УДК 621.181:620.171

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРНОЙ СТАБИЛЬНОСТИ СТЕНОК КОТЕЛЬНЫХ ТРУБ

Любимова Людмила Леонидовна,

кандидат технических наук, доцент кафедры парогенераторостроения и парогенераторных установок Национального исследовательского Томского политехнического университета, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30. E-mail: III@tpu.ru

Заворин Александр Сергеевич,

доктор технических наук, заведующий кафедрой парогенераторостроения и парогенераторных установок Национального исследовательского Томского политехнического университета, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30. E-mail: zavorin@tpu.ru

Ташлыков Александр Анатольевич,

кандидат технических наук, доцент кафедры парогенераторостроения и парогенераторных установок Национального исследовательского Томского политехнического университета, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30. E-mail: tashlykov@tpu.ru

Артамонцев Александр Иванович,

кандидат технических наук, доцент кафедры парогенераторостроения и парогенераторных установок, Национального исследовательского Томского политехнического университета, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30. E-mail: a_art@tpu.ru

Актуальность работы обусловлена необходимостью обеспечения надежности и ресурса работоспособности поверхности нагрева труб паровых и водогрейных котлов.

Цель работы заключается в установлении распределения пространственно-структурной неоднородности свойств стенки котельной трубы и определении условий стабилизационного отжига.

Методы исследования: метод микротвердометрии и рентгеноструктурного анализа.

Результаты. В обеспечении ресурса работоспособности поверхностей нагрева труб паровых и водогрейных котлов, который гарантируется конструктивными и режимными параметрами эксплуатации, проведением подготовительных термических операций на этапе монтажа и пусконаладочных работ, большую роль играет структурная однородность труб поверхностей нагрева, которая может нарушаться в ходе транспортировки, хранения и эксплуатации. Надежная работа поверхностей нагрева труб паровых и водогрейных котлов обеспечивается контролем структурной однородности труб и степени локализованности дефектов, которые вскрываются в процессе дальнейшей эксплуатации в виде пор ползучести и коррозионных проявлений. По результатам исследований установлено, что исходный материал в состоянии поставки обладает существенной неоднородностью внутренних структурных напряжений, способных к перераспределению в зависимости от внешних давлений и температур, что пороявляется в процессе эксплуатации в изме порой сотавляет собкости. Показано, что под поверхностей и коррозионных давлений и температур, что порявляется в процессе эксплуатации в зона, ширина которой составляет опрядка 200...300 мкм. Получена зависимости от внешних давлений и температур, что пороявляется стенки трубы наблюдается упрочненная диффузионной зона, ширина которой составляет порядка 200...300 мкм. Получена зависимость и защиньного отжига, при котором устраняется неоднородность свойств диффузионной зоны от врементально установлен режим стабилидии диффундирующего элемента по длине диффузионной зоны позволяет определять время отжига для получения заданной концентрации на определита для получении вонденоти сействи и концентрации диффузионной зоны от времени и температуры. Кривая зависимости концентрации диффузионной зоны от врементально установлен режим стабилизационного отжига, при котором устраняется неоднородность свойств диффузионной зоны. Кривая зависимости концентрации диффузионной зоны позволяет определять время отжига для получения заданной концентрации на определенной глубине с

Ключевые слова:

Сталь, коррозия, ресурс, микротвердость, дифракционная линия, внутренние структурные микронапряжения, отжиг.

Введение

Вопросы надежности работы теплоэнергетического оборудования и оценки его технического состояния с целью последующего прогнозирования работоспособности и ресурса относятся к числу наиболее актуальных в энергетике [1–3]. Надёжная работа поверхностей нагрева парогенераторов и котлов обеспечивается гарантированными конструктивными и режимными параметрами эксплуатации, проведением подготовительных термических операций на этапе монтажа и пусконаладочных работ [4, 5].

Ресурс во многом определяется структурной однородностью поверхностей нагрева, которая может изменяться в процессе транспортировки, хранения и эксплуатации в условиях развития механизмов деградации за счет усталости металлов, теплового старения, коррозии, эрозии, образования и развития микротрещин [6].

Контроль структурной неоднородности труб позволяет производить оценку степени локализованности дефектов, а восстановление физических свойств трубного металла по данным диагностики обеспечивает его дальнейшую эксплуатацию без повреждений [7].

Методика исследований

Цель настоящих исследований заключается в выявлении распределения пространственноструктурной неоднородности свойств стенки котельной трубы и определении условий стабилизационного отжига. Для этого устанавливались изменения микротвердости и внутренних структурных напряжений II рода в образцах из тепловой стали Ст. 20.

Измерения микротвердости выполнены для 16 образцов, вырезанных из кольцевого среза трубы стали Ст. 20 высотой 20 мм, диаметром 50 мм и толщиной стенки 5 мм (рис. 1). В каждом из 16 образцов рентгеновским методом оценивалось распределение полей внутренних структурных напряжений II рода $\sigma_{\rm II}$.



Fig. 1. Scheme of cuttings samples

Напряжения II рода $\sigma_{\rm II}$ оценивались на основе метода рентгеновской дифракции по физическому уширению профилей рентгеновских дифракционных линий β [8, 9]. Физическое уширение β рентгеновской линии обусловлено совокупным влиянием дисперсности *m* и микронапряжений *n* и для двух аналитических дифракционных линий представляется в виде

$$\beta_1 = \frac{(m_1 + 2n_1)^2}{m_1 + 4n_1}; \ \beta_2 = \frac{(m_2 + 2n_2)^2}{m_2 + 4n_2}.$$

Часть истинного физического уширения первой из двух анализируемых дифракционных линий m_1 связана с дисперсностью D, а часть уширения второй дифракционной линии n_2 – с микронапряжениями II рода $\sigma_{\rm II}$ зависимостями

$$D = \frac{0.94\lambda}{m_1 \cos \theta_1},\tag{1}$$

$$\sigma_{\rm II} = \left(\frac{n_2}{4 {\rm tg} \theta_2}\right) E, \qquad (2)$$

где θ – угол дифракции; E – модуль нормальной упругости; λ – длина волны используемого излучения; индексы 1 и 2 относятся к первой и второй дифракционным линиям соответственно.

Для экспериментального определения величины n_2 и разделения влияния блочности и микронапряжений на физическое уширение дифракционной линии применены следующие выражения [8, 9]:

$$\frac{m_1}{\beta_1} = \frac{1}{2} \left(1 - \frac{4n_1}{\beta_1} + \sqrt{\frac{8n_1}{\beta_1}} + 1 \right), \tag{3}$$

$$\frac{\beta_2}{\beta_1} = \frac{\left[0,5r\left(1 - \frac{4n_1}{\beta_1} + \sqrt{\frac{8_1}{\beta_1} + 1}\right) + \frac{2n_1}{\beta_1}s\right]^2}{0,5r\left(1 - \frac{4n_1}{\beta_1} + \sqrt{\frac{8_1}{\beta_1} + 1}\right) + \frac{4n_1}{\beta_1}s},$$
(4)

$$\frac{\beta_2}{\beta_1} = \frac{\frac{1}{2r} \left(1 - \frac{4n_2}{\beta_2} + \sqrt{\frac{8n_2}{\beta_2} + 1} \right) + \frac{4n_2}{\beta_2} \frac{1}{s}}{\left[\frac{1}{2r} \left(1 - \frac{4n_2}{\beta_2} + \sqrt{\frac{8n_2}{\beta_2} + 1} \right) + \frac{2n_2}{\beta_2} \frac{1}{s} \right]^2}, \quad (5)$$

где
$$\frac{m_2}{m_1} = \frac{\cos\theta_1}{\cos\theta_2} = r; \ \frac{n_2}{n_1} = \frac{tg\theta_2}{tg\theta_1} = s.$$

Графические зависимости $m_1/\beta_1 = f(\beta_2/\beta_1)$ и $n_2/\beta_2 = f(\beta_2/\beta_1)$, построенные на основании выражений (3)–(5), позволяют определить отношения m_1/β_1 и n_2/β_2 при известном экспериментальном значении $(\beta_2/\beta_1)_{\text{эксп}}$.

Тогда выражение (2) позволяет рассчитать значение внутренних микронапряжений второго рода.

Обсуждение результатов

Распределение внутренних микронапряжений по периметру трубы для исходных образцов в состоянии поставки представлено на рис. 2. Видно, что поверхность имеет существенную неоднородность распределения внутренних микронапряжений, изменяющихся в широком диапазоне значений, от 168 до 335 МПа. Так как происхождение внутренних напряжений связывается с неоднородностями структуры - зерен и их ориентировок, границ зерен, отдельных фрагментов, формирующих структурные напряжения, то и механические свойства различных участков поверхности будут различны. Очевидно, что труба, из которой изготовлены образцы, уже в исходном состоянии имеет предпосылки к микроповреждаемости за счет возможного трещинообразования, так как внутренние остаточные растягивающие напряжения, суммируясь с внешними нагрузками, могут превзойти предел временной прочности и изменить эксплуатационные характеристики и коррозионную стойкость.



- Рис. 2. Перераспределение внутренних микронапряжений в исследуемых образцах (рис. 1): – в исходном состоянии; ■ – после деформирования гидравлическим прессом; □ – после термообработки в водяном паре при t=240 °C
- **Fig. 2.** Redistribution of internal microstrain in the samples under investigation (fig. 1): - in the original state; - after straining by a hydraulic press; □ after the heat treatment in steam at t=240 °C

Пятнадцать исходных образцов (2–16) подверглись холодному пластическому деформированию при помощи гидравлического прессования, имитируя процесс гидравлических испытаний, эксплуатационных нагрузок и внешних давлений при транспортировке и хранении. Результат воздействия давлением представлен на рис. 2.

Из рис. 2 следует, что после деформирования разброс значений внутренних структурных напряжений хотя и находится практически в том же диапазоне, что и для исходных образцов (от 150 до 310 МПа), однако внутренние напряжения способны к существенному перераспределению внутри этого диапазона. Например, для образца № 2 они изменились с 248 до 155 МПа, для образца № 4 - с 252 до 176 МПа. Наблюдается релаксация (уменьшение) напряжений и в других случаях.

По поводу процесса релаксации напряжений отмечается, что на границах зерен межатомные связи сильно напряжены, и когда межатомное расстояние увеличивается более чем на $10{-}15~\%$, связи следует считать разрушенными [10]. Процесс разрыва межатомных связей является ведущим на всех стадиях разрушения [11, 12]. Последствием разрушения межатомных связей является релаксация напряжений и трещинообразование [11]. В процессе возникновения и роста усталостных трещин происходит релаксация и перераспределение остаточных напряжений [13]. Наконец, из теории дифракции рентгеновских лучей (выражения (3)-(5)) следует, что физическое уширение рентгеновской дифракционной линии связано с перераспределением полей упругих напряжений: возрастание соответствует упрочнению, а уменьшение – зарождению микротрещин, так что образование микротрещин является релаксационным процессом, приводящим к уменьшению локальных напряжений [14].

При изготовлении, монтаже или ремонте элементов теплоэнергетического оборудования одной из важнейших контролирующих операций с целью проверки на плотность и прочность является гидравлическое испытание, которое предусматривает превышение напряжения свыше расчетного значения, определяемого на основе рабочего давления [4, 5]. Гидроиспытания проводятся в предположении, что внутриструктурные напряжения составляют малозначительную величину и их влиянием можно пренебрегать без последствий для сплошности и разупрочнения металла, что противоречит экспериментально полученным и представленным на рис. 2 данным, а также другим результатам [15]. Наблюдаемый процесс уменьшения напряжений при гидравлическом прессовании связывается с образованием субмикротрещин, на кончике которых сразу же происходит пластическая релаксация напряжений.

С целью установления влияния внутренних напряжений на тепломеханические характеристики все образцы после пластического деформирования были подвергнуты коррозионным испытаниям, в течение которых они находились под давлением при температуре *t*=240 °С. После коррозионных испытаний (рис. 2) разброс значений микронапряжений существенно изменился - от 14 до 302 МПа. Из этого следует, что коррозионный процесс в еще большей степени характеризуется неоднородной релаксацией внутренних структурных напряжений, что также связывается с образованием субмикротрещин в процессе разрушения материала за счет коррозии. Характерным признаком начального разрушения является релаксация напряжений [16].

Следствием неоднородности поверхности может быть различие в величинах микротвердости по периметру и длине трубы. Микротвёрдость связана с механическими свойствами сталей зависимостями: $\sigma_{0,2}$ =0,185 *Hd*, $\sigma_{\rm s}$ =0,37 *Hd*, где $\sigma_{0,2}$ – предел текучести, кгс/мм², $\sigma_{\rm s}$ – предел временной прочности, кгс/мм², *Hd* – микротвёрдость, кгс/мм²[17]. Измерение микротвердости используется для установления локальных изменений механических свойств и степени локализованности дефектов структуры.

Исследование распределения микротвердости выполнено стандартным прибором ПМТ-3. Измерения производились по толщине стенки трубы по направлению от внешней поверхности к внутренней. Характерный результат измерения микротвердости для образца в исходном состоянии представлен на рис. 3.

В других направлениях измерений, также как и на рис. 3, на кривых видны пики микротвердости. Упрочненная зона, по данным микротвердометрии, располагается непосредственно под поверхностью. Ширина упрочненных зон для разных направлений измерений составляет 200...300 мкм. В [18] также отмечается, что режим эксплуатации оставляет след в металле на наружной поверхности в виде измененного, по сравнению с матрицей, слоя. Установленная в настоящей работе неравномерность может зависеть от ряда факторов. В частности, упрочнение возникает при образовании твердых растворов: известно, что твердость чистых металлов ниже, чем твердых растворов. Таким образом, в структуре стенки трубы существует некая приповерхностная зона, пересыщенная дефектами, в пределах которой наблюдается повышенная микротвердость.



Fig. 3. Changes of microhardness in the tube wall thickness in the initial state of the sample



бы после первого нагрева

Fig. 4. Changes of microhardness in the tube wall thickness after the first heating



Рис. 5. Изменения микротвердости по толщине стенки трубы после второго нагрева

Fig. 5. Changes of microhardness in tube wall thickness after the second heating

Основываясь на данных [19] о том, что в области границы преобладают неравновесные концентрации, накопление атомов растворенных компонентов, а граница является местом стока вакансий, можно предположить, что наблюдаемый пик неоднородности относится только к межзеренным границам. Внутри зерна неоднородность отсутствует [19]. Тогда ширина межзеренной границы, равная размеру упрочненной зоны в 200...300 мкм (рис. 3), представляется достаточно большой при существующих сведениях о межзеренных границах, протяженность которых оценивается величинами от 0,5...1,0 нм [20] до порядка 0,1 мкм [21] и 0,3 мкм [22].

Одновременно с этим экспериментальные данные, представленные на рис. 2, характеризующие внутризеренную неоднородность, свидетельствуют о неравномерности свойств и их перераспределениях как на межзеренных границах, так и на границах зерен.

Если связывать максимум микротвердости с максимальной концентрацией атомов растворенных компонентов (рис. 3), то видно, что максимальная концентрация в упрочненной зоне меняется непрерывно до некоторого среднего значения в основном металле.

С целью устранения локальных неоднородностей структуры образец был дважды подвергнут нормализующему отжигу при температуре 500 °С. Суммарное время отжига составило 1 час.

Температурные зависимости микротвердости без термообработки (рис. 3) и после двух термоциклов (рис. 4, 5) указывают на нормализацию микротвердости и вырождение структурной неоднородности.

Изменения микротвердости при циклическом нагреве возможно объяснить диффузионным перераспределением дефектов структуры.

В нестационарных системах процесс диффузии описывается вторым законом Фика [23]:

$$\frac{\partial c}{\partial t} = D \frac{\partial^2 c}{\partial x^2}.$$
 (6)

Для диффузии соответственно в двух и трех направлениях выражение (6) представляется в виде:

$$\frac{\partial c}{\partial t} = D_x \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} + D_y \frac{\partial^2 c}{\partial y^2};$$
$$\frac{\partial c}{\partial t} = D_x \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} + D_y \frac{\partial^2 c}{\partial y^2} + D_z \frac{\partial^2 c}{\partial z^2}$$

где D_x , D_y , D_z – коэффициенты вдоль осей; c – концентрация диффундирующих атомов; t – время диффузии.

Для кубических кристаллов принимается, что $D_x = D_y = D_z$.

Решение уравнения (6) имеет вид [23]:

$$\frac{1}{x^2} = Dt; \ D = \frac{1}{x^2/t},$$
 (7)

где *х* – ширина диффузионной зоны; *D* – коэффициент диффузии.

По изменению микротвердости можно оценить ширину диффузионной зоны x, коэффициент диффузии D и величину \sqrt{Dt} .

При x=300 мкм, t=1,0 ч коэффициент диффузии $D=2,5\cdot 10^{-7}$ см²·с⁻¹.

На основании экспериментальных данных при заданной температуре отжига 500 °С получена зависимость $x=f(\sqrt{t})$ (рис. 6).



Fig. 6. Changes in the diffusion zone X (micrometers) versus $\sqrt{t(h)}$

Циклический нагрев образца привел к вырождению диффузионной зоны и выравниванию концентраций по толщине стенки трубы (рис. 5). Полученная функция зависимости концентрации диффундирующего элемента по всей длине диффузионной зоны позволяет определять время отжига для получения заданной концентрации на определенной глубине или для полного устранения концентрационной неоднородности в результате диффузии.

По всей видимости, нужно иметь в виду, что постоянно протекающий распад твердых растворов (естественное и искусственное старение), неоднородные внутренние напряжения, которые, кроме градиентов концентраций, также являются движущей силой процесса диффузии, приведут к циклическим изменениям свойств приповерхностного слоя за счет диффузии, «расшатывая» структуру и постепенно распространяясь от поверхности

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Приймак Е.Ю., Грызунов В.И. Особенности поведения металла конвективного пароперегревателя в процессе высокотемпературной эксплуатации // Металловедение и термическая обработка металлов. – 2011. – № 3. – С. 33–37.
- Urtsev V.N., Morozov A.A., Kaptsan A.V. The features of austenite to ferrite transformation for carbon steel // International Congress on Metallurgy and Materials Technology, Physical Metallurgy. – 1994. – № 1. – P. 251–259.
- Гринь Е.А. Ресурс, надежность и безопасность теплосилового оборудования электростанций // Надежность и безопасность энергетики. – 2012. – № 1. – С. 76–79.
- Правила устройства и безопасной эксплуатации трубопроводов пара и горячей воды (ПБ 10-573-03). Сер. 17. Вып. 46 – М.: Научно-технический центр по безопасности в промышленности. 2008. – 128 с.
- Правила устройства и безопасной эксплуатации сосудов, работающих под давлением (ПБ 03–576–03). Сер. 03. Вып. 24. – М.: Научно-технический центр по безопасности в промышленности, 2008. – 188 с.

по всей толщине стенки трубы, что будет проявляться в явлениях термической усталости.

Заключение

Как следует из результатов, методом рентгеноструктурного анализа в совокупности с микротвердометрией реализован контроль структурной неоднородности труб и показана локализованность дефектов структуры с целью продления ресурса работоспособности поверхностей нагрева котлов.

Представленные результаты могут быть применены при прогнозировании усталостных разрушений поверхностей нагрева при циклических механических и термических нагрузках, а экспериментальные факты диффузионного перераспределения примесей положены в основу гипотезы о диффузионной природе термомеханической усталости.

По работе можно сделать следующие основные выводы.

- 1. Установлено наличие неоднородности свойств стенки котельной трубы как в исходном состоянии, так и в зависимости от термомеханических и химических факторов воздействия.
- Степень локализованности структурной неоднородности фиксируется рентгеновским методом путем измерения внутренних микронапряжений в сочетании с измерениями микротвердости.
- 3. В целях стабилизации структуры и восстановления физических свойств возможен нормализующий отжиг, при котором устраняется локальная структурная неоднородность. Режим стабилизирующего отжига определяется на основе микротвердометрии по заданной концентрации на определенной глубине или при полном устранении концентрационной неоднородности в диффузионной зоне.

Работа поддержана грантом РФФИ № 15-08-99544а в 2015 г.

- Механизмы и причины «нетрадиционных» повреждений труб пароперегревателей котлов энергоблоков сверхкритического давления / А.Б. Вайнман, Б.Э. Школьникова, О.Д. Смиян, А.В. Жабров // Электрические станции. – 2010. – № 7. – С. 15–32.
- Микроструктурные изменения в стали 10Х9В2МФБР при ползучести в течение 40000 часов при 600 °С / А.Э Федосеева, П.А. Козлов, В.А. Дудко, В.Н. Скоробогатых, И.А. Щенкова, Р.О. Кайбышев // Физика металлов и металловедение. – 2015. – Т. 116. – № 10. – С. 1102–1111.
- Горелик С.С., Скаков Ю.А., Расторгуев Л.Н. Рентгенографический и электронно-оптический анализ. – М.: МИСИС, 2002. – 360 с.
- Любимова Л.Л., Заворин А.С., Лебедев Б.В. Основы применения метода высокотемпературной рентгенографии для оценки работоспособности труб паровых котлов. – Томск: Изд-во «STT», 2009. – 220 с.
- Friedel J., Gullity B.D., Crussard C. Study of the surface tension of a grain boundary in a metal as a function of the orientation of the two grains which the boundary separates // Acta Met. – 1953. – V. 1. – P. 79–92.

- 11. Иванова В.С. Разрушение металлов. Достижения отечественного металловедения. – М.: Металлургия, 1979. – 168 с.
- Регель В.Р., Слуцкер А.И., Тамашевский Э.Е. Кинетическая природа прочности твердых тел. – М.: Наука, 1974. – 560 с.
- К методике оценки остаточных напряжений в железнодорожных рельсах / А.Ю. Абдурашитов, М.Н. Георгиев, Н.Я. Межова, В.А. Рейхарт // Заводская лаборатория. – 1991. – № 4. – С. 57–58.
- Распространение усталостной трещины в низкоуглеродистой мартенситной стали / Б.К. Барахтин, В.В. Макаров, П.П. Петров // Заводская лаборатория. – 1991. – № 3. – С. 30–32.
- 15. Прогнозирование работоспособности труб поверхностей нагрева котлов с учетом внутренних напряжений при пусконаладочных операциях / Л.Л. Любимова, А.А. Макеев, А.А. Ташлыков, А.С. Заворин, Р.Н. Фисенко // Известия Томского политехнического университета. – 2013. – Т. 323. – № 4. – С. 81–84.
- Consideration of intrastructural stresses in the processes connected with the effect of structural nonuniformity on corrosion damages inflicted to HeattTransfer Tubes / L.L. Lyubimova, A.A. Makeev, A.S. Zavorin, A.A. Tashlykov, A.I. Artamontsev, B.V. Lebedev, R.N. Fisenko // Thermal Engineering. 2014. V. 61. № 8. P. 600–605.

- Марковец М.П. Определение механических свойств металлов по твердости. – М.: Машиностроение, 1979. – 190 с.
- Богачев В.А., Старчиков С.Н., Тимонин И.Л. Применение явления намагничивания для контроля тепловой неравномерности пароперегревателей из стали 12X18H12T // Электрические станции. 2007. № 12. С. 22–25.
- Глейтер Г., Чалмерс Б. Большеугловые границы / пер. с англ. С.Н. Горина, В.М. Половова. – М.: Мир, 1975. – 375 с.
- Каур И., Густ В. Диффузия по границам зерен и фаз / пер. с англ. Б.Б. Страумала; под. ред. Л.С. Швиндлермана. – М.: Машиностроение, 1991. – 448 с.
- Аверин С.А. Оценка прочности границ зерен нержавеющей стали X16H15M3Б, используемой в атомной энергетике // Перспективные материалы. – 1997. – № 1. – С. 44–47.
- Астафьев А.А. Некоторые закономерности водородного охрупчивания конструкционных сталей // Металловедение и термическая обработка металлов. – 1997. – № 2. – С. 5–8.
- Ермаков С.С. Физика металлов и дефекты кристаллического строения. – Л.: Изд-во Ленинградского университета, 1989. – 280 с.

Поступила 18.12.2015 г.

UDC 621.181:620.171

EXPERIMENTAL STUDY OF THE STRUCTURAL STABILITY OF THE BOILER PIPES WALLS

Lyudmila L. Lyubimova,

National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin Avenue, Tomsk, 634050, Russia. E-mail: Ill@tpu.ru

Alexander S. Zavorin,

National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin Avenue, Tomsk, 634050, Russia. E-mail: zavorin@tpu.ru

Alexander A. Tashlykov,

National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin Avenue, Tomsk, 634050, Russia. E-mail: tashlykov@tpu.ru

Alexander I. Artamontsev,

National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin Avenue, Tomsk, 634050, Russia. E-mail: a art@tpu.ru

Relevance of the work is due to the need to ensure the reliability and resource efficiency of the heating surface tubes of steam and hot water boilers.

Objective: to establish the spatial distribution and structural heterogeneity of the properties of the wall of the boiler pipe and determination of the conditions of the stabilization annealing.

Methods: micro hardness and X-ray analysis.

Results. In providing the resource efficiency of the heating surface tubes of steam and hot water boilers, which is guaranteed by design and operational parameters of the operation, the preparatory thermal operations during installation and commissioning works, plays an important role structural homogeneity of heating surface tubes, which can be broken during transport, storage and operation. Reliable operation of the heating surface tubes of steam and hot water boilers is provided by the control of pipes and structural homogeneity degree of localization of defects that are revealed in the process of further exploitation as long creep and corrosion phenomena. According to the research the authors found that the starting material in the initial state has a significant internal structural heterogeneity of stresses capable of redistribution according to external pressure and temperature, which is manifested in a change in the operation of heat resistance and corrosion resistance of the surface. It is shown that under the surface of the pipe wall there is a hardened diffusion zone whose width is about 200...300 micrometers. The authors also found the dependence of the change in the size of the diffusion zone on the time and temperature. In an experimental way we set a stabilization annealing mode at which non-uniform properties of the diffusion zone are eliminated. The curve of the concentration of the diffusing element along the length of the diffusion zone allows to determine the annealing time to obtain a predetermined concentration at a certain depth of the pipe wall or to completely eliminate nonuniformity in the concentration diffusion.

Key words:

Steel, corrosion, resource, micro hardness, diffraction line, internal structural micro tension, annealing.

This work was supported by grant RFBR No. 15-08-99544a in 2015.

REFERENCES

- 1. Priymak E.Yu., Gryzunov V.I. Osobennosti povedeniya metalla konvektivnogo paroperegrevatelya v protsesse vysokotemperaturnoy ekspluatatsii [Features of behavior of convective superheater metal during high temperature operation]. *Metal Science* and Heat Treatment, 2011, no. 3, pp. 33-37.
- Urtsev V.N., Morozov A.A., Kaptsan A.V. The features of austenite to ferrite transformation for carbon steel. *International Congress on Metallurgy and Materials Technology, Physical Metallurgy*, 1994, no. 1, pp. 251–259.
- Grin E.A. Resurs, nadezhnost i bezopasnost teplosilovogo oborudovaniya elektrostantsiy [Resource, reliability and safety of heat power equipment of power stations]. *Nadezhnost i bezopasnost energetiki*, 2012, no. 1, pp. 76–79.
- Pravila ustroystva i bezopasnoy ekspluatatsii truboprovodov para i goryachey vody (PB 10-573-03) [Rules for design and safe operation of steam and hot water (Safety regulations 10-573-03)]. Moscow, Scientific and Technical Center of Industrial Safety Publ., 2008. 128 p.

- Pravila ustroystva i bezopasnoy ekspluatatsii sosudov, rabotayushchikh pod davleniem (PB 03-576-03) [Rules of construction and safe operation of vessels working under pressure (Safety regulations 03-576-03)]. Moscow, Scientific and Technical Center of Industrial Safety Publ., 2008. 188 p.
- Vaynman A.B., Shkolnikova B.E., Smiyan O.D., Zhabrov A.V. Mekhanizmy i prichiny «netraditsionnykh» povrezhdeniy trub paroperegrevateley kotlov energoblokov sverkhkriticheskogo davleniya [Mechanisms and causes of «non-traditional» boiler superheater tubes damage supercritical units]. *Power Technology* and Engineering, 2010, no. 7, pp. 15–32.
- Fedoseeva A.E., Kozlov P.A., Dudko V.A., Skorobogatykh V.N., Shchenkova I.A., Kaybyshev R.O. Mikrostrukturnye izmeneniya v stali 10H9V2MFBR pri polzuchesti v techenie 40000 chasov pri 600 °C [Microstructural changes in 10X9B2MΦ5P steel in creep over 40000 hours at 600 °C]. *The Physics of Metals and Metallography*, 2015, vol. 116, no. 10, pp. 1102–1111.
- Gorelik S.S., Skakov Yu.A., Rastorguev L.N. *Rentgenograficheskiy i elektronno-opticheskiy analiz* [X-ray and electron-optical analysis]. Moscow, MISIS Publ., 2002. 360 p.

- Lyubimova L.L., Zavorin A.S., Lebedev B.V. Osnovy primeneniya metoda vysokotemperaturnoy rentgenografii dlya otsenki rabotosposobnosti trub parovykh kotlov [Basics of using the method of high-performance X-ray to assess the tubes of steam boilers]. Tomsk, STT Publ., 2009. 220 p.
- Friedel J., Gullity B.D., Crussard C. Study of the surface tension of a grain boundary in a metal as a function of the orientation of the two grains which the boundary separates. *Acta Met.*, 1953, vol. 1, pp. 79–92.
- Ivanova V.S. Razrushenie metallov. Dostizheniya otechestvennogo metallovedeniya [The destruction of the metal. Achievements of domestic metallurgy]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1979. 168 p.
- Regel V.R., Slutsker A.I., Tamashevskiy E.E. Kineticheskaya priroda prochnosti tverdykh tel [The kinetic nature of the strength of solids]. Moscow, Nauka Publ., 1974. 560 p.
- Abdurashitov A.Yu., Georgiev M.N., Mezhova N.Ya., Reykhart V.A. K metodike otsenki ostatochnykh napryazheniy v zheleznodorozhnykh relsakh [To evaluate the method of residual stress in rails]. *Industrial Laboratory*, 1991, no. 4, pp. 57–58.
- Barakhtin B.K., Makarov V.V., Petrov P.P. Rasprostranenie ustalostnoy treshchiny v nizkouglerodistoy martensitnoy stali [Distribution of fatigue cracks in the low-carbon martensitic steel]. *Industrial Laboratory*, 1991, no. 3, pp. 30–32.
- 15. Lyubimova L.L., Makeev A.A., Tashlykov A.A., Zavorin A.S., Fisenko R.N. Prognozirovanie rabotosposobnosti trub poverkhnostey nagreva kotlov s uchetom vnutrennikh napryazheniy pri puskonaladochnykh operatsiyakh [Predicting performance of heating surface tubes of boilers taking into account stress at start-up operations]. Bulletin of the Tomsk Polytechnic University, 2013, vol. 323, no. 4, pp. 81–84.
- Lyubimova L.L., Makeev A.A., Zavorin A.S., Tashlykov A.A., Artamontsev A.I., Lebedev B.V., Fisenko R.N. Consideration of

intrastructural stresses in the processes connected with the effect of structural nonuniformity on corrosion damages inflicted to HeattTransfer Tubes. *Thermal Engineering*, 2014, vol. 61, no. 8, pp. 600–605.

- Markovets M.P. Opredelenie mekhanicheskikh svoystv metallov po tverdosti [Determination of mechanical properties of metals hardness]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1979. 190 p.
- Bogachev V.A., Starchikov S.N., Timonin I.L. Primenenie yavleniya namagnichivaniya dlya kontrolya teplovoy neravnomernosti paroperegrevateley iz stali 12H18N12T [Application to control the magnetization phenomenon of uneven heat superheater steel 12X18H12T]. *Power Technology and Engineering*, 2007, no. 12, pp. 22–25.
- Gleyter G., Chalmers B. Bolsheuglovye granitsy [Angle boundaries]. Moscow, Mir Publ., 1975. 375 p.
- Kaur I., Gust V. Diffuziya po granitsam zeren i faz [Diffusion and grain boundary phases]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1991. 448 p.
- Averin S.A. Otsenka prochnosti granits zeren nerzhaveyushchey stali H16N15M3B, ispolzuemoy v atomnoy energetike [Evaluation of the strength of the grain boundaries of stainless steel X16H15M3B used in nuclear power]. Journal of Advanced Materials, 1997, no. 1, pp. 44–47.
- Astafev A.A. Nekotorye zakonomernosti vodorodnogo okhrupchivaniya konstruktsionnykh staley [Some regularities of hydrogen embrittlement of structural steels]. *Metal Science and Heat Treatment*, 1997, no. 2, pp. 5–8.
- Ermakov S.S. Fizika metallov i defekty kristallicheskogo stroeniya [Physics of metals and defects in the crystal structure]. Leningrad, Leningrad University Publ., 1989. 280 p.

Received: 18 December 2015.