

Таким образом, представлены альтернативные варианты расширения котельной КООА «Азот» с предварительными результатами расчета эффективности.

#### Список литературы:

1. Дж. Ньюшлос, И. Ю. Ряпин. Тенденции развития распределенной генерации. // Энергосбережение – 2012. - №7 – С. 18-26.
2. Комплексное исследование ТЭС с новыми технологиями: Монография/ П.А. Щинников, Г. В. Ноздренко, В. Г. Томилов и др.-Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2005.-528 с. –(Серия «Монографии НГТУ»)
3. Эффективность пылеугольных ТЭЦ с новыми экологообеспечивающими технологиями / В. Г. Томилов, П.А. Щинников, Г. В. Ноздренко и др. –Новосибирск: Наука. Сибирская издательская фирма РАН, 1999.-97 с.
4. Расчет тепловых схем паротурбинных ТЭС / Новосиб. гос. техн. ун-т ; [сост. : О. К. Григорьева, О. В. Боруш ]. - Новосибирск : Изд-во НГТУ , 2010.
5. Щинников П.А. Оценка воздействия вредных выбросов в атмосферу. Методические указания к РГР. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2000. – 22 с.

#### Рентгенометрия в проблемах установления температуры эксплуатации труб

*Любимова Л.Л., Таилюков А.А., Фисенко Р.Н., Артамонцев А.И.*

*Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Россия, г. Томск  
lll@tpu.ru*

Металл труб теплоэнергетического оборудования работает в условиях тепловой неравномерности и ползучести, поэтому любая разрабатываемая конструкция должна базироваться на научно-обоснованных оценках температуры эксплуатации.

В настоящее время температура эксплуатации устанавливается по условиям жаропрочности [1]. Другой распространенный подход заключается в определении эквивалентной температуры эксплуатации труб, исходя из расчетного ресурса по допускаемым напряжениям [2].

Цель настоящей работы – экспериментальное обоснование эксплуатационно-безопасной температуры стенки трубы на основе микрохарактеристик материала, отражающих структурно-фазовые превращения в металле.

К микрохарактеристикам отнесены параметр элементарной ячейки и связанные с ним зависимости от температуры коэффициентов линейных термических расширений (КЛР) кристаллических решеток.

В качестве используемой методики применен распространенный в экспериментальной практике прием термоциклирования. За базовый метод исследований выбран метод рентгеновской дифракции.

Коэффициент линейных термических расширений элементарной кристаллической решетки определяют по формуле:

$$\alpha_t = \frac{1}{a_{cp}} \cdot \left( \frac{a_{t_i}^{zop} - a_{t_{i-1}}^{xol}}{t_i - t_{i-1}} \right),$$

где  $a_{t_i}^{zop}$  – параметр элементарной кристаллической решетки образца при температуре  $t_i$ ;  $a_{t_{i-1}}^{xol}$  – параметр элементарной кристаллической решетки для холодного состояния образца предыдущего термоцикла;  $t_i$  – температура термоциклирования;  $t_{i-1}$  – температура предыдущего термоцикла;  $a_{cp} = (a_{t_i}^{zop} - a_{t_{i-1}}^{xol})/2$  – среднее значение параметров элементарной кристаллической решетки образца.

Термоциклирование, имитирующее процесс форсированного искусственного старения стали, выполнено в работе в виде двух термоциклов (рис. 1, 2). Для этого подготовленный образец подвергают первому термоциклированию, на основе которого вычисляют КЛР элементарной кристаллической решетки. Результаты вычислений первого термоциклирования графически обрабатывают в координатах «коэффициент линейных термических расширений элементарной кристаллической решетки – температура» (рис. 1,а; 2,а). Затем эту операцию повторяют для второго термоциклирования (рис. 1,б; 2б). По двум полученным зависимостям определяют

безопасные диапазоны температур, на основе которых при учете реальных градиентов устанавливают величину температуры эксплуатации элемента котельного оборудования.

Метод иллюстрируется на примерах сталей Ст10 и Ст20.

В процессе термоциклирования (рис. 1, 2) установлено, что исследуемые стали обнаруживают при определенных температурах два важных эффекта: аномальные расширения элементарных кристаллических решеток и отрицательные дилатации (отрицательную ползучесть).

Эффект аномальных расширений кристаллических решеток заслуживает внимания при анализе таких повреждений как растрескивание коллекторов парогенераторов, смятие поверхностей нагрева, перекосы, выгибание трубопроводов, заклинивание, нарушение уплотнения запорных органов, наблюдаемых в условиях переменных тепловых режимов при наличии градиентов температур, что связывается с возникновением неprojektных напряжений и их неоднородной концентрацией в узлах и деталях, снижающих выносливость элементов теплоэнергетического оборудования вследствие развития процессов усталости и разрушения.

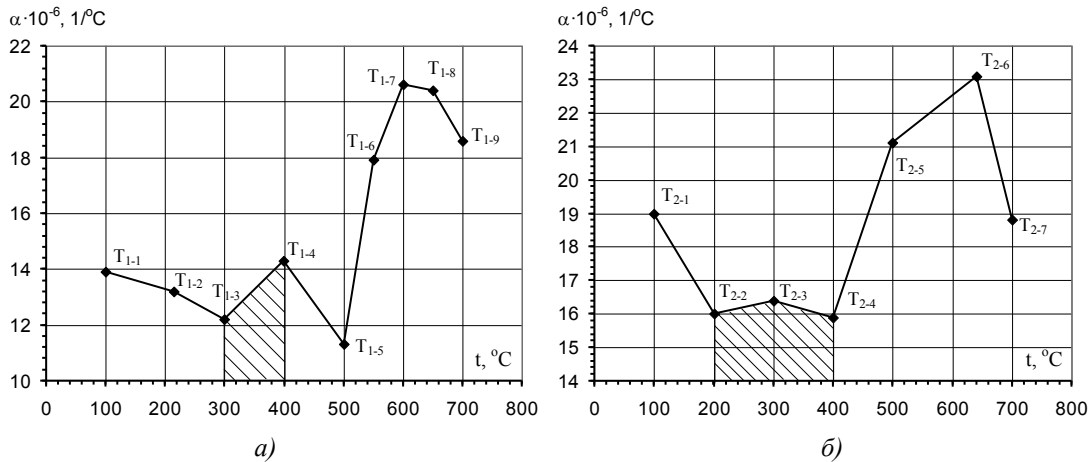


Рис. 1. Зависимость термических расширений кристаллических решеток стали 10 от температуры: а) первый термоцикл, б) второй термоцикл

Опасность снижения прочности элемента оборудования может происходить не только вследствие концентрации напряжений, но и при отрицательных дилатациях кристаллических решеток. Эффект уменьшения размера кристаллической решетки при повышении температуры свидетельствует о разрывах межатомных связей, нарушениях атомно-кристаллической структуры материала вследствие возникновения микротрещин на размерном уровне, соответствующем межатомным расстояниям кристаллической решетки. Итогом таких проявлений будет межкристаллитная коррозия и коррозионное растрескивание под напряжением.

Оба эффекта снижают сопротивляемость усталости, а температуры проявления этих эффектов представляются эксплуатационно-опасными и не способствуют обеспечению длительной прочности материала при эксплуатации.

На этом основании по двум полученным зависимостям (рис. 1, 2) определяют безопасные диапазоны температур. При учете реально действующих градиентов устанавливают величину температуры эксплуатации элемента котельного оборудования следующим образом.

На основе результатов первого термоциклирования для стали Ст10 (рис. 1, а) выделяют 5 диапазонов температур: 100–300 °С (T<sub>1.1</sub>–T<sub>1.3</sub>), 300 – 400 °С (T<sub>1.3</sub>–T<sub>1.4</sub>), 400–500 °С (T<sub>1.4</sub>–T<sub>1.5</sub>), 500–600 °С (T<sub>1.5</sub>–T<sub>1.7</sub>) и 600–700 °С (T<sub>1.7</sub>–T<sub>1.9</sub>). В диапазонах температур 100–300 °С (T<sub>1.1</sub>–T<sub>1.3</sub>), 400–500 °С (T<sub>1.4</sub>–T<sub>1.5</sub>) и 600–700 °С (T<sub>1.7</sub>–T<sub>1.9</sub>) КЛР элементарной кристаллической решетки уменьшается с ростом температуры, что свидетельствует о наличии отрицательной ползучести. Эксплуатация элементов котельного оборудования в этих диапазонах температур не может считаться безопасной. В диапазоне температур 500–600 °С (T<sub>1.5</sub>–T<sub>1.7</sub>) происходит резкое увеличение КЛР элементарной кристаллической решетки образцов с  $11,3 \cdot 10^{-6}$  до  $20,6 \cdot 10^{-6} 1/^\circ\text{C}$ , что может привести к деформации элемента, раздутию с утонением стенки и потерей прочности. Эксплуатация элементов котельного оборудования в этом диапазоне температур также не может считаться безопасной. Диапазон температур 300–400 °С (T<sub>1.3</sub>–T<sub>1.4</sub>), в котором КЛР элементарной кристаллической решетки несущественно увеличивается с ростом температуры, принимают за безопасный для первого термоцикла.

На основе результатов второго термоциклирования (рис. 1, б) выделяют 4 диапазона температур: 100–200 °С ( $T_{2.1}$ – $T_{2.2}$ ), 200–400 °С ( $T_{2.2}$ – $T_{2.4}$ ), 400–640 °С ( $T_{2.4}$ – $T_{2.6}$ ) и 640–700 °С ( $T_{2.6}$ – $T_{2.7}$ ). В диапазонах температур 100–200 °С ( $T_{2.1}$ – $T_{2.2}$ ) и 640–700 °С ( $T_{2.6}$ – $T_{2.7}$ ) КЛР элементарной кристаллической решетки образцов уменьшается с ростом температуры. Эксплуатация элементов котельного оборудования в этих диапазонах температур не может считаться безопасной. В диапазоне температур 400–640 °С ( $T_{2.4}$ – $T_{2.6}$ ) происходит резкое увеличение КЛР элементарной кристаллической решетки образцов с  $15,9 \cdot 10^{-6}$  до  $23,1 \cdot 10^{-6}$  1/°С, что может привести к формоизменению элемента, раздутию с утонением стенки и потерей прочности. Эксплуатация элементов котельного оборудования в этом диапазоне температур не может считаться безопасной. Диапазон температур 200–400 °С ( $T_{2.2}$ – $T_{2.4}$ ) принимают за безопасный для второго термоцикла.

Общим безопасным диапазоном температур для двух термоциклов является 300–400 °С.

Особенностью работы элементов котельного оборудования является нестационарность теплового режима, что приводит к возникновению значительных градиентов температур ( $\pm 50$  °С) во время эксплуатации [3]. При этом величина температуры эксплуатации экранной трубы из стали Ст 10 с учетом существующих в реальных условиях эксплуатации градиентов котельного оборудования ( $\pm 50$  °С) составляет 350 °С.

Полученное значение температуры подтверждается опытом эксплуатации элементов котельного оборудования из стали Ст 10, согласно которому данная сталь используется в котлостроении для изготовления экранов в топочной камере котлоагрегата, штамповок, поковок, трубопроводов котлов высокого давления для длительной работы при температурах, не превышающих 350 °С [1].

Аналогично определяются безопасные диапазоны температур для стали Ст.20 (рис. 2).

На основе результатов первого термоцикла (рис.2,а) выделяют 6 диапазонов температур: 100–200 °С ( $T_{3.1}$ – $T_{3.3}$ ), 200–250 °С ( $T_{3.3}$ – $T_{3.4}$ ), 250–350 °С ( $T_{3.4}$ – $T_{3.6}$ ), 350–450 °С ( $T_{3.6}$ – $T_{3.8}$ ), 450–500 °С ( $T_{3.8}$ – $T_{3.9}$ ) и 500–700 °С ( $T_{3.9}$ – $T_{3.12}$ ).

В диапазонах температур 100–200 °С ( $T_{3.1}$ – $T_{3.3}$ ), 250–350 °С ( $T_{3.4}$ – $T_{3.6}$ ) и 500–700 °С ( $T_{3.9}$ – $T_{3.12}$ ) КЛР элементарной кристаллической решетки проявляет отрицательную ползучесть.

В диапазоне температур 450–500 °С ( $T_{3.8}$ – $T_{3.9}$ ) наблюдается аномальное расширение элементарной кристаллической решетки образцов с  $14,6 \cdot 10^{-6}$  до  $20,4 \cdot 10^{-6}$  1/°С, что может привести к формоизменению конструкционного элемента.

Диапазоны температур 200–250 °С ( $T_{3.3}$ – $T_{3.4}$ ) и 350–450 °С ( $T_{3.6}$ – $T_{3.8}$ ), в которых КЛР элементарной кристаллической решетки проявляет стабильность, принимают за безопасные для первого термоцикла.

На основе результатов второго термоциклирования (рис.2, б) выделяют 7 диапазонов температур: 100–150 °С ( $T_{4.1}$ – $T_{4.2}$ ), 150–200 °С ( $T_{4.2}$ – $T_{4.3}$ ), 200–250 °С ( $T_{4.3}$ – $T_{4.4}$ ), 250–300 °С ( $T_{4.4}$ – $T_{4.5}$ ), 300–400 °С ( $T_{4.5}$ – $T_{4.7}$ ), 400–450 °С ( $T_{4.7}$ – $T_{4.8}$ ) и 450–700 °С ( $T_{4.8}$ – $T_{4.10}$ ).

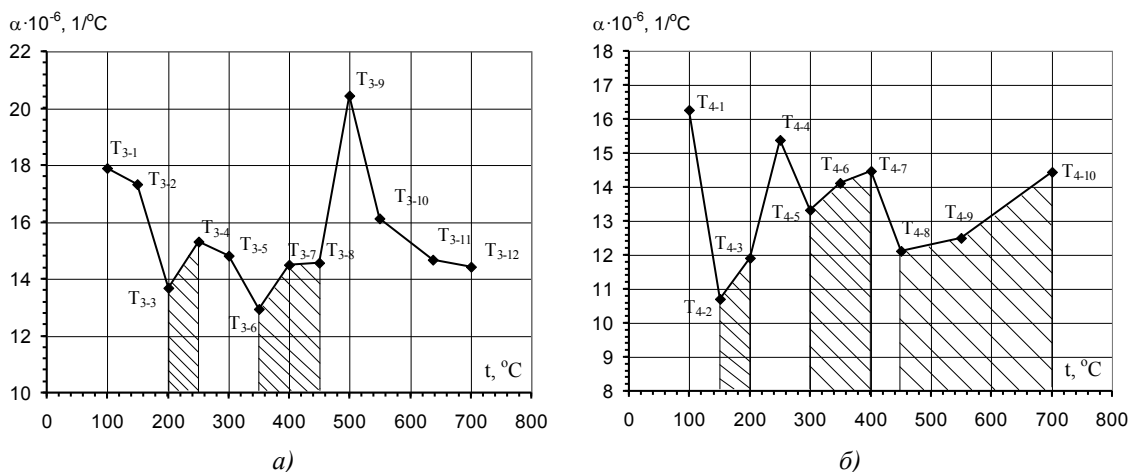


Рис. 2. Зависимость термических расширений кристаллических решеток стали 20 от температуры: а) первый термоцикл, б) второй термоцикл

Диапазоны температур 100–150 °С ( $T_{4.1}$ – $T_{4.2}$ ), 250–300 °С ( $T_{4.4}$ – $T_{4.5}$ ) и 400–450 °С ( $T_{4.7}$ – $T_{4.8}$ ) исключаются в связи с отрицательной ползучестью. Диапазон температур 200–250 °С ( $T_{4.3}$ – $T_{4.4}$ )

характеризуется аномальным поведением элементарной кристаллической решетки образцов с  $11,9 \cdot 10^{-6}$  до  $15,4 \cdot 10^{-6}$   $1/^\circ\text{C}$ . Диапазоны температур 150-200  $^\circ\text{C}$  ( $T_{4.2}$ – $T_{4.3}$ ), 300-400  $^\circ\text{C}$  ( $T_{4.5}$ – $T_{4.7}$ ) и 450-700  $^\circ\text{C}$  ( $T_{4.8}$ – $T_{4.10}$ ), в которых КЛР элементарной кристаллической решетки несущественно увеличивается с ростом температуры, принимают за безопасные для второго термоцикла.

Общим безопасным диапазоном температур для двух термоциклов является 350-400  $^\circ\text{C}$ .

При этом величина температуры эксплуатации труб экономайзера из стали Ст 20 с учетом существующих в реальных условиях эксплуатации градиентов котельного оборудования ( $\pm 50$   $^\circ\text{C}$ ) составляет 375  $^\circ\text{C}$  [1].

Полученное значение температуры подтверждается опытом эксплуатации элементов котельного оборудования из стали Ст 20, согласно которому температура наружной стенки элемента котельного оборудования не должна превышать 450-500  $^\circ\text{C}$  [4].

#### Список литературы:

1. 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.
2. Исследование предела длительной прочности стали марки ДИ59 пароперегревателей котла типа ТПЕ-216М Харанорской ГРЭС – Электрические станции.– 2014, №10.– С.27– 31.
3. Вайнман А.Б., Школьникова Б.Э., Смиян О.Д., Жабров А.В. Механизмы и причины «нетрадиционных» повреждений труб пароперегревателей котлов энергоблоков сверхкритического давления // Электрические станции. – 2010. – № 7. – С. 15–32.
4. РД 10-249-98 Нормы расчета на прочность стационарных котлов и трубопроводов пара и горячей воды.

Работа поддержана грантом РФФИ № 15-08-99544а

#### **Выявление основных групп факторов, которые влияют на повышение эффективности энергоблоков ПГУ посредством снижения затрат электроэнергии на собственные нужды для обеспечения работы котла-утилизатора**

**Хуторненко С. Н., Фурсов И.Д., Жуков Е.Б.**

*Алтайский государственный технический университет им. И. И. Ползунова, Россия, г. Барнаул*

*E-mail: sergeykhutornenko@gmail.com*

Для введения новых мощностей по выработке тепловой и электрической энергии в настоящее время широко распространены энергоблоки комбинированного цикла (парогазовые установки - ПГУ). Среди основных целевых индикаторов и показателей технологической подпрограммы “Модернизация тепловых электростанций на период до 2020 года” предусмотрено доведение установленной мощности газовых ТЭС на основе передовых технологий (ПГУ и ГТУ) с 6600 до 50900 МВт в 2020 году [2]. В состав современных ПГУ входят: газовая турбина (ГТ), котёл-утилизатор (КУ), паровая турбина (ПТ).

Для выявления основных групп факторов, которые влияют на процесс повышения эффективности ПГУ посредством снижения затрат электроэнергии на собственные нужды для обеспечения работы котла-утилизатора за основу для исследования был принят энергоблок ПГУ-230. Согласно классификации по действующей нормативной документации [5] данный энергоблок представляет собой двухвальный моноблок в состав основного оборудования, которого входят:

- одна газотурбинная установка типа ГТЭ-160, подробно описана в [9];
- котёл-утилизатор типа Е-236/40,5-9,3/1,5-514/299-13,5вв, конструкция подобного котла-утилизатора приведена в источнике [4];
- одна паровая турбина типа Т-63/76-8,8, подробно описана в [3].

Принципиальная схема энергоблока представлена на рисунке 1.

Одним из возможных путей повышения эффективности выработки электроэнергии на ТЭС является снижения затрат электроэнергии на собственные нужды. Поскольку данная работа посвящена исследованиям в области котлов-утилизаторов, то поиск путей снижения затрат на собственные нужды тесно связан с изменением тепловой схемы котла-утилизатора с целью снижения количества электропотребителей. Анализ приведённой на рисунке 1 теплогидравлической схемы котла-утилизатора показывает, что основными электропотребителями для обеспечения нормального протекания технологических процессов, в схеме котла-утилизатора являются электроприводы арматуры, питательных электронасосов и насоса рециркуляции конденсата. С учётом того, что первые две из перечисленных группы электропотребителей являются неотъемлемыми для обеспечения бесперебойной работы котла-утилизатора, а насос