

УДК 621.791.754

## **АНАЛИЗ ПОВРЕЖДАЕМОСТИ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ РАЗРАБОТКИ ТЕХНОЛОГИИ ОЦЕНКИ ДЛИТЕЛЬНОЙ ПРОЧНОСТИ МЕТАЛЛА ПО КРАТКОВРЕМЕННЫМ МЕХАНИЧЕСКИМ ХАРАКТЕРИСТИКАМ**

Мордовин Денис Владимирович, студент гр. МТа-251, I курс  
Научный руководитель: Абабков Н. В., к.т.н., доц.  
Кузбасский государственный технический университет  
имени Т.Ф. Горбачева, г. Кемерово

### **Введение**

В современных условиях обеспечение надёжной и безопасной эксплуатации энергетического оборудования является задачей первостепенной важности. В настоящее время большая часть энергооборудования выработала свой расчётный срок службы (парковый ресурс) и поэтому их разрушения уже не такое редкое явление. Задача дальнейшего продления их ресурса может решаться только на основе изучения закономерностей изменения структуры и свойств в условиях ползучести.

Длительная эксплуатация энергетического оборудования в тяжёлых условиях, включающие в себя высокое давление, температуру и агрессивные среды, приводит к возникновению различных процессов в сварных соединениях и основном металле. Эти процессы включают накопление внутренних напряжений, формирование дефектов и зарождение трещин.

Для предотвращения негативных последствий необходимо проводить регулярный контроль металла оборудования, внедрять современные методы диагностики и технического обслуживания, а также своевременно заменять элементы, которые выработали свой ресурс.

Для оценки ресурса и длительной прочности необходим анализ механических характеристик металла для установления состояния микроструктуры на разных этапах его наработки.

### **Анализ стали 12Х1МФ и 15Х1М1Ф.**

Металлы, которые применяются на объектах энергетики и эксплуатируются при высоком давлении и температуре, должны обладать следующими свойствами:

- жаростойкостью (способность металла противостоять химическому разрушению под действием пара высоких температур);
- деформационной способностью (способность изменять форму и размер под действием нагрузок);
- жаропрочностью (способность металла сохранять свои механические свойства при высоких температурах). [3]

Нормативный режим термической обработки труб из стали 12Х1МФ состоит из нормализации 950-980°C, отпуска 720-750°C, в пределах 1-3 часов с охлаждением на воздухе.

Характерной особенностью этой стали является сильная зависимость её свойств от режимов термической обработки, способа выплавки и технологии производства труб. Вследствие этого на паропроводах в состоянии поставки встречается широкий спектр структур, определяющий жаропрочные и кратковременные механические свойства.

Одной из основных целей термической обработки теплоустойчивых сталей является обеспечение высоких значений длительной прочности за счёт фазового наклёпа, дисперсионного твердения и термической стабильности заданной структуры.[7]

Для достижения указанных целей применяется процесс высокого отпуска, сопровождающийся рядом следующих процессов:

1. В ферритной составляющей структуры наблюдается выделение дисперсных карбидных частиц, как по границам зёрен, так и в объёме зёрен. Данный процесс способствует повышению прочностных характеристик материала и увеличению сопротивления ползучести ферритной фазы.

2. В перлитной составляющей структуры протекает процесс сфероидизации цементитных пластин. В этом структурном состоянии перлит демонстрирует зависимость от типа изделия:

- в толстостенных трубах паропроводов перлитная структура приобретает зернистое значение;
- в трубах поверхностей нагрева перлит сохраняет пластинчатое строение.

3. В бейнитной составляющей структуры в ходе отпуск происходит разложение пересыщенного твёрдого раствора, который сопровождается:

- выделением карбидных фаз;
- снижением микроповреждений, которые сформировались в результате фазового наклёпа.[6]

В современных энергоблоках паропроводы изготавливают из стали 15Х1М1Ф. Нормативный режим термообработки паропроводных труб из стали 15Х1М1Ф следующий: нормализация 970-1000°C, отпуск 730-760°C в течение не менее 10 часов, охлаждение на воздухе.

Увеличение в стали 15Х1М1Ф в сравнении со сталью 12Х1МФ содержания хрома и молибдена приводит к увеличению стабильности аустенита, что определяет особенности термо-кинетического распада аустенита и формирование структур стали при нормализации.

#### **Анализ повреждаемости**

Металл элементов оборудования тепловых электростанций работает в тяжёлых условиях под воздействием высоких температур, коррозионно-активной среды, высоких и изменяющихся нагрузок.

Эффективным методом для решения становится диагностирование металла и причин его повреждения структурными методами.

Наиболее повреждаемые узлы теплоэнергетического оборудования приведены в таблице 1.

| Наименование элемента              | Повреждаемые детали   | Вид дефекта                   | Характер разрушения | Причина разрушения                                                        | Оценка ресурса                   |
|------------------------------------|-----------------------|-------------------------------|---------------------|---------------------------------------------------------------------------|----------------------------------|
| Пароперегреватели котлов           | Прямые трубы и отводы | Продольные трещины            | Хрупкий             | Потеря длительной прочности                                               | По критерию длительной прочности |
|                                    |                       |                               | Вязкий              | Потеря кратковременной прочности                                          | По предельному состоянию         |
| Экономайзеры                       | Прямые трубы и отводы | Продольные разрывы            | Вязкий              | Утонение стенок от износа и потеря кратковременной прочности              | По предельному состоянию         |
| Экранные трубы                     | Прямые трубы и отводы | Продольные разрывы            | Вязкий              | Язвенная коррозия, утонение стенок за счёт наружной коррозии              | По предельному состоянию         |
| Пароперепускные трубы, паропроводы | Отводы                | Продольные трещины            | Хрупкий             | При $T_{\text{экспл}} \geq 450^\circ\text{C}$ потеря длительной прочности | По критерию длительной прочности |
|                                    |                       |                               |                     | При $T_{\text{экспл}} \leq 450^\circ\text{C}$ коррозионная усталость      | По критерию длительной прочности |
| Корпусные детали турбин            | Клапан, корпус ЦВД    | Трещины в радиусных переходах | Хрупкий             | Потеря длительной прочности и малоцикловая усталость                      | По критерию трещиностойкости     |

Таблица 1. Повреждения элементов энергооборудования, методы оценки остаточного ресурса повреждаемых узлов.

Можно сделать вывод, что для диагностирования и прогнозирования ресурса металла после длительной эксплуатации и правильного применения расчётных методов необходимы знания основных закономерностей процессов зарождения и накопления повреждений в тяжёлых условиях эксплуатации.[10]

**Разрушение труб поверхностей нагрева котлов вследствие перегрева.**

Все виды повреждений труб поверхностей нагрева в результате перегревов можно разделить на две группы: кратковременный и длительный перегрев.

*Кратковременный перегрев* – это разрушение от внутреннего давления пара при перегреве до температур, при которых предел текучести становится равным или меньше рабочих напряжений. В условиях высоких температур одновременно с деформированием развиваются процессы динамической рекристаллизации, происходит устранение деформационного упрочнения, облегчения деформации.

Основной причиной разрыва труб при кратковременном перегреве выступает снижение прочностных характеристик металла из-за его нагрева до критических температур. Разрушение будет происходить при температуре, когда рабочие напряжения в стенке трубы будут превышать предел текучести материала для текущей температуры эксплуатации. Особенностью такого разрушения является значительное утонение стенки трубы в месте разрыва, больше раскрытие, сильный изгиб трубы, край разрыва заострён.



Рис. 1. Повреждённая труба потолочного пароперегревателя Котла №13 Кемеровская ГРЭС

*Длительный перегрев.* Причиной разрыва труб при длительном перегреве является ползучесть металла, поэтому разрушение происходит с деформацией и плавным раскрытием. Длительность работы до разрыва зависит от фактической температуры и рабочих напряжений и может длиться от нескольких часов до многих тысяч часов. Отличительными признаками длительного перегрева являются: наличие значительного слоя окалины на поверхности труб, небольшая деформация трубы и утонение стенки в месте разрушения, а также результаты металлографического анализа. Чем выше температура перегрева, тем заметнее увеличение диаметра и утонение стенки трубы. При длительных перегревах в микроструктуре металла наблюдается полная трансформация зёрен перлита и сорбита отпуска с образованием феррито-карбидной структуры. Около основной трещины широкая зона повреждается порами и микротрещинами.[2]



Рис. 2. Повреждённая труба конвективного пароперегревателя 5 ступени Котла №8 Ново-Кемеровская ТЭЦ

### **Коррозия металла**

*Коррозия металла* – это процесс разрушения металла в результате химического или электрохимического взаимодействия факторами окружающей среды.

Общая коррозия протекает по всей поверхности. Она может быть равномерной и неравномерной. Местная коррозия охватывает лишь некоторые участки поверхности трубы. Коррозия может быть наружной и внутренней. Коррозионные повреждения труб проявляются в виде язвин, раковин, которые утоняют стенку и в дальнейшем превращаются в свищи или трещины.



Рис. 3. Язвенная коррозия

Очагами интенсивной наружной коррозии поверхностей нагрева являются места прохода через опорные стойки, так как между стойками и поверхность труб скапливается влага от промывки котлов.

### **Коррозионная усталость**

Работа металла труб при переменных тепловых напряжениях приводит к образованию трещин усталостного характера. Коррозионно-усталостные повреждения характеризуются дефектами, у которых глубина в 2 раза и более превышает ширину.

Коррозионно-усталостные трещины могут быть не только кольцевыми, но и продольными, имеющими место на гребках. Это зависит от направления максимального напряжения. Коррозионно-усталостные трещины на гребках образуются на внутренней поверхности и сосредоточены вдоль нейтральной зоны. Дефекты представляют собой трещины клиновидного типа, транскристаллитные с тупым концом.[9]



Рис. 4. Коррозионно-усталостные трещины на внутренней поверхности гребка.

Узкая область трубы около нейтральной линии является областью максимальных тангенциальных напряжений, поскольку верхняя часть трубы растягивается, а нижняя сжимается. В результате длительной эксплуатации при достижении критического количества циклов в этой области образуются дефекты, которые развиваются под действием коррозионных процессов.

### **Ползучесть металла.**

Эксплуатация деталей тепломеханического оборудования в условиях повышенных температур под напряжением сопровождается рядом процессов, происходящих в металле, в результате чего происходит его постепенное деформирование. Это явление называется ползучестью.

Процессы, которые возникают в металле в условиях ползучести можно разделить на две группы:

- упрочняющие процессы – процессы выделения дисперсных частиц вторичных фаз, накопление и перераспределение дислокаций, стабилизация субструктуры;
- разупрочняющие процессы – обеднение твёрдого раствора легирующими элементами, укрупнение частиц вторичных фаз, увеличение расстояния между карбидами, процессы возврата и рекристаллизации.[8]

Все перлитные стали при ползучести деформируются по кривой зависимости деформации от времени, которая условно делится на три стадии: затухающая, квазиравномерная и ускоренная ползучесть.

Самую значительную долю долговечности занимает третья стадия - ускоренной ползучести. Переход ползучести в данную стадию обусловлен преобладанием разупрочняющих процессов над упрочняющими. На этой стадии наблюдается развитие процессов рекристаллизации в зёрнах сорбита отпуска. На третьей стадии возрастает скорость ползучести и идёт процесс накопления пор в структуре стали.[5]

### **Заключение**

В данной статье проведён анализ повреждаемости энергетического оборудования из стали 12Х1МФ и 15Х1М1Ф. Одним из самых опасных явлений является коррозия, коррозионная усталость, ползучесть, а также длительный и кратковременный перегрев металла.

В течение 2026 года планируется провести неразрушающий контроль вырезанных образцов с различной наработкой спектрально-акустическим методом системой «Астрон», а также ряд исследований физико-механических свойств и микроструктур. Образцы будут представлены с различных станций Кузбасса, таких как Ново-Кемеровская ТЭЦ, Беловская ГРЭС, Кемеровская ГРЭС. После всех проведённых исследований, испытаний и обработки информации будет проведён сравнительный анализ состояния металла в зависимости от различного срока эксплуатации оборудования.

### **Список литературы**

1. Абабков Н.В., Смирнов А.Н., Данилов В.И., Горбатенко В.В., Попова Н.А., Никоненко Е.Л., Пимонов М.В., Телегуз А.С. Прогнозирование и оценка остаточного ресурса энергетического оборудования, 2024 – 231 с.
2. Крутасова Е.И., Надёжность металла энергетического оборудования, 1981-238 с.
3. Антикайн П.А., Должанский П.Р., Глебова Л.И. Опыт длительной эксплуатации паропровода из стали 12Х1МФ – Теплоэнергетика, 1975, №8.
4. Смирнов А.Н. / Под общ. ред. Блюменштейна В.Ю., Кречетова А.А. Контроль. Диагностика. Ресурс. Кемерово, 2007 – с.168-170.
5. Куманин В.И., Алексеев С.В., Ковалёва Л.А. Долговечность металла в условиях ползучести. М.: Металлургия, 1988.
6. Гофман Ю.М. Оценка работоспособности металла энергооборудования ТЭС. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 136 с.:
7. Н.В. Бугай, Т.Г. Березина, И.И. Трунин. Работоспособность и долговечность металла энергетического оборудования. – 1994 -271с.
8. Березина Т.Г. Исследования закономерностей развития разрушения при ползучести теплоустойчивых сталей. – 1985. №8. С. 48-52.
9. Акользин П.А. Предупреждение коррозии металла паровых котлов. М.: Энергия, 1975.
10. Ашихмина Л.А., Березина Т.Г., Тайхенберг Ю.Н. Анализ повреждаемости длительно работающих паропроводов // Электрические станции. 1982. №9. С. 36-39.