

УДК 539.52;621.181

## ЗАКОНОМЕРНОСТИ ИЗМЕНЕНИЙ ПАРАМЕТРА ЭЛЕМЕНТАРНОЙ ЯЧЕЙКИ КОТЕЛЬНОЙ СТАЛИ КАК КРИТЕРИЙ НАКОПЛЕНИЯ ПОВРЕЖДАЕМОСТИ

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

Томский политехнический университет

E-mail: tashlykov@tpu.ru

Проведено тестирование текущего физического состояния для оценки индивидуального физического ресурса стальных труб поверхностей нагрева котла по параметру элементарной ячейки. Показана экспериментальная кривая, позволяющая оценивать зарождение повреждаемости структуры на микроуровне, сопоставимом с размером элементарной ячейки; определять скорость и динамику накопления микроповреждаемости в структуре стенки трубы вплоть до потери прочности; тестировать текущее физическое состояние и устанавливать остаточный ресурс трубопровода по предельному изменению параметра элементарной кристаллической решетки стали.

### Ключевые слова:

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

### Key words:

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

Оценка работоспособности трубо- и паропроводов, деталей и узлов теплоэнергетического оборудования в условиях ползучести всегда является актуальной задачей, в особенности при физическом состоянии металла, близком к исчерпанию ресурса [1, 2].

Эта задача может быть решена или расчетным путем с учетом условий эксплуатации, или на основании анализа состояния металла каждой конкретной детали оборудования [1, 2].

При расчетах трудно учесть влияние на ползучесть и ресурс присутствующих в структуре фаз и других особенностей микроструктуры, микроструктурные напряжения первого и второго рода, разнотерность, наличие мало- и высокоугловых границ зерен, межфазные и межзеренные взаимодействия, неизотропность, неплотность, неоднородность, в том числе и внутризеренную, которые определяют свойства технического материала и его индивидуальные особенности [3].

В этой связи не утрачивают актуальности экспериментальные подходы, позволяющие проводить диагностику металла и прогнозировать возможный ресурс с учетом его реального физического состояния.

При анализе свойств и диагностике реального металла необходимо выбрать диагностические параметры, достоверно отражающие его текущее физическое состояние, и критерии достижения этими параметрами предельных величин, после которых наступает разрушение.

Таким объективным структурным параметром материала мог бы послужить период идентичности элементарной кристаллической ячейки стали, на величину которого окажут влияние не только внешние температурные и физические воздействия, но и любые внутренние изменения и превращения.

Таким образом, в данной работе за критериальный параметр выбирается не один из параметров

повреждаемости, такой как, например, удельное электрическое сопротивление, критическая длина трещины или критическая концентрация трещин, пористость и др., а структурная характеристика материала, которая является чувствительным датчиком, реагирующим на все перечисленные индивидуальные изменения в структуре, связанные с накоплением повреждаемости, прочностными и ресурсными свойствами.

В этой связи цель настоящих исследований заключается в разработке методики тестирования текущего физического состояния и оценки индивидуального физического ресурса стальных труб поверхностей нагрева котла по параметру элементарной ячейки.

### Объект испытаний

Для экспериментальных исследований выбрана сталь марки 10, используемая в котлостроении для изготовления радиационных экранов, штампованных и кованных конструктивных элементов, трубопроводов, работающих под давлением, при температурах, не превышающих 350 °С [4].

Сталь 10 относится к жаропрочным углеродистым сталям. Химический состав стали по ГОСТ 1050–74, мас. %: 0,07...0,14 С; 0,17...0,37 Si; 0,35...0,65 Mn; <0,04 S; <0,035 P; <0,15 Cr; <0,08 As; <0,25 Cu; <0,25 Ni, остальное – железо [4].

Особенности, наблюдаемые при эксплуатации стали 10, заключаются в графитизации, которая наступает иногда гораздо быстрее исчерпания сталью своего проектного ресурса (100 тыс. ч) и приводит к снижению прочностных свойств с последующим растрескиванием.

Для проведения испытаний стали 10 использовались образцы, изготовленные из прямого участка экранной трубы котлоагрегата в виде шлифов размером 15×20 мм.

### Методика испытаний

В основу методики испытаний материала из стали 10 закладывается метод рентгеновской дилатометрии.

Методика включала в себя два этапа – термоциклирование и холодное циклическое деформирование исследуемых образцов.

Методика термоциклирования заключалась в реализации циклов «нагрев – охлаждение – нагрев» образца при давлении 0,0013 Па с повышением температуры в каждом последующем микроцикле. Всего выполнено три макротермоцикла: I термоцикл осуществлялся подъемом температур от 12 °С (температура охлаждающей вакуумную камеру воды) до 770 °С включительно; во II термоцикле диапазон температур составлял 12...925 °С и заканчивался аустенизацией стали с последующей реализацией  $\gamma \rightarrow \alpha$  перехода; в III термоцикле диапазон температур испытаний составлял 12...770 °С.

Кроме термоциклирования параллельно устанавливалась зависимость относительных «деформаций» кристаллической ячейки  $\Delta a/a$  от внешнего «холодного» циклического нагружения, для чего образец стали 10 площадью 35,4×17,8 мм подвергался холодному циклическому деформированию при фиксированных значениях внешнего давления от 24,6 до 90,2 МПа с постоянно возрастающей нагрузкой в каждом цикле. Всего выполнено 9 циклов нагружения. После каждого цикла определялся параметр элементарной ячейки.

### Методика определения параметра элементарной ячейки кристалла

Определение периода кристаллической решетки  $a$  основывается на уравнении Вульфа–Брэгга  $n\lambda = 2d_{HKL} \sin \theta_{HKL}$ , из которого по экспериментальному значению угла дифракции  $\theta_{HKL}$  при известной длине волны  $\lambda$  (длина волны используемого молибденового анода  $\lambda_{cp} = 0,71069 \text{ \AA}$ ) рассчитывается межплоскостное расстояние  $d_{HKL}$  для данной системы плоскостей ( $HKL$ ) и по соотношению, связывающему индексы ( $HKL$ ) с межплоскостным расстоянием для данного типа кристаллической решетки, определяется ее параметр  $a_i$  для каждой анализируемой дифракционной линии.

Для кристаллов кубической сингонии для  $i$ -й дифракционной линии это соотношение имеет вид [5]:

$$a_i = d_i \sqrt{H_i^2 + K_i^2 + L_i^2},$$

а точность в определении параметра элементарной ячейки зависит от точности определения угла дифракции.

Погрешность при измерении угла дифракции  $\theta_{HKL}$  складывается из случайных и систематических погрешностей. Анализ систематических погрешностей показывает, что почти все они стремятся к нулю при  $\theta_{HKL}$ , стремящемуся к 90° [5–7]. Экспериментальное измерение на этих углах невозможно, поэтому межплоскостное расстояние, соответствующее этому углу, находят экстраполяцией экс-

периментальных значений параметров элементарной ячейки, вычисленных для ряда дифракционных линий ( $HKL$ ), к углу 90°.

Одним из приемов экстраполяции служит метод наименьших квадратов, для его реализации по экспериментальным данным об углах дифракции для ряда дифракционных линий составляются нормальные уравнения, которые для кубических кристаллов имеют вид [7]:

$$\left. \begin{aligned} A \sum_i \alpha_i^2 + D \sum_i \alpha_i \delta_i &= \sum_i \alpha_i \sin^2 \theta_i \\ A \sum_i \alpha_i \delta_i + D \sum_i \delta_i^2 &= \sum_i \delta_i \sin^2 \theta_i \end{aligned} \right\}, \quad (1)$$

где  $A$  и  $D$  – постоянные, причем  $A = \lambda^2 / (4a^2)$ ,  $\alpha_i = H_i^2 + K_i^2 + L_i^2$ ;  $\Sigma \alpha_i$  – сумма сумм квадратов индексов всех анализируемых линий. При использовании метода наименьших квадратов в широком интервале углов дифракции величина  $\delta$  принимается равной [8]:

$$\delta = 10 \sin^2 2\theta \left( \frac{1}{\sin \theta} + \frac{1}{\theta} \right).$$

Система уравнений (1), решенная относительно  $A$ , позволяет определить период кристаллической решетки  $a$ .

Погрешность определения периода решетки оценивалась следующим образом.

1. Проведено подряд 3 рентгеновские снимки в идентичных условиях эксперимента, в результате чего получено три значения параметра кристаллической решетки  $a_1, a_2, a_3$  и вычислено среднее арифметическое значение из трех измерений  $a_{cp}$ .
2. Дисперсия оценивается согласно [6]:

$$\sigma_x = \sqrt{\sum_{i=1}^n \frac{(a_i - a_{cp})^2}{n(n-1)}}.$$

Результаты трехкратных измерений параметра элементарной ячейки образца стали 10 в исходном состоянии при температуре 12 °С:

$$a_1 = 2,8723 \text{ \AA}; a_2 = 2,8720 \text{ \AA}; a_3 = 2,8723 \text{ \AA}.$$

Среднеарифметическое из трех измерений равно  $a_{cp} = 2,8722 \text{ \AA}$ .

Среднеквадратичное отклонение от среднеарифметического составляет:

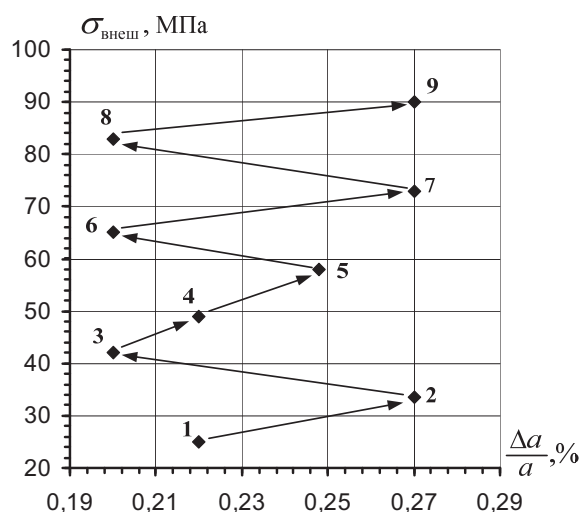
$$\sigma_x = \sqrt{\frac{\left( (2,8722 - 2,8723)^2 + (2,8722 - 2,8720)^2 + (2,8722 - 2,8723)^2 \right)}{3(3-1)}} = 1 \cdot 10^{-4}.$$

При доверительной вероятности  $\alpha = 95\%$  из таблицы определяется критерий Стьюдента  $t = 3,182$  [9]. Доверительный интервал, в котором с установленной вероятностью (95%) определяется истинное значение измеряемой величины, равен:  $\Delta a = \sigma_x t = 1 \cdot 10^{-4} \cdot 3,182 = \pm 0,0003 \text{ \AA}$ .

В дальнейшем считается, что доверительный интервал измерений параметра  $a$  стали 10 по методу наименьших квадратов равен:  $\Delta a = \pm 0,0003 \text{ \AA}$ .

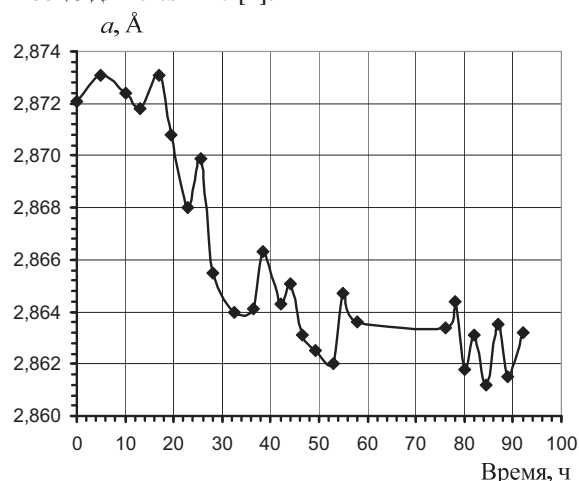
**Экспериментальные результаты**

Результаты исследований представлены на рис. 1–3.



**Рис. 1.** Зависимость деформаций кристаллической ячейки стали 10 от внешних давлений при холодном циклическом деформировании

На рис. 1 представлена зависимость «деформаций» кристаллической ячейки от внешних давлений при циклическом нагружении образца, из которой следует, что элементарная ячейка в широком диапазоне внешних давлений не деформируется больше, чем на 0,27 %, если существует сила, вызывающая деформацию. При снятии этой силы за счет перераспределения внутренних напряжений деформации решетки снимаются, возвращаясь к исходному значению, равному 0,2 %. Это свидетельствует о том, что элементарная атомно-кристаллическая ячейка является жестким, упругим телом, реагирующим, с одной стороны, на внешние воздействия, с другой стороны, не способным отвечать за такие пластические свойства металла, как относительное удлинение  $\delta$  и относительное сужение  $\psi$ , равные соответственно (24...32) % и 55 % для стали 10 [4].



**Рис. 2.** Зависимость параметра элементарной ячейки стали 10 от времени термоциклирования

Из рис. 2 следует, что в процессе термоциклирования параметр твердого раствора  $\alpha$ -железа стали 10 начинает изменяться практически с первых часов форсированного старения. По данным об изменениях параметра решетки определена скорость «деформации» (авторы используют этот термин, хотя, в сущности, кристаллическая решетка не деформируется и не искажается, она остается кубической, но при этом испытывает всестороннее сжатие).

Скорость деформации оценивалась для температуры эксплуатации данной стали в котле ДКВР-6,5 (200 °С) и составила:

$$V_{cp} = 8,22 \cdot 10^{-5} \%/\text{ч}.$$

В [10] отмечается, что значение максимальной вытяжки межатомных связей в вершине трещины для  $\alpha$ -железа составляет 11 %. Это позволяет оценить время до разрушения (срок службы):

$$\tau_{cl} = \epsilon_{r,m} / V_{cp} = 11 / 8,22 \cdot 10^{-5} = 133870 \text{ ч } (\sim 15 \text{ лет}).$$

Принятую величину ресурса пластичности  $\epsilon_{r,m} = 11\%$  необходимо адаптировать к максимальным «деформациям» кристаллических решеток, т. к. при любых процессах, происходящих в границах, наличие когерентных и некогерентных межатомных связей делает атомно-кристаллическую решетку чувствительным датчиком структурных превращений, приводящих к изменению схемы действующих напряжений. За «ресурс пластичности» элементарной ячейки  $\epsilon_{r,яч}$  принимается максимально зафиксированная в эксперименте термическая «деформация» 0,34 % и максимальная «деформация» при циклическом холодном деформировании 0,27 %:

$$\epsilon_{r,яч} = 0,34 + 0,27 = 0,61 \%,$$

так что этим учитывается наличие фактора внешнего давления в реальной энергоустановке.

На рис. 3 представлена расчетная кривая, определяющая три участка накопления повреждаемости в стали в процессе эксплуатации, заканчивающаяся исчерпанием прогнозируемого физического ресурса стали.

На кривой (рис. 3):

- третий участок заканчивается прогнозируемым временем до разрушения, равным 133870 ч при  $\epsilon_{r,m} = 11\%$  и  $\epsilon_{r,яч} = 0,61\%$ . Начало этого участка устанавливается на основе большого эксплуатационного опыта, свидетельствующего, что на ускоренный процесс развития разрушения приходится примерно 20 % времени от общего ресурса [11], т. е.  $133870 \cdot 0,8 = 107096$  ч (через 12 лет с начала эксплуатации). При этом матрица накопит деформации, равные  $\epsilon_{r,m} = 8,22 \cdot 10^{-5} \cdot 107096 = 8,8\%$ , а «деформации» кристаллической ячейки составят  $\epsilon_{r,яч} = 0,6127 \cdot 8,8 / 11 = 0,49\%$ .
- параметры первого участка кривой устанавливались следующим образом. Из действующего котлоагрегата была вырезана труба, ресурс которой известен и составил 8760 ч. Из произвольных участков этой трубы приготовлены образцы и определен средний параметр элементарной

ячейки  $a_{cp} = 2,8661 \text{ \AA}$ . За 8760 ч накоплена деформация, равная  $(\Delta a/a)_{8760} = (2,8722 - 2,8661) / 2,8661 = 0,21 \%$ . Скорость деформации составила  $V_{8760} = (0,21 / 8760) \cdot 100 = 2,43 \cdot 10^{-5} \%$ /ч. Первый участок заканчивается деформацией  $\varepsilon_{r,яч} = 0,29 \%$  ( $200 \text{ }^\circ\text{C}$ ), которая будет накоплена за время  $\tau = (0,29 - 0,21) / 2,43 \cdot 10^{-5} = 2988 \text{ ч}$ . Таким образом, общее время участка I–II равно:  $\tau_1 = 8760 + 2988 = 11748 \text{ ч}$ . К этому моменту матрица накопит деформацию  $\varepsilon_{r,м} = 8,22 \cdot 10^{-5} \cdot 11748 = 0,97 \%$ .

Уравнение прямого участка II–III кривой (рис. 3) имеет вид:

$$\varepsilon_{r,яч} = 2,1458 \cdot 10^{-6} \tau + 0,26.$$

Если полученные деформации кристаллической решетки диагностируемой стали составили, например, 0,3 %, то время ее эксплуатации по этому уравнению равно 18552 ч, остаточный физический ресурс составит  $\tau_{сд} = 107096 - 18552 = 88544 \text{ ч}$  (10 лет). Если деформации кристаллической решетки оказались меньше 0,26 %, то можно оценить фактическое состояние металла, определяемое положением полученной точки на этой кривой.

Из рис. 3 следует, что зависимость изменения параметра элементарной ячейки  $\Delta a/a$  от времени, имеет сходство с классической кривой ползучести. Значением  $\Delta a/a$ , характеризуемым точкой на кривой, аналогичной кривой ползучести, определяется степень накопления повреждаемости, текущее физическое состояние и остаточный ресурс стали.

Степень изменения среднего параметра кристаллической решетки на разных этапах старения стали определена экспериментально и составляет на момент истощения прогнозируемого физического ресурса стали  $\Delta a/a = 0,61 \%$ .

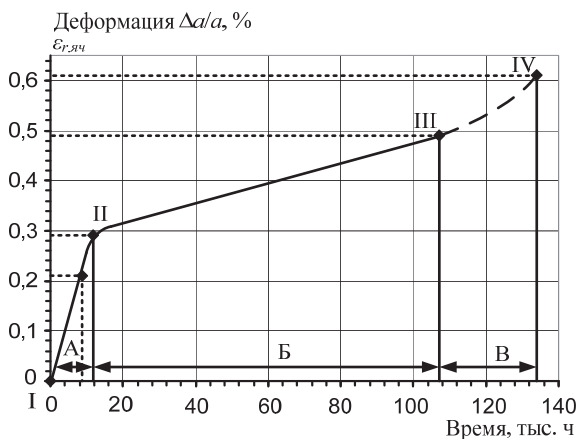


Рис. 3. Экспериментальная кривая  $\Delta a/a$ , аналогичная классической кривой ползучести: участки ползучести I–II) неустановившейся А; II–III) установившейся Б; III–IV) ускоренной В

Хорошее совпадение представленных экспериментальных результатов о поведении элементарных ячеек в процессе форсированного искусственного старения стали обнаруживается с результатами авторов [11, 12] о динамике накопления пористости в металле за счет ползучести в процессе

длительной эксплуатации, воспроизведенными на рис. 4. В [11, 12] реализован подход оценки поврежденности микроструктуры за счет накопления пор по границам зерен. Развитие микроповрежденности оценивается в баллах: 1 балл – отдельные изолированные поры; 2–4 – цепочки пор; 5, 6 – цепочки пор, переходящие в микротрещины по границам зерен; 7 – макротрещины.

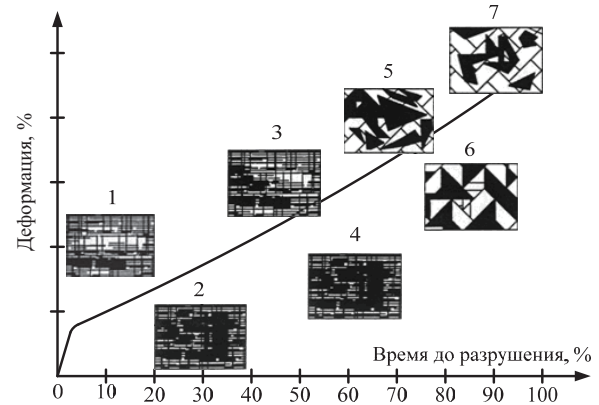


Рис. 4. Характер повреждаемости стали порами ползучести по мере истощения ресурса: 1–7) баллы повреждаемости

Принятая в работе методика форсированного искусственного старения металла в процессе термоциклического отжига позволяет при сравнительно небольших временах ресурсных испытаний по изменению параметра кристаллической решетки построить кривую – аналог классической кривой ползучести. Установленная полуэмпирическая кривая «ползучести» определена на всех ее участках и, несмотря на ряд принятых допущений, полученный с помощью этой кривой, долгосрочный прогноз соответствует проектному ресурсу в 100 тыс. ч, а кривая может быть использована для оценок фактического состояния и остаточного ресурса металла по параметру деформируемости  $\Delta a/a$  кристаллической решетки.

### Выводы

Впервые экспериментально получена кривая изменения параметра деформируемости кристаллической решетки металлов на примере стали 10, аналогичная классической кривой ползучести, позволяющая:

- оценивать зарождение повреждаемости структуры на микроуровне, сопоставимом с размером элементарной ячейки;
- определять скорость и динамику накопления микроповреждаемости в структуре стенки трубы вплоть до потери прочности;
- тестировать текущее физическое состояние и устанавливать остаточный ресурс трубопровода по предельному изменению параметра элементарной кристаллической решетки стали.

Работа поддержана грантом РФФИ «Фундаментальные основы инженерных наук» № 012011598308 (11-08-00782а) в 2011 г.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Березина Т.Г. Структурный метод определения остаточного ресурса деталей длительно работающих паропроводов // Теплоэнергетика. – 1986. – № 3. – С. 53–56.
2. Должанский П.Р. Особенности оценки остаточного ресурса паропроводных труб при эксплуатации сверх паркового ресурса // Теплоэнергетика. – 2005. – № 8. – С. 35–39.
3. Одинг И.А., Иванова В.С., Бурдукский В.В., Геминев Г.Н. Теория ползучести и длительной прочности металлов // под ред. чл.-корр. АН СССР И.А. Одинг. – М.: ГНТИ, 1959. – 488 с.
4. Стали и сплавы для высоких температур: Справ. изд. в 2-х кн. Кн. 1 / С.Б. Масленков, Е.А. Масленкова. – М.: Металлургия, 1991. – 383 с.
5. Горелик С.С., Расторгуев Л.Н., Скаков Ю.А. Рентгенографический и электронооптический анализ. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Металлургия, 1970. – 366 с.
6. Руководство по рентгеновскому исследованию минералов / под ред. В.А. Франк-Каменецкого. – Л.: Недра, 1975. – 399 с.
7. Русаков А.А. Рентгенография металлов. – М.: Атомиздат, 1977. – 480 с.
8. Миркин Л.И. Справочник по рентгеноструктурному анализу поликристаллов / под ред. проф. Я.С. Уманского. – М.: Гос. изд-во физ.-мат. лит-ры, 1961. – 863 с.
9. Батунер Л.М., Позин М.Е. Математические методы в химической технике. – 5-е изд., перераб. и доп. / под общей ред. проф. М.Е. Позина. – Л.: Химия, 1968. – 823 с.
10. Глейтер Г., Чалмерс Б. Большеугловые границы / Пер. с англ. С.Н. Горина, В.М. Половова. – М.: Мир, 1975. – 375 с.
11. Злепко В.Ф., Линкевич К.Р., Швецова Т.А. Влияние восстановительной термической обработки на свойства стали 12Х1МФ // Теплоэнергетика. – 2001. – № 6. – С. 68–70.
12. Данюшевский И.А., Куприй Е.Б., Малкин М.Р., Гринь Е.А. Оценка остаточного ресурса с учетом микроповрежденности // Теплоэнергетика. – 2008. – № 2. – С. 17–20.

Поступила 22.04.2011 г.

УДК 621.184.3.018.54

## РЕНТГЕНОМЕТРИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ТЕМПЕРАТУРНЫХ УСЛОВИЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ И РАЗРУШЕНИЯ ТРУБНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ПАРОВЫХ КОТЛОВ

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

Томский политехнический университет  
E-mail: ronifis@sibmail.com

*На основе анализа интегральных интенсивностей дифракционных линий разработана и проанализирована методика оценки температурных условий эксплуатации и разрушения трубных элементов паровых котлов, обладающая низкой погрешностью и позволяющая решать многочисленные практические задачи. Достоверность результатов подтверждается тепловым, гидравлическим и аэродинамическим расчётами, а также тестированием с использованием образцов труб с известной историей эксплуатации.*

### Ключевые слова:

*Сталь 12Х1МФ, паровой котел, пароперегреватель, рентгенометрия, дифрактометр, интенсивность дифракционных линий, измерение температуры, зерно, текстура, температура рекристаллизации, проектный ресурс.*

### Key words:

*Steel 12Х1МФ, steam boiler, steam superheater, roentgenometry, diffractometer, intensity of diffraction line, temperature measurement, grain, texture, recrystallization temperature, design resource.*

### Введение

Центральной проблемой при проектировании и эксплуатации энергетических паровых котлов (как, впрочем, и любых других) является обеспечение таких условий работы их поверхностей нагрева, при которых рабочие элементы последних (как правило, стальные трубы) надёжно охлаждаются рабочим телом. Нормативные источники [1, 2], используемые при проектировании котельной техники, выделяют две ключевые расчётные температуры стенки элементов поверхностей нагрева – среднюю и наружную. Первая из них, являясь полусуммой значений наружной и внутренней температур стенки в наиболее проблемных (нагретых) зонах, на этапе проектирования определяет (наряду с маркой стали и с принятым расчётным ресурсом) величину допустимого напряжения, необходимо для расчёта толщины стенки (т. е. она является

одним из тех наиболее весомых факторов, которые определяют длительную прочность [2, 3]).

Фактическое значение средней температуры в процессе эксплуатации определяет реальный срок службы (ресурс), который резко снижается в случае её отклонения в большую сторону по сравнению с проектной температурой. Например, превышение температуры пара над расчётным значением 545 °С в течение смены на 5 °С для выходных поверхностей нагрева котла приводит к потере ресурса, эквивалентного нескольким месяцам эксплуатации при нормальных параметрах [4].

В свою очередь, наружная температура, являясь максимальной температурой материала поверхности нагрева (в самом распространённом случае, когда рабочее тело движется внутри трубы), позволяет при разработке конструкции оценить сопротивляемость окалинообразованию. При этом для