

# Исследование предела длительной прочности стали марки ДИ59 пароперегревателей котла типа ТПЕ-216М Харанорской ГРЭС

- Богачев В. А.<sup>1</sup>, доктор техн. наук, ОАО “Всероссийский теплотехнический институт” (ВТИ), Москва
- Урусова Г. А., ОАО “Всероссийский теплотехнический институт”, Москва
- Шумовская М. А., ОАО “Всероссийский теплотехнический институт”, Москва

Экспериментально исследован предел длительной прочности аустенитной хромомарганцевой стали марки ДИ59 при не изученных ранее температурах 700 и 750°C и напряжениях 30 – 80 МПа. Показано, что разрушение является классическим в условиях ползучести металла. Опытные данные аппроксимированы уравнением, структура которого предложена И. И. Труниным.

**Ключевые слова:** котёл, пароперегреватель, аустенитная хромомарганцевая сталь, относительная деформация ползучести, время до разрушения, предел длительной прочности.

В связи с пуском в 2012 г. нового угольного энергоблока № 3 на Харанорской ГРЭС ОАО “Интер РАО” поставило ВТИ задачу – повысить эксплуатационную надёжность работы котла типа ТПЕ-216М путём разработки и внедрения инструкции по определению остаточного ресурса пароперегревателей из аустенитной хромомарганцевой стали марки 10X13Г12БС2Н2Д2 (ДИ59).

Харанорская теплоэлектростанция – не единственная, где в ближайшее время будет использована сталь типа ДИ59. В 2014 г. планируется ввод в эксплуатацию новых угольных энергоблоков № 8, 9 с котлами типа ТПЕ-223 на Черепетской ГРЭС, в которых часть пароперегревателей сделана из стали этой марки. Пароперегреватели из неё в течение продолжительного периода эксплуатируются в котлах угольных и газомазутных энергоблоков, например, на Кармановской ГРЭС, Костромской ГРЭС, ТЭЦ-22, -23, -25, -26 ОАО “Мосэнерго”.

Преимущество стали марки ДИ59 перед традиционной для пароперегревателей аустенитной хромоникелевой сталью марки 12Х18Н12Т заключается в повышенной длительной прочности [1], жаростойкости в дымовых газах от сжигания топлив с Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> и V<sub>2</sub>O<sub>5</sub> [2] и адгезивной прочности оксидной плёнки на внутренней поверхности труб энергоблоков с нейтрально-кислородным водным режимом.

К недостаткам стали марки ДИ59 по сравнению со сталью марки 12Х18Н12Т следует отнести пониженную в 1,6 – 1,7 раза жаростойкость в воздушной среде [2], повышенную склонность к наклёпу и образованию σ-фазы. Несмотря на перечисленные недостатки, для пароперегревателей котлов, эксплуатирующихся даже непродолжительное время на мазуте, разработчики оборудова-

ния начали часто отдавать предпочтение стали марки ДИ59.

Так как пароперегреватели мощных энергетических котлов работают в условиях тепловой неравномерности [3] и ползучести металла [4], разрабатываемая инструкция должна базироваться на зависимости эквивалентной температуры эксплуатации от структурных превращений в металле и наработка труб, а также на зависимости расчётного ресурса от допускаемого напряжения в металле и эквивалентной температуры эксплуатации труб. Последняя зависимость является по существу производной от предела длительной прочности металла. Информация о структурных изменениях и напряжениях в длительно работающем металле должна определяться путём лабораторных исследований вырезанных образцов труб. Схожая инструкция была разработана в ВТИ для пароперегревателей из стали марки 12Х18Н12Т [4].

Средние значения предела длительной прочности образцов стали марки ДИ59 в интервале напряжений от 75 до 191 МПа приведены в [1, 5]. (Заметим, что значения в [1] взяты из [5] с неточностями.) Однако пароперегреватели современных котлов до- и сверхкритического давления эксплуатируются в области напряжений существенно меньше 75 МПа, где предел длительной прочности стали марки ДИ59 не изучался. Экстраполяция данных из [1, 5] в неисследованную область рабочих напряжений может быть сопряжена с существенной погрешностью. Более того, массовое повреждение в виде коррозионного растрескивания металла труб ширмового пароперегревателя и конвективного пароперегревателя высокого давления на этапе гидравлического испытания котла типа ТПЕ-216М Харанорской ГРЭС [6] из-за высокой твёрдости стали марки ДИ59, не соответствующей аустенизированному состоянию, порождает со-

<sup>1</sup> Богачев Владимир Алексеевич: bogachev.vti@rambler.ru



Рис. 1. Образец для испытания металла труб на длительную прочность

мнение в стандартном пределе длительной прочности металла таких труб [5].

Средние значения предела длительной прочности используются при расчёте ресурса пароперегревателей на этапе проектирования котла. Разрабатываемая инструкция по эксплуатационному контролю должна основываться на фактических данных для минимизации погрешности определения остаточного ресурса. Экспериментальному исследованию предела длительной прочности стали марки ДИ59, из которой изготовлены трубы ширмового пароперегревателя (ШПП), конвективного пароперегревателя высокого давления (КПП ВД) и конвективного пароперегревателя низкого давления (КПП НД) котла типа ТПЕ-216М Харанорской ГРЭС, и посвящена настоящая статья.

Трубы номинальным диаметром 32/24, 36/26 и 60/50 мм для ШПП, КПП ВД и КПП НД соответственно были изготовлены в ЗАО "Никопольский завод нержавеющих труб". Характеристики металла труб в исходном состоянии приведены в табл. 1.

Массовое содержание химических элементов, за исключением углерода, серы и фосфора, определено с помощью электронного сканирующего микроскопа фирмы TESCAN, оснащённого приставкой для микроанализа X-Max Oxford Instruments. Концентрации углерода, серы и фос-

фора получены с использованием газоанализатора Icarus G4. Среднее квадратичное отклонение находилось в диапазоне от  $\pm 0,001$  до  $\pm 0,78\%$  в зависимости от химического элемента. Номер (размер) зерна определён с помощью микроскопа при 100-кратном увеличении [7] на поперечных шлифах, приготовленных в соответствии с [8] и подвергнутых травлению реактивом, состоящим из 10 мл азотной кислоты плотностью 1,4 г/см<sup>3</sup>, 20 мл соляной кислоты плотностью 1,19 г/см<sup>3</sup>, 20 мл глицерина, 10 мл 30%-ной перекиси водорода. Твёрдость металла измерена на поперечных шлифах в середине стенки, вблизи внутренней и наружной поверхности труб с использованием твердомера Woolpert Instruments 452 SVD при нагрузке 10 кг.

Из табл. 1 следует, что металл всех труб по химическому составу соответствует стали марки ДИ59 [1].

Номер зерна и твёрдость металла труб из стали марки ДИ59 в [1] не регламентируются. Однако, согласно [6], твёрдость больше 195 HV – признак упрочнения металла пластической деформацией по причине некачественной аустенитации в организации – изготовителе труб. В соответствии с современными представлениями [9], аустенит с малым размером зерна и высоким уровнем пластической деформации обладает низкой термической стабильностью, при эксплуатации в нём происходит интенсивное выделение вторичных фаз ( $\sigma$ -фаза,  $M_{23}C_6$ ), содержащих хром. Эти факторы приводят к разупрочнению металла.

Минимальный размер зерна и максимальная твёрдость обнаружены в металле трубы диаметром 32/24 мм, и, как показано далее, металл именно такой трубы характеризуется низким пределом длительной прочности. Обратим внимание, что по росту количества ниобия в металле трубы располагаются в следующем порядке: 32/24, 60/50, 36/26 мм. Содержание ниобия, по-видимому, также влияет на интенсивность разупрочнения стали марки ДИ59.

Расчётная температура пара на выходе КПП ВД и КПП НД составляет 565°C. Максимальное расчётное приведённое напряжение в металле труб ШПП, КПП ВД и КПП НД равно 58, 51 и

Таблица 1  
Характеристики металла труб

Диаметр трубы, мм	Массовое содержание элемента в металле, %								Номер зерна	Твёрдость по Виккерсу, HV
	C	Si	Mn	Cr	Ni	Fe	Cu	Nb		
32/24	0,09	2,06	13,27	12,40	2,24	Основа	2,00	0,54	6 – 7	197 – 207
36/26	0,10	2,17	13,52	12,27	2,10	Основа	1,99	0,95	4	156 – 181
60/50	0,09	2,03	13,54	12,44	2,18	Основа	2,01	0,73	4	146 – 165

Примечание. Содержание серы и фосфора значительно меньше 0,02 и 0,03% соответственно.

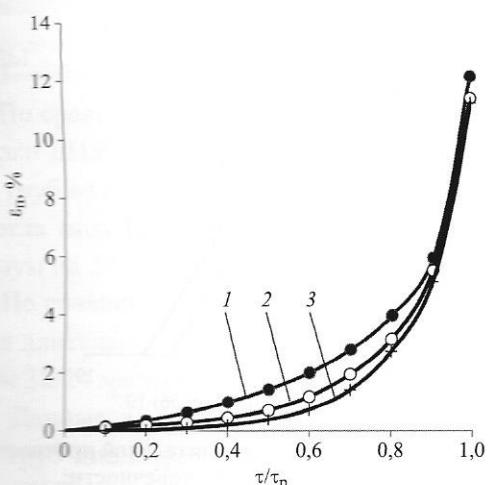


Рис. 2. Графики зависимости относительной деформации ползучести стали марки ДИ59 при 80 МПа и 750°C от доли исчерпания ресурса:

1, 2, 3 – трубы диаметром 32/24, 36/26, 60/50 мм соответственно

16 МПа соответственно (различные значения обусловлены неодинаковым давлением пара в паропреревателях). Режим испытания металла на длительную прочность выбран согласно рекомендациям [10] и опыту работы ВТИ со сталью марок 12Х18Н12Т и ДИ59. Эксперименты проведены при температурах 700 и 750°C и напряжениях 40, 60 и 80 МПа. Металл трубы диаметром 32/24 мм испытан дополнительно при напряжении 30 МПа.

Испытание стали марки ДИ59 на длительную прочность проведено с помощью машины ATS 2330 СС-230. Разность температур по длине образцов  $\pm 0,1^\circ\text{C}$ , погрешность приложенной нагрузки не более 0,5%, погрешность определения деформации ползучести не более 0,2 мкм, изгиб образца из-за несоосности приложенной нагрузки не более 4%. Деформация ползучести и температура металла фиксировались в режиме реального времени.

Образцы для испытания изготовлены из труб в состоянии поставки. Образцы секторные, длина и ширина рабочей части 44,4 и 10 мм соответственно (рис. 1). Наружная и внутренняя поверхность образцов механически не обрабатывалась. Экстензометры для измерения деформации установлены на образцах с помощью винтов с коническими концами. Для недопущения внеконтрольного растяжения образцов при испытании использованы вильчатые захваты со смещённым центром тяжести сечения. Максимальная продолжительность испытания составила 8590 ч, число испытанных образцов – 14.

Графики зависимости относительной деформации ползучести  $\varepsilon_n$  стали марки ДИ59 от доли исчерпания ресурса  $\tau/\tau_p$  показаны на рис. 2. Видно, что первая и вторая стадии ползучести металла отсутствуют, скорость ползучести постоянно возрастает во времени. Если более точно, то продолжи-

Наружная поверхность образца



Рис. 3. Микроструктура и трещины ползучести после испытания стали марки ДИ59 на длительную прочность ( $\times 100$ )

тельность первой стадии оказалась не более  $0,02\tau_p$ . Все образцы разрушились со значительной деформацией на уровне 12%.

Микроструктура металла в зоне разрушения исследована на продольных шлифах, приготовленных в соответствии с [8] и подвергнутых травлению 10%-ным водным раствором щавелевой кислоты. Результаты показаны на рис. 3. Видно, что структура состоит из равноосных и неравноосных зёрен аустенита и вторичных фаз по границе и тelu зёрен. Трещины ползучести располагаются в плоскости, перпендикулярной вектору приложенных напряжений, начинаются на наружной поверхности образцов и распространяются по границам зёрен. Разрушение стали марки ДИ59 является классическим в результате исчерпания длительной прочности металла.

Современный подход к обобщению опытных данных по пределу длительной прочности заключается в определении зависимости напряжения испытания  $\sigma$  от параметра долговечности  $P(\tau_p)$ . Аппроксимирующее уравнение должно базироваться на элементах подобия для адекватного прогнозирования поведения металла в области напряжений и температур эксплуатации. В качестве параметра долговечности часто применяются следующие температурно-временные функции:

Ларсона – Миллера

$$P_{\text{Л-М}} = T(\lg \tau_p + 20); \quad (1)$$

И. И. Трунина [9]

$$P_T = T(\lg \tau_p - 2\lg T + a), \quad (2)$$

где  $T$  – абсолютная температура испытания, К;  $\tau_p$  – время до разрушения, ч;  $a$  – постоянная, для аустенитной стали марки 1Х18Н12Т равная 20,38.

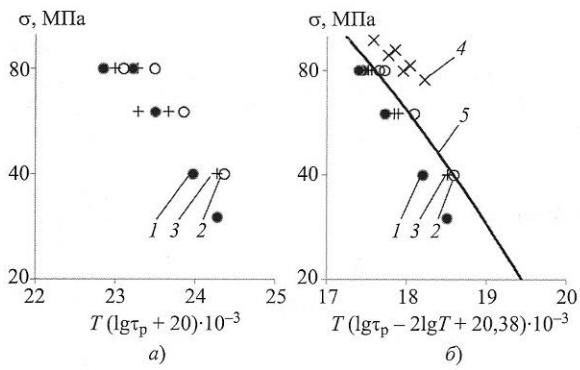


Рис. 4. Обработка результатов исследования предела длительной прочности стали марки ДИ59 с использованием параметров долговечности Ларсона – Миллера (а) и И. И. Трунина (б):

1, 2, 3 – трубы диаметром 32/24, 36/26, 60/50 мм соответственно; 4 – опытные данные стандарта для стали марки ДИ59 [5]; 5 – аппроксимационная кривая для стали марки 1X18H12T [9]

Результаты обработки опытных данных для стали марки ДИ59 с использованием обоих параметров долговечности показаны на рис. 4. Видно, что разброс результатов при использовании параметра (2) значительно меньше: при напряжении 80 МПа и температурах 750 и 700°C отношение значений параметра (1) находится в интервале от 1,012 до 1,017, а параметра (2) – в диапазоне от 0,997 до 1,004. Следовательно, параметр (2) в общем правильно характеризует вклад температуры во время до разрушения металла.

На рис. 4, б показан график зависимости предела длительной прочности стали марки 1X18H12T при 50%-ной вероятности разрушения из [9] и данные по пределу длительной прочности стали марки ДИ59 из [5]. Видно, что опытные данные для металла труб диаметром 36/26 и 60/50 мм из стали марки ДИ59 группируются вблизи зависимости для аустенитной хромоникелевой стали. По сравнению со сталью марки 1X18H12T, предел длительной прочности металла трубы диаметром 32/24 мм из стали марки ДИ59 ниже, причём преимущество хромоникелевой стали возрастает по мере увеличения параметра долговечности. Из рис. 4, б также следует, что, по сравнению с данными [5], предел длительной прочности стали марки ДИ59 согласно результатам исследований

Таблица 2

Значения постоянных в уравнении (3)

Диаметр трубы, мм	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>
32/24	19,39	21 079	0,8
36/26	19,02	21 208	3,6
60/50	20,28	22 491	6,4

Примечание. Усреднённые значения: *a* = 19,56; *b* = 21 593; *c* = 3,6.

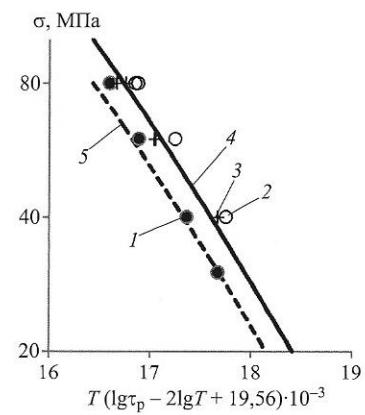


Рис. 5. Зависимость предела длительной прочности стали марки ДИ59 от параметра долговечности:

1, 2, 3 – трубы диаметром 32/24, 36/26, 60/50 мм соответственно; 4, 5 – результаты расчёта по уравнению (3) среднего по трубам и с отклонением на 20% в сторону уменьшения предела длительной прочности

авторов статьи как минимум на 20 – 30% меньше. Это расхождение вызвано, по-видимому, различными исходными свойствами изученного металла.

Опытные данные по пределу длительной прочности стали марки ДИ59 при температурах 700 и 750°C и напряжениях в интервале от 30 до 80 МПа аппроксимированы уравнением

$$T(\lg\tau_p - 2\lg T + a) = b - 2400\lg\sigma - c\sigma, \quad (3)$$

где  $\sigma$  – напряжение испытания, МПа; *a*, *b*, *c* – постоянные (их значения для металла труб в отдельности и усреднённые приведены в табл. 2).

Максимальное отклонение измеренных значений предела длительной прочности металла труб диаметром 32/24, 36/26, 60/50 мм от рассчитанных по уравнению (3) составляет 4,5; 2,3; 6,7% соответственно. Этот результат является основанием для расчёта допускаемого напряжения в металле с коэффициентом запаса, равным 1,25.

Графики зависимости среднего по трубам и с отклонением на 20% в сторону уменьшения предела длительной прочности стали марки ДИ59 показаны на рис. 5. Видно, что по росту предела длительной прочности стали марки ДИ59 трубы располагаются в следующем порядке: 32/24, 60/50, 36/26 мм.

Исследования стали марки ДИ59 на длительную прочность показали, что чем больше температура, напряжение и время испытания, тем больше количество  $\sigma$ -фазы в структуре металла. Химический состав, условия зарождения и эволюция  $\sigma$ -фазы, а также зависимость эквивалентной температуры эксплуатации от структурных превращений в стали марки ДИ59 будут темой следующей статьи.

## Выводы

1. По сравнению с данными стандарта для стали марки ДИ59, предел длительной прочности металла труб из стали марки ДИ59 пароперегревателей котла типа ТПЕ-216М Харанорской ГРЭС как минимум на 20 – 30% ниже.

2. По сравнению со сталью марки 12Х18Н12Т, предел длительной прочности металла трубы диаметром 32/24 мм из стали марки ДИ59 на 10 – 70% ниже. Данные для стали марки 1Х18Н12Т и металла труб диаметром 36/26 и 60/50 мм из стали марки ДИ59 близки.

3. По росту предела длительной прочности стали марки ДИ59 трубы располагаются в следующем порядке: 32/24, 60/50, 36/26 мм. Такое распределение можно объяснить размером зерна, твёрдостью и содержанием ниобия в металле.

4. Результаты исследования предназначены для разработки инструкции по определению остаточного ресурса пароперегревателей из стали марки ДИ59.

*Исследования выполнены с использованием оборудования ЦКП “Центр исследования конструкционных материалов теплоэнергетики нового поколения” ВТИ.*

## Список литературы

1. ТУ 14-3Р-55-2001. Трубы стальные бесшовные для паровых котлов и трубопроводов. Изменение № 2. М.: ГНЦ РФ “ЦНИИТМАШ”, 2001.
2. Основы контроля тепловой неравномерности пароперегревателей из аустенитных сталей с помощью ферритометра / Богачев В. А., Змиенко Д. С., Корнеев А. Е., Пищеченкова Т. П., Школьникова Б. Э. – Теплоэнергетика, 2012, № 4.
3. Богачев В. А., Таран О. Е. Влияние тепловой неравномерности на температуру и надёжность металла конвективных пароперегревателей. – Электрические станции, 2002, № 2.
4. СО 34.17.452-98. Методические указания о порядке проведения работ при оценке остаточного ресурса пароперегревателей котлов электростанций. М.: ВТИ, 1998.
5. ГОССД 116-88. Коррозионно-стойкая сталь 0Х13Г12С2Н2Д2Б (ДИ59). Условный предел длительной прочности при температурах 500...650°C. М.: Изд-во стандартов, 1989.
6. Богачев В. А., Пищеченкова Т. П., Школьникова Б. Э. Причина повреждения пароперегревательных труб из стали ДИ59 котла ТПЕ-216М Харанорской ГРЭС. – Электрические станции, 2013, № 5.
7. ГОСТ 5639-82. Стали и сплавы. Методы выявления и определения величины зерна.
8. ОСТ 34-70-690-96. Металл паросилового оборудования электростанций. Методы металлографического анализа в условиях электростанций.
9. Бугай Н. В., Березина Т. Г., Трунин И. И. Работоспособность и долговечность металла энергетического оборудования. М.: Энергоатомиздат, 1994.
10. Методические указания по определению характеристик жаропрочности и долговечности металла котлов, турбин и трубопроводов. М: ЦПТИ ОРГРЭС, 2004.

## Повреждения экранных труб барабанных котлов высокого давления вследствие повышенной кислотности питательной воды

• Беляков И. И.<sup>1</sup>, канд. техн. наук, ОАО “Научно–производственное объединение по исследованию и проектированию энергетического оборудования им. И. И. Ползунова” (НПО ЦКТИ), Санкт–Петербург

Установлено, что при значительном снижении pH котловой воды барабанных котлов высокого давления отмечаются повреждения экранных труб, носящие хрупкий характер.

**Ключевые слова:** барабанные котлы высокого давления, экранные трубы, водородное охрупчивание, низкие значения pH котловой воды.

Основной особенностью барабанных котлов и их преимуществом, по сравнению с прямоточными котлами, является возможность получения пара более высокого качества, чем качество питательной воды. Такая возможность обусловлена организацией эффективного разделения пароводяной смеси в барабане котла.

<sup>1</sup> Беляков Иван Иванович: beliakovivan@yandex.ru

Из-за различной растворимости примесей, содержащихся в паровой и водяной фазах пароводяной смеси, концентрация их в котловой воде значительно выше, чем в питательной воде. Это позволяет путём организации непрерывной продувки, т.е. постоянного вывода части воды из барабана, удалить из тракта котла часть растворимых соединений.