

КОРРОЗИОННЫЕ ПОВРЕЖДЕНИЯ ТЕПЛООБМЕННЫХ ТРУБ ПАРОГЕНЕРАТОРОВ ЮЖНО-УКРАИНСКОЙ АЭС

*И.М. Неклюдов, Л.С. Ожигов, А.С. Митрофанов, С.В. Гоженко
ИФТТМТ ННЦ ХФТИ, г. Харьков, Украина;
В.М. Пышный ОП ЗАЭС, г. Энергодар, Украина;
Н.А. Феофентов, А.В. Бажуков, П.Е. Мельник
ОП ЮУ АЭС, г. Южноукраинск, Украина*

Изучены коррозионные повреждения теплообменных труб парогенераторов на Южно-Украинской АЭС. Представлены результаты металлографических исследований поврежденных участков. Проведена идентификация результатов вихретокового контроля и металлографии.

ВВЕДЕНИЕ

Теплообменные трубы парогенераторов (ТОТ ПГ) на энергоблоках АЭС с реакторами типа ВВЭР в процессе эксплуатации подвержены коррозионным повреждениям.

Для обеспечения эксплуатационной надежности проводят контроль герметичности ТОТ и уровня их повреждения. В настоящее время на ЮУ АЭС это осуществляют посредством системы вихретокового контроля INETEC. С помощью данной системы в автоматическом режиме производится вихретоковая дефектоскопия. Вихретоковый датчик (зонд) протягивается внутри ТОТ. Наличие и величина дефектов типа коррозионных язв или трещин, места их расположения фиксируются на картограммах. Результат контроля выдается как параметр "нехватка металла" в процентах.

Данных для интерпретации выявленных дефектов, несмотря на довольно большое количество заглушенных ТОТ, явно недостаточно. Проблема состоит в технологической сложности вырезки дефектных участков ТОТ из находящихся в эксплуатации парогенераторов.

На некоторых эксплуатируемых парогенераторах количество заглушенных ТОТ приближается к критической отметке. Любой акт глушения по данным

вихретокового контроля существенно сокращает ресурс эксплуатации парогенератора. Неоднозначность принятия решения о глушении ТОТ в этой ситуации усугубляется тем, что в ряде случаев дефекты, выявленные вихретоковым контролем, не всегда подтверждаются другими методами.

В настоящей работе были выявлены и проанализированы различные дефекты ТОТ. Дефектные участки были вырезаны из парогенераторов первого и второго энергоблоков Южно-Украинской АЭС. Вырезки были произведены из верхних (13-3Р-I) и нижних (60-102-II, 60-94-II) рядов трубного пучка.

Различают два основных вида дефектов ТОТ: "межрешеточные" и "подрешеточные" [1-3]. "Подрешеточные" дефекты образуются в местах закрепления ТОТ к дистанцирующим решеткам, "межрешеточные" – на свободном пространстве. По своему характеру эти виды дефектов существенно отличаются, и им приписывается различное происхождение. Нами исследованы как "межрешеточные", так и "подрешеточные" дефекты.

ОБЪЕКТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Координаты исследованных ТОТ, их расположение и величина обнаруженных при вихретоковом контроле дефектов приведены в табл. 1.

Таблица 1
Координаты исследованных ТОТ и параметры дефектов по результатам вихретокового контроля

Координаты ТОТ	Парогенератор, энергоблок	Расположение дефекта	Нехватка металла по данным ВТК, %
60-102-II	ПГ-2, блок I	Между 5 и 6 решетками	71
60-94-II	ПГ-1, блок II	Между 3 и 4 решетками	51
13-3Р-I	ПГ-3, блок-II	Под решеткой	86 80

Эти данные обозначают следующее. Например, ТОТ 60-102-II: 102 – номер ряда, 60 – номер в ряду, II петля. Участок этой трубы вырезан из парогенера-

тора №2 на первом энергоблоке. Дефект "нехватка металла 71 %" обнаружен при вихретоковом контро-

ле между 5 и 6 трубными решетками, считая от "горячего" коллектора.

Диаметр ТОТ 16 мм, толщина стенки 1,5 мм. Длина вырезанных отрезков была от 400 до 850 мм.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Участок поверхности ТОТ 60-102-II, на котором согласно вихретоковому контролю находится дефект "нехватка металла 71 %", показан на рис. 1. На поверхности видны проявления язвенной коррозии.

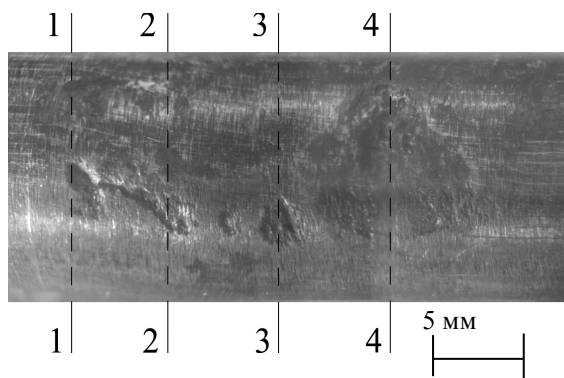


Рис. 1. Поверхность ТОТ 60-102-II с коррозионными дефектами. 1-4 – сечения изготовления металлографических шлифов

Вид дефектов на шлифах, выполненных в сечениях 1 и 2 (см. рис. 1) показан на рис. 2 и 3 соответственно.

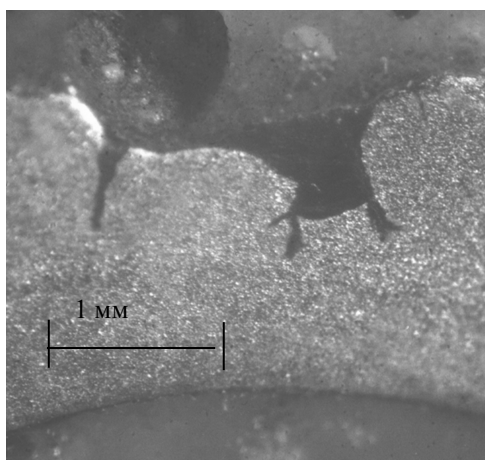


Рис. 2. Коррозионные дефекты в сечении 1 (см. рис. 1)

На рис. 2 видна в разрезе глубокая и обширная коррозионная язва, заканчивающаяся разветвленными трещинами. Язва в выбранном сечении распространяется на глубину приблизительно 0,7 мм. Вместе с наиболее глубокой трещиной глубина дефекта составляет в этом сечении ~65 % толщины трубы.

В сечении 2 (см. рис. 3) видна коррозионная язва меньших размеров, с середины которой распространяется глубокая разветвленная трещина. Общая глубина дефекта в этом сечении составляет приблизительно 50 % толщины трубы.

На рис. 4 показан "раскрытый" дефект на поперечном разрыве участка между сечениями 1 и 2.

Дефект имеет вид "промоины", наибольшая глубина которой достигает 80 % от толщины трубы.

По результатам металлографических исследований дефект на ТОТ 60-102-II можно представить, как обширную коррозионную язву (или несколько язв), вытянутую вдоль трубы. Язва заканчивается разветвленной сетью трещин. Протяженность дефекта составляет 10...12 мм, глубина 1...1,2 мм (70...80 % тела трубы).

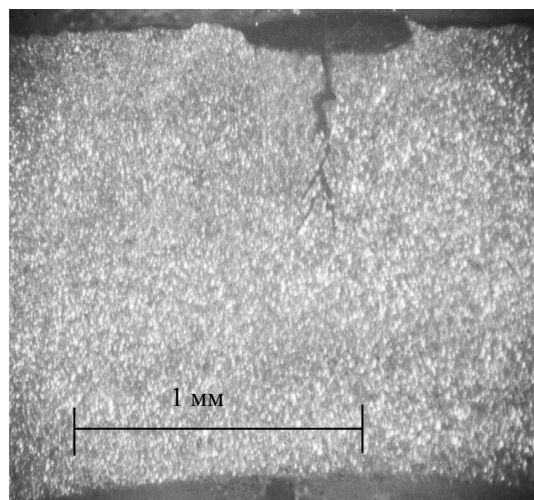


Рис. 3. Характер дефекта в сечении 2 (см. рис. 1)

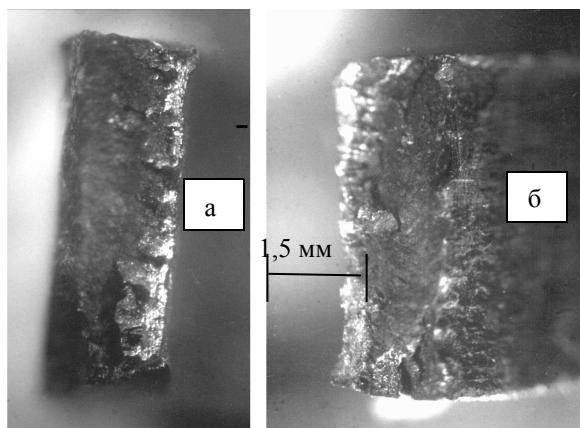


Рис. 4. Раскрытый дефект "нехватка металла", 71 %, ТОТ 60-102-II; а – внутренняя, б – наружная поверхности

Расположение дефекта на трубе и величина его достаточно хорошо согласуются с результатами вихретокового контроля. В других сечениях (3 и 4) коррозия не распространилась в металл до образования критических дефектов, хотя на шлифе в сечении 3 были выявлены неглубокие язвы с признаками образования трещин.

Межрешеточный дефект "нехватка металла" 51 %, обнаруженный вихретоковым контролем на ТОТ 60-94-II показан на рис. 5.

В сечении 2 это глубокая, расширяющаяся к наружной поверхности трубы коррозионная язва, заканчивающаяся разветвленными трещинами в металле (рис. 6).

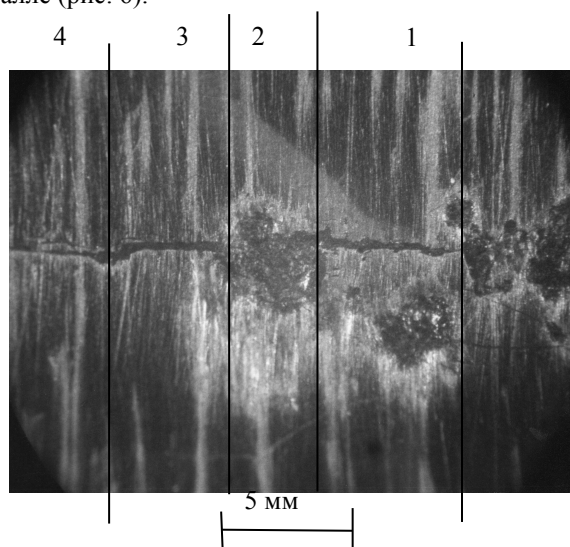


Рис. 5. Дефектный участок трубы 60-94-II
1...4 – сечения, в которых были выполнены металлографические шлифы

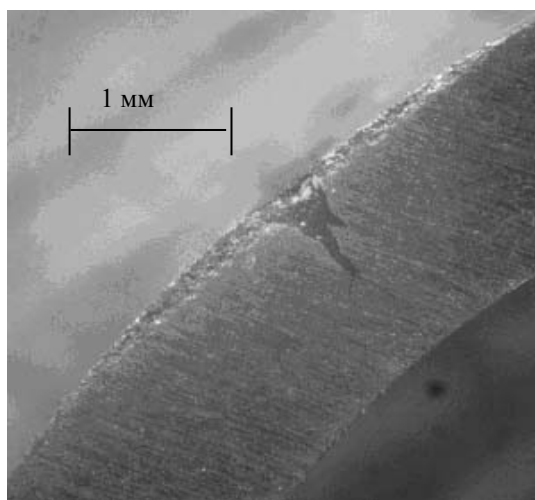


Рис. 6. Коррозионная язва и трещина в металле. Сечение 2 (см. рис. 5)

В сечении 3 видна глубокая, разветвленная трещина (рис. 7).

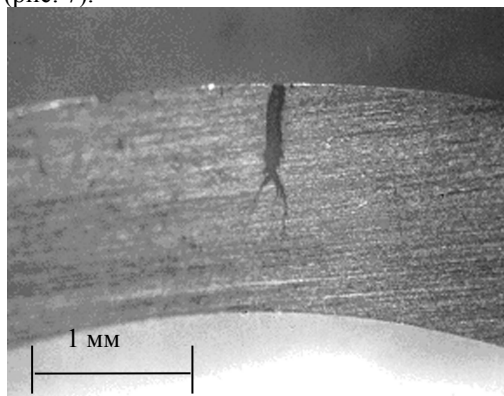


Рис. 7. Вид дефекта в сечении 3 (см. рис. 5)

Глубина трещины около 1 мм (~66 % толщины трубы). В верхней части трещина имеет вид глубокой "промоины" с гладкими стенками, расстояние между которыми составляет приблизительно 0,1 мм. Это наибольшая глубина дефекта. Далее по трубе язва и трещина уменьшаются в размерах (рис. 8).

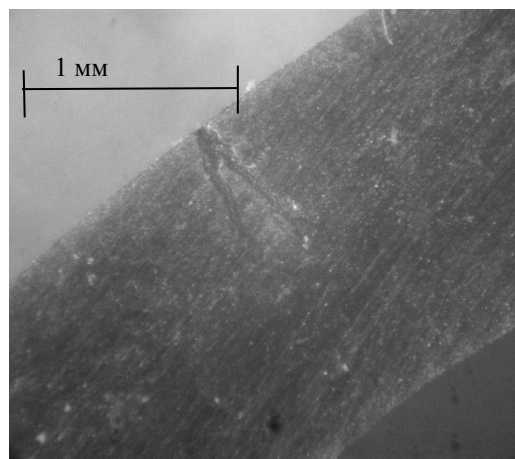


Рис. 8. Вид дефекта в сечении 4 (см. рис. 5)

Таким образом, исследования отрезка трубы 60-94-II подтвердили наличие в ней дефекта в участке, определенном вихретоковым контролем.

Дефект можно охарактеризовать как несквозную трещину, распространяющуюся вдоль трубы. Началом образования трещины является ряд небольших коррозионных язв на наружной поверхности.

Длина трещины приблизительно 10 мм. Максимальные глубина 1 мм, ширина 0,2 мм.

Раскрытый подрешеточный дефект на ТОТ 13-3Р-1 (нехватка металла 86 %) изображен на рис. 9.

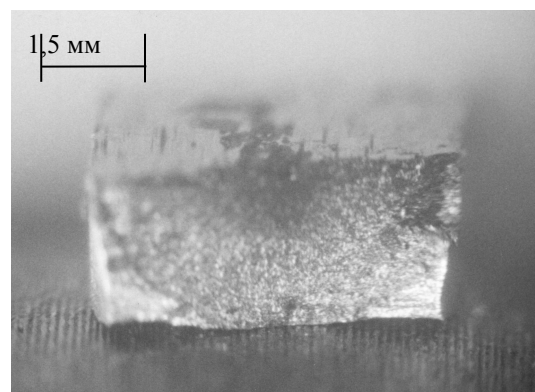


Рис. 9. Раскрытый "подрешеточный" дефект на ТОТ 13-3Р-1 (нехватка металла 86 %)

Показано место разрыва металла по дефекту и примыкающий к нему участок наружной поверхности трубы. Место разрыва захватывает дефект целиком. Можно видеть начало дефектообразования и характер продвижения дефекта в глубь металла и вдоль трубы.

Местом зарождения дефекта явилась коррозионная язва в середине разрыва. По верхней кромке разрыва можно видеть черную полосу от продуктов коррозии, распространяющуюся от язвы вдоль трубы. Таким образом, как видно из рис. 9, дефект на трубе 13-3Р-I "нехватка металла" – 86 % – это сквозная коррозионная трещина, распространяющаяся вдоль трубы на расстоянии 3 мм.

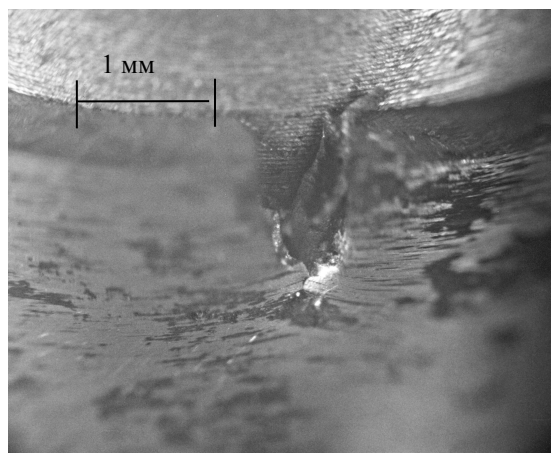


Рис. 10. Подрешеточный дефект "нехватка металла" 80 % (ТОТ 13-3Р-I)

Второй "подрешеточный" дефект на ТОТ 13-3Р-I (нехватка металла 80 %) показан на рис. 10 в "полу-раскрытом" виде на растянутом кольцевом участке трубы. Дефект представляет собой сквозную трещину, вытянутую вдоль трубы на 1,5...2 мм. Подрешеточные дефекты на ТОТ 13-3Р-I не были выявлены цветной дефектоскопией и обнаружались только при окружном растяжении участков с дефектами.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Сопоставление результатов измерений дефектов теплообменных труб металлографическим методом и методом вихретокового контроля

№ п/п	Номер ТОТ	Нехватка металла по данным ВТК, %	Глубина дефекта по результатам металлографических исследований, %
1	60-102-II	70...75	83
2	60-94-II	52	66
3	13-3Р-I	82	100
4	13-3Р-I	87	100

Исследованные дефекты по характеру приблизительно такие же, как были описаны ранее [3]. Межрешеточные дефекты наблюдаются в нижних рядах (ТОТ 60-94-II и 60-102-II), в верхнем ряду – подрешеточные (ТОТ 13-3Р-I). Межрешеточные и подрешеточные дефекты существенно отличаются. Первые имеют значительную долю язвенной коррозии, тогда как вторые практически представляют собой, в основном, трещины.

При сопоставлении металлографии и вихретокового контроля отметим следующие обстоятельства.

Таким образом, на исследованных отрезках ТОТ 60-102-II, 60-94-II и 13-3Р-I с помощью металлографии были выявлены и подтверждены дефекты, обнаруженные вихретоковым контролем. Полученные в процессе выполнения работы результаты дают основание подтвердить, что применяемая для контроля и отбраковки ТОТ вихретоковая методика (система INETEC) является надежной и достаточно точной.

Вопрос точности вихретоковой методики требует некоторого пояснения.

Критерий "нехватка металла" по своему названию не вполне отвечает физической сущности. Название произошло при калибровке методики, которая осуществляется путем измерения сигнала от эталонов металла, имеющих отверстия заданных диаметров и глубины. В реальных случаях измеряются сигналы от коррозионных язв и трещин. Такие дефекты могут не иметь нехватки металла. При строгом подходе, по нашему мнению, следовало бы в результаты вихретокового контроля ввести поправочные коэффициенты, соответствующие типу дефектов, и перейти от критерия "нехватки металла" к параметрам "глубина дефекта" или "глубина поражения металла". Для определения таких коэффициентов, конечно, необходима база данных по металлографии дефектов. Пока же по результатам наших исследований можно констатировать, что определенная металлографически реальная глубина дефектов превышает численные значения параметров "нехватки металла". Эти различия отражены в табл. 2. Причем для "межрешеточных" дефектов, имеющих значительный объем язвенной коррозии, эти отличия меньше, чем для "подрешеточных" дефектов, представляющих собой трещины, практически не имеющие выноса металла.

Таблица 2

С точки зрения практики отбраковки дефектных труб и принятия решения на их глушение, важно представлять, что критерий "нехватка металла 50 %" означает, что глубина повреждения составляет не менее половины толщины стенки трубы. Данные вихретокового контроля по месту расположения дефекта с большой вероятностью позволяют судить о его характере, а именно: в верхних рядах трубного пучка подрешеточные дефекты представляют собой трещины с небольшой долей язвенной коррозии.

Межрешеточные дефекты – это преимущественно коррозионные язвы.

На всех исследованных отрезках труб, в том числе и не имеющих дефектов по вихретоковому контролю, имеются области, пораженные коррозионными очагами небольших размеров.

Очаги коррозии имеют вид кратеров диаметром 0,3 ... 0,5 и глубиной 0,2 ... 0,3 мм. Характер таких очагов показан на рис. 11 и 12.

Характерный вид более крупных дефектов показан на рис. 13.

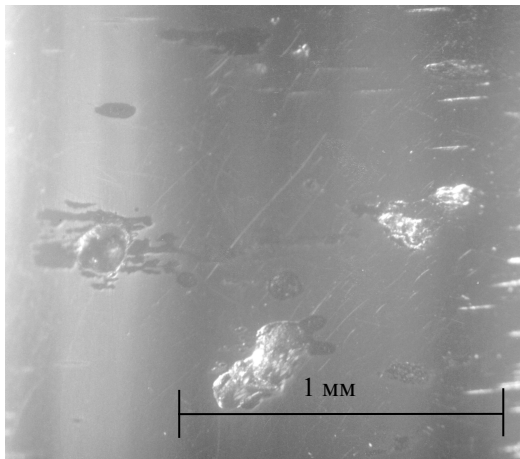


Рис. 11. Характерный вид очагов коррозии на поверхности ТОТ

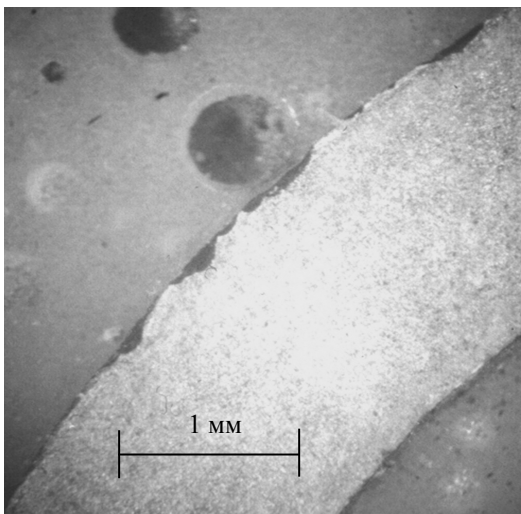


Рис. 12. Очаги коррозии на поверхности ТОТ

В нашем случае продукты коррозии полностью заполняют язвы в металле. В том, что это именно продукты коррозии, а не шлам или какие-либо иные образования, убеждают вид границ раздела и строение материала продуктов. Границы раздела образованы в результате химического взаимодействия металла. Материал продуктов, плотный на вид, имеет слоистое строение и хорошо сцеплен с основой. В язве можно видеть начало образующихся трещин.

По результатам исследований можно отметить два обстоятельства. Первое: преимущественно очаги

коррозии сосредоточены на одной стороне труб, а именно на верхней в парогенераторе; второе: на всех трубах имеются места, где очаги коррозии встречаются наиболее часто. Здесь же очаги имеют наибольшие размеры. В таких местах очаги коррозии представляют собой глубокие коррозионные язвы диаметром 2...3 мм, которые, соприкасаясь, образуют коррозионные скопления (трубы 60-102-II и 60-94-II).

По виду коррозионных проявлений и их расположению можно предположить, что они являются результатом взаимодействия поверхности ТОТ с коррозионно-активными элементами.

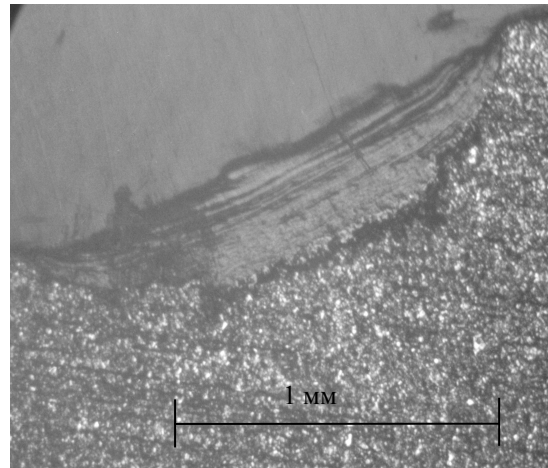
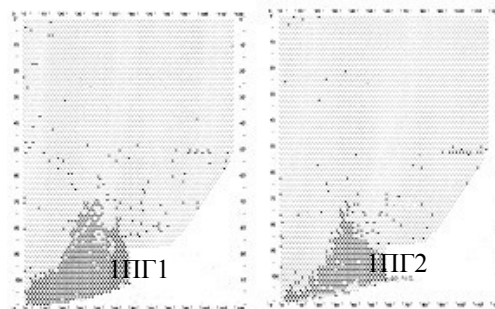


Рис. 13. Коррозионная язва, заполненная продуктами коррозии. Начало образования трещин

Проведенные микрорентгеноспектральные исследования материала, заполняющего коррозионные язвы, показали, что в нем содержится значительное количество меди (до 30 %). Некоторые язвы наряду с медью содержат также цинк.

Статистика коррозионных повреждений имеет определенные закономерности. На рис. 14 приведено состояние трубочки парогенераторов первого энергоблока ЮУ АЭС. Картина по заглушенным трубам во всех парогенераторах аналогична, если учесть, что IV парогенератор введен в эксплуатацию на два года позднее других. Преимущественно заглушенные трубы находятся в одной и той же зоне трубного пучка.



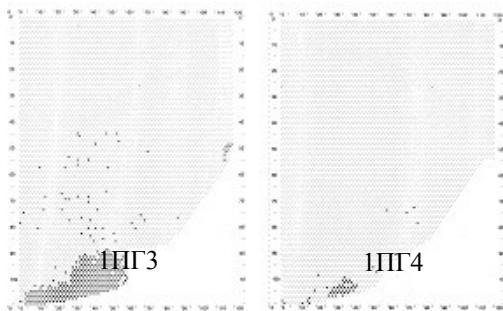


Рис. 14. Расположение заглушенных труб в парогенераторах I энергоблока ЮУ АЭС на 2001 г

Статистику образования коррозионных дефектов и их особенности можно понять с точки зрения материаловедения, если допустить, что в парогенераторе имеется направленное поступление коррозионноактивных примесей. Тогда отмеченные особенности по статистике повреждений и расположению их на верхней поверхности труб можно объяснить особенностями конструкции парогенераторов ПГВ-1000. Установленное по результатам наших, а также более ранних исследований [3,4] значительное содержание меди и цинка в продуктах коррозии также подтверждает это предположение.

Во втором контуре имеется технологическое оборудование, выполненное из меди и медьсодержащих сплавов (подогреватели питательной воды, конденсаторы и др.). Примеси меди и цинка могут поступать в парогенератор как продукты эрозии теплообменных поверхностей. Как известно, сталь Х18Н10Т, из которой изготовлены теплообменные трубы, является неустойчивой против локальных видов коррозии [5-8]. При образовании контактной пары стали с медью в химически активной среде второго контура закономерно возникают эффекты электрокоррозии.

Исследование микромеханизма и кинетики этих явлений представляет несомненный научный интерес с точки зрения материаловедения.

ЛИТЕРАТУРА

- 1.Н.Б. Трунов, В.В. Денисов, Ю.Г. Драгунов, Г.Ф. Банюк., Ю.В. Харитонов. Работоспособность теплообменных труб ПГ АЭС с ВВЭР // *Целостность трубок парогенераторов*. М.: «ЭКИЦ ВНИИ АЭС», 2001, с.12 – 19.
- 2.А.Е. Федосеев, Т.М. Буланова, Ю.Д. Гончаренко. Исследование характера повреждения теплообменных труб парогенераторов 2 блока Балаковской АЭС. Новые технологии для энергетики, промышленности и строительства // *Сборник статей*. ГНЦ РФ НИИАР, Димитровград, 1998, с.38 – 42.
- 3.В.П. Горбатов. Влияние сочетания аммиака и медьсодержащих сплавов на коррозионное растрескивание трубных пучков парогенераторов из аустенитных сталей. Целостность трубок парогенераторов // *Материалы Регионального семинара МАГАТЭ, Удомля, 27-30 ноября 2000 г.* М.: ЭНИЦ ВНИИАЭС, 2001, с.123 – 130.
- 4.М. Дожи, Ф. Освальд, Г. Такаш. Анализ поврежденных теплообменных труб парогенераторов на АЭС Пакш // *Материалы Регионального семинара МАГАТЭ, Удомля, 27...30 ноября 2000 г.* М.: ЭНИЦ ВНИИФЭС, 2001, с.106 – 116.
- 5.В.В. Романов. *Коррозионное растрескивание металлов*. М.: «Машгиз», 1960, 179 с.
- 6.Х.Л. Логан. *Коррозия металлов под напряжением*. М.: «Металлургия», 1970, 340 с.
- 7.Я.М. Колотыркин. *Металл и коррозия*. М., «Металлургия», 1985, 88 с.
- 8.И.И. Василенко, Р.К. Мелехов. *Коррозионное растрескивание сталей*. Киев: «Наукова думка», 1977, 265 с.

КОРОЗИЙНІ ПОШКОДЖЕННЯ ТЕПЛОБІМНІХ ТРУБ ПАРОГЕНЕРАТОРІВ ПІВДЕННО-УКРАЇНСЬКОЇ АЕС

І.М. Неклюдов, Л.С. Ожигов, А.С. Митрофанов, С.В. Гоженко, В.М. Пишний, А.В. Бажуков, П.Є. Мельник, М.О. Феофентов

Вивчені корозійні пошкодження теплобмінних труб парогенераторів на Південно-Українській АЕС. Представлені результати металографічних досліджень пошкоджених ділянок. Проведена ідентифікація результатів вихреструмового контролю та металографії.

CORROSION DAMAGE OF HEAT EXCHANGE TUBES OF SOUTH-UKRAINE ATOMIC STATION STEAM GENERATOR

I.M. Neklyudov, L.S. Ozhigov, A.S. Mitrofanov, S.V. Gojenko, V.M. Pishney, A.V. Bajukov, P.E. Melnik, N.A. Feofentov

Corrosion damage of heat exchange tubes of South-Ukraine atomic station steam generator are studied. The damaged portion metallographic examination results are presented. Metallography results and the eddy current control results are identified.