

**СРАВНЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ РЕНТГЕНОМЕТРИЧЕСКИХ И МЕТАЛЛОГРАФИЧЕСКИХ  
ИССЛЕДОВАНИЙ ПРИПОВЕРХНОСТНОЙ НЕОДНОРОДНОСТИ СОСТАВА АУСТЕНИТНОЙ  
ЖАРОПРОЧНОЙ ТРУБНОЙ СТАЛИ ДЛЯ ПАРОПЕРЕГРЕВАТЕЛЕЙ**

Юдин В.А.

Научные руководители: Любимова Л.Л., к.т.н., доцент; Ташлыков А.А., к.т.н., доцент  
Томский политехнический университет, 634050, Россия, г. Томск, пр. Ленина, 30  
E-mail: [yudin\\_1992@sibmail.com](mailto:yudin_1992@sibmail.com)

**COMPARISON OF RADIOMETRIC AND METALLOGRAPHIC STUDIES SUBSURFACE  
INHOMOGENEITIES AUSTENITIC HEAT-RESISTANT PIPE STEEL FOR SUPERHEATER**

Yudin V.A.

Supervisors: Lubimova L.L., Ph.D., associate professor; Tashlykov A.A., Ph.D., associate professor  
Tomsk Polytechnic University, 634050, Lenina Avenue, 30, Tomsk, Russia  
E-mail: [yudin\\_1992@sibmail.com](mailto:yudin_1992@sibmail.com)

Основными конструкционными материалами для изготовления пароперегревателей котлов СКД в России являются аустенитная сталь 12X18H12T и стали перлитного класса 12X1МФ и 12X2МФСР. Рассчитанные на ресурс работы порядка 300 тыс.ч.они разрушаются по разным причинам гораздо раньше [1]. Одной из причин преждевременных разрушений может выступать ускорение структурной деградации стали в результате циклических механических и температурных градиентов [2].

Малая изученность некоторых аспектов структурных превращений и возможность фиксировать их с применением высокотемпературной рентгенометрии непосредственно при температурах этих превращений определили актуальность настоящей работы.

*Целью* работы является исследование и анализ влияния приповерхностной неоднородности состава на структурную деградацию на основе сравнения данных рентгенометрии и металлографии.

В качестве объекта исследований выбрана аустенитная хромомарганцевая сталь 10X13Г12БСН2Д2 (Ди-59), разработанная для пароперегревателей котлов СКД [3, 4]. Исследования проведены на образцах, вырезанных из трубы диаметром 32 и толщиной стенки 6 мм.

Проведенный рентгеноструктурный анализ приповерхностных слоев образца с внутренней и наружной его сторон показывает, что атомно-кристаллическая структура наружной и внутренней поверхностей стенки трубы принципиально отличается (рис. 1).

На внутренней поверхности со стороны малых углов отмечается признак расслоения основной фазы, соответствующей аустениту с гранецентрированной кубической (ГЦК) решеткой и ребром элементарного куба, равным  $a_\gamma = 3,6076 \text{ \AA}$  (рис. 1 а). Наружная поверхность обладает смешанной фазовой структурой. Одна из фаз имеет объемно-центрированную кубическую (ОЦК) решетку с параметром элементарной ячейки  $a = 2,8509 \text{ \AA}$ , вторая фаза представляет собой аустенит ( $\gamma$  - Fe) с ГЦК решеткой и ребром куба  $a_\gamma = 3,5929 \text{ \AA}$  (рис.1 б). Различие в параметрах решетки аустенита на наружной и внутренней поверхностях свидетельствует о концентрационной неоднородности основного  $\gamma$  - твердого раствора. Примерное соотношение фаз на наружной поверхности соответственно равно  $\alpha$  - Fe – 25 и  $\gamma$  - Fe – 75 масс. %.

Следует отметить, что установленная неоднородность окажет влияние на механические и электрохимические свойства различных участков поверхности, явится фактором, определяющим их усталостную и коррозионную прочность. Исследования показывают, что потенциальные возможности конструкционных материалов, особенно высокопрочных, проявляются лишь в том случае, когда качество поверхности удовлетворяет самым высоким требованиям [5].

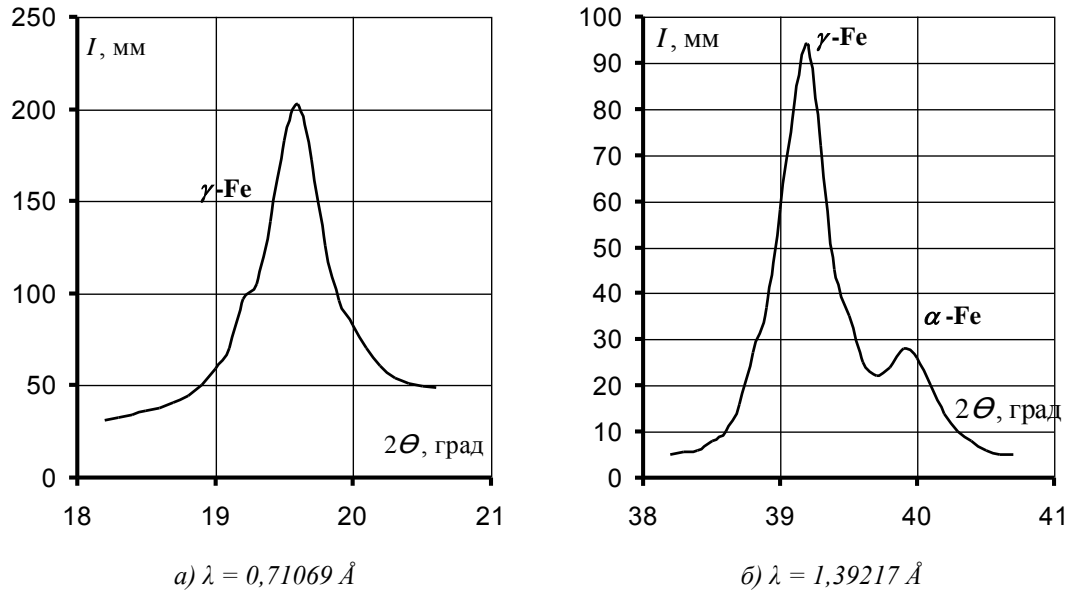


Рис. 1. Фрагменты рентгенограмм внутренней (а) и наружной (б) поверхностей

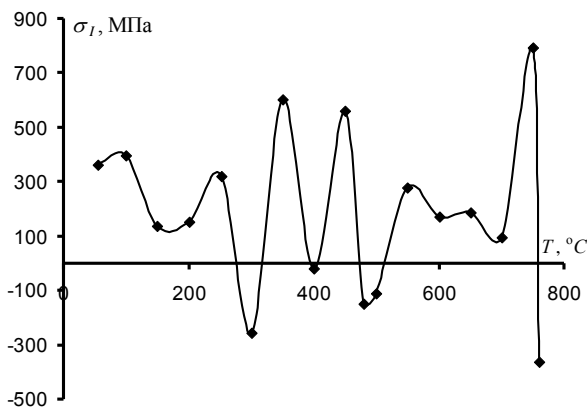


Рис. 2. Изменение зональных макронапряжений I рода  $\sigma_I$  в стенке трубы от температуры

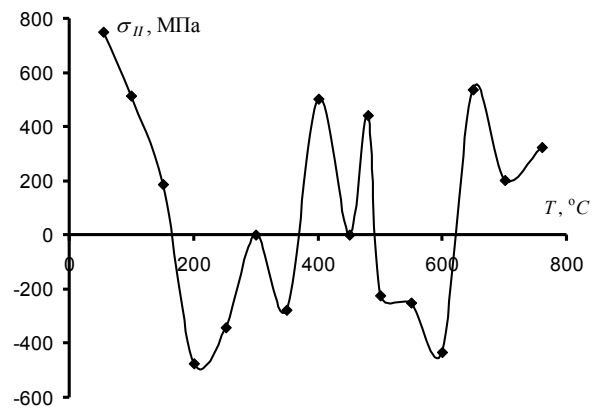


Рис. 3. Изменение внутренних микронапряжений II рода  $\sigma_{II}$  в стенке трубы от температуры

Кроме того, материальная неоднородность сплава (рис. 1) проявляет себя возникновением неоднородных внутренних структурных напряжений первого  $\sigma_I$  и второго рода  $\sigma_{II}$  (рис. 2, 3).

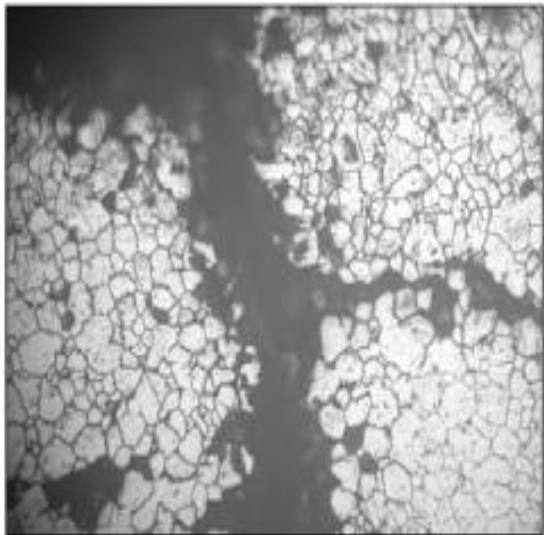
Из рис. 2 следует, что зональные макронапряжения  $\sigma_I$  при знакопеременных термических нагрузках приобретают осциллирующий характер и в диапазонах предполагаемых эксплуатационных температур 550...600...650...700 °С находятся в области растягивающих напряжений.

Внутренние микронапряжения второго рода (внутризеренные) в диапазоне температур 500...600 °С находятся в области сжимающих напряжений (рис. 3), которые препятствует развитию явлений термической усталости [6], вследствие чего и их разрушающее влияние проявляется с меньшей вероятностью, чем при растягивающих напряжениях.

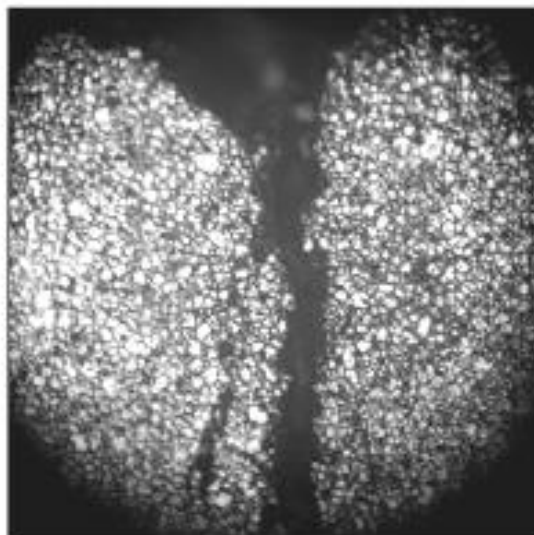
На том основании, что в объеме зерен действуют сжимающие напряжения (рис. 3), а по границам – растягивающие (рис. 2), можно предположить, что исследуемый образец стали в диапазоне служебных температур будет иметь в большей степени склонность к образованию трещин не в теле зерна, а по его границам. Имея в виду существенную фазовую неоднородность наружной поверхности (рис. 1б), можно

утверждать, что межкристаллитной коррозии в первую очередь будет подвергаться наружная поверхность.

Этот же вывод вытекает из металлографических исследований разрушенных труб IV ступени пароперегревателя из стали Ди-59 котлов БКЗ 210-140 Ф с наработкой 12941 ч и 6821 ч и числом пусков – 17 (рис. 4, 5, 6), предоставленных одной из ТЭЦ СФО.



*Рис. 4. Разветвленные трещины на наружной поверхности трубы пароперегревателя из стали Ди-59*



*Рис. 5. Трещина на наружной поверхности трубы пароперегревателя из стали Ди-59*

Микрошлифы для исследования вырезались перпендикулярно месту разрушения.

Травление производилось раствором «царской водки», микроструктура стали определялась на микроскопе Метам ЛВ-32 при увеличениях 500х. Установлено, что наружная поверхность состоит, в основном, из аустенита с некоторым количеством двойников и выделением укрупненных карбидов по границам и внутри зерна.

Во всех рассмотренных случаях разрушения выявлены с наружной стороны труб. Внутренняя поверхность труб оставалась чистой, без видимых дефектов. Разрушения представляют собой нераскрытые разветвленные трещины как в продольном, так и в поперечном направлениях с выкрашиванием металла по наружной поверхности (рис. 4, 5).

По месту разрушения из аустенита с тонкими и четкими границами зерен по наружной поверхности параллельно основной трещине, обнаружено межзеренное коррозионное растрескивание металла на глубину до 3,3 мм, начинающееся с наружной поверхности и сопровождающееся выпадением целых зерен, что характерно для межкристаллитной коррозии (рис. 6).

Разрушенные поверхности пароперегревателя не несли следов отложений и окалины, не обнаружено также увеличения диаметра труб в месте разрыва. Это свидетельствует о том, что разрушение было бездеформационным и доминантным фактором разрушения явились внутрискристаллитные процессы старения металла. В отличие от рентгенофазового анализа (рис. 1б) данные микроскопического метода не обнаруживают в структуре стали достаточно существенной по величине фазы альфа-железа (25 %), что также может объясняться неоднородностью состава поверхности стенки трубы.

По результатам металлографических исследований, как и по данным рентгенометрии, можно сделать вывод, что разрушения труб  $D \times S = 32 \times 4,5$  мм, сталь Ди-59 IV ступени пароперегревателя, произошли вследствие развития коррозионного повреждения (МКК) металла со стороны внешней поверхности.

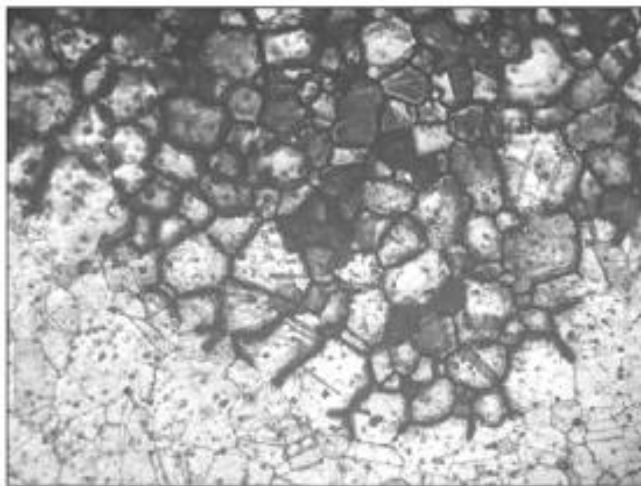


Рис. 6. Межкристаллитная коррозия на наружной поверхности

#### Заключение

На основе методики рентгенодиагностики протестированы образцы труб поверхностей нагрева паровых котлов по уровню внутренних структурных напряжений. Полученные оценки и выводы относительно возможных разрушений и работоспособности труб находятся в соответствии с результатами, выполненными путем анализа микроструктуры на основе металлографического метода. Согласно исследованиям сравниваемыми методами разрушение поверхностей нагрева произошло с внешней стороны трубы и выразилось в межкристаллитном растрескивании металла.

*Работа поддержана грантом РФФИ № 15-08-99544а*

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Резинских В.Ф., Школьников Б.Э., Урусова Г.А. Перспективные стали для пароперегревателей котлов СКД // Теплоэнергетика.– 2000.– № 10. – С. 39–43.
2. Structural Instability in the Early Decomposition of Supersaturated Austenite Solid Solution /A.A. Makeev, L.L. Lyubimova, A.S. Zavorin et al. // Steel in Translation.–2009. –Vol. 39 – No. 12.– pp. 1048 – 1055.
3. Адамович В.К., Крац И.В., Гриневский В.В. Разработка расчетных характеристик кратковременной и длительной прочности, пластичности и допускаемых напряжений стали Ди59// Труды ЦНИИТМАШ/ Под ред. А.В. Рябченкова, Е.В. Кузнецова. – М.: 1988.– С. 62 – 68.
4. Тумановский А.Г., Резинских В.Ф. Стратегия продления ресурса и технического перевооружения тепловых электростанций//Теплоэнергетика.– 2001.– № 6.– С.3 –10.
5. Учёт внутрискристаллических напряжений в процессах подавления влияния структурной неоднородности на коррозионные повреждения теплообменных труб/Л.Л. Любимова, А.А. Макеев, А.С. Заворин и др.// Теплоэнергетика. – 2014.– № 8.– С. 62–67.
6. Русаков А. А. Рентгенография металлов. – М.: Атомиздат, 1977. – 480 с.