



ТЕХНИЧЕСКОЕ ДИАГНОСТИРОВАНИЕ ТРУБНОЙ СИСТЕМЫ ПОДОГРЕВАТЕЛЕЙ ВЫСОКОГО ДАВЛЕНИЯ БЛОКОВ МОЩНОСТЬЮ 100...300 МВт В ПРОЦЕССЕ ДЛИТЕЛЬНОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ

Е. Я. ВЕКСЛЕР, И. А. ЗАПЛОТИНСКИЙ, И. В. ЗАМЕКУЛА, В. Ю. ТОЛСТОВ

Рассмотрены причины возникновения и процесс развития водородной коррозии труб змеевиков подогревателей питательной воды в турбоустановках тепловых электростанций. Описан характер повреждений и установлены идентификационные признаки процесса водородной коррозии. Предложены способы контроля и рассмотрено установление сроков межконтрольного периода. В действующей отраслевой нормативной документации этот процесс не рассмотрен.

Considered are the causes for initiation and process of development of hydrogen corrosion in coil pipes of drinking water heaters in TPS turbo-installations. Nature of the damage is described and identification features of hydrogen corrosion process are established. Control methods are proposed and establishment of inter-inspection intervals is considered. This process is not covered by the codes currently in force.

В последнее время на тепловых станциях высокого давления киевской энергосистемы из-за повреждения змеевиков подогревателей высокого давления (ПВД) происходили вынужденные остановки блоков мощностью 300 МВт (прямоточный котел ТГМП-344А, турбина Т-250/300-240) [1]. Змеевики выполнены из труб $\varnothing 32 \times 5$ мм, материал — сталь 20. Время эксплуатации труб до момента повреждения составляло более 100 тыс. ч.

Параметры рабочей среды корпусов ПВД трех ТЭС, обследованных в работе, приведены в табл. 1.

Повреждения однотипны, хрупкого, бездеформационного характера с разрушением труб по механизму макровыкрашиваний со стороны наружной поверхности змеевиков и располагаются преимущественно на их растянутой части.

Внешний вид поврежденных змеевиков ПВД-6 после 121 тыс. ч эксплуатации приведен на рис. 1.

Поврежденные зоны протяженностью 50 мм и более — это выкрашивания, одиночные свищи и их скопления размером от 0,5 до 15 мм.

Поверхность труб вокруг свищей получила значительный эрозионный износ в виде кратеров. Причиной повреждения труб змеевиков ПВД явилось развитие водородной коррозии металла.

При микроструктурном исследовании в зоне повреждения были выявлены межкристаллитные микротрещины и трещины водородной коррозии, развивающиеся от внешней поверхности трубы со стороны паровой среды.

У кратеров коррозионно-эрозионного износа располагаются скопления микротрещин в виде сетки, соединяющей локальные выкрашивания, поры, надрывы и развитые макротрещины, заполненные оксидами (рис. 2).

На участках, удаленных от мест повреждений, выявлено значительное количество микротрещин

Таблица 1. Параметры пара на входе корпусов ПВД

Станция	Блок	Тип ПВД	P , ата	T , °C
А	А1 А2	ПВД-6	18	475
		ПВД-7	43	335
		ПВД-8	66	390
Б	Б1	ПВД-6	22	338
		ПВД-7	34	387
	Б2	ПВД-6	17	460
		ПВД-7	41	335
		ПВД-8	65	390
В	В1	ПВД-8	65	390
	В2	ПВД-8	65	390



Рис. 1. Внешний вид поврежденных змеевиков ПВД-6

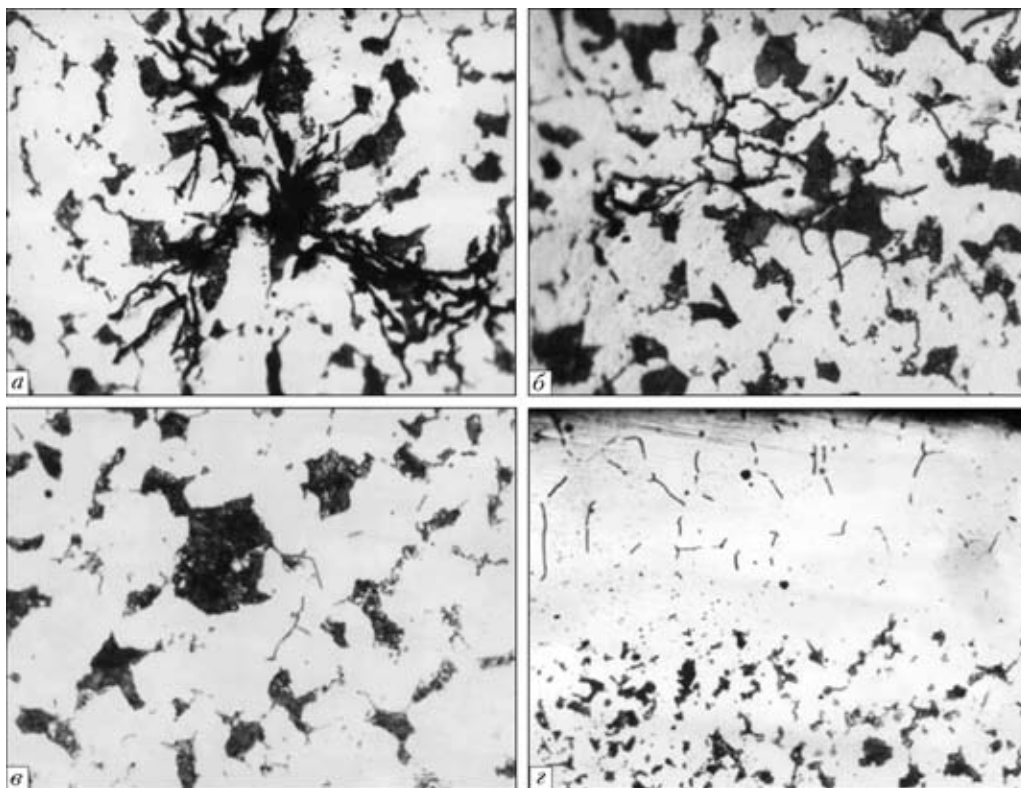


Рис. 2. Микроструктура металла поврежденной трубы ПВД: *а, б* — в зоне; *в, з* — вдали от повреждения (*а-в* — $\times 1000$; *з* — $\times 250$)

и трещин-надрывов, вызванных водородной коррозией (рис. 2, *в*). Со стороны наружной поверхности трубы наблюдается обезуглероживание металла (рис. 2, *з*). Микроструктура металла ферритно-перлитная, слабо дифференцированная.

В ряде случаев водород проходит сечение трубы и тогда коррозионное растрескивание наблюдается и на внутренней поверхности трубы. Так, при исследовании поврежденных труб ПВД-8 блоков *В1* и *В2* станции *В* (см. табл. 1) после 119 тыс. ч эксплуатации со стороны внутренней поверхности труб было обнаружено массовое растрескивание металла, развивающееся на фоне частичного обезуглероживания за счет наводороживания. Коррозионные межкристаллитные трещины с ответвлениями распространялись от внутренней поверхности на глубину до 1,5 мм (30 % сечения), далее в объеме сечения располагается разорванная сетка межкристаллитных микротрещин. Разрушения в этом случае произошли на гibaх труб и имели вид хрупких продольных трещин длиной до



Рис. 3. Внешний вид поврежденного змеевика ПВД-8

250 мм, расположенных по нейтральным линиям гiba (рис. 3).

Наружная поверхность труб ПВД была поражена углекислотной язвенной коррозией, покрыта рыхлыми многослойными отложениями темно-коричневого цвета толщиной до 3 мм. Под легко откальзывающимся верхним слоем отложений обнажался солевой налет и серая оксидная пленка. На поверхности труб обнаружены язвины диаметром до 4,5 мм. Утонение стенки труб за счет коррозионного износа в местах язвин достигало 40 %.

Анализ причин происходящих отказов показал, что повреждения змеевиков ПВД связаны с особенностями эксплуатационных режимов блоков и происходят под воздействием водорода, присутствующего в паровой среде и диффундирующего в металл.

С точки зрения современных представлений [2, 3], источником поставки водорода в металл являются органические соединения в паровом тракте за счет возвратных производственных конденсатов, присосов охлаждающей воды в конденсаторах турбин и пр.

В рассмотренном случае (повреждения труб ПВД-6 на станции *А*, работающей в режиме замкнутого водного цикла пароохлаждения) наиболее вероятным источником попадания водорода в паровой тракт является добавочная вода для подпитки котла, поступающая из постоянного запаса охлаждающей воды с присутствием органики, при условии плохой работы фильтров водоподготовки



тельной установки (ВПУ) и блочно-обессоливающей установки (БОУ).

Повреждения труб ПВД-8 станции В вследствие совместного воздействия внутренней водородной и наружной углекислотной коррозии произошли при переводе блока на нейтральный кислородно-водный химический режим и передозировке вводимого кислорода. Для нормализации работы сосуда потребовалась полная замена труб змеевиков и реконструкция ПВД.

Наиболее активным катализатором коррозионных процессов в стали считаются два состояния водорода — ионизированное в виде подвижных отрицательных ионов и молекулярное в виде H₂ и СН₄, ответственное за образование остаточного водорода в решетке. Водород ослабляет межатомные связи в металле и дислоцируется на границах зерен, дефектах типа микропор, несплошностях, оказывая давление на поверхности полости дефекта, что приводит к образованию микронадрывов и микротрещин стальной матрицы.

Газовый анализ одной из поврежденных труб на остаточный водород (установка RH2 LECO) показал, что в зоне повреждения содержание водорода составляет 0,0051...0,0075 мас. %, а на участках, удаленных от мест повреждения — 0,00036...0,00049 мас. %. Таким образом, в зоне повреждения содержание водорода по крайней мере на порядок выше, чем в неповрежденном объеме металла труб.

В нашем случае развитию водородной коррозии труб змеевиков ПВД-6 блока А2 станции А способствовала закономерная деградация субструктуры в процессе длительной эксплуатации в условиях высокотемпературной (для углеродистой стали) паровой среды. При этом в металле поверхностных наружных слоев труб в процессе эксплуатации происходит накопление микрповрежденности в виде субмикропор и других дефектов, которые становятся очагами начальных коррозионных микроразрушений.

Следует отметить, что до момента аварийных остановов эксплуатация труб ПВД указанных блоков проходила без замечаний. В процессе эксплуатации в полном объеме проводился контроль металла труб змеевиков (визуальный контроль, ультразвуковая толщинометрия) в соответствии с действующими нормативами, однако признаки коррозии не были выявлены. Очевидно, что принятые методы контроля труб ПВД в данной ситуации по своим инструментальным возможностям недостаточны и не позволяют выявить изменения, происходящие в металле на микроуровне.

С целью определения реального состояния металла змеевиков ПВД блоков после длительной эксплуатации и оценки кинетики развития водородной коррозии была осуществлена программа исследований [4] на вырезках из труб ПВД блоков

Т а б л и ц а 2. Износ труб ПВД блока А2 станции 2 за счет водородной коррозии

Время эксплуатации, тыс. ч	Суммарный коррозионный износ сечения труб, %		
	ПВД-6	ПВД-7	ПВД-8
121	В зоне повреждений до 100	До 3	До 3
123	6...10	До 3	До 3
131	3...9	До 4,5	До 4,5

мощностью 300 МВт станции А с замкнутым и станции В с открытым водяным циклом системы пароохлаждения. При этом были обследованы не только ПВД-6, где зафиксированы повреждения, но также и ПВД-7, ПВД-8, где повреждения отсутствовали.

Для сопоставления были также исследованы трубы ПВД блока мощностью 100 МВт станции В (барабанный котел ТГМ-96А, турбина Т-100-130).

В первую очередь представляет интерес рассмотрение труб ПВД-7 и ПВД-8 блока А2 станции А с поврежденными и неповрежденными трубами ПВД-6.

Для оценки состояния указанных труб после 123 и 131 тыс. ч эксплуатации были произведены вырезки из различных зон подогревателей: пароохлаждения, средней части и конденсации. Исследование структуры металла проводили на шлифах поперечного сечения труб. Критерием оценки была выбрана величина суммарного коррозионного износа сечения трубы (%) за счет водородной коррозии.

Микроисследование металла вырезок во всех случаях выявило признаки наружной водородной коррозии. Обобщенные данные исследований ПВД блока А2 станции А приведены в табл. 2.

Как видно из приведенных данных, активность коррозии металла труб по зонам подогревателя различна и в худшем состоянии оказались трубы змеевиков ПВД-6, работающие в паровой среде более высокой температуры (зона пароохлаждения). Трубы зоны пароохлаждения ПВД-6 блока А2 были полностью заменены. Интересные данные были получены при сопоставлении труб ПВД двух однотипных блоков А1 и А2 станции А.

Блок А1 станции имел к моменту исследования большую наработку — 150 тыс. ч, но за время эксплуатации повреждений труб ПВД не происходило.

При микроструктурном исследовании во всех случаях были выявлены признаки начальной стадии развития водородной коррозии металла труб: микротрещины и их скопления в виде разорванной сетки, микронадрывы, поры, микровыкрашивания и развитые транскристаллитные трещины, заполненные оксидами. Развитие кор-



розии также происходило со стороны паровой среды (с наружной поверхности трубы).

Наибольший коррозионный износ претерпели трубы ПВД-6 блока А1 в зоне пароохлаждения и в средней зоне, однако глубина коррозии труб ниже, чем на трубах аварийного блока А2 и составляет 6...8 %. Отмеченные особенности свидетельствуют о меньшей скорости коррозии труб ПВД-6 на блок № 1, что обеспечено удовлетворительной работой фильтров ВПУ и БОУ блока. Трубы ПВД блока № 1 были оставлены в эксплуатации при условии повторного контроля через два года работы.

Исследование состояния труб ПВД блока Б4 станции Б показало похожие результаты. Были произведены вырезки из труб змеевиков ПВД-6, ПВД-7, ПВД-8 в зоне пароохлаждения, где коррозионные повреждения наиболее вероятны.

Подтвержден факт развития водородной коррозии металла труб змеевиков ПВД-6, ПВД-7, ПВД-8 со стороны паровой поверхности, но скорость коррозии замедлена и глубина коррозии после 183 тыс. ч эксплуатации не превышает 1,6 %: суммарный коррозионный износ сечения труб ПВД-6 составляет 1,6; ПВД-7 — 1,3; ПВД-8 — 1,0 %.

Трубы ПВД блока Б4 станции были оставлены в эксплуатации при условии систематического контроля каждые 4 года. Для оценки состояния труб ПВД блока мощностью 100 МВт Б1 станции Б были произведены вырезки из труб змеевиков ПВД-6 и ПВД-7 в средней зоне и зоне пароохлаждения после 180 и 42 тыс. ч эксплуатации. Параметры рабочей среды корпусов ПВД приведены в табл. 1.

При исследовании гибов труб в средней зоне змеевиков ПВД-6 выявлены начальные признаки водородной коррозии в виде редких одиночных микротрещин. Развитие водородной коррозии начинается со стороны внешней поверхности труб в подповерхностном слое, глубиной 3,3 % сечения.

При исследовании труб змеевиков ПВД-7 коррозионные дефекты не выявлены даже в зоне пароохлаждения. Трубы ПВД-6 блока А1 станции оставлены в эксплуатации при условии систематического контроля через каждые 4 года.

В рамках программы было также обследовано состояние металла корпуса и коллектора ПВД-6 блока А2 станции А, где наблюдали повреждения змеевиков вследствие водородной коррозии после 123 тыс. ч эксплуатации.

Исследования проводили неразрушающими методами в зоне пароохлаждения ПВД. При исследовании металла корпуса (сталь 20К) со стороны внутренней поверхности выявлена деградация структуры, связанная с дифференциацией перлитной фазы и выделением цементитных сфе-

роидов по границам и в поле феррита, что закономерно для длительной эксплуатации углеродистой стали при рабочих температурах пара в корпусе (475 °С). Признаков водородной коррозии металла корпуса не выявлено. При исследовании металла коллектора (сталь 20) изменений структуры и признаков водородной коррозии также не выявлено.

Таким образом, при исследовании труб змеевиков ПВД блоков мощностью 250...300 МВт после 119...183 тыс. ч эксплуатации во всех случаях были выявлены признаки водородной коррозии металла: межкристаллитные трещины, поры, надрывы, выкрашивания и развитые транскристаллитные трещины.

Развитие водородной коррозии начинается с наружной поверхности змеевиков под воздействием водорода из пара в корпусе сосуда. В некоторых случаях водород проходит сечение трубы, о чем свидетельствуют коррозионные повреждения на внутренней поверхности труб. При этом наружная поверхность труб повреждается за счет язвенной углекислотной коррозии.

Наибольший коррозионный износ получают трубы в высокотемпературной части конструкции ПВД, т. е. в зоне пароохлаждения ПВД-6, где существуют благоприятные условия для накопления в процессе длительной эксплуатации субмикроскопической микроповрежденности металла и развития коррозионных процессов.

Повреждения труб змеевиков ПВД во всех случаях связаны с попаданием в паровой тракт ПВД активных форм водорода.

Для технического диагностирования состояния труб змеевиков подогревателей высокого давления блоков можно рекомендовать систематические вырезки из наиболее часто повреждаемых труб ПВД-6 в зоне пароохлаждения и средней зоне, в сочетании со стандартными неразрушающими методами контроля (визуальный контроль, толщинометрия).

1. *Водородная коррозия металла трубной системы подогревателей высокого давления / Е. Я. Векслер, И. А. Заплатинский, И. В. Замекула, В. Ю. Толстов // Сб. тр. науч.-техн. конф. «Металлы оборудования ТЭС. Проблемы и перспективы».* — М., ВТИ: 2006. — С. 129–134.
2. *Вайнман А. Б., Мелехов Р. К., Смян О. Д.* Водородное охрупчивание элементов котлов высокого давления. — Киев: Наук. думка, 1990. — 268 с.
3. *Гиренко В. С., Рабкина М. Д., Гиренко С. В.* Физико-химические изменения в сталях при эксплуатации в водородосодержащих средах // Техн. диагностика и неразруш. контроль. — 2003. — № 4. — С. 18–23.
4. *Векслер Е. Я., Чайковский В. М.* Современные методы контроля структуры и свойств металла энергоустановок / Украинское республиканское научно-техническое общество энергетики и электротехнической промышленности. — Киев, 1982. — С. 62.