. Физический механизм износа углеродистых сталей отчетливо не установлен. Из литературы известно, что склонность к коррозии углеродистых сталей возрастает при образовании непрерывной сетки тонкодисперсных перлитных выделений. Существенную роль при этом может играть полосчатая микроструктура. Для выяснения и уточнения этих вопросов должны быть проведены дальнейшие фундаментальные исследования.

Выводы

1. Исследованы фрагменты разрушившихся после длительной эксплуатации плоскоспиральных трубных элементов подогревателей высокого давления энергоблоков с ВВЭР-1000.

2. Экспериментально установлено, что механические свойства металла плоскоспирального трубного элемента остаются в пределах допустимых значений, как для внешней, так и для внутренней сторон гибов труб и не зависят от коррозионно-эрозионных процессов, протекающих на внутренней поверхности труб.

3. С использованием металлографических методов показано, что характер разрушения стенок труб обусловлен протеканием коррозионно-эрозионных процессов на внутренней поверхности. В значительной степени износу подвержены внешние стороны гибов.

4. В результате металлографических исследований получено экспериментальное подтверждение тому, что причиной коррозионно-эрозионного износа плоскоспиральных трубных элементов является характерная особенность ее полосчатой феррито-перлитной структуры, реализующейся в результате пластической деформации при производстве труб. В процессе эксплуатации под воздействием рабочей среды происходят окисление перлитной составляющей и вынос продуктов коррозии в контур. В результате этого на

внутренней поверхности труб образуется ямочный рельеф из ферритного каркаса, стимулирующий эрозию и непрерывный процесс коррозионно-эрозионного износа. На растянутой стороне гйба по сравнению с внутренней стороной этот процесс происходит более интенсивно как результат воздействия больших скоростей теплоносителя.

ОСОБЛИВОСТІ КОРОЗІЙНО-ЕРОЗІЙНОГО ЗНОШУВАННЯ ТРУБНИХ ЕЛЕМЕНТІВ НА АЕС З ВВЕР-1000

Л.С. Ожигов, А.С. Митрофанов, Є.О. Крайнюк, О.Г. Руденко, В.Г. Лісна, А.В. Бажуков, П.Є. Мельник, А.М. Палій

З використанням металографічних методів і механічних випробувань був досліджений характер корозійно-ерозійного зношування (КЕЗ) плоско-спіральних трубних елементів (ПСТЕ) зі сталі 20 на ПУАЕС. Показано, що причиною КЕЗ є смугастість ферито-перлітної структури, що реалізується в результаті пластичної деформації при виробництві труб. В умовах експлуатації перліт окислюється і вимивається потоками теплоносія. Таким чином, на поверхні утворюється ямковий рельєф з феритного каркасу, що стимулює ерозію і безперервний процес КЕЗ.

CORROSION-EROSIVE WEAR FEATURES of PIPE ELEMENTS at NPPs with WWER-1000

L. Ozhigov, A. Mitrofanov, Y. Krainyuk, A. Rudenko, V. Lesnaya, A. Bazhukov, P. Melnik, A. Paliy

The pattern of the corrosive-erosive wear (CEW) of steel St.20 flat spiral tube elements (FSTE) has been studied by use of metallographic and mechanical testing methods. The ferrite-pearlite dark streak pattern realized as the result of the plastic deformation in the tubal industry process is shown to be the CEW reason. Under the operation conditions the pearlite is oxidized and washed-out by the heat-transfer flows. Thus, the ferrite dimple-type relief stimulated the erosion and continuous CEW process has been formed on the surface.

Список использованных источников

1. *Соловьева С.П.* Аварии и инциденты на атомных электростанциях: учеб. пособие по курсам "Атомная электростанция", "Надежность и безопасность АЭС". – Обнинск: ИАЭ, 1992. – 299 с.
2. *Кумов А.В.* Исследование повреждаемости теплообменных поверхностей ПВД в процессе эксплуатации и разработка рекомендаций их ремонта: автореф. дис. ... канд. техн. наук: спец. 05.16.01 «Металловедение и термическая обработка металлов» / А.В. Кумов. – М., 2003. – 125 с.
3. *Марушкин В.М.* Подогреватели высокого давления турбоустановок ТЭС и АЭС / В.М. Марушкин, С.С. Иващенко, Б.Ф. Вакуленко. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 136 с.
4. *Nedelko L.* Weak Point Analysis in Response to Erosion Corrosion Problems in Nuclear Power Plant Piping / L. Nedelko, W. Kastner // ENC' 90. Lyon, France, 23 - 28 sept. 1990. – P. 12.
5. *Woolsey J.S.* Assessment and avoidance of Erosion-corrosion damage in PWR feed-pipework / J.S. Woolsey // Proceed of specialists meeting organized by the Inter Atomic Energy Agency and held in Vienna 12 - 14 Sept. 1988. - IAEA Vienna, 1990. – P. 60 - 66.
6. ГОСТ 1497-84 (СТ СЭВ 471-77). Металлы. Методы испытаний на растяжение. – Введ. 1988-01-02. – М.: Госстандарт СССР, 1984. – 38 с. - (Национальный стандарт Украины).

7. ТУ14-ЗР-55-2001. Трубы стальные бесшовные для паровых котлов и трубопроводов. – Введ. 2004-01-03. – Челябинск: ОАО «РосНИТИ», 2004. – 91 с.

8. *Полищук С.М.* Анализ исследований эрозионно-коррозионного износа трубопроводов АЭС / С.М. Полищук, А.А. Манузин // Восточно-европейский журнал передовых технологий. – 2007. – 1/3 (25). – С. 3 - 7.

9. *Крутасова Е.И.* О повреждаемости гибов паропроводных труб / Е.И. Крутасова, Н.И. Слободчикова, В.И. Брагина // Электрические станции. – 1976. – № 1. – С. 19 - 21.

10. Эрозионно-коррозионный износ оборудования атомных электростанций / В.И. Бараненко [и др.] // Атомная техника за рубежом. – 1995. – № 8. – С. 9 - 13.

11. *Бараненко В.И.* Эрозионно-коррозионный износ трубопроводов с однофазной и двухфазной средами при эксплуатации АЭС с ВВЭР / В.И. Бараненко, Ю.А. Янченко, М.С. Белов // Сб. науч. работ 6-й Междунар. науч.-практ. конф. «Обеспечение безопасности АЭС с ВВЭР» 26 - 29 мая 2009 г. – Подольск: ОКБ «ГИДРОПРЕСС» ВНИИАЭС, 2009. – С. 168 - 173.

12. *Петров Л.Н.* Коррозионно-механическое разрушение металлов и сплавов / Л.Н. Петров, Н.Г. Сопрунюк. – К.: Наукова думка, 1991. – 216 с.

Надійшла до редакції 13.05.2013 р.
Після доопрацювання 29.05.2013 р.

УДК 621.313.322-81-752:303.733.3

ПРИМЕНЕНИЕ СПЕКТРАЛЬНОГО АНАЛИЗА ПРИ ДИАГНОСТИКЕ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ТУРБОГЕНЕРАТОРОВ АЭС

Н.Е. Сапожников¹, Б.М. Демидюк², О.Д. Чужикова-Проскурнина¹

¹*Севастопольский национальный университет ядерной энергии и промышленности*

²*ЗАО «Укратомэнергострой», г. Киев*

В работе рассмотрено применение спектрального анализа в диагностике технического состояния турбогенераторов АЭС. Приведена методика его проведения с использованием дискретного преобразования Фурье, а также даны рекомендации по подготовке данных измерений к анализу.

Введение

При диагностике технического состояния турбогенератора одним из наиболее информативных показателей является вибрация, поскольку она напрямую или косвенно отражает негативные процессы, протекающие в агрегате, и дефекты, их вызывающие. Поэтому измерение вибрации и тщательный анализ результатов является важной составляющей диагностики турбогенераторов.

Представление вибрации во временной области содержит большое количество информации, которая сложно поддается анализу. Часть этой информации приходится на очень слабые компоненты, величина которых может быть соизмерима с толщиной линии графика. Тем не менее, подобные слабые компоненты могут быть важны для выявления развивающихся неисправностей в машине, например, дефектов подшипников.