

УДК 621.181.12

УРОВЕНЬ ВНУТРЕННИХ СТРУКТУРНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ КАК ПОКАЗАТЕЛЬ РАБОТОСПОСОБНОСТИ ДЛИТЕЛЬНО ЭКСПЛУАТИРУЕМОГО ПАРОПЕРЕГРЕВАТЕЛЯ

Л.Л. Любимова, А.А. Макеев, А.С. Заворин, А.А. Ташлыков, Р.Н. Фисенко

Томский политехнический университет

E-mail: tashlykov@tpu.ru

Проведено обоснование возможности тестирования поверхностей нагрева паровых котлов на основе анализа внутренних структурных напряжений. На основе экспериментальных данных определено текущее физическое состояние поверхности нагрева, выработавшей парковый ресурс, с определением способности материала к деформированию без разрушения, проведена оценка запаса прочности, установлен критерий, отражающий запас прочности металла паропровода применительно к условиям эксплуатации. На основе оценочных значений запаса прочности выработаны рекомендации для продления срока службы металла, выработавшего проектный ресурс.

Ключевые слова:

Паровой котел, пароперегреватель, поверхность нагрева, внутренние структурные напряжения, плотность дислокаций, рентгенодилатометрия, проектный ресурс.

Key words:

Steam boiler, superheater, heating surface, internal structural stresses, dislocation density, X-ray measurements, design resource.

Введение

Эксплуатация трубно-оболочечных элементов теплотехнического оборудования при современных требованиях к интенсификации параметров рабочих процессов требует обеспечения высокой надежности конструктивных элементов.

В теории надежности применяются аналитические методы расчета, позволяющие определить экстремальные значения параметров математической модели, соответствующие условиям долговечности. В основу метода закладывается варьирование переменных параметров – температуры, внешних напряжений (эксплуатационные факторы), структура зёрен и т. д. [1]. Однако долговечность является многофакторным состоянием и срок службы труб, работающих в переменных и стационарных температурно-силовых режимах, зависит также от исходной структуры материала, условий термообработки, колебаний концентраций легирующих добавок, эксплуатационных факторов, рабочей среды и т. д. Таким образом, неопределенности при прогнозировании ресурса объектов, связанные с аналитическим описанием механизмов деградации конструктивных материалов, делают задачу определения характеристик надежности при эксплуатации весьма сложной [2].

В ряду факторов, практически не учитываемых в процессах деградации материалов трубно-оболочечных элементов, можно отметить внутренние структурные напряжения, которые тормозят движение дислокаций [3], затрудняя сдвиговые процессы. Но именно процессы скольжения и сдвиговой деформации являются основными при эксплуатации, создают зоны концентрации напряжений, в которых фактические напряжения достигают предела текучести и даже превышают его, и этими зонами определяется надежность и ресурс оборудования [4].

И.А. Одинг [5] отмечал, что при уменьшении дислокаций растет сопротивляемость материала

деформированию, которая является критерием прочности. Следовательно, внутренние напряжения, отражая сопротивляемость материала деформированию, являются критерием прочности и участвуют в формировании тех свойств, которые определяют его пригодность к службе под напряжением и температурой.

Таким образом, актуальными остаются экспериментальные исследования, вносящие вклад в установление факторов, влияющих на индивидуальный ресурс и работоспособность оборудования. В их ряду особый научный интерес представляет поведение внутренних структурных напряжений.

В этой связи задачей настоящей работы определено выявление на основе рентгеновского микроструктурного анализа соответствующих параметров для склонных к повреждениям поверхностей нагрева паровых котлов с целью прогнозирования предполагаемых повреждений по величине и характеру изменений внутренних структурных напряжений.

Образцы

Для исследования представлен поврежденный участок трубы диаметром 32 мм пароперегревателя, отработавшего ~150 тыс. ч. Участок, образованный сварным соединением труб из стали 12Х1МФ и 12Х18Н12Т, относился к выходной части пароперегревателя с температурой эксплуатации 500...560 °С. Вид повреждения – трещина в сварном шве со стороны стали 12Х1МФ (рис. 1).

Сталь 12Х18Н12Т применяется для изготовления теплообменников, поковок энергетического оборудования, крепежа с рабочей температурой до 600 °С. Жаростойкий материал для печей с рабочей температурой до 600 °С. Основные характеристики прочности и пластичности (при $t=20$ °С): предел прочности $\sigma_b=560$ МПа, предел пластичности $\sigma_{0.2}=230$ МПа, относительное удлинение $\delta=46$ %, относительное сужение $\psi=66$ %.

Сталь 12Х1МФ применяется для изготовления труб перегревателей, трубопроводов высокого давления для весьма длительной службы при температурах до 585 °С. Основные характеристики прочности и пластичности (при $t=20$ °С): $\sigma_b=520$ МПа, $\sigma_{0,2}=330$ МПа, $\delta=25$ %; $\psi=67$ %.

Из трубы (рис. 1) были вырезаны два образца (рис. 2 и 3).



Рис. 1. Места вырезки образцов



Рис. 2. Исследованный образец (сталь 12Х18Н12Т): а) наружная; б) внутренняя сторона



Рис. 3. Исследованный образец (сталь 12Х1МФ): а) наружная; б) внутренняя сторона

Методические основы эксперимента

Прохождение дислокации через кристалл приводит к сдвиговым процессам в атомном масштабе, поэтому пластическая деформация, происходящая за пределами упругой области деформаций, связывается с движением дислокаций. Механическая прочность твердых тел определяется наличием дислокаций. Влияние дислокаций на свойства материала можно проиллюстрировать кривой И.А. Одинг (рис. 4).

Согласно гипотезе И.А. Одинг сопротивление материала деформированию растет с уменьшением плотности дислокаций (левая ветвь кривой, рис. 4) и достигает максимума при минимальной плотности дислокаций.

При деформации образца, обладающего высоким сопротивлением ползучести при малой плотности дислокаций, он может быть разрушен прежде, чем дислокации смогут обеспечить достаточные сдвиги. При увеличении плотности дислокаций сопротивление деформированию уменьшается и металл характеризуется пластичностью и ползучестью. Упрочнение материала при увеличении дислокаций выше критической плотности $\rho_{кр}$ (правая ветвь кривой, рис. 4) И.А. Одинг объяснял наклепом. Таким образом, кривая (рис. 4) характеризует два крайних состояния металла: высокую прочность при малой плотности структурных дефектов и высокую пластичность при $\rho_{кр}$. Все промежуточные положения на кривой И.А. Одинг характеризуют свойства материала в тех или иных сочетаниях прочности и пластичности.

Длительная служба металла при высоких температурах таким образом, исходя из кривой И.А. Одинг, обуславливается двумя свойствами — сопротивляемостью деформированию (прочностью) и сопротивляемостью разрушению при деформировании (пластичностью).

Запас прочности можно рассматривать в определенном соотношении двух величин — предела прочности и предела ползучести. Так как тестирование образцов, отработавших ресурс 150 тыс. ч, проводилось по кривой рис. 4, на первом этапе определялось текущее состояние материала относительно кривой И.А. Одинг, после чего образец подвергался силовому воздействию с целью тестирования его сопротивляемости деформированию. На втором этапе образцы подвергались последовательному отжигу с целью тестирования наличия запаса по ресурсу пластичности. Поэтому в основу методики заложена термомеханическая деформация исследуемых образцов. После каждого воздействия производились измерения параметров линий рентгеновского дифракционного спектра, в результате чего определены функциональные зависимости перераспределения внутрискруктурного напряжения от деформирующего давления и температуры [6, 7]. Для анализа уширения линий рентгеновских спектров, с целью обеспечения высокой точности рентгенодиагностики, выполнена специальная настройка аппарата рентгеноструктурного анализа с использованием кварцевого монохроматора с выделением β -линии.

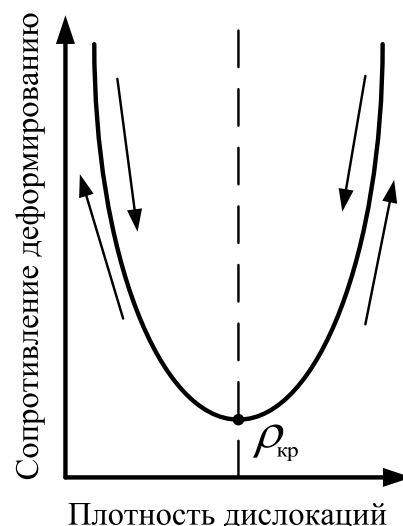


Рис. 4. Зависимость сопротивления деформированию от плотности дислокаций (гипотеза И.А. Одинг)

Экспериментальные результаты. Обсуждение

На рис. 5 представлена зависимость внутризменных напряжений от плотности дислокаций для образца стали 12Х18Н12Т. Исходное состояние трубы после наработки 150 тыс. ч характеризуется высоким уровнем внутренних напряжений (точка 1, рис. 5, $\sigma_{II}=965$ МПа) и относительно невысокой плотностью структурных дефектов $\rho=5,33 \cdot 10^{10}$ 1/см².

Будет ли такой образец разрушен при дальнейшем его деформировании в условиях сложно напряженной конструкции пароперегревателя? Способность к дальнейшему деформированию без разрушения образец обнаруживает при силовом воздействии, при котором состояние из точки 1 перемещается в точку 2. При этом внутренние напряжения уменьшаются с 965 до 654 МПа, а плотность структурных дефектов увеличивается с $5,33 \cdot 10^{10}$ до $17,2 \cdot 10^{10} \text{ 1/см}^2$. И.А. Одинг указывал [5], что если деформация протекает с увеличением плотности дислокаций, то пластичность такого металла еще далека от предельной ползучести. Таким образом, работа пароперегревательной трубы на участке ползучести, протекающей с возрастающей скоростью, не будет приводить к прогрессирующему разрушению, и по этому критерию металл пароперегревателя мог бы эксплуатироваться дальше.

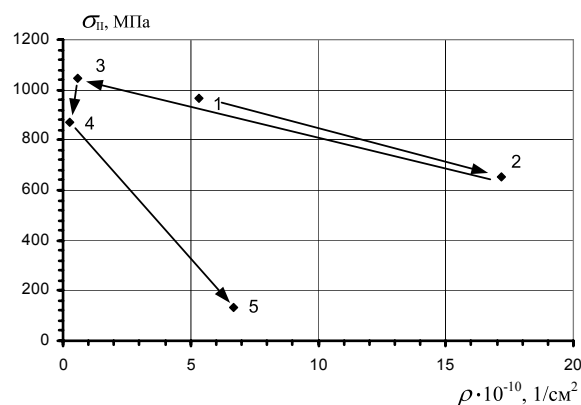


Рис. 5. Распределение микронапряжений второго рода σ_{II} от плотности структурных дефектов образца трубы из стали 12X18H12T: 1) исходное состояние; 2) после механического воздействия; 3–5) после нагрева до 120, 430, 600 °С

Под влиянием температуры в результате последовательного отжига происходит сдвиг зависимости внутренних напряжений с базовой кривой (точки 1, 2) влево (точки 3–5, рис. 5), а нагрев до 600 °С приводит к увеличению числа дислокаций до практически исходной величины (точка 5, $\rho = 6,67 \cdot 10^{10} \text{ 1/см}^2$). Значение внутренних напряжений в точке 5 равно $\sigma_{II} = 132 \text{ МПа}$. Полученное значение целесообразно сравнить с пределом длительной прочности $\sigma_{дл}$ для стали 12X18H12T, приводимом с справочной литературе [9]: для температуры 575 °С на ресурс 10 тыс. ч $\sigma_{дл} = 155 \text{ МПа}$; для температуры 575 °С на ресурс 100 тыс. ч $\sigma_{дл} = 130 \text{ МПа}$.

Внутренние структурные напряжения, как уже отмечалось, представляют собой прочностную характеристику материала и отражают сопротивление деформированию. Тормозя движение дислокаций, они будут препятствовать формоизменению стенки трубы, уменьшат скорость ползучести. Но внутренние напряжения представляют собой также и ресурс сил межатомных связей, что не противоречит физической природе прочности. Так, в твердом теле сила взаимодействия двух соседних

атомов зависит от расстояния между ними. Если это расстояние меньше равновесного, то атомы отталкиваются (сила отталкивания положительная), если расстояние больше равновесного – атомы притягиваются. Если действующая внешняя сила оказывается больше, чем та, которая удерживает атомы, они беспрепятственно будут удаляться друг от друга, и в локальном объеме ресурс сил межатомных связей будет исчерпан. Исходя из эксперимента, надо полагать, что эта внешняя сила для трубной стали 12X18H12T должна быть более 132 МПа при условиях эксплуатации.

Нормами расчета на прочность [8] допускаемые напряжения, гарантирующие нормальную работу пароперегревателя при температуре 570 °С без разрушений в процессе проектного срока службы, равны $\sigma_{доп} = 97 \text{ МПа}$ (для ресурса 100 тыс. ч) и $\sigma_{доп} = 92 \text{ МПа}$ (для ресурса 150 тыс. ч).

Таким образом, видно, что в расчетах на прочность заложен существенный запас прочности, который применительно к конкретному случаю может быть оценен как отношение:

$$K\sigma = \sigma_{II} / \sigma_{доп} = 132 / 92 = 1,43. \quad (1)$$

При этом величина σ_{II} представляет собой фактически установившийся предел прочности стали на отработавший ресурс 150 тыс. ч при давлении среды 14 МПа и температуре 500...560 °С. С учетом коэффициента использования оборудования, равного 0,7, максимальный запас прочности стали 12X18H12T составит $K\sigma = 2,04$. С учетом оценок по запасу прочности срок службы такого паропровода можно продлить как минимум на 100 тыс. ч.

На этой основе можно заключить, что структура стенки трубы из стали 12X18H12T обладает достаточным ресурсом прочностных, пластических и жаропрочных свойств, хорошей структурной стабильностью и не является причиной разрушения пароперегревателя.

На рис. 6 представлена зависимость внутризменных напряжений от плотности дислокаций для образца стали 12X1МФ.

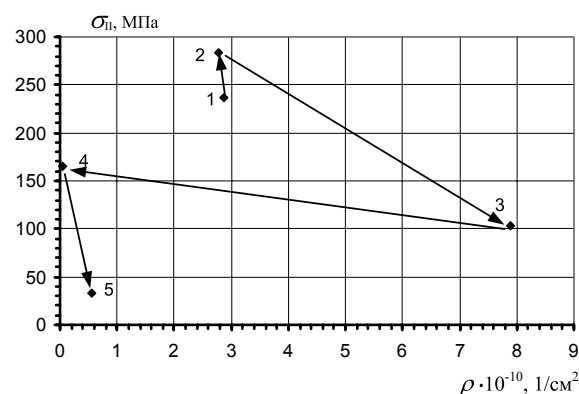


Рис. 6. Распределение микронапряжений второго рода σ_{II} от плотности структурных дефектов образца трубы из стали 12X1МФ: 1) исходное состояние; 2) после механического воздействия; 3–5) после нагрева до 120, 430, 600 °С

Из рис. 6 видно, что при силовом воздействии растет сопротивление деформированию от $\sigma_{II}=237$ МПа (точка 1) до $\sigma_{II}=283$ МПа (точка 2). Деформация не приводит к увеличению плотности дислокаций (в точке 1 $\rho=2,87 \cdot 10^{10}$ 1/см², в точке 2 – $2,77 \cdot 10^{10}$ 1/см²).

Пользуясь выражением (1), запас прочности $K\sigma$ в точках 3, 4 и 5 можно оценить следующим образом:

$$K\sigma(120^\circ\text{C})=\sigma_{II}/\sigma_{доп}=103/173=0,58,$$

$$K\sigma(430^\circ\text{C})=\sigma_{II}/\sigma_{доп}=165/136=1,21, \quad (2)$$

$$K\sigma(600^\circ\text{C})=\sigma_{II}/\sigma_{доп}=33/65=0,51.$$

Сталь 12Х1МФ паропровода обнаруживает весьма сложное и даже аномальное поведение. Это уже было замечено ранее для данной стали [10], где отмечалось, что в процессе эксплуатации при высоких температурах наблюдается существенное изменение микроструктуры, фазового состава, легированности твердого раствора (перераспределение компонент). Следует отметить, что именно эти факторы среди других являются причиной возникновения внутренних напряжений.

Не углубляясь в природу этого явления, можно констатировать следующее.

Сталь 12Х1МФ, созданная для изготовления паропроводов блоков 150 и 200 МВт с расчетным давлением 14 МПа и температурой 565...570 °С, а также для паропроводов с поперечными связями на параметры $p=10...11$ МПа, $t=540^\circ\text{C}$, не обладает стабильностью свойств. При наличии градиентов температур, наблюдаемых в переменных температурных режимах, внешних, а также и внутренних знакопеременных нагрузок, это обстоятельство приведет к явлениям термической усталости и прогрессирующим разрушениям.

Приведенный пример (2) показывает, что данная сталь не может надежно работать при служебной температуре 500...560 °С, т. к. не обладает установленным Нормами запасом прочности. Кроме того, как следует из рис. 6, внутренние напряжения практически «заблокировали» движение дислокаций (430 и 600 °С), что проявится в процессе эксплуатации в виде склонности стали к растрескиванию.

Следует отметить, что в [10] определяется коэффициент запаса прочности K для различных типов размеров труб. Показано, что коэффициент запаса прочности при гарантированных значениях характеристик длительной прочности должен удовлетворять условию:

$$K=\sigma_{дл.пр.факт}/\sigma_{пр}\geq 1,5, \quad (3)$$

где $\sigma_{дл.пр.факт}$ – фактический предел длительной прочности металла после 100 тыс. ч эксплуатации, МПа; $\sigma_{пр}$ – приведенное напряжение; МПа, равное:

$$\sigma_{пр}=p(D-S)/200S,$$

где p – давление, МПа; D – наружный диаметр, мм; S – толщина стенки, мм.

Представленные отношения (1), (2) и их сравнение с (3) косвенно подтверждают сформулированные здесь положения о возможности диагностики и оценки остаточного ресурса длительно работающих паропроводов по внутренним структурным напряжениям.

Таким образом, по данным тестирования стальной паропровода можно предположить, что разрушение сложно-напряженного сварного шва со стороны жаропрочной низколегированной стали 12Х1МФ происходит вследствие термической усталости из-за наступившей в процессе эксплуатации несовместимости материалов вследствие резких изменений служебных свойств стали.

Выводы

1. Обоснована возможность тестирования поверхностей нагрева паровых котлов на основе анализа внутренних структурных напряжений второго рода, определено текущее физическое состояние трубы пароперегревателя, выработавшего парковый ресурс, с определением способности материала к деформированию без разрушения.
2. Применительно к параметрам эксплуатации для оценки продления срока службы поверхностей нагрева, выработавших проектный ресурс, при сравнении допускаемых и внутренних структурных напряжений с учетом их перераспределения в процессе термомеханических воздействий установлен критерий, отражающий запас прочности металла пароперегревателя.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мельников Г.П. Долговечность элементов конструкций в условиях высоких температур при стендовых испытаниях. – М.: Атомиздат, 1979. – 80 с.
2. Острейковский В.А. Теория надежности. – М.: Высшая школа, 2003. – 463 с.
3. Достижения науки о коррозии и технологии защиты от нее. Коррозионное растрескивание металлов / под ред. М. Фонтана, Р. Стейла; Пер. с англ. под ред. В.С. Синявского. – М.: Металлургия, 1985. – 488 с.
4. Дубов А.А. Проблемы оценки остаточного ресурса стареющего оборудования // Теплоэнергетика. – 2003. – № 11. – С. 54–57.
5. Одинг И.А., Иванова В.С., Бурдукский В.В., Геминев В.Н. Теория ползучести и длительной прочности металлов. – М.: Гос. изд-во лит-ры по цветной и черной металлургии, 1959. – 488 с.
6. Любимова Л.Л. Методика рентгенометрического анализа внутрискрупульных напряжений // Известия Томского политехнического университета. – 2003. – Т. 306. – № 4. – С. 72–77.
7. Любимова Л.Л., Макеев А.А., Заворин А.С., Казанов А.М. Исследование структурной устойчивости стали труб пароперегревателя // Известия Томского политехнического университета. – 2002. – Т. 305. – № 2. – С. 157–161.
8. ОСТ 108.031.08-85. Котлы стационарные и трубопроводы пара и горячей воды. Нормы расчета на прочность. Общие положения по обоснованию толщины стенки.
9. Масленков С.Б., Масленкова Е.А. Стали и сплавы для высоких температур: Справ. изд. в 2-х кн. Кн. 2. – М.: Металлургия, 1991. – 832 с.
10. Крутасова Е.И. Надежность металла энергетического оборудования. – М.: Энергоиздат, 1981. – 240 с.

Поступила 19.01.2011 г.