

# РЕНТГЕНОМЕТРИЧЕСКОЕ ВЫЯВЛЕНИЕ ПРИЗНАКОВ РАЗУПРОЧНЕНИЯ КОТЕЛЬНЫХ СТАЛЕЙ

А.А. Ташлыков, В.Ф. Почуев

Рекомендации по расчету на прочность и компенсацию температурных удлинений, содержащиеся в ряде руководств по проектированию стационарных трубопроводов и основанные на методе расчета по допускаемым напряжениям, при проектировании трубных поверхностей теплообмена паровых котлов могут использоваться в ограниченных пределах, так как они не учитывают влияния температурных нагрузок, масштабного фактора, условий окисления и образования золошлаковых отложений поверхностей, характерных для топочного пространства. Типовые материалы, нормы и рекомендации проектных организаций, нормы и методики расчета, не всегда увязанные между собой и не в полной мере отражающие реальные условия работы, приводят к чрезмерно большим запасам прочности и к увеличению металлоемкости котельных агрегатов. Это связано с тем, что определение толщины стенок труб  $\delta$ , м, по допускаемому напряжению производится по формуле [1]:

$$\delta = p \cdot d_n / (2\phi\sigma_{доп} + p), \quad (1)$$

где  $\phi$  – коэффициент прочности сварных швов, для цельнотянутых труб  $\phi=1$ ;  $p$  – давление, МПа;  $\sigma_{доп}$  – допускаемое напряжение, принимается от предела пластичности  $\sigma_{0,2}$  с учетом ряда понижающих коэффициентов: температуры, ресурса, безопасности, степени надежности и других, принятых из опыта межремонтных периодов эксплуатации. Преобразуя формулу (1), получаем зависимость для определения допустимого внутреннего напряжения в стенке трубы:

$$\sigma_{доп} = (d_n - d_{вн}) \cdot p / (4 \cdot \delta). \quad (2)$$

В значение  $\sigma_{доп}$  не заложены внутрискрустные, температурные и напряжения тангенциального растяжения  $\sigma_{раст}$  [1]:

$$\sigma_{раст} = p \cdot d_{вн} / (2 \cdot \delta). \quad (3)$$

Температурные напряжения  $\sigma_t$  зависят от температурного перепада на стенке трубы  $\Delta T$  [3]:

$$\sigma_t = \alpha \cdot E \cdot \Delta T / (1 - \mu), \quad (4)$$

величина которого определяется теплонапряженностью и термическим сопротивлением стенки трубы [3]:

$$\Delta T = q_F \cdot \delta / \lambda_{эфф}. \quad (5)$$

Структурные напряжения формируются зональными и внутрискрустными бейнитными температурными превращениями в условиях ползучести, термической и механической усталости. В комплексе, допускаемое напряжение определяется:

$$\sigma_{доп} = \sigma_{0,2} - \sigma_{раст} - \sigma_t - \sigma_{стр}. \quad (6)$$

Имея обоснованные представления о характере возникновения, распределения и влияния внутрискрустных напряжений на ползучесть, механические и теплофизические свойства материала стенки трубы, можно:

- прогнозировать температурные диапазоны безопасной эксплуатации в условиях упрочнения;
- определить предельную величину теплонапряженности и скорости подъема температуры;
- выделить температурный диапазон (амплитуду) и скорость изменения температуры термоциклирования;
- принимать решения относительно продолжительности опрессовок в процессе механических и тепловых испытаний поверхностей нагрева;
- добиваться упрочнения в режиме кратковременного повышения давления при установленных температурах рабочей жидкости в гидравлических испытаниях.

Хотя действующие правила гидравлических испытаний [2] направлены на выявление дефектов, связанных с негерметичностью и остаточными деформациями, а параметры испытаний обобщают накопленный опыт монтажа и эксплуатации котельной техники, недостаточный объем информации о микромеханике внутрискрустных изменений сталей стенок труб и тонкостенных оболочек в процессе гидравлических испытаний может привести к сокращению срока эксплуатации из-за необоснованного назначения величин.

В соответствии с действующими правилами гидравлических испытаний металлических сосудов величина пробного давления  $P_{пр}$  определяется [4]:

$$P_{пр} = 1,25 \cdot p \cdot \sigma_{20} / \sigma_t, \quad (7)$$

## РЕНТГЕНОМЕТРИЧЕСКОЕ ВЫЯВЛЕНИЕ ПРИЗНАКОВ РАЗУПРОЧНЕНИЯ КОТЕЛЬНЫХ СТАЛЕЙ

где  $\sigma_{20}$ ,  $\sigma_t$  – допускаемые напряжения при 20°C и расчетной температуре.

Время выдержки при гидравлических испытаниях устанавливается в зависимости от толщины стенки от 10 до 60, но не менее 5 минут.

Трубопроводы, блоки трубопроводов и их детали подвергаются гидравлическим испытаниям пробным давлением с коэффициентом 1,25 р, МПа, при температуре воды от +5 до +40 °С на время не менее 10 минут, если они предварительно не подвергались неразрушающей дефектоскопии.

Значение пробного давления  $P_n$  паровых и водогрейных котлов принимается в зависимости от рабочего в диапазоне от 0,3 и свыше 0,5 МПа равным 1,25 р, а при 0,2 – 0,5 МПа, равным 1,5 р. Испытания проводятся водой при температуре от + 5 до +40 °С, которая может быть увеличена по рекомендации научно-исследовательской организации до +80 °С. Время подъема давления должно быть не менее 10 минут в последующей выдержкой под пробным давлением больше 10 минут. Таким образом, пробные давления и температура воды при проведении опрессовок используют запасы прочности в 25 – 50 % при заложенных в проекте 12 – 13 % без учета релаксации, термоциклирования и других явлений низко- и высокотемпературной ползучести.

Несмотря на то, что процесс дальнейшей эксплуатации трубопроводов и котлов сопровождается текущим контролем диаметра труб и замерами толщины стенок при периодическом освидетельствовании Ростехнадзором, структурное состояние металла стенок труб и показатели прочности не подвергаются текущему контролю, а визуально выявленные дефектные трубы заменяются при текущем и плановом ремонтах до окончания выработки ресурса металла котла. Хотя заложенные расчетные показатели прочности металла труб предусматривают эксплуатацию в течение 200 – 300 тыс. часов, практика свидетельствует о значительном снижении ресурса при применяемых толщинах стенок 2,5 – 5 мм, причина которого до настоящего времени не установлена и актуальность исследований в этой области не снимается свыше 50 лет.

При изучении жаропрочности котельных сталей с толщинами стенок свыше 5 мм не обнаруживается отклонений от свойств типовых цилиндрических образцов по стандартам механических испытаний, что давало основание экстраполировать результаты на меньшие размеры. В работе [5] изучено влияние масштабного фактора в области толщин ме-

талла, соизмеримых с размером зерна, на процесс длительного разрушения в условиях ползучести. Отмечается, что для исследованной стали марки Ст.3 влияние масштабного фактора на жаропрочность сказывается при толщине образца менее 1 мм, в связи с чем авторы предлагают отказаться от очень тонких образцов толщиной меньше 1 мм при испытаниях на длительную прочность и ползучесть. В качестве причины рассматривается зарождение трещин в поверхностном слое из-за неоднородности пластической деформации вследствие отличия структурно-силовых условий от внутрилежащих слоев металла. Рассматривая механизм упрочнения при пластической деформации, выделяется деструкция как разновидность деформации, приводящей к уменьшению плотности металла вследствие порообразования [6]. Плотность образца стали в месте разрушения уменьшается на 1,2 – 1,3 %. Деструкция искажает показатели прочности стали при проведении механических испытаний, так как силовое значение по ординате, отнесенное к сечению образца в момент измерения, учитывает пустоты как сплошной металл. Это дает основания считать порообразование основной причиной разупрочнения металла при пластическом деформировании, и если размер пор соответствует размерам зерна, то проявление масштабного фактора при разрушении выглядит обоснованным. По данным, теоретический предел прочности металла соответствует  $\sigma_{теор} = 0,1 \cdot E$ , что дает основания полагать искусственное занижение  $\sigma_{доп}$  в расчетах на 1 - 2 порядка.

Пластическое деформирование способно привести к существенному упрочнению стали стенок труб, если при этом удастся избежать порообразования в процессе проведения опрессовки и определить величину предельной нагрузки, исключающей хрупкое разрушение зерна.

В этой связи целью исследования является изучение влияния приложенного внешнего давления при пластическом деформировании стали на взаимосвязь между остаточным внутренним напряжением и плотностью дефектов на внутренней и внешней поверхностях стенки трубы, позволяющее выделить предельное значение внутреннего напряжения и допустимое напряжение низкотемпературной ползучести.

В основу предполагаемого механизма трещинообразования закладывается структурная модель, представленная рисунком (рис.1).

Основой структуры представляется матрица (4) – аморфизированное межзеренное граничное образование, включающее газонаполненные поры и неупорядоченные включения различного состава, возникающие при затвердевании расплава. Структурные зерна (3) представлены кристаллитами (1), разделенными внутризеренными границами (2), возникающими в ходе распада твердого раствора. В этом представлении внутризеренные и межзеренные границы имеют разный со-

став и, соответственно, различные свойства. Внутрискруктурные напряжения возникают как следствие термических усадок при бейнитных превращениях. Зональные макронапряжения уравниваются матрицей, релаксируют в ходе низкотемпературной и термической ползучести, а внутризеренные устанавливаются и уравниваются в пределах внутризеренных границ и способны изменяться при температурных бейнитных превращениях.

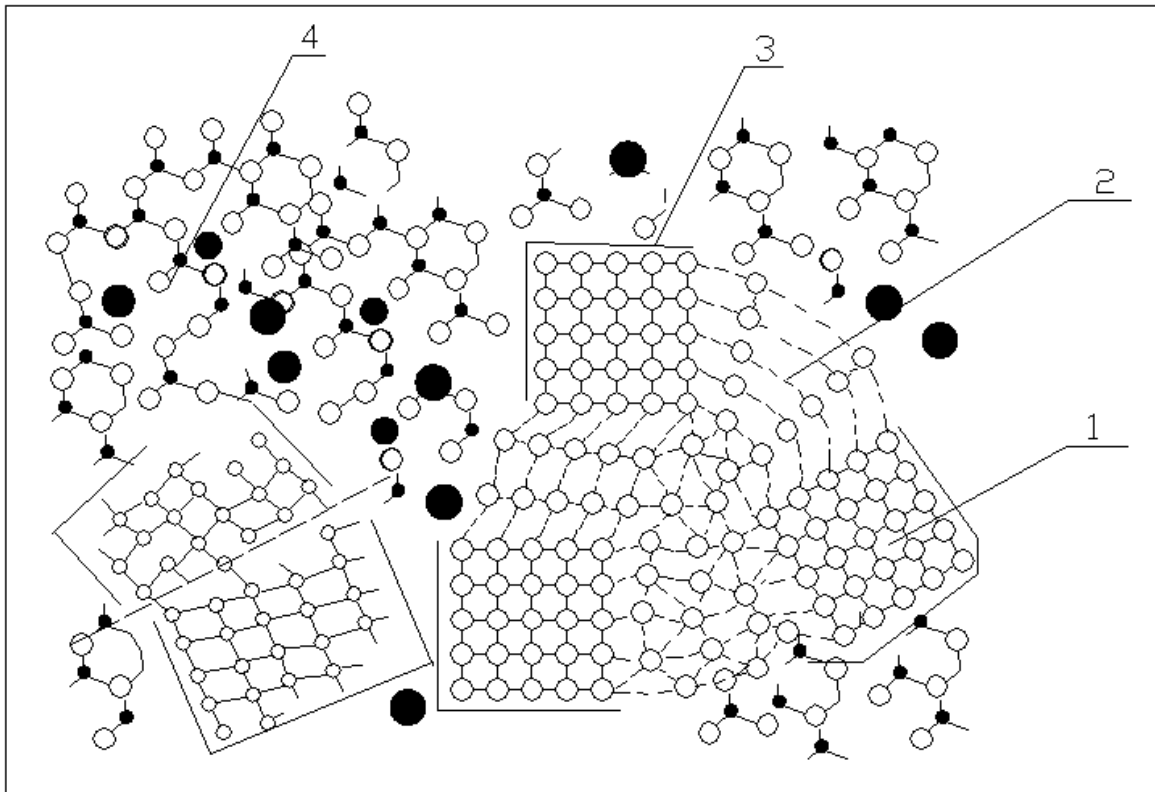


Рис.1. Строение металла стенки трубы

Принимая за основу энергетический критерий хрупкого разрушения Гриффитса  $G$ , усилие, необходимое для продвижения трещины на длину  $l$  равно:

$$[G]_{кр} = \pi \cdot (l \cdot \sigma^2)_{кр} / E. \quad (8)$$

Используя экспериментально определяемое значение коэффициента интенсивности напряжения  $K_{1c}$  в соответствии с формулой:

$$K_{1c} = G \cdot \sqrt{\pi \cdot l}, \quad (9)$$

определяем эффективный диаметр зерна,  $d$ :

$$d = K^2 / (\pi \cdot \sigma^2), \quad (10)$$

разрушение которого возможно под действием напряжения  $\sigma$ .

Согласно данным [7] значение  $K_{1c}$  зерна определяется:

$$K_{1c} = 0,1 \cdot E \cdot a^{0,5}. \quad (11)$$

Тогда критический диаметр зерна можно оценить по параметру кристаллической решетки,  $a$ :

$$d_{кр} = 0,01 \cdot E^2 \cdot a / (\pi \cdot \sigma_{max}^2). \quad (12)$$

Методика проведения исследований базируется на рентгенометрии изменения параметра кристаллической решетки после пластического деформирования образца стенки трубы гидравлическим прессом. Усилие пресования образца металла подбирается таким образом, чтобы был замечен последовательный переход от максимального значения относительной деформации кристаллической решетки к минимальному. Кристаллическая часть материала в ходе последовательного циклического пластического деформирования испытывает процессы хрупкого разрушения,

## РЕНТГЕНОМЕТРИЧЕСКОЕ ВЫЯВЛЕНИЕ ПРИЗНАКОВ РАЗУПРОЧНЕНИЯ КОТЕЛЬНЫХ СТАЛЕЙ

относительная деформация кристаллической решетки достигает предельной величины, возникает сквозная внутризеренная трещина. После снятия внешней нагрузки внутреннее напряжение зерна уменьшается и степень деформированности кристаллической решетки снижается. В последующем этапе деформирования происходит пластическое течение матрицы, на месте разлома зерна образуется деформированная пора, которая может перерасти в зональную трещину. Таким образом циклическое повышение внешней нагрузки на образец металла сопровождается достижением критического напряжения хрупкого разрушения зерна, релаксирующего до величины, определяющей пластическую деформацию матрицы.

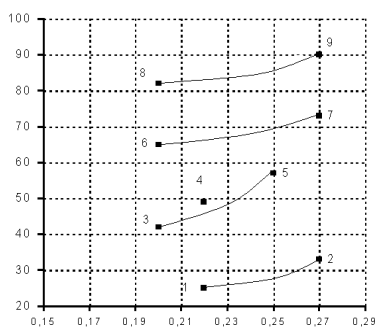


Рис. 2. Зависимость относительной деформации образца стенки трубы стали 10 от циклической внешней нагрузки: \* - нумерация точек соответствует циклам нагрузки

Рассчитывая внутренние напряжения в кристаллической решетке, пользуясь законом Гука:

$$\sigma_{стр} = \varepsilon \cdot E, \quad (13)$$

определяем напряжение пластического деформирования  $\sigma_{мин}$ , а расчеты по формуле

(12) дают минимальный критический диаметр зерна. Зная средний размер зерна образца стали, определяя внутривидовое напряжение  $\sigma_{вн}$  и используя зависимости (2), (3), (12), получаем формулу для вычисления критического давления опрессовки трубы:

$$P_{опр} = 4 \cdot \delta \cdot \frac{0,1 \cdot E / \sqrt{a/D} - \sigma_{стр}}{d_n - 3 \cdot d_{вн}}, \quad (14)$$

где  $D$  – средний размер зерна;  $E$  – модуль Юнга.

Величина определяемого по формуле (14) давления жидкости корректируется температурой и временем выдержки.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Водяные тепловые сети: Справочное руководство по проектированию. Под ред. Н.К. Громова, Е.П. Шубина. – М.: Энергоатомиздат, 1988.
2. Ростехнадзор СССР. Правила устройства и безопасной эксплуатации трубопроводов пара и горячей воды. – М.: Недра, 1970.
3. Конструкционные материалы ядерных реакторов. Часть 1. Ядерные и теплофизические свойства, основы коррозии и жаропрочности. Учебное пособие для вузов. – М.: Атомиздат, 1972, - 240 с.
4. Ростехнадзор СССР. Правила устройства и безопасной эксплуатации сосудов, работающих под давлением. М.: Металлургия, 1976.
5. Одинг И.А., Фридман З.Г. Роль поверхностных слоев при длительном разрушении металлов в условиях ползучести // Заводская лаборатория. – Т. XXV. – № 3, - 1959. - С. 329-332.
6. Гуляев А.П. Пластическая деформация за пределом прочности // Металловедение и термическая обработка металлов. – 1996, - №12, - С. 20– 22.
7. Мешков Ю.А. Энергетический критерий Гриффитса в микро- и макро механике разрушения хрупких тел // Металловедение и термическая обработка металлов. – 1996, – №1. – С. 25 – 30.