

## ОТЗЫВ

официального оппонента Попова А.Б. на диссертацию Ношин М.А. «Исследование ресурсных характеристик с разработкой методики определения долговечности котельных пароперегревателей из стали марки 10X13Г12БС2Н2Д2 (ДИ59)» на соискание учёной степени кандидата технических наук»

Известно, что металл пароперегревателей котлов ТЭС мощных энергоблоков работает в условиях высоких температур и давлений, на которые дополнительно накладываются температурные разверки, термоциклирование, а также особенности, связанные с наличием в топливе серы и ванадия. Известно также, что в условиях сжигания угля и мазута традиционная хромоникелевая сталь пароперегревателей 12X18Н12Т нередко не обеспечивает надёжности из-за недостаточной жаростойкости и низкой прочности защитной оксидной плёнки. Повреждения этой плёнки нередко были причинами повреждений пароперегревателей уже после 60 – 80 тыс. часов эксплуатации. После ряда удачных промышленных экспериментов на мазутных и угольных котлах в 2001 г. РАО «ЕЭС России» рекомендовало заменить сталь 12X18Н12Т в пароперегревателях на аустенитную хромомарганцевую сталь 10X13Г12БС2Н2Д2 (ДИ59), разработанную в АО «НПО «ЦНИИТМАШ». Её ключевой особенностью была повышенная жаростойкость и адгезивная прочность оксидной плёнки. В результате на ряде электростанций страны такая замена была выполнена и эти пароперегреватели в настоящее время продолжают эксплуатироваться. Их максимальная текущая наработка составляет на сегодняшний день порядка 180 – 190 тыс. часов.

Вместе с тем, следует отметить, что замена стали пароперегревателей не сопровождалась необходимыми инструкциями по входному и эксплуатационному контролю, которые отражали бы в полной мере основные эксплуатационные особенности стали ДИ59. В частности, следствием этой неподготовленности стали массовые повреждения труб ширмовых и конвективных пароперегревателей, обнаруженные при гидравлических испытаниях котлов новых энергоблоков, например, на Черепетской и Харанорской ГРЭС. ОАО «ВТИ» установило причину повреждения этих труб и разработало инструкцию по входному контролю пароперегревателей из стали ДИ59. Далее возникли новые повреждения при эксплуатации ширмовых пароперегревателей на Кармановской и Новочеркасской ГРЭС и связанные с ними проблемы установления причин этих повреждений, которые потребовали более глубокой информации об особенностях стали ДИ59.

Обследования пароперегревателей из широко распространенных сталей 12X1МФ, 12X2МФСР и 12X18Н12Т показали, что надёжность труб обеспечивается только тогда, когда для каждой стали имеется обоснованная объективными признаками методика оценки долговечности (остаточного ресурса). Основными признаками этого, как правило, являются

индивидуальные особенности структуры металла труб. Эти методики позволяют определить причины повреждений, выявить и своевременно заменить трубы в состоянии предразрушения, обоснованно выбрать сроки частичной или полной замены пароперегревателей. Для пароперегревателей из стали ДИ59 такая методика на момент внедрения и до настоящего времени отсутствовала.

Согласно современным научным представлениям, методика оценки состояния металла пароперегревателей должна базироваться следующих на зависимостях:

- эквивалентной температуры эксплуатации от содержания вторичной фазы в структуре металла;
- времени до разрушения от напряжения в металле и эквивалентной температуры эксплуатации.

Необходимые и достоверные данные для этих зависимостей могут быть получены только комплексными лабораторными высокотемпературными испытаниями металла и металлографическими исследованиями образцов реальных труб, выполненных из стали рядовых плавок.

Исходя из вышесказанного тема диссертации **актуальна**, так как её целью является повышение надёжности пароперегревателей котлов из стали ДИ59 (и, как следствие, – котлов в целом) путём оценки их фактического состояния и выявления труб, исчерпавших ресурс надёжной эксплуатации.

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, двух приложений и списка использованной литературы из 84 наименований.

**Во введении** обоснована актуальность, научная и практическая значимость работы, формулируется цель и задачи исследования.

**В первой главе** на основании анализа текущего состояния проблемы для определения эквивалентной температуры эксплуатации выбирается содержание  $\sigma$ -фазы в стали ДИ59.

Сделанный выбор обоснован, поскольку только этот параметр отвечает основному требованию объективной оценки состояния аустенитной стали, работающей в условиях высоких напряжений в рабочем диапазоне температур поскольку известно, что содержание  $\sigma$ -фазы непрерывно и достаточно интенсивно растёт с увеличением температуры и длительности эксплуатации.

По ряду объективных признаков, выявленных при практической эксплуатации пароперегревателей, установлена необходимость уточнения характеристик длительной прочности стали ДИ59 в диапазоне рабочих напряжений и температур. Несмотря на наличие нормативной информации по этому показателю, его дополнительное исследование представляется весьма актуальным, поскольку практика эксплуатации показывает, что реальная технология производства труб из стали ДИ59 не столь совершенна, как та, которая использовалась для получения нормативных данных. При этом для

достоверной оценки характеристик длительной прочности обязательным условием является исследование образцов металла, изготовленного из труб промышленной серии.

**Во второй главе** осуществляется выбор представительных образцов металла для проведения исследований. Известно, что даже один пароперегреватель обычно изготавливается из стали нескольких плавок с несколько отличающимися свойствами. Поэтому для повышения объективности было принято решение выполнять исследования на образцах, изготовленных из металла трёх типоразмеров промышленных труб в состоянии поставки: из ширмового пароперегревателя второй ступени, конвективного пароперегревателя высокого давления и конвективного пароперегревателя низкого давления третьей ступени котла ТПЕ-216М. Принятое решение позволяло учесть влияние допустимой разнородности химического состава и исходной структуры металла на результаты исследований.

Выбор геометрического типа образцов для проведения испытаний был логично аргументирован минимальным воздействием на структуру и свойства металла при их изготовлении.

Весьма ценно, что изучение структурных превращений выполнялось как в условиях высокотемпературного старения (585 – 750 °С) без воздействия напряжений, так и с воздействием напряжений (30 – 80 МПа) при испытаниях на ползучесть и длительную прочность, что позволяло оценить влияющие факторы в отдельности и совокупности. Следует отметить, что как диапазон исследованных температур, так и диапазон исследованных напряжений, соответствуют диапазонам этих параметров при эксплуатации реальных пароперегревателей.

Для проведения высокотемпературных испытаний и исследования структуры металла использовалась современная научная база: испытательные машины, печи, приборы и методики, что в совокупности позволило обеспечить высокую точность полученных данных и минимизировать количество испытанных образцов без ущерба для достоверности результатов.

**В третьей главе** изложены основные результаты исследований  $\sigma$ -фазы в стали ДИ59. В частности, представлена кинетика изменения количества и химического состава  $\sigma$ -фазы в зависимости от температуры, напряжения и исходной структуры металла. Ценность этого раздела представляет также информация о химическом составе  $\sigma$ -фазы, которая была получена впервые.

Кроме того, впервые было показано, что содержание  $\sigma$ -фазы в металле, помимо предполагаемой изначально зависимости только от температуры и времени эксплуатации, является также функцией размера зерна и напряжения в металле.

Весьма показательным является также обнаруженное автором совпадение химического состава  $\sigma$ -фазы в металле образцов, испытанных в

лабораторных условиях, и образцов пароперегревательных труб после длительной (на уровне 176 тыс. часов) эксплуатации. Это свидетельствует о правильном выборе режимов высокотемпературного моделирования условий эксплуатации.

На основании обобщения полученных экспериментальных данных предложены уравнения для расчёта эквивалентной температуры в интервале рабочих температур 585 – 650 °С и дополнительно при более высоких температурах 650 – 700 °С, что позволяет оценить влияние длительности перегрева сверх проектной температуры и, соответственно, остаточный ресурс труб.

**В четвёртой главе** приводятся результаты испытаний металла образцов из стали ДИ59 на длительную прочность. Установлено, что характер разрушения образцов типичен для исчерпания ресурса при ползучести. Этот факт подтверждает подобие процессов разрушения металла в выбранных условиях лабораторных испытаний и при длительной эксплуатации труб.

Обнаружено, что в разных плавках стали ДИ59 одинаковому исчерпанию ресурса соответствуют практически одинаковые значения деформации ползучести. Выявленная закономерность позволяет прогнозировать время до разрушения по накопленной деформации ползучести и тем самым существенно сократить длительность испытаний металла труб на долговечность в диапазоне рабочих напряжений.

Ценным является выбор температурно-временного параметра для обобщения данных по длительной прочности стали ДИ59 в области рабочих напряжений. Показано, что параметр И.И. Трунина намного точнее описывает влияние температуры на время до разрушения, чем параметр Ларсона – Миллера.

Установлено, что по показателю длительной прочности сталь ДИ59 не имеет преимуществ по сравнению со сталью 12Х18Н12Т. Незначительное отклонение опытных данных от результатов расчёта по интерполяционному уравнению для этого показателя позволило использовать коэффициент запаса 1,25 для оценки допускаемого напряжения в металле.

Автором предложено обобщённое уравнение для расчёта времени до разрушения стали ДИ59 в области рабочих напряжений.

**В пятой главе** на основании обобщения всех полученных данных автором предложена методика расчёта остаточного ресурса пароперегревателей из стали ДИ59. Ценным является то, что методика достаточно проста и может использоваться лабораториями металлов и отделами технической диагностики ТЭС, имеющими общедоступную лабораторную базу.

Разработанная методика прошла апробацию применительно к пароперегревателю из стали ДИ59 котла ТГМП-114 Костромской ГРЭС после приблизительно 100 и 176 тыс. часов эксплуатации.

Представляет также практический интерес тот факт, что при проведении апробации выявлена незначительное (на уровне 3 °С) превышение эквивалентной температуры, характеризующее влияние колебаний температуры пара на ускорение структурных изменений в металле после значительных сроков эксплуатации. Этот факт свидетельствует о достаточно высокой точности определения эквивалентной температуры эксплуатации по разработанной методике.

**В заключении** сформулированы основные научные положения диссертации, которые соответствуют полученным результатам.

**В приложениях** содержатся акты сдачи-приёмки, подтверждающие внедрение методики.

**Список использованной литературы** в полной мере характеризует состояние проблемы котельных пароперегревателей из аустенитных сталей.

**Рассматриваемая работа обладает признаками научной новизны, которую рецензент видит в следующем:**

- для стали ДИ59 впервые установлены зависимости содержания  $\sigma$ -фазы от величины зерна, температуры, напряжения и времени эксплуатации;
- впервые предложены уравнения для определения эквивалентной температуры эксплуатации стали ДИ59 по содержанию  $\sigma$ -фазы;
- получены новые уточненные данные по длительной прочности металла труб из стали ДИ59 в области рабочих напряжений и предложено уравнение для расчёта времени до разрушения по эквивалентной температуре и напряжению в металле;
- разработана удобная методика практического определения остаточного ресурса пароперегревателей из стали ДИ59;
- для стали ДИ59 впервые определён химический состав  $\sigma$ -фазы.

**Практическую значимость** работы рецензент видит в разработанной и внедрённой методике, предназначенной для повышения надёжности пароперегревателей котлов из стали ДИ59 путём оценки их фактического состояния и выявления труб, исчерпавших ресурс надёжной эксплуатации.

**Достоверность** научных положений диссертации обоснована использованием сертифицированной испытательной и измерительной базы, апробированных методик экспериментальных исследований, применением при обобщении опытных данных фундаментальных физических законов, удовлетворительным согласованием полученных данных с известными опытными данными, практическим подтверждением результатов лабораторных исследований.

Основные научные положения диссертации изложены в шести печатных работах, три из которых опубликованы в журнале, рекомендованном ВАК РФ.

Содержание автореферата соответствует основным положениям диссертации.

Автореферат и диссертация оформлены аккуратно в соответствии с рекомендациями ВАК РФ.

**Замечания и вопросы по содержанию автореферата и диссертации.**

1. Во введении и обзоре литературы уделено мало внимания имеющимся негативным публикациям о стали ДИ59 и их анализу.

2. В главе 1 говорится о необходимости вырезки представительных образцов для оценки остаточного ресурса. Однако сама практическая сторона выделения именно представительных образцов на реальных котлах затронута недостаточно подробно.

3. Примечание 3 к таблице 2.2 дано некорректно.

4. В главе 2 следовало бы с большей определенностью обозначить причины исходных недостатков, выявленных в трубах, использованных для проведения экспериментальной части работы, и их пригодность для проведения обобщений.

5. Не обоснован выбор первой температуры для испытаний на высокотемпературное старение (стандартный ряд 600, 650, 700 °С, у автора - 585, 650, 700 °С).

6. В таблице 2.6 допущена ошибка: вместо 1200 должно быть 12000 часов.

7. В главе 3 не раскрыт смысл величины температурного эквивалента напряжений.

8. Не вскрыт смысл определения химического состава  $\sigma$ -фазы в контексте основной цели работы.

9. Результаты испытания стали ДИ59 на длительную прочность в главе 4 оказались на 20 – 30 % ниже показателей, приведённых в нормативной документации. Кроме вывода о влиянии размера зерна и содержания ниобия в металле, есть ли ещё объяснение этому несоответствию?

10. В главе 5 не обосновано применение магнитной ферритометрии для выбора представительных вырезок из труб.

Сделанные замечания не снижают ценности рассматриваемой работы. Диссертация представляет собой научно-квалификационную работу, в которой на основании выполненного автором исследования ресурсных характеристик получены результаты, позволяющие повысить надёжность котлов ТЭС с пароперегревателями из стали ДИ59. Работа соответствует пунктам 1 и 5 паспорта специальности 05.14.14 – «Тепловые электрические станции, их энергетические системы и агрегаты» и отвечает критериям, установленным Положением о порядке присуждения учёных степеней, утверждённым постановлением Правительства Российской Федерации № 842 от 24 сентября 2013 года (с изменениями № 335 от 21 апреля 2016 года).

Считаю, что Ношин М.А. заслуживает присуждения учёной степени кандидата технических наук.

Главный эксперт по надёжности и ресурсу  
тепломеханического оборудования, к.т.н.



Попов А.Б.

115093, г. Москва, Павловская ул., д.7, корп. 1, «Энел Россия»

Тел.: 968-732-68-22, 910-441-70-63.

E-mail: [Alexander.popov@enel.com](mailto:Alexander.popov@enel.com)

Подпись Попова Александра Борисовича заверяю  
начальник отдела кадров и кадрового администрирования

Жидкова А.А.

