

Термическая усталость материала паропровода тепловой электростанции

О.В. Балина, В.В. Нассонов

Тюменский индустриальный университет, Тюмень

Аннотация: В работе представлены результаты диагностики паропровода тепловой электростанции, дан анализ влияния термической усталости на структуру и свойства стали марки 12Х1МФ и возможных причин аварийного разрушения элементов паропроводов до истощения паркового ресурса. Для обнаружения и устранения структурной неоднородности металла предложено применение ультразвукового контроля и проведение дополнительной термической обработки. Изучена возможность применения статистического метода анализа данных истории нагружения паропровода, позволяющего оценить повреждающие действия циклов нагрузки и разработать план превентивных мероприятий, а также повысить точность прогноза остаточного ресурса элементов паропровода.

Ключевые слова: металлоконструкция, диагностика, деградация, паропровод, термическая усталость, микроструктура, механические свойства, остаточный ресурс.

Большинство тепловых электростанций (ТЭС), работающих в России, эксплуатируются уже в течение длительного времени и приближены к истощению срока службы. Надежность паропроводов имеет большое значение для надежности энергоблока в целом.

Эксплуатация трубопровода тепловых электростанций происходит под воздействием механических и температурных напряжений, статических, динамических и компенсационных нагрузок, а также коррозионно-активных сред. Результатом такого воздействия являются изменения структурно-фазового состава материала, повреждения поверхностей нагрева и внутренних частей, обусловленные протеканием коррозионно-эрозийных процессов [1, 2]. Соблюдение правил эксплуатации теплотехнического оборудования и контроля состояния металла предполагает исключение разрушения элементов паропроводов до истощения нормативного срока эксплуатации (паркового ресурса), однако, периодически происходят аварийные разрывы различных элементов – гибов, сварных соединений, реже - прямых участков труб до истощения паркового ресурса.

Целью работы является изучение возможных причин аварийных разрушений элементов паропроводов при соблюдении всех правил эксплуатации и анализ методов предупреждения подобных разрушений на примере диагностики трубопровода турбины номинальной мощностью 110 МВт.

Проведена диагностика трубопровода турбины. Причиной диагностики явилась аварийная остановка турбины из-за нарушения герметичности паропровода. При этом парковый ресурс трубопровода выработан на 70%, число пусков турбины также далеко от предельного. Выполнены визуальный измерительный контроль, анализ химического и фазового состава основного и наплавленного металла, исследования структуры и свойств материала элементов трубопровода.

По результатам визуального измерительного контроля обнаружено повреждение тройника трубопровода в месте радиусного перехода с образованием сквозной трещины длиной 6,0 мм и шириной раскрытия 1,0 мм. На внутренней поверхности длина магистральной трещины составила более 25,0 мм. Наряду с основной трещиной на внутренней поверхности наблюдается множество трещин, расположенных сеткой. Внешний вид излома характерен для хрупкого разрушения. Трещины распространяются в металл на различную глубину, полости их заполнены продуктами окисления. Наружная поверхность тройника покрыта многослойной окалиной толщиной 1,3 мм, плотно сцепленной с поверхностью металла. Внутренняя поверхность тройника также покрыта плотной окалиной толщиной 1,0 мм. Фотографии диагностируемых повреждений представлены на рисунке 1.



Рис. 1 – Повреждения тройника трубопровода турбины ТЭС
а) общий вид; б) вид внутренней поверхности; в) сетка трещин и окалина на внутренней поверхности

Для оценки соответствия стали химическому составу марки 12Х1МФ выполнен спектральный полуколичественный анализ. Данные по химическому составу представлены в таблице 1.

Таблица 1

Химический состав, %										
С	Si	Mn	P	S	Cu	Cr	Mo	Ni	V	Ti
Результаты спектрального анализа										
0,12	0,24	0,45	0,01	0,01	0,14	1,12	0,28	0,017	0,21	0,004
Требования ТУ 14-ЗР-55-2001										
0,10-0,15	0,17-0,37	0,40-0,70	0,025	0,025	0,20	0,90-1,20	0,25-0,35	<0,25	0,15-0,30	0,004

Химический состав стали должен соответствовать нормам ТУ 14-ЗР-55-2001 «Трубы стальные бесшовные для паровых котлов и трубопроводов».

Технические условия». По результатам спектрального полуколичественного анализа, металл тройника соответствует проектной марке стали 12Х1МФ.

Для оценки механических свойств металла тройника были проведены измерения твердости и расчет показателей прочности по корреляционным зависимостям прочность – твердость – показатели пластичности и испытания материалов, примыкающих к тройнику трубопроводов на растяжение и ударную вязкость. Результаты определения механических свойств представлены в таблице 2.

Таблица 2

НВ	Предел прочности (σ_B), МПа	Условный предел текучести ($\sigma_{0,2}$), МПа	Относительное удлинение (δ), %	Относительное сужение (ψ), %	Ударная вязкость (КСУ), Дж/см ²
Результаты механических испытаний					
135	440 / 442	234 / 241	21 / 19	56 / 52	61 / 49
Требования ТУ 14-ЗР-55-2001					
-	441-637 /	не менее			
	441-637	274 / 274	21 / 19	55 / 50	59 / 49

По результатам исследования механических свойств металла тройника можно отметить, что значения твердости равномерны во всех исследованных зонах, ударная вязкость и показатели пластичности соответствуют проектным требованиям. Показатели прочности металла не удовлетворяют требованиям ТУ 14-ЗР-55-2001 на сталь 12Х1МФ. Согласно РД 10-577-03 «Типовая инструкция по контролю металла и продлению срока службы основных элементов котлов, турбин и трубопроводов тепловых электростанций», снижение показателей прочности находится в допустимых после длительной эксплуатации пределах. Изменение механических свойств связано с влиянием длительной эксплуатации тройника при повышенных температурах.

Далее изучена структура металла (рис. 2), определено наличие неметаллических включений и микроповрежденность. Микроструктура металла тройника феррито – карбидная, характерная для низколегированной стали после длительной эксплуатации (рис. 2а). Снижение показателей прочности коррелирует со степенью сфероидизации перлита. Степень сфероидизации перлитной составляющей достигает 5 балла по шкале приложения Е ОСТ 34-70-690-96. «Металл паросилового оборудования электростанций. Методы металлографического анализа в условиях эксплуатации» и является недопустимой для продолжения эксплуатации. Распространение трещин в металле идет преимущественно по транскристаллитному механизму. Трещины клиновидные и имеют тупой конец, а полости их заполнены продуктами окисления (рис. 2б). По кромкам повреждения и в местах зарождения и распространения трещин следов пластической деформации и направленности структуры не выявлено.

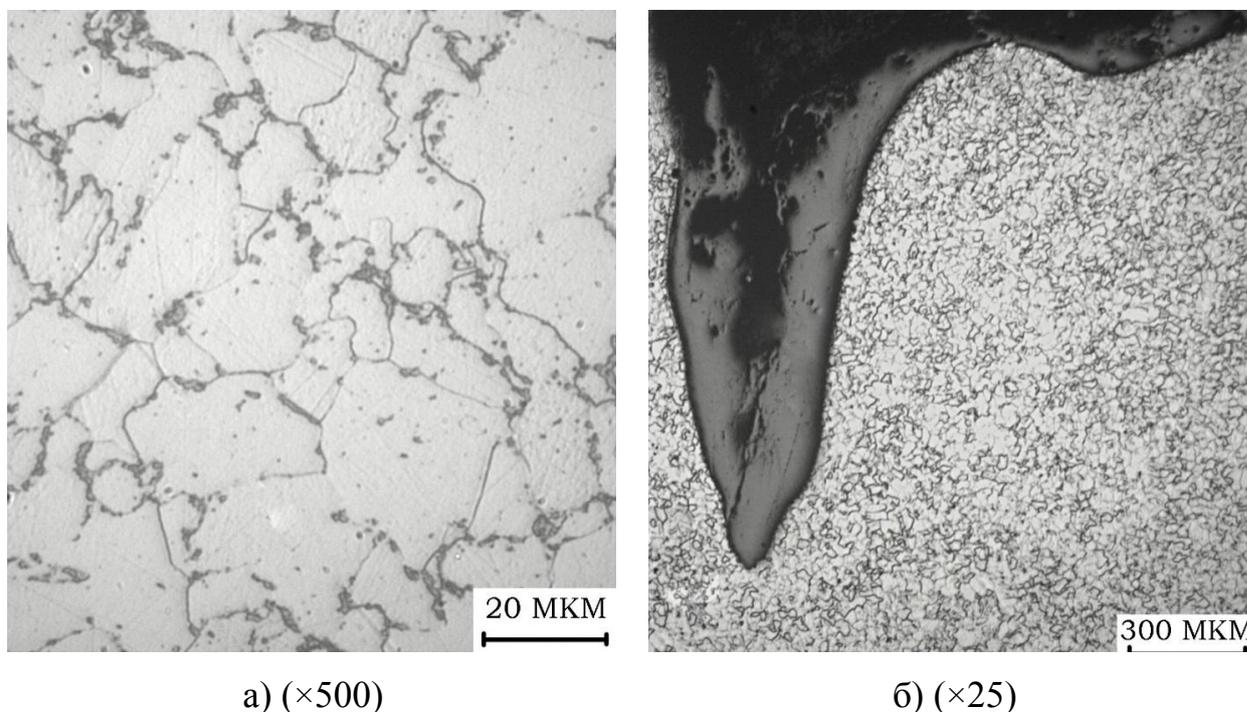


Рис.2 — Структура металла тройника

Морфология повреждения тройника трубопровода дренажа свидетельствует о том, что разрушение произошло в результате образования и развития трещин термической усталости с внутренней поверхности. После замены разрушившегося тройника, для оптимизации структуры, обеспечения надёжности и продления ресурса длительно работавшего паропровода из стали 12Х1МФ, рекомендовано провести восстановительную термическую обработку, состоящую из двойной нормализации [3].

Фактическое состояние тройника соответствует полному исчерпанию паркового ресурса, хотя по расчетам, на момент аварии имелся 30% остаток паркового ресурса. Ускоренное разрушение тройника можно объяснить большим количеством циклов изменения температуры и давления в рамках допустимых регламентом эксплуатации пределах.

Для предотвращения подобных разрушений и повышения точности расчета паркового ресурса, кроме соблюдения указанных в регламенте эксплуатации допустимых параметров рабочей среды, необходима регистрация давления и температуры рабочей среды в течение всего срока эксплуатации. Анализ истории нагружения позволяет оценить повреждающие действия циклов нагрузки и разработать план превентивных мероприятий. Подобный подход эффективно применяется при оценке ресурса строительных конструкций и магистральных газопроводов [4-6].

Кроме того, на теплопроводность и сопротивление металла термической усталости значительное влияние оказывает микронеоднородность структуры. Установлено, что сопротивление термической усталости может отличаться в 1,4 раза из-за структурной неоднородности, не определяемой при механических испытаниях. Для устранения влияния данного фактора нужно включить необходимые требования в спецификацию на заказ трубной продукции: дополнительную термообработку и контроль [7, 8]. Последние разработки в области

неразрушающего контроля позволяют определять неоднородности структуры стальных изделий, что можно использовать при входном и эксплуатационном контроле трубной продукции [9-11].

Литература

1. Масанский О.А., Токмин А.М., Казаков В.С. Исследование влияния условий эксплуатации на деградацию структуры стали 12Х1МФ. // Журнал Сибирского федерального университета. Техника и технологии. 2019. Т.12. №4. С. 427-432.

2. Лоскутов С.А., Букин Ю.А., Корягин Ю.Д. Исследование микроповрежденности металла труб высокотемпературных паропроводов из Cr-Mo-V сталей тепловых электростанций при длительной эксплуатации // Вестник ЮУрГУ. Серия «Металлургия». 2016. Т.16. №1. С. 24-28.

3. Лоскутов С.А., Корягин Ю.Д., Букин Ю.А. Оптимизация структуры и свойств длительно работавшего металла паропроводов из стали 12Х1МФ восстановительной термической обработкой // Вестник ЮУрГУ. Серия «Металлургия». 2014. Т.14. №4. С. 45-51.

4. Вагапов Р.К., Запевалов Д.Н. Практические аспекты использования диагностических методов совместно с другими данными контроля коррозии и имитационными испытаниями при эксплуатации объектов добычи газа в коррозионно-агрессивных условиях // Дефектоскопия. 2020. №7. С. 61-76.

5. Миронов А.Н., Гаранжа И.М. Вершинин В.П. Саад М.Г. Резерв несущей способности мостового сооружения через реку Кальмиус в г. Донецке. // Инженерный вестник Дона. 2021. №4. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2021/6902.

6. Сухина К.Н., Пшеничкина В.А. Вероятностный анализ ресурса конструкции покрытия промышленного здания с учетом случайного характера снеговой нагрузки // Инженерный вестник Дона. 2015. №4. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2015/3397.

7. Помазова А.В., Панова Т.В., Загорин А.С., Артамонов А.И. Взаимосвязь стойкости к коррозионно-термической усталости котельных труб с теплопроводностью дефектных структур. // Журнал Сибирского федерального университета. Техника и технологии. 2017. Т.10. №4. С. 557-571.

8. Помазова А.В., Панова Т.В., Геринг Г.И. Роль структурных факторов в повышении коррозионной стойкости трубной стали при циклической термообработке. // Известия Томского политехнического университета. 2015. Т.326. №5. С. 15-19

9. Пасманик Л.А., Камышев А.В., Радостин А.В., Зайцев В.Ю. Параметры акустической неоднородности для неразрушающей оценки влияния технологии изготовления и эксплуатационной поврежденности на структуру металла. // Дефектоскопия. 2020. №12. С. 24-36.

10. Erofeev V.I., Nikitina E.A., Rodyushkin V.M. Means for increasing the sensitivity of acoustic probing when studying the structure of metals. Russian Journal of Nondestructive Testing. 2018. vol. 54. №2. pp. 92–95.

11. Surin V.I., Polskij V.I., Osintsev A.V., Dzumaev P.S. Applying scanning contact potentiometry for monitoring incipient cracks in steels. Russian Journal of Nondestructive Testing. 2019. vol. 55. №1. pp. 59–67.

References

1. Masanskij O.A., Tokmin A.M., Kazakov V.S. Zhurnal Sibirskogo federal'nogo universiteta. Tehnika i tehnologii. 2019. vol. 12. №4. pp. 427-432.

2. Loskutov S.A., Bukin Ju.A., Korjagin Ju.D. Vestnik JuUrGU. Serija «Metallurgija». 2016. vol. 16. №1. pp. 24-28.

3. Loskutov S.A., Korjagin Ju.D., Bukin Ju.A. Vestnik JuUrGU. Serija «Metallurgija». 2014. vol. 14. №4. pp. 45-51.

4. Vagarov R.K., Zapevalov D.N. Defektoskopiya. 2020. №7. pp. 61-76.



5. Myronov A.N., Garanzha I.M., Vershinin V.P., Saad M.G. Inzhenernyj vestnik Dona. 2021, №4. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2021/6902.
6. Suhina K.N., Pshenichkina V.A. Inzhenernyj vestnik Dona. 2015, №4. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2015/3397.
7. Pomazova A.V., Panova T.V., Zavorin A.S, Artamonov A.I. Zhurnal Sibirskogo federal'nogo universiteta. Tehnika i tehnologii. 2017. vol. 10. №4. pp. 557-571.
8. Pomazova A.V., Panova T.V., Gering G.I. Izvestija Tomskogo politehnicheskogo universiteta. 2015. vol. 326. №5. pp. 15-19
9. Pasmanik L.A., Kamyshev A.V., Radostin A.V., Zaitsev V.Yu. Defektoskopiya. 2020. №12. pp. 24-36.
10. Erofeev V.I., Nikitina E.A., Rodyushkin V.M. Russian Journal of Nondestructive Testing. 2018. vol. 54. № 2. pp. 92–95.
11. Surin V.I., Polskij V.I., Osintsev A.V., Dzumaev P.S. Russian Journal of Nondestructive Testing. 2019. vol. 55. №1. pp. 59–67.