

УДК 669.1.017:620.18:620.19

ОСОБЕННОСТИ МИКРОСТРУКТУРНОЙ НЕОДНОРОДНОСТИ КОТЕЛЬНЫХ ТРУБ ИЗ СТАЛИ 20 В СОСТОЯНИИ ЗАВОДСКОЙ ПОСТАВКИ

Помазова Анна Викторовна¹,

pomazova@yandex.ru

Артамонцев Александр Иванович²,

a_art@tpu.ru

Заворин Александр Сергеевич²,

zavorin@tpu.ru

¹ ЗАО НДЦ НПФ «Русская лаборатория»,
Россия, 644035, г. Омск, пр. Губкина, 7/8.

² Национальный исследовательский Томский политехнический университет,
Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30.

Актуальность работы обусловлена необходимостью минимизации коррозионных потерь металла трубных поверхностей нагрева при их эксплуатации. Это в значительной мере влияет на остроту проблемы обеспечения надежности функционирования котельных агрегатов тепловых электрических станций и объектов промышленной теплоэнергетики. В свою очередь, увеличение надежности и безаварийности работы тепломеханического энергооборудования, наряду с повышением безопасности жизни и снижением рисков потенциального вреда обслуживающему персоналу и окружающей среде, непосредственно связано с энергоэффективным использованием ресурсов. Важный аспект актуальности работы состоит в том, что объектом исследования являются трубы из углеродистой стали (марка стали 20), которая относится к наиболее используемым в российском энергомашиностроении для изготовления поверхностей нагрева паровых котлов.

Цель работы. Анализ микрорельефа наружной и внутренней поверхности новых труб типоразмера 60×6,0 мм, изготовленных из стали 20; изучение по толщине стенки структурной неоднородности и размерных параметров микроструктуры для прогнозных заключений о надежности и преобладающих механизмах повреждаемости, которые будут развиваться в процессе эксплуатации; анализ проведения возможных дополнительных мероприятий, улучшающих эксплуатационные свойства и ресурс труб поверхностей нагрева.

Методы исследования: металлографические методы исследования структурных составляющих стали, методы измерения микротвердости.

Результаты. На поверхностях труб в состоянии поставки обнаружены различные типы дефектов (раскатанная корочка, межкристаллитные трещины, технологические дефекты в виде канавок с закругленным дном), которые неравномерно распределены по поверхности трубы. Глубина дефектов достигает половины браковочного уровня для эксплуатируемых труб. По толщине стенки трубы зафиксирована структурная неоднородность и перепад размерных параметров микроструктуры. Наличие указанных дефектов и неоднородность материала трубы приводят к существенным изменениям скорости развития повреждения и снижают ресурс котельных труб. Предложены запатентованные способы, направленные на улучшение свойств поверхности и снижение структурной неоднородности труб. Приведенные способы (режим паровоздушной обработки труб, режим двукратной нормализации при 920 °С) доступны для осуществления в условиях теплогенерирующих компаний и эффективно снижают скорость коррозионных процессов.

Ключевые слова:

Сталь 20, трубы поверхностей нагрева, структурная неоднородность, дефекты поверхности, ресурс котельных труб.

Введение

Готовность всех систем тепловых электрических станций к длительной непрерывной выработке тепловой и электрической энергии в значительной мере зависит от надежности котельного оборудования, большинство отказов которого происходит из-за повреждений труб поверхностей нагрева [1]. Статистический анализ лаборатории разрушающего контроля в г. Омске свидетельствует, что около 80 % аварийных остановов котлов связано с повреждениями теплообменных труб, большая часть которых произошла из-за развития процессов коррозии на наружной поверхности. Установлено, что дефекты, являющиеся причинами повреждения, могут возникать не только в процессе эксплуатации, но и на стадии изготовления и монтажа поверхностей нагрева. Технические условия

[2] регламентируют возможность их механического удаления при условии, что толщина стенки в месте удаления дефекта не выйдет за минимальные допустимые значения. При этом, согласно [2], допускается оставлять на поверхностях труб дефекты глубиной не более 5 % от номинальной толщины стенки трубы.

Как известно, трубы для поверхностей нагрева котлов в процессе изготовления проходят длинную и сложную технологическую цепь термомеханических операций. Под влиянием неконтролируемых отклонений в любой из операций структура стенки трубы приобретает те или иные индивидуальные особенности дефектности, заключающиеся в появлении наклепа, слоистости, внутренних остаточных напряжений и разнородности [3, 4]. Так, было показано [3], что трубная сталь в состоя-

нии поставки обладает существенной неоднородностью внутренних напряжений, что может приводить к разрушению металла в областях локальных концентраций напряжений при внешней термической или механической нагрузке. В работах [4, 5] было показано, что две соседние трубы, изготовленные из углеродистой стали, могут иметь значительно различающуюся микроструктуру и, как следствие, разную коррозионную стойкость в идентичных условиях эксплуатации. В ферритных нержавеющих сталях микроструктура так же оказывает значительное влияние на коррозионную стойкость в агрессивных средах и режимами термической обработки можно менять эксплуатационные свойства [6, 7]. Основными причинами различающейся феррито-перлитной микроструктуры в котельной стали 20, получаемой в промышленных объемах, являются неравновесные условия кристаллизации металла, присутствие в его составе легирующих и примесных элементов, деформация кристаллической решетки вследствие воздействия на нее механических, термических и других факторов в процессе изготовления изделий [8]. Эти же причины влияют и на микрорельеф поверхности, а наличие дефектов поверхности трубы, даже не выходящих за нормы требований ТУ 14-ЗР-55-2001 [2], снижает эксплуатационную надежность котельных элементов [9, 10]. В частности, от качества поверхности зависит сопротивление тепловоспринимающей трубы зарождению трещин при термоциклировании, развитие коррозионных процессов [11]. В работе [12] показано, что тип и геометрия трещин в трубах, их месторасположение и условия нагружения при эксплуатации определяют различный уровень трещиностойкости. Оценка сопротивления развитию повреждения через толщину стенки труб из аустенитной стали от вершины трещины, присутствующей на поверхности, показала различающийся уровень предельной нагрузки, приводящей к разрушению, что также связано с видом концентратора [13].

Металловедческие данные, приведенные в работе [14], показывают, что оксидный слой на поверхности неоднороден даже у новых труб и интенсивная коррозия и другие повреждающие процессы чаще всего возникают на основе дефектов как поверхности, так и структуры. Таким образом, анализ структуры и рельефа поверхностей котельных труб в состоянии поставки позволяет получить полезную информацию для прогнозных заключений о надежности и преобладающих механизмах повреждаемости, которые будут развиваться в процессе эксплуатации.

Ввиду установленного наличия указанных факторов в технологии производства труб целью данной работы является изучение неоднородности материала, проявляющейся в характеристиках микроструктуры и микротвердости по толщине стенки труб, не подвергавшихся эксплуатационным воздействиям.

Материалы и методы

Исследование проведено на образцах труб из стали 20, как наиболее распространенной для изготовления поверхностей нагрева котлов, в состоянии поставки на объекты тепловой генерации. Схема нарезки и маркировки образцов представлена на рис. 1. Микрорельеф поверхности изучался по всей окружности трубы. Для изучения градиента характеристик структуры по толщине стенки из трубы было вырезано кольцо, которое условно было разделено на четыре сегмента (обозначены 1, 2, 3, 4 на рис. 1). Стенка каждого сегмента трубы была разделена на шесть равных по толщине участков, пронумерованных в последовательности от внешней к внутренней поверхности трубы (1, 2, 3, ..., 6), в каждом из которых изучалась микроструктура (число полей зрения на каждом участке составило 30, площадь анализа – 7,8 мм²) и микротвердость. Для морфологического анализа структурных составляющих стали и оценки качества поверхности применялся металлографический анализатор фрагментов микроструктуры твердых тел «Ресурс С7», включающий в себя инвертированный микроскоп Olympus GF41 с программным обеспечением SIAMS Photolab (относительная погрешность измерений от $\pm 0,25\%$ (при увеличении до $\times 500$ включительно) до $\pm 0,65\%$ (при увеличении свыше $\times 500$)). Измерение микротвердости проводилось прибором ПМТ-3.

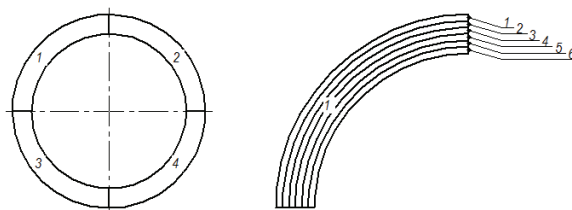


Рис. 1. Схема нарезки и маркировки образцов

Fig. 1. Scheme of cutting and labeling of samples

Результаты и их обсуждение

На рис. 2 представлена микроструктура поперечного сечения стенки трубы в сегменте № 1. На наружной поверхности трубы имеются дефекты типа раскатанной корочки, представляющие собой частичное отслоение металла. Глубина дефекта составляет 63 мкм (рис. 3, б), что не превышает допустимой величины 300 мкм. Вблизи наружной поверхности по всей окружности трубы структура состоит из неравноосных зерен феррита и перекристаллизованного перлита (рис. 3, а). Присутствует обезуглероженный слой толщиной до 100 мкм. В остальных исследуемых участках структура состоит из равновесного феррита и перлита.

Кроме названных выше неоднородностей, на наружной поверхности сегмента № 3 обнаружены межкристаллитные трещины различной глубины – от 39,3 до 65,0 мкм (рис. 4). Трещины идут вглубь по нормали к поверхности и образованы

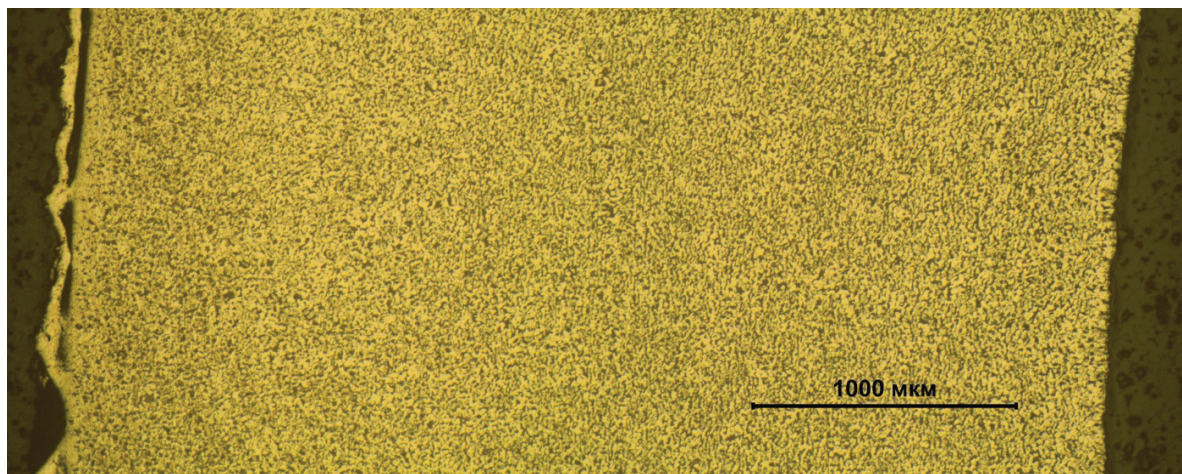


Рис. 2. Микроструктура в поперечном сечении стенки трубы сегмента № 1

Fig. 2. Microstructure in the cross section of segment 1 pipe wall

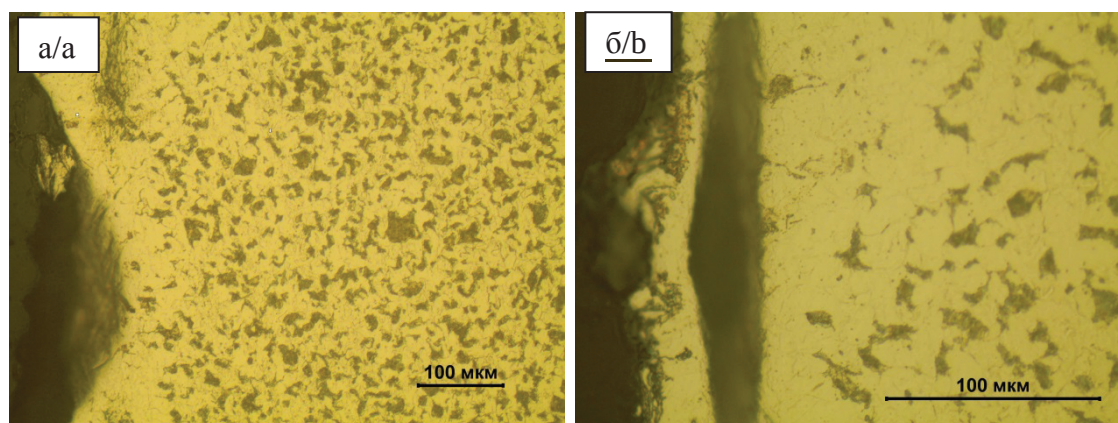


Рис. 3. Микроструктура вблизи наружной поверхности стенки трубы сегмента № 1: а) при 200-кратном увеличении; б) при 500-кратном увеличении

Fig. 3. Microstructure near the outer surface of segment 1 pipe wall: a) at 200 magnification; b) at 500 magnification

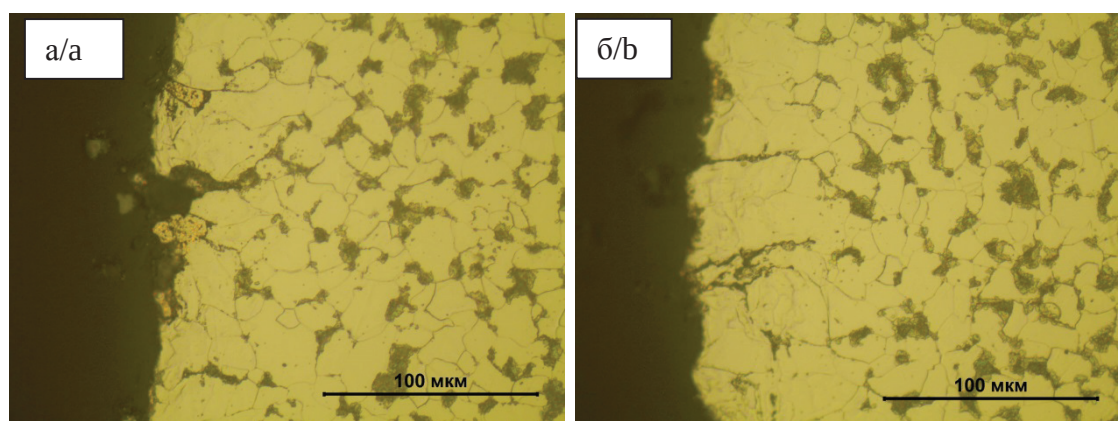


Рис. 4. Микроструктура вблизи наружной поверхности стенки трубы сегмента № 3. Трещины глубиной до: а) 39,3; б) 65,0 мкм

Fig. 4. Microstructure near the outer surface of segment 3 pipe wall. Cracked up to: a) 39,3; b) 65,0 μm depth

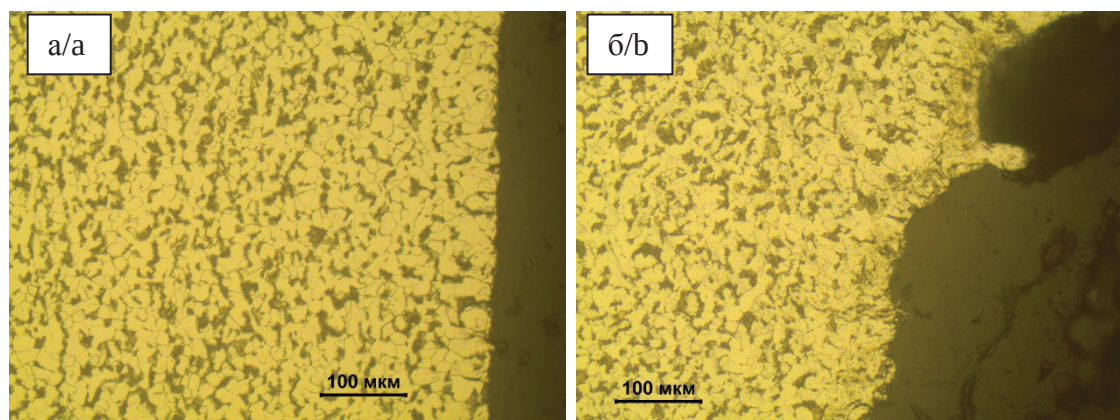


Рис. 5. Микроструктура вблизи внутренней поверхности стенки: а) трубы сегмента № 1 (дефекты отсутствуют, изменений структуры нет); б) сегмента № 3 (обнаружены дефекты и изменение структуры)

Fig. 5. Microstructure near the inner surface of the wall of: a) segment 1 pipe (no defects, no structural changes); b) segment 3 (defects and changes in the structure were detected)

вследствие напряжений, связанных с неравномерным нагревом и охлаждением. Присутствует также обезуглероженный слой толщиной до 88 мкм.

На внутренней поверхности трубы неоднородности менее выражены, только в сегменте № 3 обнаружены технологические дефекты в виде канавок с закругленным дном, сопровождающиеся изменением структуры (рис. 5, а, б).

Как было отмечено выше, в состоянии поставки трубы могут обладать и существенной микроструктурной неоднородностью. Общепринятыми характеристиками микроструктуры стали являются размеры зерен. Результаты измерения среднего размера и средней площади зерен в каждом участке сегментов трубы приведены на рис. 6 и свидетельствуют об уменьшении зерен по мере прибли-

жения к центру стенки трубы. Наличие такой закономерности изменения размерных параметров зерен по толщине стенки трубы указывает на воздействие градиента температуры и скорости охлаждения в процессе производства тонкостенных труб из стали 20.

Оценить анизотропию механических свойств по толщине стенки трубы можно измерением микротвердости, поскольку микротвердость связана с механическими свойствами сталей простыми зависимостями [15]. Полученная зависимость изменения микротвердости по толщине стенки трубы, приведенная на рис. 7, показывает непрерывное уменьшение в направлении от внешней поверхности к внутренней, за исключением участка, непосредственно прилегающего к внутренней поверхности.

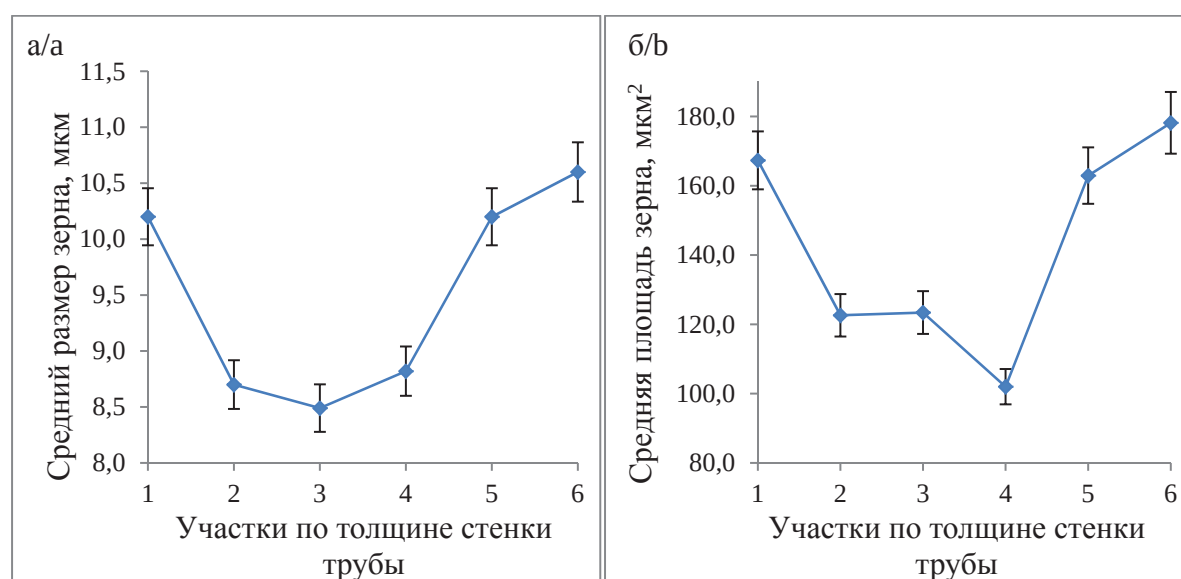


Рис. 6. Изменение среднего размера зерен (а) и средней площади зерен (б) по толщине стенки трубы

Fig. 6. Change in the average grain size (a) and the average area of grains (b) on tube wall thickness

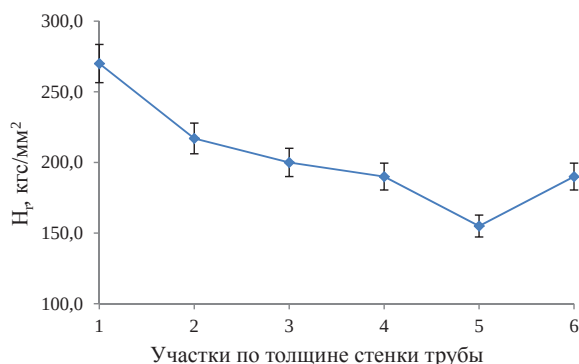


Рис. 7. Изменение микротвердости по толщине стенки трубы

Fig. 7. Change of microhardness over the pipe wall thickness

При этом максимальные значения микротвердости стенки трубы имеет в области, близкой к наружной поверхности, несмотря на наличие на указанном участке «мягкой» ферритной обезуглероженной прослойки. Это может быть связано с внутренними напряжениями, формирующимися при дефектной микроструктуре. Затем идет постепенное снижение величины микротвердости по толщине стенки трубы, а вблизи внутренней поверхности микротвердость опять увеличивается. Возможная причина такого распределения микротвердости состоит в отклонениях режимов термообработки при изготовлении трубы. Указанное состояние наружной поверхности может привести к скрытому трещинообразованию и ускорению структурно-язвенной коррозии.

Одновременное с этим обезуглероживание поверхностной зоны нежелательно для котельных труб [2], по причине уменьшения ее прочности, твердости и, соответственно, сопротивления деформации. Поэтому при металлографическом анализе вырезок труб для оценки возможности продления срока службы по критериям оценки состояния металла обезуглероженный слой глубиной более 200 мкм не допускается [16]. Связано это с тем, что неизбежная деградация структуры котельной стали совместно с коррозионными процессами на поверхности металла труб в процессе эксплуатации приводит к обезуглероживанию, которое сопровождается образованием микротрещин вдоль границ зерен и может вызвать разрыв трубы [17, 18]. В процессе эксплуатации продукты коррозии накапливаются в трещинах, где они, по мере увеличения своего объема, расклинивают металл, вызывая локальный рост напряжений до величин, близкой к пределу пластичности. На этой стадии возможно также возникновение хрупких разрушений оставшегося сечения при напряжениях, превышающих предел прочности. Разрушения такого типа могут происходить без значительного уменьшения толщины стенки трубы.

Наличие отслоений под наружной поверхностью, как и локальных дефектов с внутренней стороны трубы, усугубляет деградацию этих свойств, а также и коррозионной стойкости трубы. Известно, что любые факторы, приводящие к нарушению

защитного слоя на стали и увеличивающие рельеф поверхности, ускоряют скорость реакции [17]. В этом случае стоит ожидать доминирующее проявление коррозионных процессов на внутренней поверхности трубы в виде язвенных поражений, а при условии значительной протяженности канавок – коррозию бороздками.

Заключение

Анализ микрорельефа наружной и внутренней поверхности показал наличие различных типов дефектов на сегментах трубы. Наличие развитой наружной и внутренней поверхностей труб является предпосылкой для скопления на ней отложений, трудноудаляемых при эксплуатации теплообменного оборудования. Неравномерность распределения дефектов по поверхности трубы обуславливает неравномерность прочностных и эксплуатационных свойств, что способствует нарушению надежности работы трубных систем. Кроме того, вершины дефектов являются концентраторами напряжений и служат началом развития эксплуатационных повреждений. По результатам измерения микротвердости в состоянии поставки трубы также зафиксирована по толщине стенки структурная неоднородность и перепад размерных параметров микроструктуры, что указывает на наличие градиента температуры и скорости охлаждения в производстве труб. Образовавшийся структурный градиент приводит к существенным изменениям скорости развития повреждения.

Таким образом, в исследованном образце трубы в состоянии поставки обнаружены дефекты, которые, с одной стороны, находятся в рамках требований технических условий на поставку, а с другой стороны, уже достигли половины браковочного уровня для эксплуатируемых труб. В свете этого выполненная работа показывает, что для практических целей безаварийной эксплуатации и продления срока службы тепловоспринимающих элементов, изготовленных из стали 20, следует проводить дополнительные мероприятия, улучшающие эксплуатационные свойства труб поверхностей нагрева.

На основе анализа выполненных экспериментальных исследований в качестве таких мероприятий, направленных на улучшение свойств поверхности и снижение структурной неоднородности труб, можно рассматривать отдельные режимы термообработки, получившие научное обоснование [5, 19] и доступные для осуществления даже в условиях теплогенерирующих компаний.

В качестве способа, улучшающего приповерхностные характеристики трубной стали 20, подходит режим паровоздушной обработки труб [20]. Его эффективность определяется разработанными основами подавления структурной коррозии путем устранения электрохимической неоднородности термообработкой образцов в паровоздушной среде при температуре раскрытия микротрещин со снижением интенсивности межкристаллитной коррозии на один-два порядка.

Другим средством, повышающим однородность и уменьшающим перепады микроструктуры по толщине стенки трубы [21], способен служить режим двукратной нормализации при 920 °С, при котором формируется сорбитообразная структура,

увеличивающая коррозионную стойкость стали 20, применяемой в теплоэнергетике для изготовления труб поверхностей нагрева, на 38...51 %, а глубина межкристаллитных трещин при этом сокращается в 1,5 раза.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Березина Т.Г. Коррозия металла деталей теплоэнергетического оборудования. – Челябинск: ЧФ ПЭИПК, 2000. – 58 с.
2. ТУ 14-3Р-55-2001. Трубы стальные бесшовные для паровых котлов и трубопроводов. – М.: РНИИТП, 2001. – 84 с.
3. Артамонцев А.И. Коррозионные проявления микроструктурных повреждений в трубах теплопринимающих элементов и трубопроводных систем: дис. ... канд. техн. наук. – Томск, 2007. – 120 с.
4. Помазова А.В., Панова Т.В., Геринг Г.И. Влияние разноразмерности структуры на коррозионную стойкость наружной поверхности труб из углеродистой стали 20, применяемых в теплоэнергетике // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Металлургия. – 2014. – Т. 14. – № 4. – С. 37–44.
5. Помазова А.В., Панова Т.В., Геринг Г.И. Роль структурных факторов в повышении коррозионной стойкости трубной стали при циклической термообработке // Известия Томского политехнического университета. – 2015. – Т. 326. – № 5. – С. 15–21.
6. Effects of annealing temperature on microstructure, mechanical properties and corrosion resistance of 30 % Cr super ferritic stainless steel / Li M, Shengsun Hua, Junqi Shena, Jian Han // Materials Letters. – 2016. – № 184. – P. 204–207.
7. Effect of microstructure and crystallography on sulfide stress cracking in API-5CT-C110 casing steel / M. Liu, C.D. Yang, G.H. Cao, A.M. Russell, Y.H. Liu, X.M. Dong, Z.H. Zhang // Materials Science and Engineering: A. – 2016. – № 671. – P. 244–253.
8. Семенова И.В., Флорианович Г.М., Хорошилов А.В. Коррозия и защита от коррозии. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2010. – 416 с.
9. Тумановский А.Г., Резинских В.Ф. Стратегия продления ресурса и технического перевооружения тепловых электростанций // Теплоэнергетика. – 2001. – № 6. – С. 3–10.
10. Скоробогатых В.Н., Борисов В.П., Щенкова И.А. Перспективы совершенствования трубной продукции для изготовления котлов и паропроводов высокого и сверхкритического давления // Теплоэнергетика. – 2001. – № 4. – С. 60–61.
11. Влияние качества поверхности канала труб на стойкость против межкристаллитной коррозии / Ан.В. Серебряков, Е.Л. Шулин, Ал.В. Серебряков, А.А. Богатов, И.М. Вдоветти // Металлург. – 2004. – № 11. – С. 53–55.
12. Bergant M., Yawny A., Perez Ipiña J. Failure Assessment Diagram in Structural Integrity Analysis of Steam Generator Tubes // Procedia Materials Science. – 2015. – № 8. – P. 128–138.
13. Bergant M., Yawny A., Perez Ipiña J. Estimation procedure of J-resistance curves for through wall cracked steam generator tubes // Procedia Materials Science. – 2012. – № 1. – P. 273–280.
14. Пискаленко В.В. Эволюция структурно-фазового состояния и механических свойств котельных сталей: дис. ... канд. техн. наук. – Новокузнецк, 2002. – 169 с.
15. Продление срока службы резервуаров для жидкой двуокиси углерода. РД 26.260.129–9. – Волгоград: ВОПК «Волжский», 2000. – 31 с.
16. СТО 17230282.27.100.005–2008. Основные элементы котлов, турбин и трубопроводов ТЭС. Контроль состояния металла. Нормы и требования. – М.: РАО «ЕЭС России», 2008. – 658 с.
17. Улиг Г.Г., Ревя Р.У. Коррозия и борьба с ней. Введение в коррозионную науку и технику: пер. с англ. / под ред. А.М. Сухотина. – Л.: Химия, 1989. – 456 с.
18. Bulloch J.H., Hickey J.J. Defects in boiler evaporator tubes – a detailed case study concerning defect initiation and extension processes // International Journal of Pressure Vessels and Piping. – 1993. – № 56 (3). – P. 275–298.
19. Учет внутрискристаллических напряжений в процессах 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.
20. Способ определения оптимальной температуры пассивации трубных элементов теплоэнергетического оборудования и устройство для коррозионных испытаний: пат. РФ № 2544313; заявл. 07.05.2013; опубл. 20.03.2015, Бюл. № 8. – 14 с.
21. Способ повышения коррозионной стойкости труб из малоуглеродистых сталей: пат. РФ № 2580256; заявл. 20.11.2014; опубл. 10.04.2016, Бюл. № 10. – 6 с.

Поступила 01.09.2016 г.

Информация об авторах

Помазова А.В., начальник лаборатории разрушающего контроля ЗАО НДЦ НПФ «Русская лаборатория».

Артамонцев А.И., кандидат технических наук, доцент кафедры парогенераторостроения и парогенераторных установок Энергетического института Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Заворин А.С., доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой парогенераторостроения и парогенераторных установок Энергетического института Национального исследовательского Томского политехнического университета.

UDC 669.1.017:620.18:620.19

FEATURES OF MICROSTRUCTURAL INHOMOGENEITY OF STEEL 20 BOILER PIPES IN DELIVERY STATE

Anna V. Pomazova¹,

pomazova@yandex.ru

Aleksandr A. Artamontsev²,

a_art@tpu.ru

Aleksandr S. Zavorin²,

zavorin@tpu.ru

¹ Russian Laboratory Ltd. Research Examination Center,
7/8, Gubkin Prospect, Omsk, 644035, Russia.

² National Research Tomsk Polytechnic University,
30, Lenin Avenue, Tomsk, 634050, Russia.

Relevance of the research is caused by the need to minimize the corrosion losses of metal of tubular heating surfaces at their operation. This largely affects the urgency of the problem of ensuring the reliable operation of boiler units at thermal power plants and industrial power facilities. The increase in reliability and safety of operation of heat-mechanical power equipment, while improving the safety of life and reducing the risk of potential harm to operating personnel and the environment, is directly related to energy-efficient use of resources. The important aspect of the relevance of the work lies in the fact that the object of the study is carbon steel pipe (steel grade 20), which belongs to the most widely used in the Russian power engineering for manufacturing boilers heating surfaces.

The main aim of the study is to analyze the microrelief of the outer and inner surface of new pipe size 60×6,0 mm, made of steel 20; to study structural heterogeneity in wall thickness and size of the microstructure parameters for predictive conclusions on the reliability and the prevailing mechanisms of damage that will be developed at operation; to investigate possible additional measures improving the operational properties and service life of pipes of heating surfaces.

The methods used in the study: metallographic methods of investigating the structural components of steel, micro-hardness measurement methods.

The results. Different types of defects (scab unrolled, intergranular cracks, defects in the form of grooves with rounded bottoms), which are evenly distributed over the surface of the pipe, were found on the surfaces in delivery state. The defects depth reaches a half of the acceptance level for the exploited pipes. Structural inhomogeneity and difference in dimensional parameters of microstructure are detected over the thickness of the pipe wall. The presence of these defects and inhomogeneity of the pipe material lead to significant changes in failure development rate and reduce the life of boiler tubes. The authors have proposed the proprietary methods to improve surface properties and reduce structural heterogeneity of the pipes. The methods (steam-pipe processing mode, double normalization mode at 920 °C) are available for implementing at thermal generation companies and reduce effectively the corrosion rate.

Key words:

Steel 20, tube heating surfaces, structural inhomogeneity, surface defects, the resource of boiler tubes.

REFERENCES

1. Berezina T.G. *Korroziya metalla detaley teploenergeticheskogo oborudovaniya* [Corrosion of metal parts of heat and power equipment]. Chelyabinsk, CHF PEIPK Publ., 2000. 58 p.
2. TU 14-3R-55-2001. *Truby stalnye besshovnye dlya parovykh kotlov i truboprovodov* [Specifications 143-R-552-001. Seamless steel tubes for boilers and pipelines]. Moscow, RNIITP Publ., 2001. 84 p.
3. Artamontsev A.I. *Korroziionnye proyavleniya mikrostrukturnykh povrezhdenii v trubakh teplosprinyimayushchikh elementov i truboprovodnykh sistem*. Dis. kand. nauk [Corrosive manifestations of microstructural damage in the heat exchanger elements and elements of piping systems. Cand. Diss.]. Tomsk, 2007. 120 p.
4. Pomazova A.V., Panova T.V., Gering G.I. Effect of structure inequigranular on corrosion of the external surface of carbon steel 20 pipes applied in thermal power generation. *Bulletin of the South Ural State University. Series «Metallurgy»*, 2014, vol. 326, no. 5, pp. 37–44. In Rus.
5. Pomazova A.V., Panova T.V., Gering G.I. Role of structural factors in improving corrosion resistance of pipe steel under cyclic heat treatment. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2015, vol. 326, no. 5, pp. 15–21. In Rus.
6. Li M., Shengsun Hua, Junqi Shena, Jian Han. Effects of annealing temperature on microstructure, mechanical properties and corrosion resistance of 30 % Cr super ferritic stainless steel. *Materials Letters*, 2016, no. 184, pp. 204–207.
7. Liu M., Yang C.D., Cao G.H., Russell A.M., Liu Y.H., Dong X.M., Zhang Z.H. Effect of microstructure and crystallography on sulfide stress cracking in API-5CT-C110 casing steel. *Materials Science and Engineering: A*, 2016, no. 671, pp. 244–253.
8. Semenova I.V., Florianovich G.M., Khoroshilov A.V. *Korroziya i zashchita ot korrozii* [Corrosion and Corrosion Protection]. Moscow, Fizmatlit Publ., 2010. 416 p.
9. Tumanovskiy A.G., Rezinskikh V.F. Strategiya prodleniya resursa i tekhnicheskogo perevooruzheniya teplovykh elektrostantsiy [Strategy for life extension and modernization of thermal power plants]. *Thermal Engineering*, 2001, no. 6, pp. 3–10.
10. Skorobogatikh V.N., Borisov V.P., Shchenkova I.A. Perspektivy sovershenstvovaniya trubnoy produktsii dlya izgotovleniya kotlov i paroprovodov vysokogo i sverkhkriticheskogo davleniya [Prospects for improving tubular products to manufacture boilers and steam pipe-lines of high and supercritical high pressure]. *Thermal Engineering*, 2001, no. 4, pp. 60–61.

11. Serebryakov An. V. Vliyanie kachestva poverkhnosti kanala trub na stoykost protiv mezhkristallitnoy korrozii [Impact of tube channel surface quality on resistance to intergranular corrosion]. *Metallurg*, 2004, no. 11, pp. 53–55.
12. Bergant M., Yawny A., Perez Ipiña J. Failure Assessment Diagram in Structural Integrity Analysis of Steam Generator Tubes. *Procedia Materials Science*, 2015, no. 8, pp. 128–138.
13. Bergant M., Yawny A., Perez Ipiña J. Estimation procedure of J-resistance curves for through wall cracked steam generator tubes. *Procedia Materials Science*, 2012, no. 1, pp. 273–280.
14. Piskalenko V.V. *Evolutsiya strukturno-fazovogo sostoyaniya i mekhanicheskikh svoystv kotelnykh staley*. Dis. Kand. nauk [Evolution of structural and phase state and mechanical properties of boiler steel. Cand. Diss.]. Novokuznetsk, 2002. 169 p.
15. RD 26.260.1229-9-9. *Metodicheskie ukazaniya. Prodlenie sroka sluzhby rezervuarov dlya zhidkoy dvukisi ugleroda* [Guidelines 26.260.129-9. Extending the life of reservoirs for liquid carbon dioxide]. Volgograd, Volzhskiy Publ., 2000. 31 p.
16. STO 17230282.27.100.005-2008. *Osnovnyye elementy kotlov, turbin i truboprovodov TES. Kontrol sostoyaniya metalla. Normy i trebovaniya* [Key elements of boilers, turbines and pipelines at TPP. Control of metal state. Standards and requirements]. Moscow, 2008. 658 p.
17. Uhlig H.H., Revie R.W. *Corrosion and corrosion control*. New York, John Wiley and Sons, 1985. 456 p.
18. Bulloch J.H., Hickey J.J. Defects in boiler evaporator tubes – a detailed case study concerning defect initiation and extension processes. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 1993, no. 56 (3), pp. 275–298.
19. Lyubimova L.L., Makeev A.A., Zavorin A.S. Consideration of intrastructural stresses in structural nonuniformity effect on corrosion damages inflicted to heat exchange pipes. *Thermal Engineering*, 2014, no. 8, pp. 62–67. In Rus.
20. Lyubimova L.L., Zavorin A.S., Lebedev B.V. *Sposob opredeleniya optimalnoy temperatury passivatsii trubnykh elementov teploenergeticheskogo oborudovaniya i ustroystvo dlya korroziionnykh ispytaniy* [Method for determining the optimum temperature passivation of tubular heat power equipment and apparatus for corrosion testing]. Patent RF, no. 2544313, 2015.
21. Pomazova A.V., Panova T.V., Gering G.I. *Sposob povysheniya korroziionnoy stoykosti trub iz malouglerodistykh staley* [Method for improving corrosion resistance of low carbon steel pipes]. Patent RF, no. 2580256, 2016.

Received: 1 September 2016.

Information about the authors

Anna V. Pomazova, the head of the laboratory, Russian Laboratory Ltd. Research Examination Center.

Aleksandr A. Artamontsev, Cand. Sc., associated professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

Aleksandr S. Zavorin, Dr. Sc., professor, head of the department, National Research Tomsk Polytechnic University.