

(Mo), марганца (Mn) и ванадия (V). Твердость материала наплавленного слоя составляет 55–62 HRC, что на ~40% выше твердости исходной коронки.

3. Профилометрическими исследованиями равновесных поверхностей трения коронки установлено, что характеристики Ra, Rz, Rq наплавленной поверхности существенно ниже, чем у исходной коронки. Это свидетельствует о механизме ударно-абразивного изнашивания наплавленного слоя, отличном от стального материала. Поэтому для исследования процессов изнашивания наплавленной коронки актуальным является проведение в дальнейшем металлографического анализа поверхности трения.

Исследования в работе проведены на оборудовании ЦКП «Станция натуральных испытаний» Института физико-технических проблем Севера им. В. П. Ларионова СО РАН.

#### Литература

1. Хасуи А. Наплавка и напыление / А. Хасуи, О. Моригаки. – М.: Машиностроение, 1985. – 240 с.

2. Борисов Ю.С. Газотермические покрытия из порошковых материалов: Справочник / Ю.С. Борисов, Ю.А. Харлампьев, С.Л. Сидоренко, Е.Н. Ардаговская. – Киев: Наукова думка, 1987. – 544 с.

3. Шехтер С.Я. Наплавка металлов / С.Я. Шехтер, А.М. Резницкий. – М.: Машиностроение, 1982. – 71с.

4. Линник В.А. Современная техника газотермического нанесения покрытий / В.А. Линник, П.Ю. Пекшев. – М.: Машиностроение, 1985. – 128с.

5. Бороненков В.Н. Основы дуговой металлизации: физико-химические закономерности / В.Н. Бороненков, Ю.С. Коробов. – Екатеринбург: Изд-во Уральского ун-та, 2012. – 268 с.

6. Виноградов В.Н. Абразивное изнашивание / В.Н. Виноградов, Г.М. Сорокин, М.Г. Колокольников. – М.: Машиностроение, 1990. – 224 с.

7. Крагельский И.В. Основы расчетов на трение и износ / И.В. Крагельский, М.Н. Добычин, В.С. Комбалов. – М.: Машиностроение, 1977. – 526 с.

8. Справочник по триботехнике / под общ. ред. М. Хебды, А.В. Чичинадзе. – М.: Машиностроение, 1989. – Т. 1. Теоретические основы. – 400 с.

9. Сорокин В.Г. Марочник сталей и сплавов. / В.Г. Сорокин, А.В. Волосникова, С.А. Вяткин и др. – М.: Машиностроение, 1989. – 640 с.

10. Лахтин Ю.М. Основы металловедения. – М.: Металлургия, 1988. – 320 с.

11. Винокуров Г.Г. Изменение структуры и изнашивание породоразрушающего элемента бульдозера при эксплуатации в условиях Севера / Г.Г. Винокуров, С.П. Яковлева, А.К. Кычкин, М.И. Васильева, Н.Ф. Стручков, М.В. Федоров // Металлы. –2009. – № 5. – С. 74–80.

Поступила в редакцию 20.04.2016

УДК 621.184.2:621.78.019:620.18

## Причины послеремонтного разрушения труб поверхностей нагрева котла, эксплуатируемого в арктических условиях

С.П. Яковлева, С.Н. Махарова

*Институт физико-технических проблем Севера им. В.П. Ларионова СО РАН, г. Якутск*

*Представлены результаты исследования качества материала, природы и причин разрушения конвективных труб водогрейного котла, снабжавшего теплом арктический поселок. Определен химический состав металла труб (углеродистая сталь марки 20), исследованы особенности его структуры, природа и уровень повреждений, повлекших аварийную утечку технологической среды. В зоне разрушения выявлены необратимые физико-химические изменения стали, обусловившие потерю ее работоспособности, – высокотемпературная трансформация карбидной составляющей (сфероидизация, графитизация). Усугубляющим фактором повреждений структуры явилось присутствие алюминия, повышающего склонность перлитных сталей к графитизации при воздействии высоких температур. В результате появления термических дефектов структуры, разупрочнения и снижения коррозионной*

ЯКОВЛЕВА Софья Петровна – д.т.н., проф., зав.отд., e-mail: spyakovleva@yandex.ru; МАХАРОВА Сусанна Николаевна – к.т.н., в.н.с.

устойчивости работоспособность металла труб снизилась. Развитие неравномерной внутренней коррозии по механизму анодного растворения привело к появлению свищей и аварийной разгерметизации котла.

Ключевые слова: водогрейный котел, углеродистая сталь, разрушение, сфероидизация, графитизация, коррозия.

## Causes of the Post-Repair Failure of Connective Bank of Boiler Operated under Arctic Conditions

S.P. Yakovleva, S.N. Makharova

*Larionov Institute of the Physical-Technical Problems of the North SB RAS, Yakutsk*

*The results of the study of a material quality, nature and causes of the destruction of connective bank of a boiler which supplied heating for an Arctic village are presented. The chemical composition of the tube bank metal (carbon steel, grade 20) is determined, the peculiarities of the metal structure, the cause and the level of damage which led to the emergency leakage of a technological medium are determined. In the fracture zone the irreversible physical and chemical changes contributed to the loss of function, – high-temperature transformation of the carbide component (spheroidization, graphitization) are revealed. The presence of aluminum that increases the propensity of pearlitic steels to graphitization when exposed to high temperatures has aggravated the factor of damage to the structure. As a result of the appearance of thermal defects of the structure, the ductilizing effect and degradation of corrosion resistance, the working ability of the pipes's metal decreased. The uneven development of the internal corrosion due to a mechanism of anodic attack led to the air leakages and the emergency boiler disintegration.*

Key words: hot-water boiler, carbon steel, destruction, spheroidization, graphitization, corrosion.

### Введение

Обеспечение необходимого уровня безопасности любых технических объектов требует выполнения исследований, связанных с анализом изменений структуры и свойств использованных в них материалов с учетом условий эксплуатации [1–3]. Изучение процессов деградации материалов, природы и особенностей эксплуатационных разрушений деталей, механизмов, установок, конструкций позволяет не только выявить технологические, эксплуатационные или иные причины поломок и аварий, но и наметить пути совершенствования проектных характеристик, определения и поддержания остаточного ресурса, а также проведение организационно-технических мероприятий по предупреждению аналогичных происшествий.

Проблемы надежности и долговечности технических систем ответственного назначения, включая объекты теплоснабжения, в условиях Севера и Арктики во многом обусловлены экстремальностью условий эксплуатации, высоким уровнем нагрузок и значительными амплитудами их сезонных и среднесуточных колебаний из-за изменений температуры наружного воздуха. Нестационарные режимы функционирования ускоряют выработку рабочего ресурса термонагруженных элементов тепловых установок, снижая рабочие параметры их эксплуатации и

приводя к потере работоспособности. В котельных агрегатах такими наиболее повреждаемыми элементами являются трубы экранных и конвективных поверхностей нагрева, работающие при воздействии высоких температур и активных технологических сред, вызывающих необратимые физико-химические изменения металла труб [4–6]. Поэтому, во избежание потери работоспособности и останова котлов вследствие неудовлетворительного состояния металла поверхностей нагрева, периодически проводится их ремонт с частичной или полной заменой системы труб. Тем не менее, проведение таких мероприятий иногда не исключает последующего достаточно быстрого наступления аварийных отказов ремонтных котлоагрегатов. В данной работе приведены результаты технического расследования такой (не совсем типичной) аварии двухбарабанного водотрубного котла ДКВР 20–13, снабжающего теплом арктический поселок: после проведения капитального ремонта поверхностей нагрева, пуска котла и менее чем двух месяцев его эксплуатации в стенках конвективных труб начали образовываться множественные свищи. Вследствие произошедшей утечки технологической среды и аварийного останова котельной в зимнее время без отопления оказались несколько многоэтажных жилых домов.

## ПРИЧИНЫ ПОСЛЕРЕМОНТНОГО РАЗРУШЕНИЯ ТРУБ ПОВЕРХНОСТЕЙ НАГРЕВА КОТЛА

Цель данной работы – выявление природы и причин послеремонтного разрушения труб конвективной поверхности нагрева котла ДКВр 20–13, эксплуатировавшегося в арктических условиях. Помимо экспертной значимости, исследования такого плана важны для выявления механизмов и ранжирования факторов, вызывающих ускоренное разрушение материалов в тех или иных условиях функционирования.

### Объекты и методы исследования

Как уже отмечалось, множественное нарушение целостности труб конвективной поверхности нагрева двухбарабанного водотрубного котла ДКВР 20–136, повлекшее утечку теплоносителя с последующим остановом котла, произошло в зимнее время приблизительно через полгода после проведения ремонтных работ по замене труб поверхностей нагрева. На рис. 1 показаны предоставленные для исследования два фрагмента разрушившихся труб, вырезанные из прямого и криволинейного участков конвективного пучка во время ликвидации аварии. В обоих случаях трубы не имели признаков общей макродеформации; толщина стенки труб 2,5 мм.

Внешняя поверхность фрагмента № 1, вырезанного из прямого участка, трубы, несмотря на налет ржавчины, выглядит достаточно гладкой, отчетливо заметно сквозное повреждение – свищ диаметром  $\approx 2,5$  мм (рис. 1, а, б). Внутренняя поверхность также равномерно покрыта ржавчиной, содержит небольшие участки отслоений и не имеет серьезных дефектов в виде

трещин, глубоких язвин и раковин; в зоне свища выявляются участки накипи.

Отрезок № 2 криволинейного участка (гиба) трубы имеет неравномерно корродированную внешнюю поверхность и многочисленные свищи различной конфигурации и размеров в зонегиба (рис. 1, в, з). Следует отметить, что гибы являются одними из самых ненадежных участков трубопроводов: при холодной обработке они получают остаточную деформацию и наибольшие напряжения, вследствие чего наиболее подвержены коррозии.

Анализ химического состава металла труб проводили в соответствии с ГОСТ 18895–97 «Сталь. Метод фотоэлектрического спектрального анализа» на спектрометре «FOUNDRY-MASTER UVR». Среднее значение содержания химических элементов получено по результатам трех измерений. Металлографические образцы были подготовлены шлифованием на наждачной бумаге в порядке убывания зернистости и полированием алмазной пастой; составляющие структуры выявляли травлением в 4%-м растворе азотной кислоты в этиловом спирте.

Микроструктуру металла труб исследовали с помощью металлографических микроскопов “Neophot-32”, “Axio Observer D1m” и растрового электронного микроскопа JEOL JSM-6480LV. Микрораспределение химических элементов в структурных составляющих изучали методом микрорентгеноспектрального анализа также на приборе JEOL JSM-6480LV (луч диаметром  $\sim 2$  мкм,  $K\alpha$ -излучение).



Рис. 1. Общий вид предоставленных на исследование фрагментов труб и увеличенные изображения эксплуатационных повреждений в них: труба № 1 (а) со свищом (б); труба № 2 (в) со скоплениями свищей (з)

Фрактографические исследования выполнены на стереоскопических микроскопах Альтами ПСО745-Т и “Stemi 2000С”. Кроме того, на микротвердомере ПМТ-3 была измерена микротвердость  $H_{50}$  металла труб при нагрузке на индентор  $0,5 H (50 \text{ z})$ .

### Результаты и обсуждение

Химический анализ, структура и микротвердость. По результатам спектрального анализа металл исследованных ремонтных труб конвективного пучка аварийного котла представляет собой качественную углеродистую сталь марки 20 (ГОСТ 1050–88), что соответствует нормативным требованиям: данная сталь применяется для деталей котлотурбостроения, работающих под давлением при температурах до  $+425^\circ\text{C}$  [7]. Вместе с тем Госстандарт не предусматривает присутствие в ней алюминия, который в условиях повышенных температур увеличивает склонность перлитных сталей к графитизации (высокотемпературной деградации карбидной компоненты). Поэтому считается нежелательным и даже недопустимым в сталях для котлотурбостроения наличие алюминия уже в количестве  $\sim 0,02\%$  [8, 9], в то время как металл аварийных труб содержит до  $\sim 0,04\%$  алюминия.

Микроструктура металла труб – характерная для сталей указанного класса ферритно-перлитная смесь (рис. 2) с размером зерна, соответствующим 8–9 баллам по шкале ГОСТ 5639–82 [10], что составляет около 15 мкм. Прокатная строчечность во взаимном расположении феррита и перлита отсутствует, что указывает на изменение морфологии перлита, «размывающегося» по границам феррита, свидетельствуя о перераспределении углерода. Микротвердость при этом снижается 1370–1075 МПа в металле трубы № 1, в металле трубы № 2 1503–1100; обычно снижение микротвердости связано с разупрочнением металла за счет трансформации карбидной фазы. Для подтверждения процессов термической деградации стали труб методами растровой электронной микроскопии были исследованы особенности ее микростроения при больших увеличениях.

Высокотемпературные изменения микроструктуры. При эксплуатации конвективных труб в металле вследствие воздействия повышенных температур протекают процессы, приводящие к существенным изменениям структуры. Исходное перлитное зерно использованной в исследуемых трубах стали 20 имеет пластинчатое строение. Пластинчатый перлит является нестабильной структурой, и в ходе длительной работы при высоких температурах претерпевает сфероидизацию (распад пластин с обособлением и последующей коагуляцией карбидной фа-

зы), снижающую прочность стали. Такая неблагоприятная с позиций высокотемпературной прочности структура сфероидизированного перлита была выявлена в металле аварийных труб (рис. 2). Четко различаются крупные округлые частицы сфероидизированного карбида, часто декорирующие границы зерен (рис. 2, а, в).

Сфероидизация предшествует другому, более опасному проявлению нестабильности цементита при высокотемпературной эксплуатации стали – графитизации, при которой цементит распадается на железо и углерод (по реакции  $\text{Fe}_3\text{C} \rightarrow 3\text{Fe} + \text{C}$ ), причем углерод выделяется в виде графита. Зародыши графита весьма устойчивы, так как их свободная энергия меньше энергии карбидов, и они могут достаточно быстро расти за счет осаждения на них углерода из твердого раствора. Выделившийся графит может собираться в виде отдельных гнезд, являющихся концентраторами напряжений, так как ввиду незначительной прочности графита по сравнению с ферритом его скопления представляют собой по существу пустоты. Особенно опасно расположение графита в виде цепочек (рис. 2, б, з), поскольку при этом ослабляется сечение стенки трубы [11, 12]. Пониженное сопротивление металла труб процессам графитизации обусловлено, в частности, присутствием алюминия.

Углеродная природа структурных образований, идентифицированных как участки графитизации, подтверждена микрорентгеноспектральным анализом: эти участки дали спектры с повышенным содержанием углерода, не характерным для таких фаз, как феррит и цементит.

Определение степени графитизации по шкале, приведенной в стандарте [13], показало, что

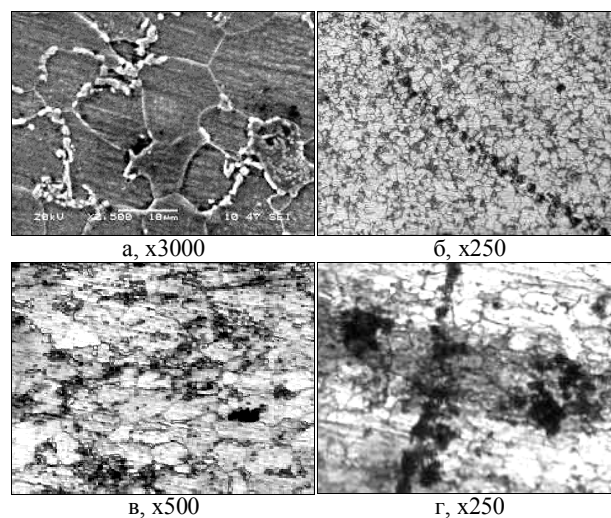


Рис. 2. Сфероидизация перлита (а, в) и графитные цепочки и гнезда (б, з) в металле трубы № 1 (а, б) и трубы № 2 (в, з)

## ПРИЧИНЫ ПОСЛЕРЕМОНТНОГО РАЗРУШЕНИЯ ТРУБ ПОВЕРХНОСТЕЙ НАГРЕВА КОТЛА

наблюдаемые в трубах включения графита по величине и характеру расположения соответствуют баллу 3 при допускаемом балле 2.

Необходимо подчеркнуть, что как сфероидизация, так и графитизация – свидетельство длительного пребывания труб при температурах выше 470–500°C, что превышает значение +425°C верхнего предела температур эксплуатации для стали 20.

Природа разрушения конвективных труб. Выявленные термические повреждения металла труб приводят к его высокой структурной неоднородности, макро- и микрохимической гетерогенности, что является важным фактором, способствующим ускорению коррозии. Графитизация (фактически образование пустот) облегчает проникновение в металл коррозионной среды и протекание ускоренной коррозии.

Все вещества, растворенные в воде, циркулирующей в трубах пароводяного тракта котельных агрегатов (кроме газов, угольной и кремниевой кислот), практически полностью диссоциированы, и транспортируемая среда по сути представляет собой сильный электролит. Под ее воздействием в металле инициируются процессы электрохимической коррозии, так как при контакте с электролитом разные структурные составляющие приобретают неодинаковые по величине и знаку электродные потенциалы: одни из них становятся анодами, а другие – катодами. Участки металла, являющиеся анодами (в ферритно-перлитной стали это, прежде всего, зерна перлита), активно переходят в раствор; происходит так называемое анодное растворение [14, 15].

Вследствие локального анодного растворения на поверхности труб образуются микрораковины и микрокаверны, развитие которых определяется совместным действием напряжений и коррозионной среды. Обычно на начальном этапе корродирования точечные и вытянутые микроразрушения деконцентрированы, то есть статистически равномерно распределены в поверхностных слоях металла (стадия сплошной или равномерной коррозии). Опережающее развитие отдельных микрораковин приводит к созданию квазистационарных анодных микрозон, перемещающихся в глубь металла и превращающихся в макрозоны предразрушения (стадия ускоренной местной коррозии) и, в последующем, – свищей.

По данным микроанализа отложений на внутренней стенке трубы № 1 в зоне свища, они состоят преимущественно из окислов железа, являющихся продуктами коррозионного распада; также присутствуют SiO<sub>2</sub>, CaO, SO<sub>3</sub>. Накопление в разных зонах труб рыхлых и пористых отложений, шлама вызывает подшламовую коррозию металла и ускоряет местную коррозию.

На рис. 3 показано развитие коррозионных процессов в стенках исследованных труб. Во всех случаях наблюдаются коррозионные язвы, эрозийные повреждения различной глубины. Коррозионные разъедания труб происходят как со стороны внутренней стенки, так и с ее внешней поверхности.

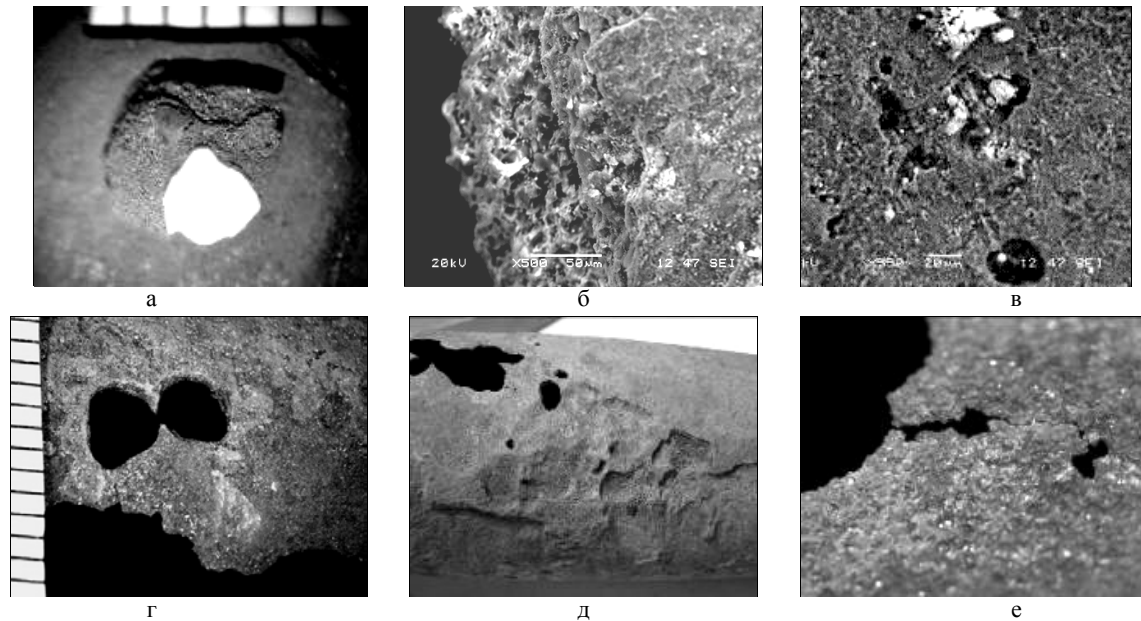
Микростроение стенок свища в трубе № 1 представлено на рис. 3, а-в. По периметру свища достаточно хорошо различимы микроразрушения, которые можно определить как группы расслоений, ориентированных в направлении прокатки (рис. 3, б). Механизм их возникновения связан с «вымыванием» перлитных прослоек по границам ферритных кристаллитов. Образование сквозного повреждения идет за счет объединения скоплений продольных микротрещин и отслоения тонких слоев материала. Вследствие продолжающегося локального анодного растворения металла в зонах свищей образуются дополнительные микрораковины и микротрещины (рис. 3, в).

Труба № 2 с гибом помимо коррозии испытала обширную внешнюю эрозию (рис. 3, г). Эти процессы, ослабляя более значительные по площади участки стенки, могут приводить к более масштабным повреждениям трубных элементов, что подтверждается большей площадью сквозных отверстий, образовавшихся в данной трубе (рис. 3, г-е) и утончением обширных участков стенки, приводящим к появлению в них новых свищей и трещин (рис. 3, д, е).

Сопrotивляемость коррозии и окалинообразованию у стали 20, из которой изготовлены конвективные трубы, резко падает при достижении критической температуры, равной 400°C (как отмечалось выше, полная сфероидизация структуры и развитая графитизация свидетельствуют о работе труб при температурах в диапазоне 470–500°C).

Таким образом, основной механизм нарушения целостности стенок в металле труб конвективного пучка – электрохимические процессы анодного растворения (внутренняя коррозия) и наружной коррозии (эрозии), ускоренные возникновением структурно-химических неоднородностей в металле при работе в режиме перегрева. Термические повреждения при перегреве в первую очередь формируются в металле, работоспособность которого понижена из-за технологических погрешностей изготовления (в данном случае выявлено недопустимо высокое содержание алюминия). Длительный перегрев металла труб подтверждается отсутствием у них признаков общей макродеформации.

Эксплуатационные факторы коррозионного разрушения труб поверхностей нагрева котель-



**Рис. 3. Эксплуатационные повреждения трубы № 1:** *а* – вид на свищ изнутри; *б* – послойные разъедания металла у края свища; *в* – язвины, раковины, растрескивания; и трубы № 2: *г* – слияние свищей; *д* – эрозионные поражения наружной поверхности трубы, *е* – трещинообразование

ных установок. Согласно статистическим данным основной причиной (до 60–70%) вынужденных остановов котлов являются повреждения поверхностей нагрева [1, 4]. Выявление роли отдельных факторов эксплуатации и происходящих при этом физико-химических процессов, развивающихся в металле труб, являлось предметом достаточно большого числа исследований, однако в силу многофакторности проблемы многие вопросы остаются недостаточно изученными. Так, длительное время коррозия труб объяснялась в основном недостатками водно-химического режима. Затем было предположено значительное и, возможно, даже решающее влияние на протекание и интенсивность коррозионных процессов уровня тепловой нагрузки на стенки труб. Вместе с тем, при более или менее нормальном режиме эксплуатации наработка на отказ поверхностей нагрева котлов, происходящая при одновременном воздействии как активных коррозионных сред, так и повышенных температур, исчисляется годами (к примеру, графитизация стали в обычных условиях функционирования котельного оборудования обнаруживается только через несколько лет его службы). Поэтому сложно дифференцировать влияние этих факторов на скорость и механизм развития коррозии. Расследованный случай ускоренной электрохимической коррозии блока конвективных труб, произошедший практически сразу после их замены, предоставил достаточно уникальную возможность практического подтверждения определяющей роли тепловой нагрузки как стимулятора коррозион-

ных повреждений по сравнению с действием такого фактора, как активная коррозионная среда.

В заключение следует отметить, что деградация материала поверхностей нагрева котлов с появлением дефектов, приводящих к их отказам при малых сроках эксплуатации, как правило, обуславливается нарушениями эксплуатационных и ремонтных регламентов. Очевидной рекомендацией для предотвращения подобных послеремонтных аварий котельных установок (наряду с обеспечением правильного стабильного режима эксплуатации и режима консервации при простоях котлов во избежание стояночной коррозии) является обязательный входной контроль металла ремонтной трубной продукции, качество которой должно соответствовать требованиям стандартов.

### Выводы

Проведенные исследования отрезков труб конвективного пучка аварийной котельной установки ДКВр 20–13, содержащих бездеформационные эксплуатационные повреждения различной степени развития (в том числе, свищи), позволяют сделать следующие выводы о природе и механизмах возникновения этих повреждений, а также качеству материала:

Химический состав металла труб в целом соответствует химическому составу низкоуглеродистой качественной стали марки 20, используемой в котлотурбостроении (для температур не выше +425 °С). Отличительной особенностью металла аварийных труб является присутствие в



нем алюминия, что не предусмотрено Госстандартом, так как алюминий является одним из основных факторов, повышающих склонность перлитных сталей к графитизации – выделению структурно свободного графита, ухудшающего их механические свойства.

Выявлена высокотемпературная деградация структуры металла труб, обычно возникающая при температурах в диапазоне 470–500°C и свидетельствующая о работе металла в режиме перегрева: сфероидизация (развитие процессов распада и коагуляции карбидов) и графитизация. Металл труб полностью сфероидизирован, графитизация вышла на уровень возникновения графитных гнезд и графитных цепочек. Ввиду незначительной прочности, скопления графита (по сути, пустоты) ослабляют сечение стенки трубы, являются концентраторами напряжений, а также облегчают проникновение в металл коррозионной среды.

Основной механизм разрушения конвективных труб – внутренняя электрохимическая коррозия металла (процессы анодного растворения). В результате возникновения термических повреждений структуры при перегреве произошло снижение устойчивости металла к агрессивному воздействию рабочей среды, обусловившее ускоренную местную коррозию отдельных участков трубы с наиболее неблагоприятной и коррозионно-уязвимой микроструктурой. Другой выявленный механизм разрушения труб – эрозия наружной поверхности, тоже ускоренная термической деградацией структуры.

Структурное состояние стали в зоне разрушения конвективных труб аварийного котла указывает на регулярный и достаточно длительный перегрев металла из-за нарушения нормальных условий эксплуатации (возможно, из-за работы в накипном режиме, нарушений циркуляции рабочей среды и т. п.). Усугубляющим фактором, облегчившим трансформацию структуры при перегреве, стало повышенное содержание алюминия. В результате перегрева в металле произошли необратимые физико-химические изменения, снизившие его работоспособность вследствие появления дефектов, разупрочнения и падения коррозионной устойчивости. Развитие неравномерной внутренней коррозии по механизму анодного растворения привело к появлению свищей и аварийной разгерметизации котельного оборудования.

Подтверждена ведущая роль тепловой нагрузки как стимулятора коррозионных повреждений металла конвективных труб по сравнению с фактором воздействия активной коррозионной среды.

## Литература

1. *Смирнов А.Н.* Диагностирование технических устройств опасных производственных объектов / А.Н. Смирнов, Б.Л. Герике, В.В. Муравьев. – Новосибирск: Наука, 2003 – 244 с.
2. *Ботвина Л.Р.* Разрушение: кинетика, механизмы, общие закономерности. – М.: Наука, 2008. – 334 с.
3. *Мак-Ивили А. Дж.* Анализ аварийных разрушений. – М.: Техносфера, 2010 – 416 с.
4. *Кушнаренко В.М.* Анализ повреждаемости парогенерирующего оборудования ТЭС / В.М. Кушнаренко, Н.Е. Кандыба, Е.П. Степанов и др. // Вестн. Оренбург. гос. ун-та. – 2003. – № 6. – С. 177–182.
5. *Дегтев О.Н.* Анализ причин образования коррозионно-усталостных повреждений экранных труб котлов П-57 и ПК-39 / О.Н. Дегтев, И.Н. Беликов, Э.И. Гецфрид и др. // Теплоэнергетика. – 1988. – № 11. – С. 39–43.
6. *Lobley G. R.* Diagnosing Boiler Tube Failures Related to Overheating / G. R. Lobley, W. L. Al-Otaibi // Advanced Materials Research. – 2008. – Vol. 41–42. – P. 175–181.
7. *Марочник сталей и сплавов* / под ред. А.С. Зубченко и [др.]. – М.: Машиностроение, 2001. – 672 с.
8. *Стырикович М.А.* Котельные агрегаты / М.А. Стырикович, К.Я. Катковская, Е.П. Серов. – М.: Гос. энергетическое изд-во, 1958. – 488 с.
9. *Лёзин В.И.* Пароперегреватели котельных агрегатов / В.И. Лёзин, Ю.М. Липов, М.А. Селезнев, В.М. Сыромятников. – М.; Л.: Энергия, 1965. – 288 с.
10. *ГОСТ 5639–82.* Стали и сплавы. Методы выявления и определения величины зерна. – М.: Изд-во стандартов, 1982. – 25 с.
11. *Антикайн П.А.* Металлы и расчет на прочность котлов и трубопроводов. – М.: Энергосервис, 2001. – 440 с.
12. *Израилев Ю.Л.* Живучесть трубопроводов стареющих тепловых электростанций / Ю.Л. Израилев, Ф.А. Хромченко, А.П. Ливанский и др. – М.: Торус Пресс, 2002. – 611 с.
13. *СТО 1723082. 27. 100. 005–2008.* Основные элементы котлов, турбин и трубопроводов ТЭС. Контроль состояния металла: нормы и требования. Утвержден ОАО РАО «ЕЭС России»: протокол от 10. 06. 2008; введен 01. 10. 2008. – М., 2008. – № 329. – 634 с.
14. *Василенко И.И.* Коррозионное растрескивание сталей / И.И. Василенко, Р.К. Мелехов. – Киев: Наукова думка, 1977. – 265 с.
15. *Стеклов О.И.* Стойкость материалов и конструкций к коррозии под напряжением. – М.: Машиностроение, 1990. – 384 с.

Поступила в редакцию 17.03.2016