

АНАЛИЗ ДАННЫХ КОНТРОЛЯ ТЕПЛООБМЕННЫХ ТРУБ ПАРОГЕНЕРАТОРОВ ПГВ-1000 НА ЮУ АЭС

*В.Н. Воеводин¹, А.С. Митрофанов¹, С.В. Гоженко¹, Р.Л. Василенко¹, И.Н. Шаповал¹,
Е.А. Крайнюк¹, А.В. Бажуков², А.Н. Палий², П.Е. Мельник²*

¹ННЦ «Харьковский физико-технический институт», Харьков, Украина;

²ОП «Южно-Украинская АЭС», Южноукраинск, Украина

С использованием данных многолетнего вихретокового контроля (ВТК) теплообменных труб парогенераторов ПГВ-1000 на энергоблоках ЮУ АЭС рассмотрено дефектообразование в теплообменнике с учетом результатов новых металлографических исследований. Установлены особенности распределения дефектов по характеристикам ВТК (амплитуда сигнала, «нехватка металла»). Показано, что зародышами образующихся повреждений в металле могут быть неметаллические включения, которые инициируют процессы локальной коррозии и коррозионной усталости. Проведенный анализ может быть использован для совершенствования регламента и планов очередных контролей на АЭС.

ВВЕДЕНИЕ

Известной проблемой парогенераторов ПГВ-1000, комплектующих энергоблоки ВВЭР-1000, являются коррозионные повреждения металла теплообменных труб (ТОТ). Нарушение целостности стенок труб приводит к протечкам радиоактивного теплоносителя из первого контура во второй. В этой ситуации по правилам эксплуатации необходим останов энергоблока и глушение поврежденной ТОТ. Это приводит к значительным энергетическим и экономическим потерям. На АЭС периодически контролируют состояния металла ТОТ вихретоковым методом (ВТК). Последнее связано с трудностями интерпретации полученных результатов и не дает представления о зарождении и развитии эксплуатационных дефектов. Со временем, при росте количества индикаций от ТОТ, возникают сложности по оценке и планированию последующих контролей ТОТ.

В работе предложен новый подход к анализу данных контроля ТОТ и планированию оптимальных объемов ВТК парогенераторов ПГВ-1000. Суть такого подхода состоит в том, что результаты ВТК рассматриваются с двух позиций: базы данных по ВТК на ЮУ АЭС и результатов металлографических исследований дефектов со сходными индикациями.

БАЗА ДАННЫХ ПО ВТК НА ЮУ АЭС

Результаты ВТК за все годы измерений по парогенераторам (ПГ) ЮУ АЭС собраны в одну базу данных. База сформирована из основных результатов ВТК по индикациям (амплитуда, фаза, расстояние), а также из данных по году, блоку, парогенератору.

На рис. 1 дается статистическое распределение накопленных данных в представлении «обобщенной ячейки», в которой данные отобраны по абсолютному значению индикаций, их количеству (частоте) и удалению от ближайшего узла крепления в межрешеточном промежутке ТОТ.

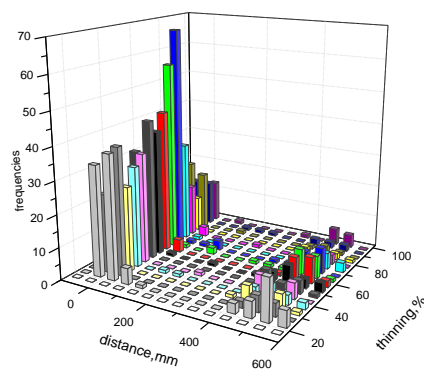


Рис. 1. «Обобщенная ячейка» с индикациями дефектов по базе данных ВТК ЮУ АЭС

Понятие межрешеточного промежутка охватывает все проконтролированные ТОТ, независимо от их расположения в трубном пучке. Гистограмма представляет частоту (вертикальная ось «frequencies») возникновения потери металла (горизонтальная ось «thinning») в зависимости от позиционирования дефекта по отношению к ближайшему узлу крепления (ось «distance»).

Конструктивно ТОТ в объеме ПГ закреплены в дистанционирующих и антивибрационных решетках, представляющих собой волнообразного профиля стальные полосы, между которыми ТОТ удерживаются силами трения.

Из статистического распределения, показанного на рис. 1, видно, что основная масса дефектов, включая дефекты с высокими показаниями «потери металла» (ПМ), сосредоточена вблизи узлов крепления ТОТ в решетках.

ИССЛЕДОВАНИЕ ДЕФЕКТОВ СО СХОДНЫМИ ИНДИКАЦИЯМИ

Проведенные ранее металлографические исследования [1, 2] показали, что значительное количество дефектов ТОТ (по некоторым данным большинство дефектов) представляют собой продольные, единичные или групповые (растрескивание) трещины. Трещины заполнены продуктами коррозии (рис. 2).

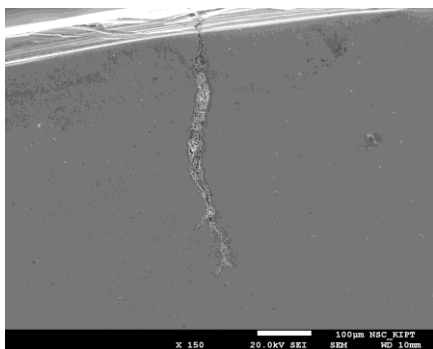
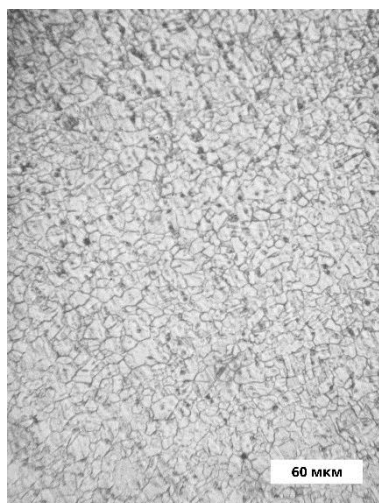


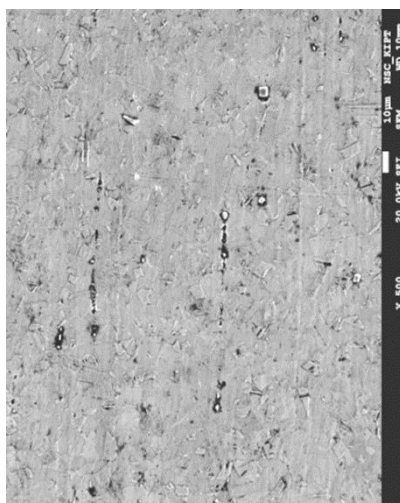
Рис. 2. Характерные повреждения в металле ТОТ – трещина коррозионной усталости

Такие дефекты были обнаружены как в нижних рядах трубного пучка выведенного из эксплуатации ПГ, так и во фрагментах ТОТ, вырезанных из верхних рядов трубчатки.

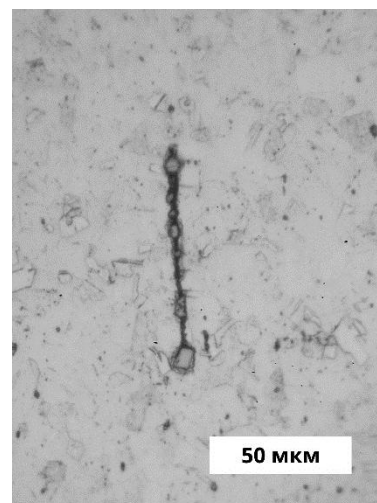
Трещины носят усталостный характер и по всем признакам произошли на коррозионной стадии.



а



б



в

Рис. 3. Структура стали 08X18N10T: а – аустенитная микроструктура (поперечный шлиф); б – строчки неметаллических включений (продольный шлиф); в – структура отдельной строчки включений

Количество включений оценивается в 1а–2а балла по шкале 5 [4], что не превышает требования нормативной документации для труб из стали 08X18N10T. Присутствие неметаллических включений неизбежно в металле технической чистоты. Строчечное расположение включений свойственно структуре труб, изготовленных холоднодеформированным способом. Пластичные включения при протяжке деформируются и вытягиваются в тонкие строчки, которые устраняются при аустенизирующем отжиге. Твердые включения карбонитридов дробятся на фрагменты и при отжиге остаются в матрице металла. Некоторые включения могут выходить на внешнюю и внутреннюю поверхности трубы (рис. 4,б,в).

Мелкие глобулярные (менее 1 мкм) и более крупные (2...5 мкм) ограненные включения расположены в металле хаотично, иногда в виде отдельных скоплений.

Выходящие на поверхность ТОТ карбонитридные включения, размеры которых сопоставимы с

Началом образования этих трещин могут быть неметаллические включения.

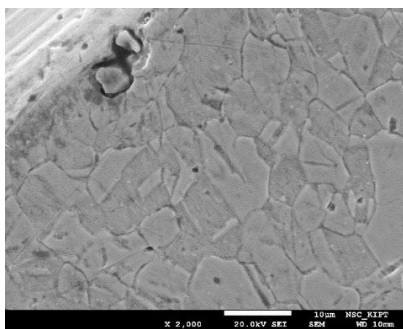
На рис. 3 показана микроструктура металла на шлифах, выполненных в поперечном и продольном сечениях теплообменной трубы.

Металл характеризуется однородной мелкозернистой структурой с величиной зерна 8...10 мкм, что соответствует 10 баллу по шкале 1 [3]. Аустенитные зерна имеют четкие границы, выпадения карбидов на них не замечены, что говорит об отсутствии признаков старения стали. На продольном шлифе (см. рис. 3,б) в некоторых местах отмечаются отдельные неметаллические включения прямоугольной формы (зондовый микроанализ показал, что это карбонитриды титана), а также строчки длиной до 500 мкм из фрагментов включений. Такая строчка отдельно показана на рис. 3,в.

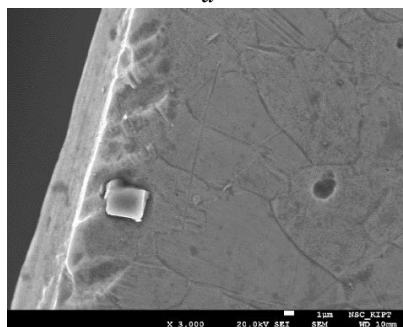
размером зерна стали 08X18N10T, инициируют локальную межкристаллитную коррозию, аналогичную питтинговой. Знакопеременные напряжения, вызываемые вибрацией ТОТ в зонах крепления, приводят к зарождению усталостных трещин в местах выхода включений. Окисление вновь образовавшихся (ювенальных) поверхностей металла способствует росту трещин по механизму коррозионной усталости. Наличие вибраций в ТОТ нами подтверждено металлографическими исследованиями.

На рис. 5 показан тип дефектов, которые образовались непосредственно в местах касания ТОТ с дистанционирующей решеткой.

Об этом свидетельствует характерная форма каналов вокруг места касания (см. рис. 5,а). Овальная язва (см. рис. 5,б) – это подрешеточный дефект на более поздней стадии. Возникновение таких дефектов обусловлено нарушением оксидной пленки на поверхности металла ТОТ вследствие трения поверхностей при вибрациях и воздействия рабочей среды.



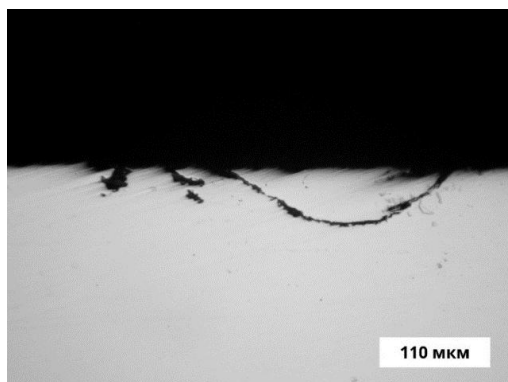
a



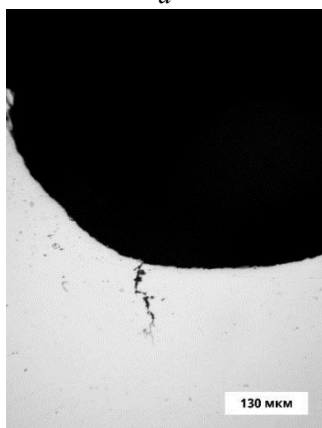
б

Рис. 4. Неметаллические включения: а – включения выходят на внешнюю поверхность ТОТ; б – включения вблизи внешней поверхности ТОТ

Отсутствие в язве отложений продуктов коррозии (см. рис. 5,б) подтверждает наличие вибраций, которые способствуют их удалению.



a



б

Рис. 5. Подрешеточные дефекты (продольные шлифы): а – коррозионные каналы в местах контактов ТОТ с решеткой; б – язва с трещиной

Предложенный механизм образования трещин объясняет наблюдаемую статистику образования дефектов, согласно которой большинство индикаций ВТК находится в областях узлов крепления ТОТ (см. рис. 1).

Немаловажен замеченный факт, что устья трещин ТОТ зарастают продуктами коррозии. При этом развитие коррозионных процессов затормаживается и может прекратиться вовсе. Этим объясняются случаи отсутствия протечек в ТОТ даже тогда, когда ВТК фиксирует наличие сквозных трещин. Трещины, вызванные включениями в металле, распространяются вдоль труб по протяженности строчечных включений.

Очевидно, что на конструкционную прочность ТОТ такие трещины существенно не влияют.

Как по индикациям ВТК определить, какие именно дефекты являются трещинами усталости? Согласно проведенному анализу и результатам, представленным в «Атласе эксплуатационных дефектов...» [5], к трещинам усталости, образовавшимся от неметаллических включений, можно отнести дефекты с низкими значениями сигналов по амплитуде. При этом фаза сигнала, характеризующая глубину дефекта, может меняться в широких пределах, вплоть до всей толщины стенки ТОТ. Уточнить характер дефектов можно за несколько контролей, оценив изменение параметров ВТК.

Наиболее опасными, с точки зрения возможных протечек, являются коррозионные язвы. Их можно отличить в массиве данных ВТК по сигналам с большими значениями амплитуды. На ЮУ АЭС коррозионные язвы наблюдались в большом количестве на фрагментах ТОТ, вырезанных из нижних рядов теплообменника в зоне шламовых отложений (ПГ-1, первый блок). На рис. 6 показан пример сквозной коррозионной язвы. Подобные дефекты нарушают герметичность контура и приводят к протечкам теплоносителя. Теплообменные трубы с такими дефектами подлежат глушению.

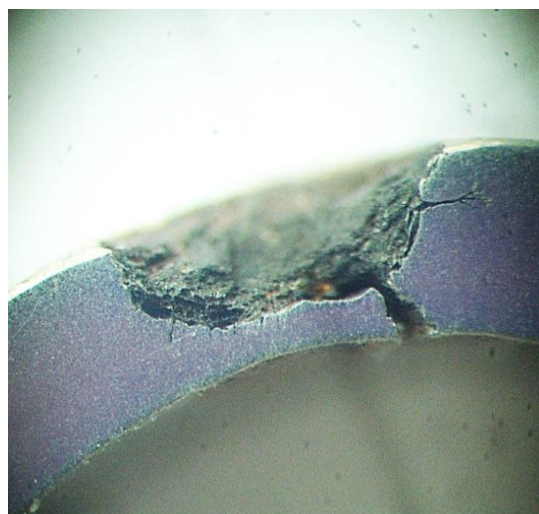


Рис. 6. Сквозная коррозионная язва

Появление язв обусловлено процессами электрокоррозии, которые идут при контакте поверхности металла ТОТ с частицами шлама, содержащими медь.

Коррозионные язвы, как неоднократно отмечалось, реализуются по механизму коррозионного растрескивания под напряжением. Последнее создается «распирающим» эффектом со стороны продуктов коррозии. Коррозионные язвы наиболее опасны, так как не имеют сдерживающих механизмов роста. При достижении ими определенной глубины образующиеся трещины не зарастают продуктами коррозии, а, наоборот, имеют тенденцию к быстрому развитию, образованию сквозного дефекта. Оптимистическим выводом из проведенных исследований является то, что, как показывает статистика (см. рис. 1), коррозионные язвы в общем массиве дефектов составляют меньшинство.

В атомной энергетике остро стоят вопросы по оптимизации критериев глушения ТОТ, определению объемов и периодичности проверок состояния, стратегии их проведения на разных ПГ.

Проведенные исследования пересекаются с перечисленными вопросами. На Украинских АЭС в настоящее время действует двухпараметровый критерий глушения ТОТ на энергоблоках с ВВЭР-1000: по фазе (глубине дефекта) и амплитуде сигнала. На каждой АЭС действуют свои нормативы на критерии глушения, при этом учитывается расположение дефекта и результаты предыдущих ВТК. Нормативы разработаны на основании опытных данных, без знания морфологии дефектов. Из полученных результатов исследований следует, что при принятии решения на глушение ТОТ следует в первую очередь установить тип повреждения: усталостная трещина или коррозионная язва. Это можно установить по величине амплитуды сигналов. Как было отмечено, трещинам с малым раскрытием соответствуют малые амплитуды, тогда как язвы характеризуются большими амплитудами. Из результатов металлографических исследований дефектов вытекает, что первыми кандидатами на глушение следует рассматривать ТОТ с дефектами, имеющими большие амплитуды сигналов.

В России с 2013 года действует руководящий документ «Амплитудный критерий глушения теплообменных труб парогенераторов реакторных установок АЭС с ВВЭР» РД ЭО 1.1.2.01.0927-2013 [6]. Этим документом определены допустимые амплитуды сигнала на открытых участках и под решетками ТОТ для различных систем ВТК. Этим же документом определена допустимая глубина дефекта в процентах от толщины стенки (фаза сигнала). Согласно РД ТОТ подлежат глушению, если глубина дефекта превышает 88%, независимо от амплитуды сигналов. Но, как упоминалось, имеется много примеров того, что дефекты глубиной 88% и больше (включая сквозные) не дают протечек. Поэтому вопрос о критериях глушения ТОТ остается открытым.

По результатам проведенных исследований можно отметить некоторые общие представления по особенностям «трубчатки» в ПГ энергоблоков ВВЭР. Несмотря на значительные количества дефектов, обнаруживаемых в ТОТ при ВТК, исследования позволяют сделать оптимистические выводы относительно работоспособности ТОТ. Абсолютное

большинство образующихся дефектов – трещины коррозионной усталости. Это прямо вытекает из статистического факта их расположения у мест закрепления в решетках. Саму причину зарождения трещин – неметаллические включения – устранить на действующих парогенераторах уже нельзя.

Эту задачу необходимо поставить при строительстве новых ПГ. Что же касается действующих, то здесь важно отметить, что трещины коррозионной усталости (по крайней мере большинство их) со временем эксплуатации «самозалечиваются» и не представляют опасности, с точки зрения протечек или прочности ТОТ.

ВЫВОДЫ

1. Проведен анализ данных контроля теплообменных труб парогенераторов ПГВ-1000 на ЮУ АЭС с привлечением статистики и металлографических исследований.

2. Анализ показал, что возможным механизмом большинства эксплуатационных повреждений ТОТ является растрескивание под действием коррозионной усталости.

3. В работе показано, что зародышами трещин являются неметаллические включения, находящиеся на поверхности ТОТ.

4. На основании статистических данных и металлографических исследований показано, что повреждение типа коррозионных язв следует контролировать при каждом планово-предупредительном ремонте; трещины целесообразно контролировать регулярно до стадии их «заморозки».

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. И.М. Неклюдов, Л.С. Ожигов, А.С. Митрофанов, С.В. Гоженко. Исследование причин образования коррозионных дефектов в теплообменных трубах парогенераторов ПГВ-1000 // *Сборник научных трудов СНИЯЭ и П.* 2003, в. 8, с. 50-63.

2. Л.С. Ожигов, А.С. Митрофанов, И.Ю. Добровольская, С.В. Шрамченко, Р.Л. Василенко, Н.Д. Рыбальченко, Е.А. Крайнюк. Коррозионные повреждения трубопроводов на АЭС и проблемы их контроля // *Фізико-хімічна механіка матеріалів.* 2017, т. 53, №6, с. 30-35.

3. ГОСТ 5639-82. Введ. 1983-01-01. *Стали и сплавы. Методы выявления и определения величины зерна.* М.: «Издательство стандартов», 1983, 16 с.

4. ДСТУ 3295-95. Чинний від 1997-007-01. *Труби сталеві. Металографічний метод визначення забрудненості металу неметалевими включениями.* К.: «Держстандарт України», 1995, 113 с.

5. И.М. Неклюдов, В.М. Ажажа, А.С. Митрофанов, Л.С. Ожигов, Е.А. Крайнюк, В.Г. Лесная, П.А. Мищенко. *Атлас эксплуатационных дефектов в теплообменных трубах парогенераторов АЭС с реакторами типа ВВЭР:* Справочник-каталог. Интеллектуальная собственность ННЦ ХФТИ. Свидетельство №20514, Харьков, 2012, 237 с.

6. *Амплитудный критерий глушения теплообменных труб парогенераторов реакторных установок АЭС с ВВЭР/* РД ЭО 1.1.2.01.0927-2013.

АНАЛІЗ ДАНИХ КОНТРОЛЮ ТЕПЛОБМІННИХ ТРУБ ПАРОГЕНЕРАТОРІВ ПГВ-1000 НА ПУ АЕС

*В.М. Воєводін, А.С. Митрофанов, С.В. Гоженко, Р.Л. Василенко, І.М. Шаповал, Є.О. Крайнюк
А.В. Бажуков, А.М. Палій, П.Є. Мельник*

З використанням даних багатолітнього вихрострумового контролю (ВСК) теплообмінних труб парогенераторів ПГВ-1000 на енергоблоках ПУ АЕС розглянуто дефектоутворення в теплообміннику з урахуванням результатів нових металографічних досліджень. Знайдені особливості розподілу дефектів за характеристиками ВСК (амплітуда сигналу, «втрата металу»). Показано, що зародками пошкоджень у металі можуть бути неметалеві включення, котрі ініціюють процеси локальної корозії та корозійної втоми. Проведений аналіз може бути використаний для удосконалення регламенту та планів чергових контролів на АЕС.

ANALYSIS OF MEASURING DATA OF HEAT EXCHANGER PIPES OF STEAM GENERATORS WWER-1000 ON SU NPP

*V.N. Voyevodin, A.S. Mitrofanov, S.V. Gozhenko, R.L. Vasilenko, I.N. Shapoval, Y.A. Krainyuk,
A.V. Bazhukov, A.N. Paliy, P.Y. Melnik*

Defect formation into the heat exchangers of WWER-1000 steam generators at the power plants of the SU NPP was considered using the data of multi-year eddy current control, taking into account the results of new metallographic investigations. The features of the defect distribution according to the control characteristics (amplitude of the signal, “lack of metal”) are established. It has been shown that the damage germs formed in the metal can be non-metallic inclusions, which initiate the processes of local corrosion and corrosion fatigue. The analysis can be used to improve the regulations and plans for the next control at the NPP.