УДК 621.791.05:620.179

ОЦЕНКА РАБОТОСПОСОБНОСТИ И РЕСУРСА МЕТАЛЛА ПОТЕНЦИАЛЬНО-ОПАСНОГО ОБОРУДОВАНИЯ ТЭС ПОСЛЕ ДЛИТЕЛЬНОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ СПЕКТРАЛЬНО-АКУСТИЧЕСКИМ МЕТОДОМ

Абабков Николай Викторович,
кандидат техн. наук, доцент,e-mail:n.ababkov@rambler.ru

Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева, 650000, Россия, г. Кемерово, ул. Весенняя, 28

Аннотация

Представлена принципиально новая методология оценки работоспособности и ресурса металла потенциально-опасного оборудования ТЭС, основанная на выявлении закономерностей изменения структурно-фазового состояния и полей внутренних напряжений в длительно работающем металле и в сварных соединениях спектрально-акустическим методом. Даны сведения об изменении структурного состояния металла в процессе длительной эксплуатации теплоустойчивых сталей. Приведены зависимости критериев от величины локальных полей внутренних напряжений кристаллической решетки. Представлена связь между комплексным критерием и длительной прочностью теплоустойчивых сталей.

Ключевые слова: *спектрально-акустический метод, структурно-фазовое состояние, поля внутренних напряжений, длительная прочность, сварные соединения, теплоустойчивые стали, паропроводы.*

Вопросам безопасной эксплуатации технических устройств опасных производственных объектов (ТУОПО) во всем мире уделяется повышенное внимание. В России эта проблема особенно актуальна, так как по официальным данным Ростехнадзора на 01.01.2015 г. [1] средний износ технических устройств составляет 43,7 % (табл. 1), однако для отдельных групп оборудования более 60 % промышленного оборудования отработало расчетный срок, а в энергетике – более 80 %. Повреждения ТУОПО может привести и приводит к авариям и техногенным катастрофам с человеческими жертвами. За последние 10 лет можно привести достаточное количество примеров [2]. С целью оценки технического состояния потенциально-опасного оборудования в России была создана система экспертизы промышленной безопасности (ЭПБ). Одной из составляющих ЭПБ является диагностирование и неразрушающий контроль (НК) основного металла и сварных соединений. Использование разрушающих методов для оценки микроструктуры и механических характеристик при ЭПБ требует вырезки образцов для испытаний из действующего оборудования и, соответственно, эти методы практически не применяется. Поэтому результаты НК являются определяющими при ЭПБ.

Существующий в настоящее время подход к оценке работоспособности металла ТУОПО отличается большим многообразием руководящих документов, методов, методик и средств исследований и испытаний. Все это значительно затрудняет процесс диагностирования и не всегда позволяет правильно оценить состояние технических устройств и, следовательно, надежно определять ресурс и прогнозировать срок их службы. НК в задачах оценки ресурса и работоспособности ТУОПО ориентированы главным образом, *на выявление уже существующих и развивающихся очагов разрушения, они не дают возможности выявлять стадии зарождения микроповреждений и оценивать характер изменения структурно-фазового состояния металла.* Проблема усугубляется отсутствием научно обоснованной концепции надежного прогнозирования работоспособности длительно работающего металла.

Поэтому возникла необходимость разработки нового методологического подхода к оценке рабо-

Таблица 1 Средний износ технических устройств по состоянию на 01.01.2015 г.
(по данным Ростехнадзора)

Наименование технических устройств	Общее количество технических устройств, ед.	Отработали нормативный срок службы, ед.	Средний процент износа, %
Паровые и водогрейные котлы	71016	35818	50,4
Сосуды, работающие под давлением	302037	131031	43,4
Трубопроводы пара и горячей воды	34068	13773	40,4
Итого:	407121	177922	43,7

тоспособности металла ТУОПО, основанного на выявлении закономерностей эволюции структурно-фазового состояния и изменения физико-механических характеристик неразрушающими физическими методами исследования.

В настоящее время существует большое число теоретических и экспериментальных работ по оценке ресурса работоспособности, надежности, долговечности и других характеристик длительно работающего металла потенциально-опасного оборудования. Среди них, особо следует отметить фундаментальные работы школ академиков Махутова Н. А. [3] и Митенкова Ф. М. [4].

Махутов Н. А. и Гаденин М. М. рассматривают вопросы технической диагностики остаточного ресурса и безопасности с точки зрения оценки рисков возникновения опасных состояний, которые определяются как произведение вероятностей их возникновения на соответствующие ущербы, связанные с запасами по прочности, устойчивости, ресурсу, живучести в статистической или детерминированной постановке [4]. Другими словами анализу методами математической статистики и теории вероятности подвергается большой объем данных по тому или иному оборудованию. К расчету прибавляется анализ возможных ущербов от аварий оборудования. В соответствии с этими расчетами осуществляется ранжирование объектов по классам опасности.

Митенковым Ф.М. и соавторами [6] разработана концепция оценки остаточного ресурса оборудования и систем ядерных энергетических установок. В основе данной концепции лежит определение фактической модели эксплуатации (ФМЭ) и физического закона накопления повреждений ω:

$$\omega = \sum \frac{\Delta V}{V_f}; \qquad (1)$$

где V – объемная доля дефектов, V_f – критическая объемная доля дефектов.

Из (1) следует, использование физического закона накопления повреждений учитывает лишь долю дефектов, которую позволяют обнаружить современные методы и средства неразрушающего контроля. В концепции оценки остаточного ресурса оборудования и систем ядерных энергетических установок речь не идет об изменении структурно-фазового состояния металла в процессе длительной эксплуатации.

Как известно, ни одна методика, ни один алгоритм расчета остаточного ресурса не учитывают изменения, которые происходят в структуре металла в процессе длительной эксплуатации технического устройства опасного производственного объекта. В качестве примера рассмотрен расчет ресурса барабанов котлов высокого давления. Согласно нормативной документации [5] ресурс барабанов котлов высокого давления определяется по величине накопленной поврежденности металла (2):

$$A = 2\frac{n_{\text{по}}}{N_{\text{по}}} + 0,08\frac{n_{\text{по}}}{N_{\text{ту}}} + \frac{n_{\text{по}}}{N_{\text{ги}}} + \frac{40n_{\text{по}} + \omega\tau}{N_{\text{т}}}, \qquad (2)$$

где $n_{\text{по}}$ – число пусков-остановов барабана; $N_{\text{по}}$, $N_{\text{ту}}$, $N_{\text{ги}}$, $N_{\text{т}}$ – число циклов для режимов пусков-остановов, тепловых ударов, гидроиспытаний и температурных колебаний соответственно; ω – частота термоциклирования барабана в период работы котла на стационарном режиме; τ – наработка барабана.

Из выражения (2) видно, что при продлении ресурса барабанов котлов высокого давления учитывается только факторы, относящиеся к режимам эксплуатации оборудования. Структурные изменения в металле при длительной эксплуатации не учитываются.

Очевидно, что общее время эксплуатации любого оборудования складывается из времени наработки до текущего состояния $\tau_{тек}$ и остаточного времени до разрушения $\tau_{ост}$ (остаточный ресурс):

$$\tau_{п.с} = \tau_{тек} + \tau_{ост} \qquad (3)$$

При этом текущее состояние объекта можно описать как функцию, зависящую от проведенных ремонтов $K_{рем}$, наличия производственных и (или) эксплуатационных дефектов $K_{деф}$, условий монтажа $K_{монт}$ (4):

$$\tau_{тек} \rightarrow f(K_{рем}, K_{деф}, K_{монт}) \rightarrow \tau_{ост} \qquad \textbf{(4)}$$

По текущему состоянию объекта оценивается остаточный ресурс $\tau_{ост}$ (5). Нами предлагается учитывать при оценке остаточного ресурса процессы, происходящие в структуре металла $K_{стр}$, а также характеристики, измеряемые акустическими методами контроля $K_{акуст}$:

$$\tau_{тек} \rightarrow f(K_{рем}, K_{деф}, K_{монт}, K_{стр}, K_{акуст}) \rightarrow \tau_{ост} \qquad (5)$$

Предполагается, что структурный коэффициент будет учитывать такие параметры как: поля внутренних напряжений $\sigma_{вн}$, среднюю ρ и скалярную $\rho_{\pm}$ плотность дислокаций, средний размер зерен $d_{зер}$, параметры кристаллической решетки и др.:

$$K_{стр} = f(\sigma_{вн}, \tau, \rho_{\pm}, \rho, d_{зер}, \mu) \qquad (6)$$

В процессе длительной эксплуатации потенциально-опасного оборудования в сложных напряженных условия, зачастую в агрессивных средах, в основном металле и в сварных соединениях происходят различные физико-химические процессы, вызывающие ползучесть, усталость, коррозию и т.д. [6, 7]

При локальной перестройке дислокационной структуры во время эксплуатации ТУОПО происходит образование новых источников дальнодействующих полей внутренних напряжений и изменение этих полей характеризует работоспособность металла. В исследованиях [8, 9] с применением

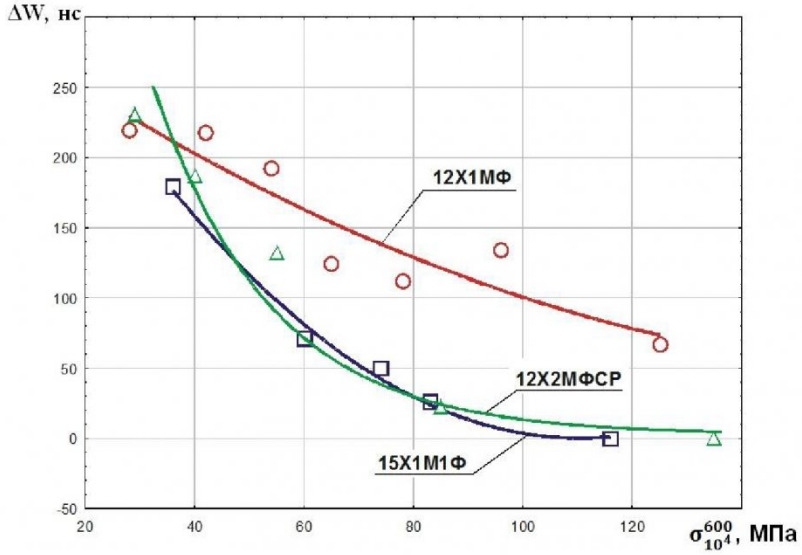

Рис. 1. Влияние длительной прочности теплоустойчивых сталей на время задержки ПАВ

электронной микроскопии доказано, ***что для конструкционных сталей величина локальных полей внутренних напряжений и характер распределения их источников является важнейшим показателем работоспособности и оценки ресурса потенциально-опасного оборудования.***

Отсюда, разработка методов НК для оценки локальных полей внутренних напряжений – важнейшая проблема, которая была частично решена акустическими методами. Для решения поставленных задач в Нижнем Новгороде по нашему заказу была разработана принципиально новая акустическая система «АСТРОН», которая соответствует концепции развития диагностики и прогнозирования разрушения сварных конструкций.

Авторам [8–10] удалось доказать, что время задержки поверхностных акустических волн (ПАВ) является надежным параметром, характеризующим изменение локальных полей внутренних напряжений.

Так, например, с увеличением величины локальных внутренних полей напряжений (средней кривизны-кручения кристаллической решетки) происходит рост времени задержки ПАВ, что объясняется ослаблением ультразвуковых колебаний на источниках (концентраторах) внутренних полей напряжений.

На основе ряда исследований установлено (рис. 1), что с уменьшением длительной прочности теплоустойчивых сталей происходит рост времени задержки ПАВ, вызванный увеличением плотности источников внутренних полей напряжений. Максимальному времени задержки ПАВ соответствуют минимальная длительная прочность.

Результаты исследований показывают высокую чувствительность спектрально-акустического метода к определению изменений параметров микроструктуры (плотности дислокаций, средней амплитуды кривизны-кручения и плотности экстинкционных контуров).

Таким образом, применение спектрально-акустического метода позволило разработать комплексный критерий предельного состояния длительно-работающего металла

$$K_f = \frac{W_\tau - W_0}{W_f - W_0} \cdot \frac{W_f}{W_\tau} \cdot \gamma ,$$

который определяется временем задержки ПАВ в металле с исходным состоянием структуры (W_0), в металле, исчерпавшем свой ресурс работоспособности (W_f) и в контролируемом металле ($W\tau$), где γ – коэффициент, учитывающий материал контролируемого элемента. Комплексный критерий предельного состояния (ККПР) апробирован на ряде разрушенных элементов энергооборудования. Экспериментально доказано, что при $K_f \geq$ 0,7 металл достигает предельного состояния.

ККПР применен при ЭПБ длительно-работающих и разрушенных гнутых участков паропроводов из сталей 20, 12Х1МФ, 15Х1М1Ф и труб поверхностей нагрева из стали 12Х2МФСР котлоагрегатов ряда электростанций Сибири. Получено хорошее совпадение результатов различных испытаний и расчетов с акустическими измерениями.

Для сварных соединений паропроводов ТЭС проводили комплекс специальных исследований. С применением методов электронной микроскопии изучали структуру, фазовый состав и внутренние напряжения в сварных соединениях из стали 20 и 12Х1МФ [11, 12] после различных сро-

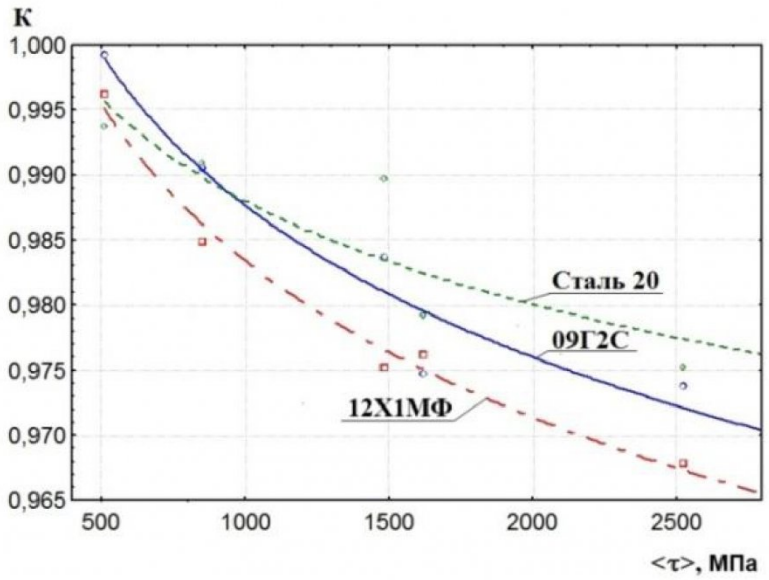

Рис. 2. Связь критерия оценки ресурса сварных соединений (К) с амплитудой локальных (моментных) напряжений (τ)

ков эксплуатации и поврежденные соединения.

После комплекса исследований было установлено, что в сварных соединениях паропроводов поля внутренних напряжений оказывают существенное влияние на акустические характеристики, в частности на время задержки ПАВ. При исследовании сварных соединений была обнаружена анизотропия акустических характеристик. Замеряли время задержки ПАВ на поверхности сварного соединения в исходном состоянии и на поверхности исследуемого (контролируемого) сварного соединения (после определенного срока эксплуатации). Под исходным состоянием сварного соединения понимается сварное соединение, выполненное из тех же основных и сварочных материалов по той же технологии, что и контролируемое.

Разработан критерий оценки ресурса сварных соединений (K), который выражается формулой

$$K = \frac{R_{01} \cdot R_{02}}{R_{t01} \cdot R_{t02}} \qquad (8)$$

где R_{01} – среднестатистическое время задержки ПАВ, поляризованной вдоль сварного соединения (исходное состояние), нс;

R_{t01} – среднестатистическое время задержки ПАВ, поляризованной вдоль сварного соединения контролируемого элемента, нс;

R_{02} – среднестатистическое время задержки ПАВ, поляризованной перпендикулярно сварному соединению (исходное состояние), нс;

R_{t02} – среднестатистическое время задержки ПАВ, поляризованной перпендикулярно сварному соединению контролируемого элемента, нс.

Установлена зависимость критерия от амплитуды локальных (моментных) внутренних напряжений (рис. 2). Критерий апробирован на ряде электростанций Кузбассэнерго. Экспериментально

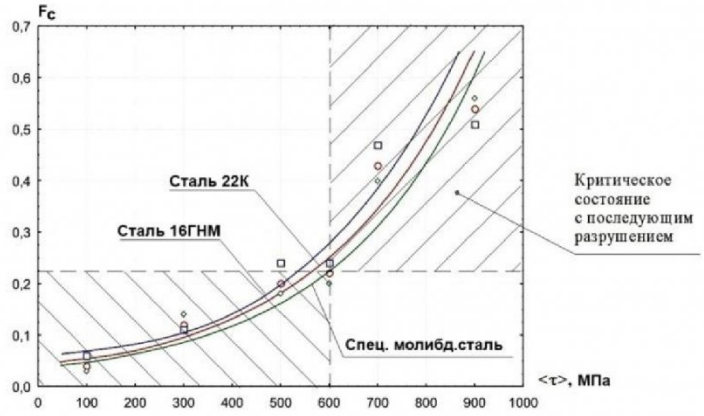

Рис. 3. Связь спектрально-акустического F_C критерия оценки ресурса металла с изменением величины локальных полей внутренних напряжений (<τ>)

доказано, что при $K \le 0{,}98$ металл сварных соединений выработал свой ресурс и необходимо выполнение ремонтно-восстановительных мероприятий.

Результаты исследований сварных соединений спектрально-акустическим методом положены в основу разработки методических рекомендаций по оценке ресурса сварных соединений трубопроводов потенциально-опасного оборудования. Методические рекомендации и комплексный критерий оценки ресурса сварных соединений реализованы при техническом диагностировании сварных соединений трубопроводов электростанций совместно с ОАО «Инженерно-аналитический центр «Кузбасстехэнерго» и ООО «Кузбасский инженерно-консультационный диагностический центр «Надежность».

В сварных барабанах котлов высокого давления, изготовленных из сталей 22К и 16ГНМ и специальной молибденовой стали [13] проводили оценку амплитуд полей внутренних напряжений, изучили структуру и фазовое состояние, как основного, так и наплавленного металла после ремонта сваркой дефектных сварных соединений.

Анализ поверхностных слоев образцов длительно работающего основного и наплавленного металла сварных барабанов котлов показал, что здесь формируются дальнодействующие поля внутренних напряжений, источниками которых являются крупные скоагулированные карбиды Me_3C и цепочки карбидов по границам фрагментов, а также несовместность деформаций по границам зерен. Увеличении в структуре металла числа источников внутренних напряжений и изменение характера их распределения приводит к повышение амплитуды полей внутренних напряжений.

После комплекса акустических исследований было установлено, что в основном и наплавленном металле барабанов котлов высокого давления, поля внутренних напряжений оказывают существенное влияние на акустические характеристики, в частности на время задержки ПАВ.

Все полученные результаты были учтены в разработке спектрально-акустического критерия оценки ресурса длительно работающих барабанов котлов высокого давления. Для акустического критерия, за величину степени поврежденности длительно работающего металла сварных барабанов котлов высокого давления было принято отношение анизотропии времени задержки ПАВ в наплавленном металле к анизотропии времени задержки ПАВ длительно работающего металла. Кроме этого, разработанный критерий также учитывает степень изменения локальных внутренних напряжений в длительно работающем металле до и после ремонта. С учетом того, что исследуемый длительно работающий металл акустически анизотропен, то разработанный критерий оценки ресурса сварных барабанов котлов (F_c) представлен в относительных единицах и выражается

$$F_c = \gamma \cdot K_C^{-1} \qquad (9)$$

где K_C – коэффициент, учитывающий анизотропию акустических характеристик и выражается формулой:

$$K_C = \frac{\Delta R_1}{\Delta R_2} \qquad (10)$$

где γ – коэффициент, учитывающий изменение величины внутренних напряжений в исследуемом металле и выражается формулой:

$$\gamma = \frac{\tau_{вн}^{0} - \tau_{вн}}{\tau_{вн}}, \qquad (11)$$

где $\tau_{вн}^{0}$ – величина внутренних напряжений в исследуемом металле до ремонта, $\tau_{вн}$ – величина внутренних напряжений в исследуемом металле после ремонта.

В формуле (10) ΔR_1 и ΔR_2 – анизотропия времени задержки ПАВ в металле после ремонта и в длительно работающем металле до ремонта соответственно. Данные величины рассчитываются как:

$$\begin{aligned} \Delta R_1 &= \left|\Delta \overline{R}_1^{перп} - \Delta \overline{R}_1^{пар}\right|, \\ \Delta R_2 &= \left|\Delta \overline{R}_2^{перп} - \Delta \overline{R}_2^{пар}\right| \end{aligned} \qquad (12)$$

Спектрально-акустический критерий апробирован на длительно работающем и наплавленном металле ряда барабанов котлов высокого давления. Экспериментально установлено, что при γ>0,13, металл находиться в критическом состоянии, при этом K_C должен находиться в пределах 0,64<K_C<1. Расчеты F_c показали, что при F_c>0,22, исследуемый металл барабана котла находится в стадии предразрушения и необходимо проведение ремонтно-восстановительных мероприятий (рис. 3) [14, 15].

Выводы

1. Рассмотрены основные подходы к технической диагностике и оценке остаточного ресурса потенциально-опасного оборудования ТЭС, применяемые в настоящее время. Показано, что существующие методы и методики оценки ресурса не учитывают характер изменения структурно-фазового состояния, метала (распад структуры, изменения локальных полей внутренних напряжений) как основного, так и наплавленного металла в процессе длительной эксплуатации в сложных напряженных условиях и в агрессивных средах

2. Предложен новый методологический подход к оценке работоспособности и ресурса потенциально-опасного длительно работающего оборудования ТЭС, основанный на выявлении закономерностей изменения структурно-фазового состояний и полей внутренних напряжений в ос-

новном металле, в сварных соединениях и наплавках неразрушающим спектрально-акустическим методом.

3. Разработаны критерии предельного состояния металла энергооборудования, оценки ресурса сварных соединений и наплавок, которые нашли применение на ряде энергетических предприятий Кузбасса.

Автор выражает благодарность профессору каф. Технология машиностроения КузГТУ Смирнову А.Н., д.т.н. и начальнику ПТО ООО «Кузбасский центр сварки и контроля» Фольмеру С.В., к.т.н. за участие в настоящей работе.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РНФ, соглашение № 14-19-00724.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Информационный бюллетень Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору. – М.: ЗАО «Научно-технический центр исследований проблем промышленной безопасности», 2015. – № 1 (76). – С. 12–19.

2. *Смирнов, А. Н.* Комплексный подход к оценке работоспособности элементов энергетического оборудования / А. Н. Смирнов, Н. В. Абабков // Известия Самарского научного центра РАН, 2010. – Т. 12. – №1 (2). – С.520–524.

3. *Махутов, Н. А.* Техническая диагностика остаточного ресурса и безопасности / Махутов Н. А., Гаденин М. М.. – учеб. пособие под общ. ред. В. В. Клюева. – М.: Изд. дом «Спектр», 2011. – 187 с.

4. *Митенков, Ф. М.* Методы обоснования ресурса ядерных энергетических установок / Митенков Ф. М., Кайдалов В. Б., Коротких Ю. Г. и др. – М.: Машиностроение, 2007. – 448 с.

5. СО 153-34.17.442-2003. Инструкция по порядку продления срока службы барабанов котлов высокого давления.

6. *Филинов, М. В.* Подходы к оценке остаточного ресурса технических объектов / Филинов М.В., Фурсов А.С., Клюев В.В. // Контроль. Диагностика. – 2006. – № 8. С. 6–16.

7. *Дубов, А. А.* Проблемы оценки остаточного ресурса стареющего оборудования // Теплоэнергетика. – 2003. – № 11. – С. 54–57.

8. *Смирнов, А. Н.* Структурная поврежденность сталей и ее оценка спектрально-акустическим и электронно-микроскопическим методами // Контроль. Диагностика. – 2004. – № 4. – С. 13–18.

9. *Смирнов А. Н.* Концепция технического диагностирования объектов повышенной опасности / Смирнов А. Н., Герике Б. Л. // Вестник Кузбасского государственного технического университета, 1999. – № 6. – С. 15–19.

10. *Смирнов, А. Н.* Оценка степени поврежденности длительно работающего металла энергооборудования акустическим методом / Смирнов А.Н., Васильев А.Г., Шевелев Е.В. // Вестник Кузбасского государственного технического университета. – 2000. – № 5. – С. 46.

11. *Смирнов, А. Н.* Локальные поля внутренних напряжений в сварных соединениях, спектрально-акустический метод их выявления и синергетический подход к материаловедению / Смирнов А.Н., Фольмер С. В., Абабков Н. В. // Вестник Кузбасского государственного технического университета, 2009. – № 3. – С. 28–38.

12. Патент РФ № 2457478. Способ выявления зон предразрушений в сварных соединениях теплоустойчивых сталей / А. Н. Смирнов, С. В. Фольмер, Н. В. Абабков.

13. Диагностика, повреждаемость и ремонт барабанов котлов высокого давления / Н. В. Абабков, Н. И. Кашубский, В. Л. Князьков, А. Ф. Князьков, Э. В. Козлов, Н. А. Конева, Н. М. Макаров, В. В. Муравьев, Н. А. Попова, А. Н. Смирнов, С. В. Фольмер. – М.: Машиностроение, 2011. – 256 с.

14. *Смирнов, А. Н.* Структурно-фазовое состояние, поля внутренних напряжений и акустические характеристики в длительно работающем металле поврежденного барабана котла высокого давления / Смирнов А. Н., Абабков Н. В., Козлов Э. В. и др. // Контроль. Диагностика, 2012. – №7. – С. 13–17.

15. *Смирнов, А. Н.* Критерии оценки состояния и ресурса длительно работающих барабанов котлов высокого давления / Смирнов А. Н., Абабков Н. В. // Сварка и диагностика. – 2013. – № 4. – С. 55–58.

THE ASSESSMENT OF PERFORMANCE AND LIFETIME OF METAL POTENTIALLY DANGEROUS EQUIPMENT TPP AFTER PROLONGED BY SPECTRAL ACOUSTIC METHOD

Ababkov Nikolay V.,
C.Sc. in Engineering, Associate Professor,e-mail: n.ababkov@rambler.ru

T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University, Vesennyaya street, 28, Kemerovo, 650000, Russian Federation

Abstract

Fundamentally new methodology for assessing the health and life of metal potentially dangerous equipment TPP, based on identifying patterns of change in the structural-phase state, and internal stress fields in the long-running metal and welded joints spectral acoustic method is presented. Information about changing the structural state of the metal in the process of long-term operation of heat-resistant steels is given. Dependences of the criteria on the size of the local internal stress fields lattice. It shows the relationship between the complex and long-term strength criterion for heat-resistant steels.

Keywords: *spectral acoustic method, structural-phase condition, fields of internal stresses, long-term strength, welds, heat-resistant steel, steam pipes.*

REFERENCES

1. Informacionnyj bjulleten' Federal'noj sluzhby po jekologicheskomu, tehnologicheskomu i atomnomu nadzoru [Newsletter rostekhnadzor]. – M.: ZAO «Nauchno-tehnicheskij centr issledovanij problem promyshlennoj bezopasnosti», 2015. – № 1 (76). – S. 12–19.

2. Smirnov, A. N. Kompleksnyj podhod k ocenke rabotosposobnosti jelementovjenergeticheskogo oborudovanija [An integrated approach to working capacity assessment elements of power equipment] / A. N. Smirnov, N. V. Ababkov // Izvestija Samarskogo nauchnogo centra RAN, 2010. – T. 12. – №1 (2). – S. 520–524.

3. Mahutov, N. A. Tehnicheskaja diagnostika ostatochnogo resursa i bezopasnosti [Technical diagnostics and the residual life of the security] / N. A. Mahutov, M. M. Gadenin. – ucheb. posobie pod obshh. red. V. V. Kljueva. – M.: Izd. dom «Spektr», 2011. – 187 s.

4. Mitenkov, F. M. Metody obosnovanija resursa jadernyh jenergeticheskih ustanovok [Methods of study of the resource of nuclear power plants] / F. M. Mitenkov, V. B. Kajdalov, JU. G. Korotkih i dr. – M.: Mashinostroenie, 2007. – 448 s.

5. SO 153-34.17.442-2003. Instrukcija po porjadku prodlenija sroka sluzhby barabanov kotlov vysokogo davlenija [Instructions for the order extending the life of the high pressure boiler drums].

6. Filinov, M. V. Podhody k ocenke ostatochnogo resursa tehnicheskih ob"ektov [Approaches to the assessment of residual life of technical objects] / M. V. Filinov, A. S. Fursov, V. V. Kljuev // Kontrol'. Diagnostika. – 2006. – № 8. S. 6–16.

7. Dubov, A. A. Problemy ocenki ostatochnogo resursa starejushhego oborudova-nija [Problems residual life assessment of aging equipment] // Teplojenergetika. – 2003. – № 11. – S. 54–57.

8. Smirnov, A. N. Strukturnaja povrezhdennost' stalej i ee ocenka spektral'no-akusticheskim i jelektronno-mikroskopicheskim metodami [Structural damage to the steel and its estimate of the spectral-acoustic method and electron microscopic method] // Kontrol'. Diagnostika. – 2004. – № 4. – S. 13–18.

9. Smirnov A. N. Koncepcija tehnicheskogo diagnostirovanija obektov povyshennoj opasnosti [The concept of technical diagnosis of high-risk] / A. N. Smirnov, B. L. Gerike // Vestnik Kuzbasskogo gosudarstvennogo tehnicheskogo universiteta, 1999. – № 6. – S. 15–19.

10. Smirnov, A. N. Ocenka stepeni povrezhdennosti dlitel'no rabotajushhego metalla jenergooborudovanija akusticheskim metodom [The assessment of the degree of damage of power for a long time working metal acoustic method] / A. N. Smirnov, A. G. Vasil'ev, E. V. SHevelev // Vestnik Kuzbasskogo gosudarstvennogo tehnicheskogo universiteta. – 2000. – № 5. – S. 46.

11. Smirnov, A. N. Lokal'nye polja vnutrennih naprjazhenij v svarnyh soedinenijah, spektral'no-akusticheskij metod ih vyjavlenija i sinergeticheskij podhod k materialovedeniju [Local fields of internal stresses in welded joints, the spectral-acoustic method of detection and synergetic approach to materials science] / A.N. Smirnov, S. V. Fol'mer, N. V. Ababkov // Vestnik Kuzbasskogo gosudarstvennogo tehnicheskogo universiteta, 2009. – № 3. – S. 28–38.

12. Patent RF № 2457478. Sposob vyjavlenija zon predrazrushenij v svarnyh soedinenijah teploustojchivyh stalej [A method of detecting pre-fracture zones in the welded joints of heat-resistant steels] / A. N. Smirnov, S. V. Fol'mer, N. V. Ababkov.

13. Diagnostika, povrezhdaemost' iremontbarabanovkotlovvy-sokogodavlenija [Diagnostics, damageability and repair of high pressure boiler drums] / N. V. Ababkov, N. I. Kashubskij, V. L. Knjaz'kov, A. F. Knjaz'kov, Je. V. Kozlov, N. A. Koneva, N. M. Makarov, V. V. Murav'ev, N. A. Popova, A. N. Smirnov, S. V. Fol'mer – M.: Mashinostroenie, 2011. – 256 s.

14. Smirnov, A. N. Strukturno-fazovoe sostojanie, polja vnutrennih naprjazhenij i akusticheskie harakteristiki v dlitel'no rabotajushhem metalle povrezhdennogo barabana kotla vysokogo davlenija [Structurally-phase state of the field of internal stresses and the acoustic characteristics of the metal in the long-running drum damaged high-pressure boiler] / A. N. Smirnov, N. V. Ababkov, JE. V. Kozlov i dr. // Kontrol'. Diagnostika, 2012. – №7. – S. 13–17.

15. Smirnov, A. N. Kriterii ocenki sostojanija i resursa dlitel'no rabotajushhih barabanov kotlov vysokogo davlenija [Criteria for assessing the state of the resource and long-running high pressure boiler drums] / A. N. Smirnov, N. V. Ababkov // Svarka i diagnostika. – 2013. – № 4. – S. 55–58.

Received 08.05.2015