

А. А. ОТС, В. Э. ПЕЛЛА, Р. В. ТОУАРТ

## ПРОБЛЕМЫ ВОДЯНОЙ ОБМЫВКИ ТОПОЧНЫХ ЭКРАНОВ ПЫЛЕСЛАНЦЕВЫХ КОТЛОВ

### 2. ПОВЕДЕНИЕ МЕТАЛЛА И ПРОГНОЗ ПРОДОЛЖИТЕЛЬНОСТИ РАБОТЫ

#### Введение

Опыт многолетнего использования водяной обмывки для очистки топочных экранов от связанных золовых отложений свидетельствует о том, что практически невозможно обеспечить такие условия работы труб, при которых в поверхностном слое металла не возникали бы термоусталостные трещины и не изменялись бы микроструктура стали и ее механические свойства. Водяная обмывка может стать причиной катастрофического износа поверхностей нагрева пылесланцевых котлов [1, 2].

Следовательно, для того чтобы достоверно прогнозировать ресурс работы экранных поверхностей нагрева, необходимо располагать комплексными экспериментальными данными об интенсивности износа и поведении металла труб при водяной обмывке. Коррозионно-эрозионный износ топочных экранов пылесланцевых котлов был рассмотрен в первой части настоящей работы [1], поведению металла их труб посвящена предлагаемая статья.

#### Методика

Методика испытаний описана в [1]. Основные параметры и режимы аппаратов водяной обмывки следующие.

1. Промышленные испытания на котле ТП-101: интервал между водяными обмывками 56 ч, максимальный перепад температур при обмывке на чистой наружной поверхности труб до 150 К, на загрязненных трубах не выше 120—130 К, среднее время контакта водяной струи с очищаемой поверхностью 0,3 с, растягивающие термические напряжения на наружной поверхности трубы не более 300 МПа.

2. Полупромышленные опыты на котле ЦКТИ 75-39Ф: интервалы между последовательными включениями водяного обмывочного аппарата 0,5 ч для первого этапа исследований и 1,85 ч для второго, перепад температур при обмывке на наружной поверхности труб в пределах 160—170 К, максимальный — 190 К, время охлаждения труб около 0,1 с, термические напряжения на поверхности труб в пределах 400—590 МПа.

На котле ТП-101 исследовали трубы из стали марок 12Х1МФ и 12Х2МФСР, на котле ЦКТИ 75-39Ф — трубы из стали марки 12Х1МФ.

## Развитие трещин термической усталости

На первый взгляд, зная как термические напряжения распределяются по толщине стенки трубы, несложно определить период времени (или число водяных обмывок), после которого начинают возникать термоусталостные трещины. Нетрудным кажется и прогнозирование их развития вглубь металла с использованием кривых, характеризующих развитие усталости при механическом нагружении. Однако использование кривых механической усталости для описания развития термической усталости не только весьма затруднительно, но и нередко дает неверные результаты. Рассмотрим некоторые усложняющие использование этих кривых факторы, которые возникают при водяной обмывке.

В гладкотрубном радиационном пароперегревателе котла ТП-101 продолжительность испытаний составляла: для труб из стали 12Х1МФ 2949, 10 921, 14 721, 16 583, 19 532, 38 500 и 53 800 ч, для труб из стали 12Х2МФСР 2949, 10 921, 11 772, 14 721, 16 583 и 19 532 ч. После первой серии испытаний (50 водяных обмывок) на лобовой части наружной поверхности труб из стали обеих марок были обнаружены язвы глубиной 0,05 мм (сталь 12Х1МФ) и 0,10—0,15 мм (12Х2МФСР). (Под язвой подразумевается микроповреждение поверхности, ширина которого приблизительно равна его глубине или превышает ее.) Глубина язв не зависела от продолжительности работы труб и была практически неизменной.

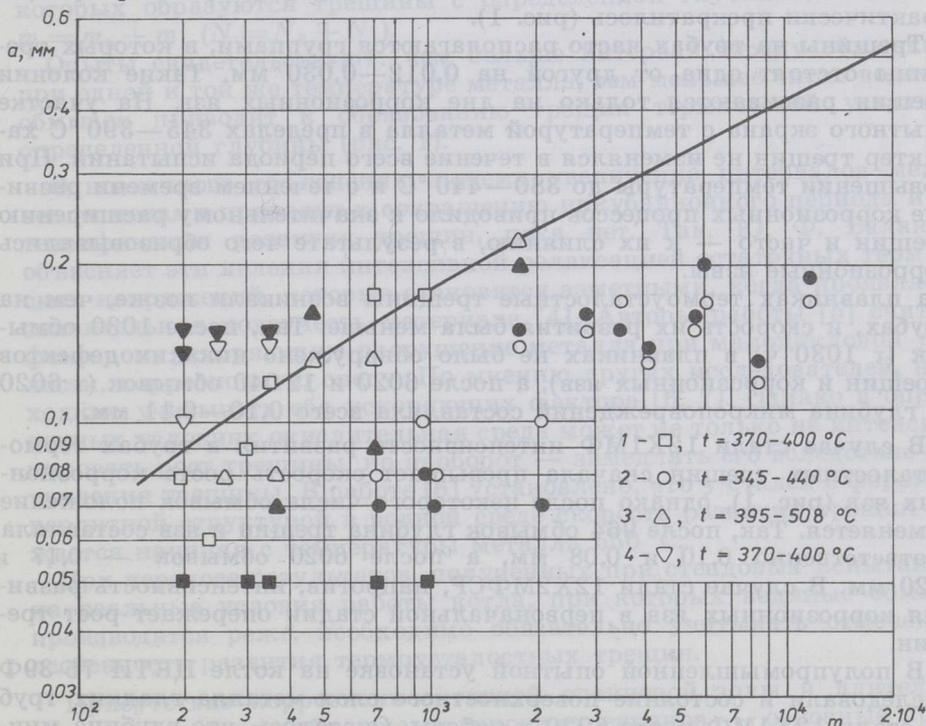


Рис. 1

Кинетика развития термоусталостных микроповреждений в поверхностном слое металла труб топочных экранов:  $a$  — глубина трещины (светлые точки) и язв (темные точки),  $m$  — число водяных обмывок; 1—3 — сталь 12Х1МФ, 4 — сталь 12Х2МФСР. Для стали 12Х1МФ кривая построена по формуле (1) (см. с. 271)

После 200 водяных обмывок (то есть после 10 920 ч работы) на лобовой части наружной поверхности труб появились трещины термической усталости глубиной до 0,08 мм (сталь 12Х1МФ) и 0,1 мм (12Х2МФСР). Со временем трещины углублялись и достигали глубины 0,14 мм (сталь 12Х2МФСР,  $\tau$  19 430 ч) и 0,18 мм (12Х1МФ,  $\tau$  38 500 ч). После 53 800 ч работы радиационного пароперегревателя углубление термоусталостных трещин в трубах из стали 12Х1МФ прекратилось, однако к этому времени началось некоторое их расширение в результате коррозионных процессов (рис. 1).

На опытном участке мембранного экрана в топке котла ТП-101 максимальная глубина термоусталостных трещин в поверхностном слое плавниковых труб после 14 721 ч работы составляла 0,08 мм [3], то есть не превышала их глубины для гладкотрубного экрана.

На котле ЦКТИ 75-39Ф состояние металла труб мембранного экрана проверяли после 1030, 1300, 1775, 1785, 4245 и 6020 ч работы в опытном режиме. В зависимости от принятой схемы очистки (см. [1]) число водяных обмывок находилось в пределах от 351 до 12 040. Развитие дефектов на опытном мембранном экране рассматривали в двух температурных интервалах — до 440 °С и выше 440 °С [1].

Максимальная глубина трещин термической усталости после 702 обмывок и 1300 ч работы при температуре металла до 440 °С составляла 0,08 мм. С увеличением числа обмывок трещины углубляются. Так, после 3550 водяных обмывок ( $\tau$  1775 ч) их глубина достигала 0,17 мм. После 6020 ч работы и 12 040 обмывок углубление трещин практически прекратилось (рис. 1).

Трещины на трубах часто располагаются группами, в которых трещины отстоят одна от другой на 0,012—0,030 мм. Такие колонии трещин развиваются только на дне коррозионных язв. На участке опытного экрана с температурой металла в пределах 345—390 °С характер трещин не изменялся в течение всего периода испытаний. При повышении температуры до 380—440 °С и с течением времени развитие коррозионных процессов приводило к значительному расширению трещин и часто — к их слиянию, в результате чего образовывались коррозионные язвы.

На плавниках термоусталостные трещины возникали позже, чем на трубах, и скорость их развития была меньше. Так, после 1030 обмывок ( $\tau$  1030 ч) в плавниках не было обнаружено никаких дефектов (трещин и коррозионных язв), а после 6020 и 12 040 обмывок ( $\tau$  6020 ч) глубина микроповреждений составляла всего 0,10—0,11 мм.

В случае стали 12Х1МФ интенсивность развития в трубах термоусталостных трещин сначала превышает скорость роста коррозионных язв (рис. 1), однако после некоторого числа обмывок положение изменяется. Так, после 964 обмывок глубина трещин и язв составляла соответственно 0,10 и 0,08 мм, а после 6020 обмывок — 0,17 и 0,20 мм. В случае стали 12Х2МФСР, напротив, интенсивность развития коррозионных язв в первоначальной стадии опережает рост трещин.

В полупромышленной опытной установке на котле ЦКТИ 75-39Ф исследовали и состояние поверхностного слоя металла гладких труб из стали 12Х1МФ после 6020 ч работы. Оказалось, что глубина микроповреждений труб такая же, как в случае мембранного экрана.

Итак, промышленные и полупромышленные испытания показали, что интенсивность развития термоусталостных микродефектов в гладкотрубном экране и в плавниковых трубах мембранного экрана одинакова. При температуре металла выше 440 °С термоусталостные трещины развиваются интенсивнее, чем при меньших температурах. Например, при температуре металла от 420 до 465 °С глубина трещин

после 1775 обмывок составила 0,22 мм против 0,14 мм при температуре 380—440 °С (рис. 1). Однако с дальнейшим повышением температуры уменьшается как глубина трещин, так и их количество, приходящееся на единицу длины по образующей. Так, в интервале температур 475—525 °С на поверхности трубы располагались лишь одиночные, случайно расположенные трещины с максимальной глубиной 0,04 мм, глубина коррозионных язв составляла 0,08 мм. При температуре 485—540 °С трещин не было, глубина одиночных язв доходила до 0,05 мм. В той части экрана, где рабочая температура была максимальной (до 578 °С), дефекты не образовывались. Скорее всего, уменьшение глубины трещин с повышением температуры металла обусловлено скачкообразным возрастанием интенсивности износа труб [1].

Процесс развития термоусталостных трещин в поверхностном слое металла трубы можно рассматривать как состоящий из двух основных периодов.

1. Инкубационный период — промежуток времени до возникновения первоначальной трещины, в течение которого происходит накопление микрповреждений. Этот период характеризуется числом обмывок  $m_0$  (или числом теплосмен  $N_0$ ).

2. Период роста трещины — промежуток времени от возникновения первоначальной трещины до того момента, когда она приобретет определенную величину. Этот период характеризуется числом обмывок  $m_1$  (или числом теплосмен  $N_1$ ).

Следовательно, общее число обмывок (или теплосмен), в течение которых образуются трещины с определенной глубиной, составляет  $m = m_0 + m_1$  ( $N = N_0 + N_1$ ).

Опыты свидетельствуют: чем больше интервал между обмывками при одной и той же температуре металла, тем меньше число водяных обмывок приводит к образованию трещин термической усталости определенной глубины (рис. 1).

Однозначного объяснения, почему увеличение интервалов между теплосменами приводит к сокращению инкубационного периода и интенсификации развития трещин, пока нет. Так, Ю. Ф. Баландин объясняет эти явления интенсивной релаксацией остаточных термических напряжений, которые становятся заметными, когда проявляется значительная ползучесть материала [4]. Авторы работы [5] считают фактором, ускоряющим разрушение металла при малоцикловой усталости, коррозионную среду. По мнению других исследователей, необходимо учитывать оба ускоряющих фактора [6, 7]. Однако в определенных условиях окислительная среда может не только не интенсифицировать рост трещины, но наоборот — замедлять его вследствие притупления трещины. В работе [6] установлено, что у сталей с ферритно-перлитной структурой в водной среде скорость развития трещин снижается начиная с температуры металла 550 °С.

При переносе результатов, полученных при стендовых испытаниях, на реальные условия работы котла, при которых водяные обмывки производятся реже, необходимо обязательно учитывать отмеченную особенность развития термоусталостных трещин.

Присутствие коррозионноактивной сланцевой золы и длительные интервалы между обмывками топочных экранов — основные причины, затрудняющие определение интенсивности роста термоусталостных трещин по кривым механической усталости металла. Механическая и термическая усталость различаются еще и тем, что в случае первой с развитием трещины локальные напряжения в ее вершине возрастают, а в случае второй, — наоборот, убывают. Так, при рассмотренных условиях работы растягивающие термические напряжения, составляющие на наружной поверхности трубы 300—590 МПа,

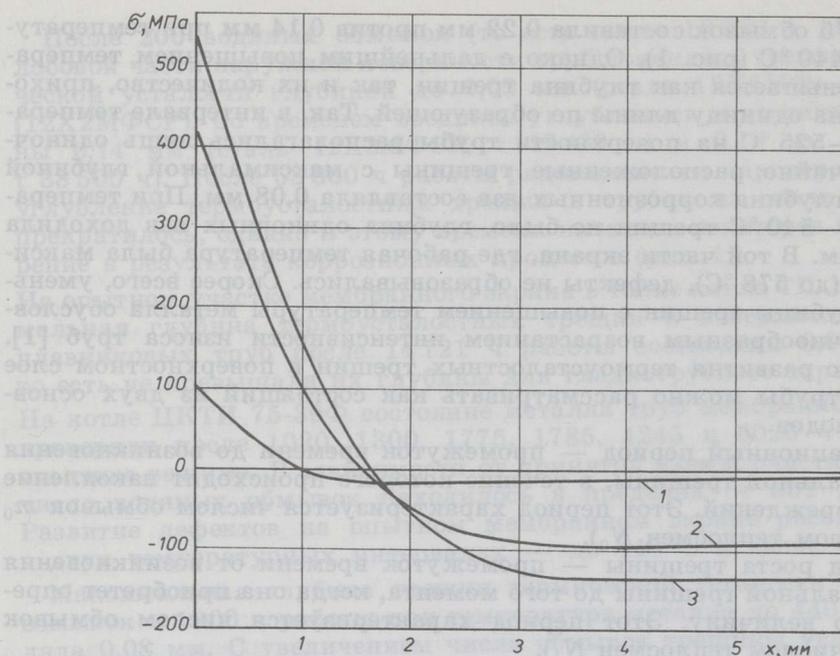


Рис. 2

Зависимость термических напряжений в стенке (на разных расстояниях от наружной поверхности) трубы из стали 12X1МФ (диаметр  $32 \times 6$  мм), возникающих при водяной обмывке, от времени охлаждения  $\tau_{\text{охл}}$ , 0,02 с (1), 0,08 с (2) и 0,10 с (3)

уже на глубине 1,4—1,6 мм превращаются в сжимающие напряжения, то есть в узком интервале толщины стенки трубы происходит резкое уменьшение растягивающих термических напряжений (рис. 2).

Наблюдения показали, что на всех стадиях своего развития трещины заполнены продуктами коррозии. Однако с увеличением глубины трещины ее характер меняется, причем самые большие превращения происходят в вершине. Так, при глубине трещин до 0,10 мм вершины имеют вид, характерный для вершин трещин усталости при механическом нагружении. При глубине 0,14—0,17 мм острый и тонкий участок в вершине трещины закругляется под действием коррозионных процессов. На этой же глубине интенсивность роста коррозионных язв начинает опережать интенсивность развития термоусталостных трещин (рис. 1). Следовательно, на глубине 0,17—0,20 мм роль термических напряжений в развитии трещины постепенно ослабевает, а значение коррозионных процессов в ее вершине, соответственно, возрастает. Таким образом, на развитие термоусталостных трещин в трубах топочных экранов оказывают влияние и коррозионные процессы.

Скорость возникновения и развития трещин зависит также от времени соприкосновения водяной струи с обмываемой поверхностью. С определенного момента термические напряжения на наружной поверхности трубы, величина которых определяется интенсивностью теплообмена, несколько уменьшаются [8]. Однако высокие напряжения проникают все глубже в металл, а это означает, что вероятность углубления трещин повышается.

Скорость углубления трещин в трубах опытного мембранного экрана (сталь 12X1МФ) при температуре металла до  $440^\circ\text{C}$  приближается к нулю на относительно маленькой глубине — примерно 0,2 мм (рис. 1). Скорость углубления трещины максимальна на первоначальной

стадии развития. Уменьшение скорости развития термоусталостных трещин с ростом числа обмывок обусловлено главным образом резким убыванием термических напряжений по толщине стенки трубы. Кроме того, притупление вершины трещины тоже снижает концентрацию локальных термических напряжений в вершине.

Поскольку по мере роста числа обмывок скорость развития трещин в опытном мембранном экране котла ЦКТИ 75-39Ф приближается к нулю и в их развитии начинают преобладать коррозионные процессы в вершине, то выбранное время испытаний (6020 ч)/число тепломосмен можно считать достаточным для определения кинетики развития трещин. При эксплуатационном режиме водяной обмывки глубина трещин (коррозионных язв) может несколько возрасть вследствие увеличения времени протекания коррозионных процессов в их вершине. Однако это увеличение незначительно, так как более продолжительным становится и время развития коррозии всей поверхности трубы. Из-за несущественной ползучести металла воздействие релаксации термических напряжений на интенсивность развития трещин должно быть слабым.

Для описания кинетики развития термоусталостных трещин в литературе приведено много формул, в основном эмпирических [6, 9—11].

Глубина термоусталостных трещин на топочных экранах из стали 12Х1МФ в зависимости от числа водяных обмывок при температуре металла до 450 °С в [11] определяется по формуле

$$a = 1,5 \cdot 10^{-2}(m - m_0)^{0,36}, \quad (1)$$

где  $m$  — число обмывок;  $m_0$  — число обмывок, имевших место до возникновения первой трещины ( $m_0 = 50$ ).

Формула (1) базируется на результатах промышленных испытаний на котлах, работающих на эстонских сланцах, назаровском угле Канско-Ачинского бассейна и подмосковном буром угле [12, 13].

Трещины, образующиеся на опытном мембранном экране при температуре металла ниже 440 °С имеют глубину меньшую, чем определенная по формуле (1) (рис. 1). Дело в том, что температура металла части труб в топках котлоагрегатов, сжигающих назаровский и подмосковный бурый угли, превышает ту температуру, при которой у стали 12Х1МФ начинает проявляться значительная ползучесть — 450 °С [14] (проявление значительной ползучести, как уже было сказано, является одним из ускоряющих факторов развития трещин термической усталости). Это подтверждают и наши опыты (рис. 1). Интенсивность развития трещин в трубах опытного мембранного экрана при температуре металла выше 450 °С хорошо описывается кривой, построенной по формуле (1). Аналогичные результаты ускорения развития термоусталостных трещин получены и другими авторами. Так, например, в работе [15] приведены такие данные: после 64 тыс. тепломосмен максимальная глубина трещин при температуре металла 325 °С составляла 0,1 мм, при 450 °С — 0,6 мм (сталь 1 % Сг, 0,5 % Мо).

Следовательно, глубину образования термоусталостных трещин на топочных экранах пылесланцевых котлов из стали 12Х1МФ при температуре металла до 440 °С, рассчитанную по формуле (1), можно принять за максимально возможную, поскольку она принимается с некоторым запасом.

Термоусталостные трещины на трубах из стали 12Х2МФСР несколько глубже трещин на трубах из стали 12Х1МФ (рис. 1). Возможные причины этого — как в механических свойствах и особенностях микроструктуры сталей, так и в более высокой чувствительности первой стали к коррозионно-эрозионному износу в условиях водяной обмывки [1].

## Механические свойства металла

В условиях водяной обмывки ресурс работы труб топочных экранов котла определяется не только коррозионно-эрозионным износом и развитием термоусталостных трещин, но и в не меньшей степени — устойчивостью микроструктуры стали к периодическому воздействию водяных струй (механических напряжений) и механическими свойствами металла.

До испытания микроструктуру металла труб из стали 12Х1МФ составляли феррит и перлит или феррит и 15—20 % участков сорбита отпуска и перлита, что соответствовало 3—4 баллам шкалы приложенной к ТУ 14-3-460-75. Величина зерна равнялась 5—8 баллам по ГОСТ 5639-82. В случае стали 12Х2МФСР до испытания микроструктура металла труб представляла собой сорбит отпуска, являлась рекомендуемой и соответствовала 1 баллу по приложению к ТУ 14-3-460-75.

Установлено, что микроструктура образцов труб из обеих сталей не изменилась ни в одной серии опытов.

Для определения механических свойств металла из средней части стенки экранных труб были изготовлены цилиндрические образцы с рабочим диаметром 3,0 мм. Образцы металла вырезали как с лобовой (огневой) стороны, которая подвергалась воздействию водяной струи, так и с тыльной стороны, которая не очищалась. Оказалось, что термические напряжения в средней части стенки трубы существенно меньше, чем в приповерхностном наружном слое металла (рис. 2). Поэтому данные о механических свойствах сталей, приобретаемых в процессе работы, характеризуют состояние основной части металла труб, а не наружного поверхностного слоя, в котором возникают трещины термической усталости.

Определяли следующие механические свойства металла труб:  $\sigma_B$  — условный предел прочности при растяжении,  $\sigma_{0,2}$  — условный предел текучести при растяжении,  $\delta_5$  — относительное удлинение при разрыве,  $\psi$  — относительное поперечное сужение при разрыве и  $a_n$  — ударная вязкость при рабочих температурах в исходном состоянии и после различных периодов работы (рис. 3). Все механические показатели обеих сталей, определенные как для лобовой, так и для тыльной стороны, в ходе эксплуатации изменяются незначительно. Однако после 12 040 водяных обмывок у части труб мембранного экрана на лобовой стороне пластичность металла несколько убывает, о чём свидетельствует уменьшение значений  $\psi$  и  $\delta_5$ .

Определив пластичность металла по относительному поперечному сужению при разрыве по формуле  $D = \ln [1/(1 - \psi)]$  [16], получим, что она стала на 20 % меньше исходной. При этом среднее снижение пластичности металла составляет 10 %. Следовательно, с увеличением числа водяных обмывок постепенно накапливается пластическая деформация металла. Отметим, что после 12 040 водяных обмывок минимальная величина относительного поперечного сужения металла труб при разрыве превышает минимальное значение  $\psi$ , допустимое в исходной поставке по ТУ 14-3-460-75. Снижение пластичности металла тыльной стороны труб из стали 12Х2МФСР после 19,5 тыс. ч работы на 21 %, по-видимому, не обусловлено водяной обмывкой, но связано с неоднородностью структуры материала.

Имея в виду большой разброс значений показателей механических свойств сталей в исходном состоянии, можно сделать вывод, что водяная обмывка в течение расчетного ресурса работы стали (100 тыс. ч) не оказывает заметного влияния ни на структуру, ни на механические свойства испытанных сталей, что объясняется резким ослаблением термических напряжений по толщине стенки трубы.

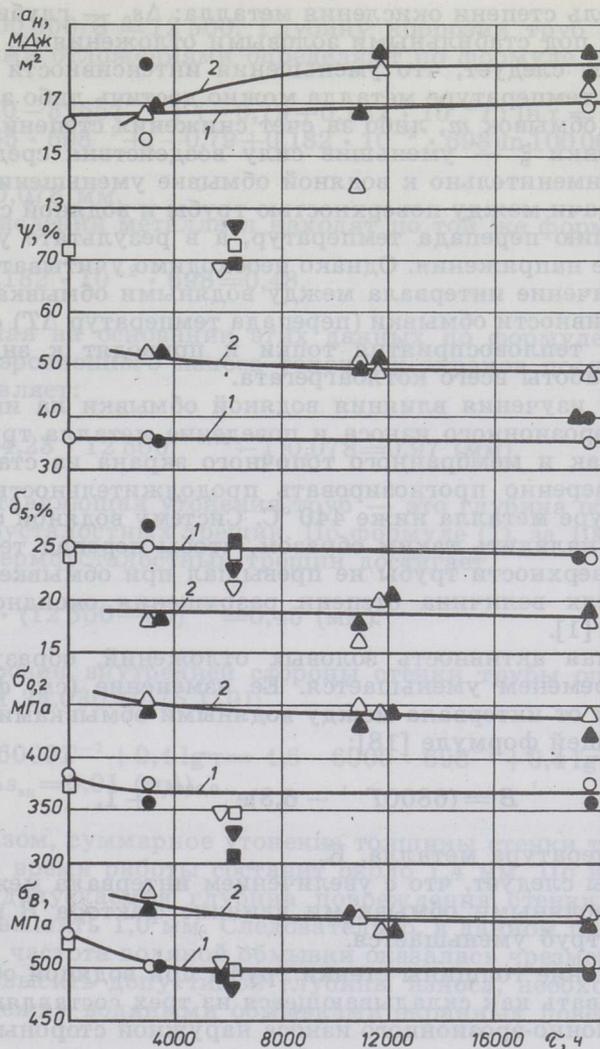


Рис. 3

Механические свойства металла труб из стали марки 12X1МФ (кривая 1) и 12X2МФСР (кривая 2) при рабочих температурах металла (значения температур приведены на рис. 1) после различных сроков эксплуатации. Светлыми точками обозначена огневая сторона труб, затемненными — тыльная сторона

### Прогноз продолжительности работы топочных экранов

Глубину коррозионно-эрозионного износа труб поверхностей нагрева, обусловленного циклическим разрушением оксидной пленки при воздействии сил очистки, определяют по следующей общей формуле [17]:

$$\Delta s = [1 + \xi(Bm^{1-n} - 1)]\Delta s_0, \quad (2)$$

где  $\xi$  — степень разрушения оксидной пленки;  $B$  — фактор, учитывающий изменение коррозионной активности золовых отложений в период между очистками;  $m = \tau/\tau_0$  — число водяных обмывок, приходящихся на период работы  $\tau$ , ч;  $\tau_0$  — интервал между обмывками;

$n$  — показатель степени окисления металла;  $\Delta s_0$  — глубина коррозии металла труб под стабильными золовыми отложениями.

Из формулы следует, что уменьшения интенсивности износа труб при заданной температуре металла можно достичь либо за счет сокращения числа обмывок  $m$ , либо за счет снижения степени разрушения оксидной пленки  $\xi$  — уменьшив силу воздействия средств очистки на трубы. Применительно к водяной обмывке уменьшение коэффициента теплоотдачи между поверхностью трубы и водяной струей приводит к снижению перепада температур, а в результате уменьшаются и термические напряжения. Однако необходимо учитывать, что произвольное увеличение интервала между водяными обмывками и уменьшение интенсивности обмывки (перепада температур  $\Delta T$ ) обуславливают снижение тепловсприятости топки и приводят к значительному ухудшению работы всего котлоагрегата.

Результаты изучения влияния водяной обмывки на интенсивность коррозионно-эрозионного износа и поведение металла труб как гладкотрубного, так и мембранного топочного экрана из стали 12Х1МФ позволяют уверенно прогнозировать продолжительность их работы при температуре металла ниже 440 °С. Систему водяной обмывки при этом следует наладить таким образом, чтобы перепад температур на наружной поверхности трубы не превышал при обмывке 150 К. При таких условиях величина степени разрушения оксидной пленки  $\xi$  составит 0,02 [1].

Коррозионная активность золовых отложений, образующихся на трубах, со временем уменьшается. Ее изменение (см. формулу (2)) в зависимости от интервала между водяными обмывками определяется по следующей формуле [18]:

$$B = (6800T^{-1} - 6,3)e^{-0,006t_0} + 1, \quad (3)$$

где  $T$  — температура металла, К.

Из формулы следует, что с увеличением интервала между последовательными водяными обмывками влияние фактора  $B$  на интенсивность износа труб уменьшается.

Общее утонение толщины стенки трубы при водяной обмывке можно рассматривать как складывающееся из трех составляющих — глубины коррозионно-эрозионного износа наружной стороны  $\Delta s$ , глубины термоусталостных трещин  $a$  и глубины коррозии внутренней стороны  $\Delta s_{\text{вн}}$ . Для топочных экранов пылесланцевых котлов определяющими являются две первых величины.

### Примеры расчета

1. Определим суммарное утонение стенки труб топочного экрана в условиях водяной обмывки при следующих исходных данных: трубы изготовлены из стали 12Х1МФ, температура наружной поверхности трубы 425 °С, интервал между обмывками и время работы котла соответственно 8 ч и 100 тыс. ч.

Глубину коррозионно-эрозионного износа на наружной стороне труб определяют по формуле (2). Наши исследования показали, что степень разрушения оксидной пленки  $\xi$  равняется 0,02. Величина фактора  $B$  в формуле (2) составляет:

$$B = [6800(425 + 273)^{-1} - 6,3]e^{-0,006 \cdot 8} + 1 = 4,23.$$

Число водяных обмывок за расчетный срок работы топочного экрана

$m = \tau/\tau_0 = 100\,000/8 = 12\,500$ . Глубину коррозии труб под стабильными золовыми отложениями определяют по формуле (2) [1]:

$$\ln \Delta s_0 = -3,40 - 3265T^{-1} + (-0,79 + 0,182 \cdot 10^{-2}T) \ln \tau = \\ = -3,40 - 3265 \cdot 698^{-1} + (-0,79 + 0,182 \cdot 10^{-2} \cdot 698) \ln 100\,000 = -2,55,$$

откуда  $\Delta s_0 = 0,078$  мм.

Степень окисления металла  $n$  находят по той же формуле:

$$n = -0,79 + 0,182 \cdot 10^{-2} \cdot 698 = 0,48.$$

Рассчитанная на основании этих данных по формуле (2) глубина коррозионно-эрозионного износа топочных экранов после 100 тыс. ч работы составляет:

$$\Delta s = [1 + 0,02(4,23 \cdot 12\,500^{1-0,48} - 1)]0,078 = 0,97 \text{ (мм)}.$$

Вторая составляющая утонения труб — это глубина образующихся на них термоусталостных трещин. По формуле (1), за 100 тыс. ч работы глубина термоусталостных трещин достигает

$$a = 1,5 \cdot 10^{-2} \cdot (12\,500 - 50)^{0,36} = 0,45 \text{ (мм)}.$$

Глубину коррозии внутренней стороны стенки трубы определяем по формуле РТМ 24.030.49-75 [19]:

$$\lg \Delta s_{\text{вн}} = 4,6 - 6000T^{-1} + 0,4 \lg \tau = 4,6 - 6000 \cdot 698^{-1} + 0,4 \lg 100\,000 = \\ = -1,996 \text{ и } \Delta s_{\text{вн}} = 0,01 \text{ (мм)}.$$

Таким образом, суммарное утонение толщины стенки трубы за рассматриваемое время работы составит около 1,4 мм. По нормативным материалам, допускаемая глубина повреждения стенки трубы  $\Delta s_{\text{доп}}$  не может превышать 1,0 мм. Следовательно, в данном примере расчета выбранная частота водяной обмывки оказалась чрезмерно высокой. Чтобы не превысить допустимой глубины износа, необходимо увеличить время между водяными обмывками экранных поверхностей нагрева.

2. Рассмотрим, как возможно рассчитать минимально допустимый интервал между водяными обмывками за определенный промежуток времени работы в зависимости от температуры металла трубы. За срок работы примем расчетный ресурс работы топочных экранов  $\tau = 100$  тыс. ч. Минимальный межобмывочный интервал можно определить на основе формулы (2) методом последовательных приближений. При этом глубина коррозионно-эрозионного износа  $\Delta s$  в формуле (2) будет выражена следующим образом:

$$\Delta s = \Delta s_{\text{доп}} - a - \Delta s_{\text{вн}}.$$

Порядок определения величин  $B$ ,  $m$ ,  $n$ ,  $\Delta s_0$ ,  $\Delta s_{\text{вн}}$ ,  $a$  аналогичен приведенному в предыдущем примере.

Результаты расчета представлены в виде графика (рис. 4). Глубина  $\Delta s_{\text{доп}}$  принята в расчетах равной 1,0 мм. Поскольку степень разрушения оксидной пленки  $\xi$  при температуре металла труб выше  $440^\circ\text{C}$  возрастает скачкообразно, температуру поверхности нагрева на рисунке ограничили  $440^\circ\text{C}$ . Видно, что расчетный минимально допустимый интервал между обмывками топочных экранов вполне приемлем при эксплуатации пылесланцевых котлов. Так, например, при температуре металла труб  $350^\circ\text{C}$   $\tau_0 = 7$  ч. С повышением температуры поверхно-

сти нагрева допустимое минимальное время между обмывками значительно возрастает и достигает при температуре стенки трубы 440 °С 22 ч.

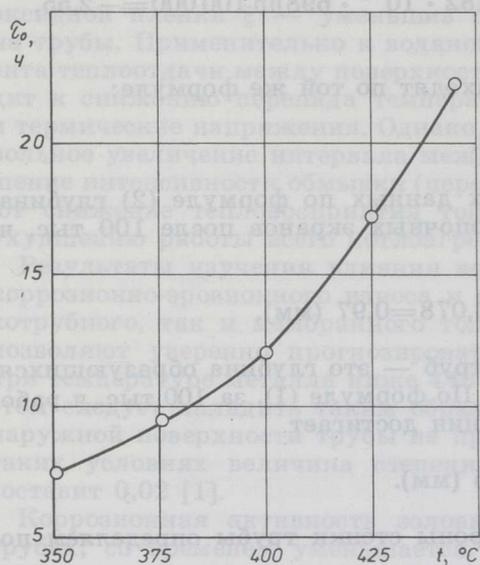


Рис. 4

Допустимый минимальный интервал между водяными обмывками топочных экранов пылесланцевых котлов при расчетном ресурсе работы (100 тыс. ч) поверхностей нагрева

## Выводы

1. В качестве основного метода очистки топочных экранов пылесланцевых котлов из сталей марок 12X1МФ и 12X2МФСР водяную обмывку можно применять до температуры металла 440 °С. При обмывке перепад температур на наружной поверхности труб может достигать до 150 К. При этом степень разрушения оксидной пленки  $\xi$  равняется 0,02. Минимально допустимый интервал между обмывками поверхностей нагрева зависит от температуры металла труб.

2. Термоусталостные трещины, которые образуются в поверхностном слое металла труб под воздействием периодической водяной обмывки, развиваются вглубь металла с затухающей во времени скоростью. Практически нет разницы в скорости развития трещин в трубах гладкотрубного и мембранного экранов. Когда в топочных экранах из стали 12X1МФ при температуре металла ниже 440 °С глубина трещин приближается к 0,17 мм, определяющими в их развитии становятся коррозионные процессы в вершине трещины. Интенсивность развития термоусталостных трещин в поверхностном слое металла экранных труб из стали 12X2МФСР несколько выше, чем в случае стали 12X1МФ.

3. Водяная обмывка не вызывает структурных изменений в металле труб топочных экранов из обеих сталей. В ходе эксплуатации все механические свойства сталей остаются практически на исходном уровне. Однако у части труб из стали 12X1МФ после 12 040 обмывок отмечено, хотя и незначительное, уменьшение относительного поперечного сужения и удлинения при разрыве. Это свидетельствует о некотором накоплении пластической деформации (повреждении) в стенке трубы. Стабильность микроструктуры и механических свойств сталей при применении водяной обмывки объясняется тем, что значительные термические напряжения имеют место только в поверхностном слое металла труб.

1. Отс А. А., Пелла В. Э., Тоуарт Р. В. Проблемы водяной обмывки топочных экранов пылесланцевых котлов. 1. Коррозионно-эрозионный износ топочных экранов // Горючие сланцы. 1987. Т. 5, № 2. С. 193—205.
2. Таллермо Х. И., Отс А. А. Влияние циклического охлаждения металла на интенсивность износа труб пароперегревателей // Тр. Таллин. политех. ин-та; № 316. Таллин, 1971. С. 21—31.
3. Исследование водяной очистки мембранных экранов. / А. А. Отс, Х. И. Таллермо, Т. Н. Сууркууск и др. // Теплоэнергетика. 1985. № 1. С. 32—35.
4. Баландин Ю. Ф. Термическая усталость металлов в судовом энергомашиностроении. — Л., 1967.
5. Челленджер, Миллер, Бринкманн. Объяснение влияния периодов выдержки на характеристики усталости 2,25Cr—1 Мо при повышенных температурах // Теор. осн. инж. расчетов. 1981. № 1. С. 7—15.
6. Туляков Г. А. Термическая усталость в теплоэнергетике. — М., 1978.
7. Донер. Анализ роста трещины при высокотемпературной усталости и ползучести // Энерг. маш. и установки. 1976. № 4. С. 54—60.
8. Отс А., Ансон П., Соодла У., Таллермо Х. Приближенный метод расчета полей температур и термических напряжений в стенке труб при резком охлаждении // Изв. АН ЭССР. Физ.-мат. 1980. Т. 29, № 1. С. 27—38.
9. Балашов Ю. В., Федотов В. П., Шрон Р. З., Волков Б. И. Исследование скорости роста трещин в барабанах паровых котлов высокого давления // Теплоэнергетика. 1983. № 9. С. 51—54.
10. Пелла В. Э. Работа мембранных экранов котлов в условиях периодической водяной обмывки: Автореф. дисс. канд. техн. наук. — Таллин, 1984.
11. Отс А. А., Тоуарт Р. В. Исследование влияния водяной обмывки на металл экранных труб котла // Электрические станции. 1983. № 8. С. 16—19.
12. Таллермо Х. И., Рандманн Р. Э., Мязюла О. Э. Исследование состояния поверхности экранных труб парогенераторов при их водяной очистке // Тр. Таллин. политех. ин-та; № 501. Таллин, 1981. С. 21—26.
13. Хайкин И. Б., Антикайн П. А. Надежность металла топочных экранов котлов с.к.д. при водяной очистке // Теплоэнергетика. 1981. № 5. С. 44—46.
14. Антикайн П. А. Металлы и расчет на прочность котлов и трубопроводов. — М., 1980.
15. Эллери А. Р., Джонсон Т. Р., Ньютон Д. Д. Исследование возможности повреждения экранных и пароперегревательных труб вследствие термической усталости, вызванной водяной расшлаковкой под нагрузкой // Энергетические машины и установки. 1974. № 2. С. 62—70.
16. Дульнев Р. А., Котов П. И. Термическая усталость металлов. — М., 1980.
17. Отс А. А. Процессы в парогенераторах при сжигании сланцев и канскоачинских углей. — М., 1977.
18. Томанн Э. Л. О высокотемпературной коррозии котельных сталей на первоначальной стадии процесса // Влияние минеральной части энергетических топлив на условия работы парогенераторов. Секция II. — Таллин. 1980. С. 57—62.
19. РТМ 24.030.49-75. Метод учета окалинообразования при расчете на прочность элементов поверхностей нагрева паровых котлов. — Л., 1976.

Таллинский политехнический  
институт  
г. Таллин

Поступила в редакцию  
1.07.1987

## PROBLEMS OF WASHING FURNACE SCREENS OF VOLATILE OIL SHALE BOILERS WITH WATER

### 2. METAL BEHAVIOUR AND PROGNOSIS FOR THE DURATION OF OPERATION

The effect of periodic washing with water on metal behaviour of the screen pipes made of steel 12X1MΦ and 12X2MΦCP was investigated in the conditions of volatile combustion of Estonian oil shales in the boilers of type ТП-101 and ЦКТИ 75-39. The interval between successive washing with water of the boiler's ТП-101 furnace totalled 56 hours, and in the case of the boiler ЦКТИ 75-39Φ — from 0.5 to 3.7 hours. Maximum temperatures as to the external surface of unfouled pipes, while washing them, accordingly, reached 150 and 190 K.

It became evident that cracks of thermal fatigue develop deep in the metal, the velocity subsiding in time, while, in the case of steel 12X2MΦCP, the intensity of their development in the metal surface, layer of pipes is somewhat higher. Periodic washing with water does not bring about any structural changes in the metal of the pipes. In the course of exploitation, mechanical characteristics of the steels practically remain at their initial level.

On the basis of the obtained experimental data minimally allowed intervals between washings with water of furnace screens of volatile oil shale boilers have been calculated. The calculated intervals between cleaning radiation heating surfaces are entirely acceptable for exploitation.

*Tallinn Technical University*