

МАШИНОСТРОЕНИЕ

УДК 621.791.05:620.179

ЭКСПЕРТИЗА ПРОМЫШЛЕННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ И РЕСУРС ОБОРУДОВАНИЯ ТЭК КУЗБАССА

Смирнов Александр Николаевич,
доктор техн. наук, профессор, e-mail:galvas.kem@gmail.com

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

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

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

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

В современных условиях вопросам безопасной эксплуатации потенциально опасного промышленного оборудования России уделяется повышенное внимание. Его большая часть отработала расчетный срок, по России в целом около 70%, а в ТЭКе – более 80%. Причем разрушения технических устройств, либо их элементов могут привести, и приводят к крупным техногенным катастрофам с человеческими жертвами. Поэтому особенно актуальной является задача обеспечения (управления) безопасной эксплуатации потенциально опасного оборудования [1–3].

В настоящей статье описана концептуальная модель и новая методология оценки ресурса деталей и узлов оборудования ТЭК, в основу которой положен механизм изменения локальных дальнодействующих полей внутренних напряжений в основном металле и сварных соединениях, включая наплавки на различных этапах жизненного цикла, предложены некоторые импортозамещающие технологии для потенциально опасного горнодобывающего оборудования (ГДО).

В процессе длительной эксплуатации технических устройств опасных производственных объектов (ТУОПО) в сложных напряженных условиях, зачастую в агрессивных средах, в металле происходят сложные физико-химические процессы, вызывающие ползучесть, усталость, коррозию. В реальных условиях, эти явления трудно отделить друг от друга, они, чаще всего, протекают одновременно (например: термоусталость; коррозионно-термическая усталость; усталость и термоусталость в условиях ползучести и т. д.). Все эти

явления необходимо учитывать при оценке ресурса работоспособности оборудования.

Необходимость разработки концептуальной модели обусловлена отсутствием единой методологии при анализе результатов комплексных исследований и испытаний длительно-работающего металла. На наш взгляд, достоверность и качество результатов может быть значительно улучшена, а трудоемкость оценок существенно снижена при использовании возможностей современных информационных технологий [5–7].

В разработке концептуальной модели использованы системный и объектно-ориентированный подходы к описанию проблемы, когда микроструктурное состояние сталей представляется в виде информационной системы знаний и закономерностей в соответствии с методологией структурного моделирования.

Существующий подход к безопасной эксплуатации и прогнозированию работоспособности ТУОПО представлен в виде концептуальной модели, которая описывает функции системы. Система представлена в виде наследственных диаграмм, где на входе контекстной (основной), диаграммы введен расчетный ресурс (РР), на выходе – ресурс остаточный (РО). Здесь механизмами реализации являются работы по выполнению расчетных (заданных) режимов эксплуатации оборудования (Э), проведению экспертизы промышленной безопасности в регламентированные нормативными документами (НД) сроки (О), выполнению ремонтно-восстановительных работ, а при необходимости замене деталей и узлов техниче-

ских устройств (В). Все эти работы проводятся под управляющим воздействием нормативно-технической документации (НД) и технической документации на конкретное оборудование (ТД). Детализированная диаграмма А0 приведена на рис. 1. После некоторого срока наработки техническое состояние оборудования изменяется, соответственно уменьшается и ресурс. Для определения остаточного ресурса (РО) выполняют оценку фактического технического состояния ТУОПО путем проведения экспертизы (О). Запросы в базы данных ТУОПО и состояния металла (БДСМ) дают экспертам информацию о процессах, протекающих в металле аналогичных технических устройств после близких сроках и условиях эксплуатации (рис. 1). Результаты экспертизы (при необходимости) передаются по (Т) в блок А1 для корректировки режимов эксплуатации ТУОПО.

Из концептуальной модели следует, что для поддержания безопасной эксплуатации промышленного оборудования необходимо на промышленном предприятии решать три основные задачи:

1. Эксплуатировать заданный срок службы ТУОПО с соблюдением всех требований НТД высококвалифицированным обученным и аттестованным персоналом;
2. Оценивать техническое состояние ТУОПО;
3. Своевременно проводить ремонт (замену узлов и деталей).

Техническое диагностирование является составной и необходимой частью экспертизы про-

мышленной безопасности (ЭПБ), а неразрушающий контроль (НК) и разрушающие испытания (при необходимости) составными частями технического диагностирования. 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.

Поэтому очевидна необходимость разработки нового методологического подхода к оценке работоспособности металла ТУОПО, основанного на выявлении закономерностей эволюции структурно-фазового состояния и изменения физико-механических характеристик неразрушающими физическими методами исследования.

Для решения этих задач применен метод акустической структуроскопии. На основе концептуальной модели с применением высокочувствительного акустической системы «АСТРОН» и электронно-микроскопических исследований изучены закономерности изменения полей внутренних напряжений в теплоустойчивых сталях (12Х1МФ, 15Х1М1Ф, 12Х2МФСР и др.), на различных этапах их жизненного цикла и установлены связи между акустическими характеристиками и параметрами структуры. Система «АСТРОН» (рис. 2) была разработана в Нижнем Новгороде по нашему заказу.

Авторам [4, 8–10] удалось доказать, что время

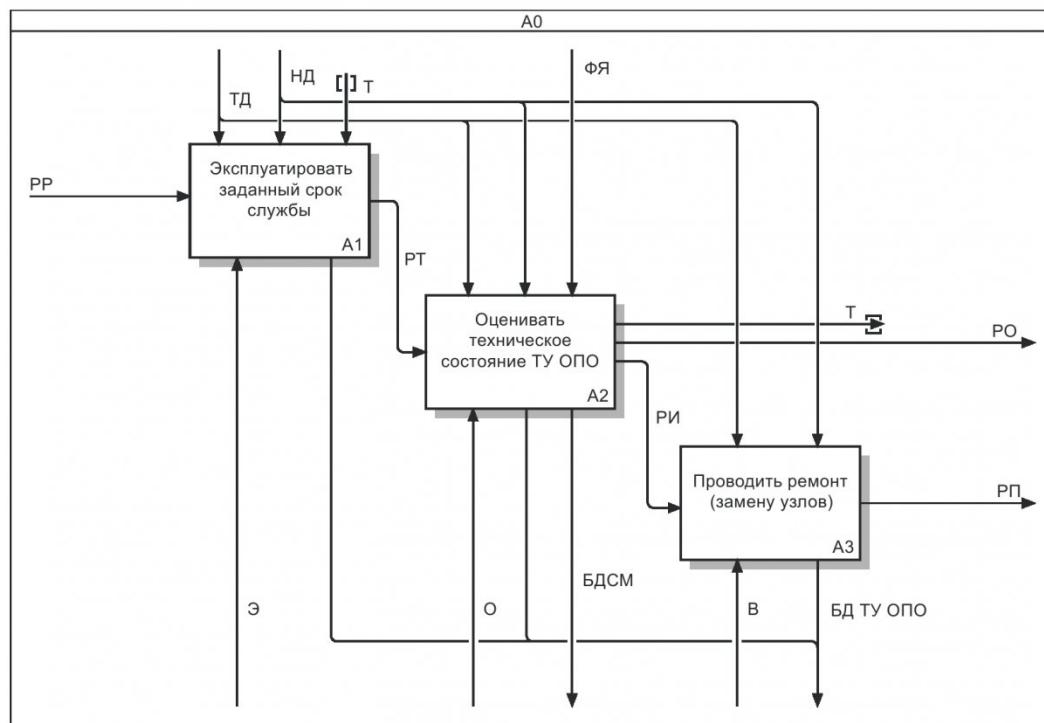


Рис. 1. Детализированная контекстная диаграмма модели управления безопасной эксплуатации и прогнозирования работоспособности ТУОПО (декомпозиция А0)

Fig. 1. Detailed contextual model diagram of safe operating performance and forecasting TUOPO (decomposition A0)

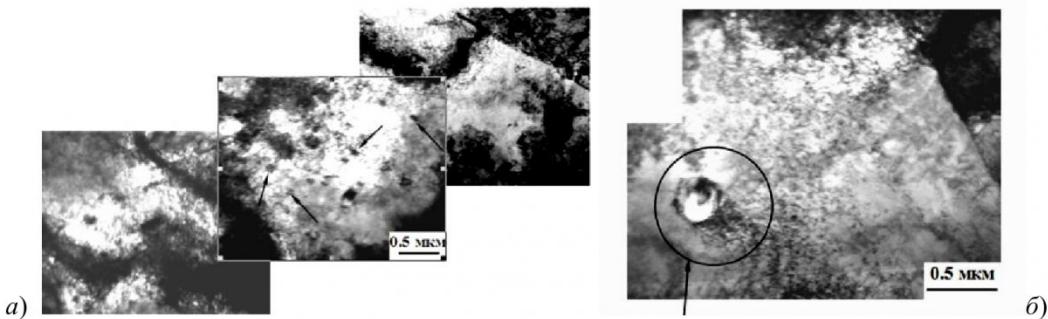


Рис. 2. Электронно-микроскопическое изображение тонкой структуры стали 12Х1МФ:
а – ферритное зерно, присутствуют частицы карбида $M_{23}C_6$, не связанные с дислокациями (основной металл); б – ферритное зерно, присутствует частица карбида $M_{23}C_6$ (металл шва)

Fig. 3. An electron microscope image of a thin steel structure 12HIMF:
a – ferrite grains present $M_{23}C_6$ carbide particles, non-dislocationions (base metal);
b – ferrite grains present $M_{23}C_6$ carbide particles (weld metal)

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.

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

Применение спектрально-акустического метода позволило разработать комплексный критерий предельного состояния длительно-работающего металла

$$K_f = \frac{W_\tau - W_0}{W_f - W_0} \cdot \frac{W_f}{W_\tau} \cdot \gamma \quad (1)$$

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_τ), 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 трубопроводов 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 [9, 10] после различных сроков эксплуатации (рис. 2) и поврежденные соединения.

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

$$K = \frac{R_{01} \cdot R_{02}}{R_{t01} \cdot R_{t02}}, \quad (2)$$

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. 3). Критерий апробирован на ряде электростанций Кузбассэнерго. Экспериментально доказано, что при $K \leq 0,98$ металл сварных соединений выработал свой ресурс и необходимо выполнение ремонтно-восстановительных мероприятий.

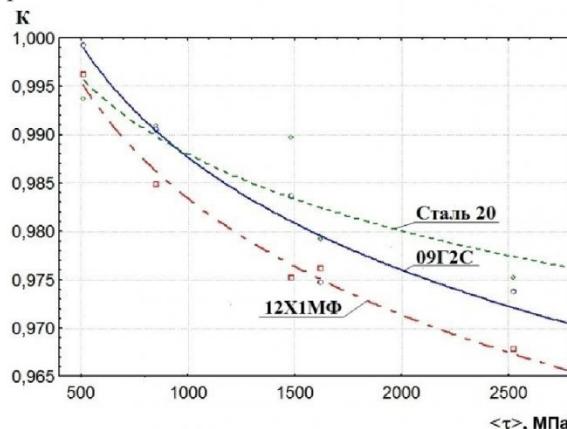


Рис. 3. Связь критерия оценки ресурса сварных соединений (K) с амплитудой локальных (моментных) напряжений (τ)

Fig. 3. The Contact of the resource evaluation criterion of welded joints (K) with the amplitude of the local (torque) stress (τ)

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 более 100 сварных соединений трубопроводов электростанций совместно с ОАО «Инженерно-аналитический центр «Кузбасстехэнерго» и ООО «Кузбасский инженерно-консультационный диагностический центр «Надежность».

В сварных соединениях барабанов котлов высокого давления, изготовленных из сталей 22К и 16ГНМ и специальной молибденовой стали, наряду с оценкой локальных полей внутренних напряжений, исследовали структуру и фазовое состояние, как основного, так и наплавленного металла после ремонта сваркой дефектных сварных соединений [9, 10]. Анализ поверхностных слоев образцов длительно работающего основного и наплавленного металла сварных барабанов котлов показал, что в них формируются дальнодействующие поля внутренних напряжений, источниками которых являются крупные сконцентрированные карбиды M_3C и цепочки карбидов по границам фрагментов, а также деформации по границам зерен. Увеличение в структуре металла числа источников внутренних напряжений (плотности дислокаций и выделений карбидов) и изменение характера

их распределения приводят к повышению величины 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 распространения рэлеевских волн. Все полученные результаты были учтены в разработке 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 акустических свойств в наплавленном металле к анизотропии свойств 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:

$$F_c = \gamma \cdot K_c^{-1} \quad (3)$$

где K_c – коэффициент, учитывающий анизотропию акустических свойств; γ – коэффициент, учитывающий изменение величины внутренних напряжений в исследуемом металле. Коэффициент γ выражается формулой:

$$\gamma = \frac{\tau_{bh}^0 - \tau_{bh}}{\tau_{bh}} \quad (4)$$

где τ_{bh}^0 – величина внутренних напряжений в исследуемом металле до ремонта, τ_{bh} – величина внутренних напряжений в исследуемом металле после ремонта. Коэффициент K_c выражается формулой:

$$K_c = \frac{\Delta R_1}{\Delta R_2} \quad (5)$$

где ΔR_1 и ΔR_2 – анизотропия акустических свойств в металле после ремонта и в длительно работающем металле до ремонта соответственно. Данные величины рассчитываются как разница времен распространения рэлеевских волн в металле перпендикулярно и параллельно сварному шву:

$$\Delta R_1 = |\bar{R}_1^{nepn} - \bar{R}_1^{nap}| \quad (6)$$

$$\Delta R_2 = |\bar{R}_2^{nepn} - \bar{R}_2^{nap}|$$

Разработанный критерий апробирован на длительно работающем и наплавленном металле ряда барабанов котлов высокого давления. Экспери-

ментально установлено, что при $\gamma > 0,13$, металл находится 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. 4).

Полученные нами результаты и критерии ресурса для металла теплоэнергетического оборудования являются частным случаем. Однако до настоящего времени не создана общая теория, учитывающая поля напряжений, наноструктуру, условия эксплуатации, монтажа, ремонта и исходную структуру металла. Нами сделана попытка решить данную задачу. Для этого были разработаны структурные коэффициенты, выполнен комплекс исследований, сделан ряд допусков и предположений.

Очевидно, что общее время безопасной эксплуатации любого оборудования (7) складывается из времени наработки оборудования до момента обследования (текущего состояния) $\tau_{\text{тек}}$ и дальнейшего времени работы оборудования до достижения предельного состояния $\tau_{\text{ост}}$ (остаточный ресурс):

$$\tau_{\text{п.с}} = \tau_{\text{тек}} + \tau_{\text{ост}} \quad (7)$$

Структура является важнейшим показателем металла, характеризующим его работоспособность. В памяти металла на момент диагностирования зафиксированы все виды тепловых воздействий и механических нагрузок, которым был подвержен металл, начиная с его изготовления и кончая определенным сроком эксплуатации (в нашем случае – $\tau_{\text{тек}}$). Главное, правильно понять и оценить эти изменения. Однако структурно-

фазовое состояние металла после наработки ($\tau_{\text{тек}}$) это одна сторона вопроса. С другой стороны, для оценки реального ресурса необходимо еще учитывать макродефекты (иногда они являются допустимыми, чаще их не устранили, а просто пропустили), возникшие при изготовлении, ремонте, эксплуатации оборудования в течении $\tau_{\text{тек}}$. Эти дефекты оказывают существенное влияние на достоверность оценки ресурса.

При этом текущее состояние оборудования в момент диагностирования характеризует коэффициент его текущего технического состояния K_t , который можно представить, как

$$K_t = f(K_{\text{стр.т}}, K_{\text{реж}}, K_{\text{деф}}) \rightarrow \tau_{\text{тек}}, \quad (8)$$

где $K_{\text{стр.т}}$ – структурный коэффициент металла в текущем состоянии, $K_{\text{реж}}$ – коэффициент, учитывающий режимы эксплуатации (температуру, давление (нагрузку), цикличность, среду), $K_{\text{деф}}$ – коэффициент, учитывающий наличие дефектов изготовления, монтажа и ремонта в основном металле и сварных соединениях. $K_{\text{стр.т}}$ определяется характером изменения структурно-фазового состояния и полей внутренних напряжений, перераспределением источников полей напряжений и их плотности. $K_{\text{стр.т}}$ можно выразить как функцию параметров структуры в виде

$$K_{\text{стр}} = f(\sigma_{\text{вн}}, \tau, \rho_{\pm}, \rho, \mu, d_3, \gamma_k), \quad (9)$$

где $\sigma_{\text{вн}}$ – амплитуда полей внутренних напряжений, МПа; τ – касательные напряжения; ρ_{\pm} – избыточная плотность дислокаций; ρ – скалярная плотность дислокаций; μ – плотность источников полей внутренних напряжений; d_3 – величина зерна, мкм; γ_k – коэффициент, учитывающий разме-

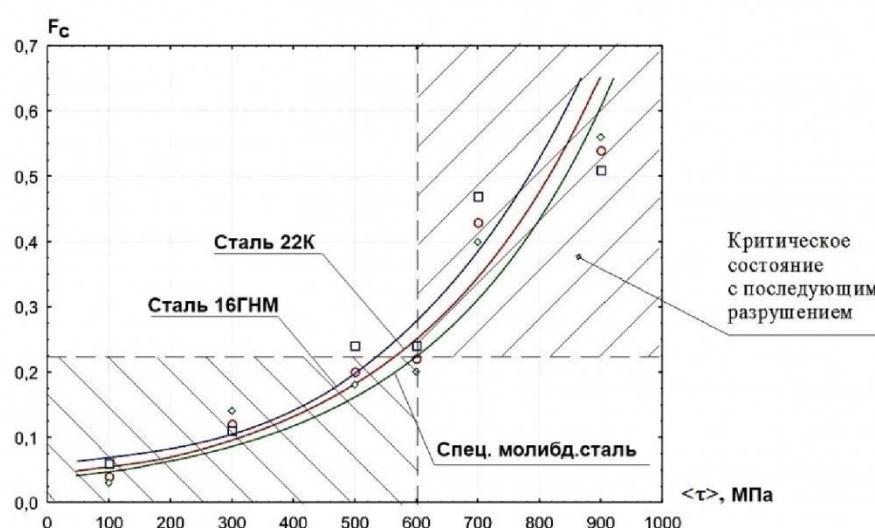


Рис. 4. Связь критерия оценки ресурса сварных барабанов котлов F_c с изменением величины локальных полей внутренних напряжений $\langle\tau\rangle$

Fig. 4. The Contact of spectral acoustic criterion F_c for assessing the resource metal with changing values of local fields of internal stresses ($\langle\tau\rangle$)

ры и характер распределения карбидных фаз в металле.

Для каждого класса материалов мы разрабатываем инженерные методы расчета структурного коэффициента.

Для ранее изученных сталей [8] предложен структурный коэффициент, который отрабатывается на оборудовании топливно-энергетического комплекса (от исходного состояния до достижения предельного состояния и разрушения) :

$$K_{\text{стр}} = \left(\frac{\sigma_{\text{вн}} + \tau}{\mu} \right) \times \frac{\rho}{\rho \pm} \gamma_k \cdot d_3^{-1/2}, \quad (10)$$

Все параметры структуры определяли методом просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ) и рентгеноструктурного анализа (РСА). Внутренние поля напряжений оценивали по контурам изгиба-кручения (рис. 5). Структурный коэффициент необходимо определять на оборудовании, эксплуатируемом в сложных напряженных условиях при высоких напряжениях и температурах, при циклических и ударных нагрузках, в агрессивных средах, в периоды проведения регламентных работ (в НТД указан срок проведения диагностики, когда выработан уже определенный ресурс).

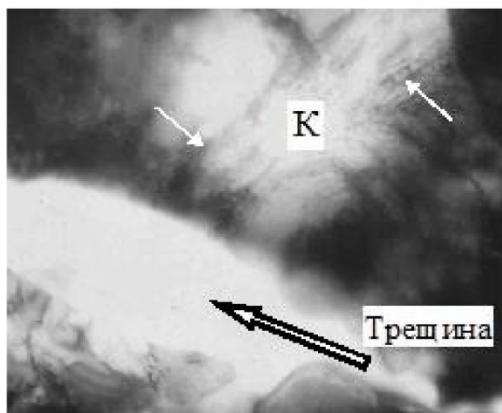


Рис. 5. Электронно-микроскопическое изображение микротрешины. Белыми стрелками показаны контуры изгиба-кручения от частиц (К)

Fig. 5. An electron microscope image of microcracks.

The white arrows show the contours
of the bending-torsion of the particles (K)

Для оценки реального состояния оборудования, кроме структурного коэффициента, необходимо учитывать и режимы эксплуатации, и монтажные, ремонтные и металлургические дефекты, и накопленные эксплуатационные дефекты, и уже на их основе выбирать коэффициенты. Следовательно, для определения K_t необходимо определиться с величинами $K_{\text{деф}}$ и $K_{\text{реж}}$.

Из условий эксплуатации оборудования $K_{\text{реж}}$ можно представить как коэффициент, зависящий от числа циклов работы (N), давления, либо нагрузки (P), температуры (T), агрессивности

среды (L).

Отсюда,

$$K_{\text{реж}} = K_N \cdot K_P \cdot K_T \cdot K_L, K_{\text{деф}} = K_{\text{мет}} \cdot K_{\text{рем}} \cdot K_{\text{мон}}.$$

Разработаны численные значения коэффициентов.

Как ранее отмечено – K_t , коэффициент, характеризующий техническое состояние объекта контроля в момент контроля. При условии сохранения, хотя бы, относительного постоянства $K_{\text{реж}}$ и $K_{\text{деф}}$ на всем протяжении срока эксплуатации оборудования, и в первом приближении можно записать

$$\frac{\tau_{\text{ост}}}{\tau_{\text{тек}}} = \frac{K_{\text{п.с.}} - K_t}{K_t}, \quad (11)$$

где $K_{\text{п.с.}}$ – коэффициент, характеризующий техническое состояние оборудования в момент достижения предельного состояния. Здесь подход необходим сугубо индивидуальный, но с учетом уровня эксплуатации и накопления дефектности в аналогичном оборудовании при близких сроках эксплуатации. Определение этого коэффициента проводили на основе анализа условий эксплуатации (определяли коэффициенты $K_{\text{реж}}$ и $K_{\text{деф}}$).

Структурный коэффициент предельного состояния оценивали по результатам исследования основного металла и сварных соединений оборудования, выработавшего свой ресурс. Из формулы (11), проведя небольшие математические преобразования и подставляя в формулу результаты расчетов и исследований, получим искомый результат – остаточное время эксплуатации оборудования

$$\tau_{\text{ост}} = \frac{\tau_{\text{тек}} (K_{\text{п.с.}} - K_t)}{K_t}, \quad (12)$$

В настоящее время авторами создается банк данных по оборудованию ТЭК Кузбасса, предстоит большая исследовательская работа по изучению горнодобывающего оборудования (ГДО). Предлагаемая методология имеет существенный недостаток, заключающийся в сложности определения структурных критериев. Необходимо выполнение дорогостоящих электронно-микроскопических исследований.

Освободиться от данного недостатка существует несколько путей. Самым перспективным является разработка неразрушающих физических методов оценки структурных изменений. Для ряда сталей (типа хромомолибденованадиевых) нами разработаны акустические и магнитные структурные критерии оценки поврежденности [8–10]. Но в любом случае (для исключения больших погрешностей измерений) существует необходимость выполнения эталонных электронно-микроскопических исследований для каждой марки стали.

Для инженеров-практиков разрабатывается атлас гистограмм, с помощью которых, при зна-

ния структурного коэффициента, условий эксплуатации оборудования (после проведение анализа ремонтной и эксплуатационной документации) специалист найдет по гистограмме срок эксплуатации (ресурс) данного технического устройства.

Данная методология совсем не исключает проведение стандартных методов НК, они дополняют результаты наших испытаний, за их счет вводятся уточняющие поправки в соответствующие коэффициенты.

Известно, что ГДО работает в сложнейших условиях, оно подвергается износу и значительным ударным нагрузкам, которые часто превышают нормативные и расчетные. Поэтому при таких эксплуатационных режимах *проводить оценку ресурса становиться затруднительно*. И конечно, в таких условиях, вопросам повышения эксплуатационных характеристик ГДО на предприятиях уделяется первостепенное значение. Еще несколько лет назад хозяева угледобывающих предприятий могли приобрести за рубежом любое оборудование с любыми характеристиками. Вопрос был только в цене. В связи со сложившейся экономической ситуацией в настоящее время, остро встал вопрос о создании отечественного оборудования, либо о замене отдельных быстроизнашивающихся узлов и деталей на отечественные. Наибольшей нагрузке, как правило, подвержены поверхности деталей машин, непосредственно соприкасающиеся с горной породой.

Выводы

1. Рассмотрены основные подходы к технической диагностике и оценке остаточного ресурса

потенциально-опасного оборудования ТЭК, применяемые в настоящее время. Показано, что существующие методы и методики оценки ресурса не учитывают характер изменения структурно-фазового состояния металла (распад структуры, изменения локальных полей внутренних напряжений и плотности дислокаций), как основного, так и наплавленного в процессе длительной эксплуатации в сложных напряженных условиях и в агрессивных средах.

2. Предложена модель оценки ресурса длительно работающего металла объектов ТЭК, основанная на изучении эволюции структурно-фазового состояния металла. Разработаны акустические критерии оценки ресурса основного металла, сварных соединений энергооборудования, ремонтных наплавок на барабаны котлов высокого давления. Для теплоустойчивых сталей разработан структурный коэффициент, учитывающий характер изменения основных параметров структуры металла в процессе длительной эксплуатации, который совместно с режимным коэффициентом и коэффициентом дефектности дает возможность с достаточной степенью достоверности оценивать ресурс теплоэнергетического оборудования.

3. Для различного оборудования ТЭК проводится комплекс дополнительных исследований, включающих неразрушающие методы исследования, разрабатываются коэффициенты и гистограммы с применением которых повысится достоверность оценки ресурса.

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Клюев В.В. Деградация диагностики безопасности. – М.: Издательский дом «Спектр», 2012. – 128 с.
2. Смирнов А. Н. Оценка степени поврежденности длительно работающего металла энергооборудования акустическим методом / А.Н. Смирнов, А.Г. Васильев, Е.В. Шевелев // Вестник Кузбасского государственного технического университета. – 2000. – № 5. – С. 46.
3. 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.
4. Смирнов А. Н. Структурная поврежденность сталей и ее оценка спектрально-акустическим и электронно-микроскопическим методами // Контроль. Диагностика. – 2004. – № 4. – С. 13–18.
5. Махутов Н. А. Техническая диагностика остаточного ресурса и безопасности / Н. А. Махутов, М. М. Гаденин. – учеб. пособие под общ. ред. В. В. Клюева. – М.: Изд. дом «Спектр», 2011. – 187 с.
6. Митенков Ф. М. Методы обоснования ресурса ядерных энергетических установок / Ф. М. Митенков, В. Б. Кайдалов, Ю. Г. Коротких и др. – М.: Машиностроение, 2007. – 448 с.
7. СО 153-34.17.442-2003. Инструкция по порядку продления срока службы барабанов котлов высокого давления.
8. Углов А.Л. Акустический контроль оборудования при изготовлении и эксплуатации / А. Л. Углов, В. И. Ерофеев, А. Н. Смирнов / М.: Наука, – 2009. – 278 с.
9. Смирнов А.Н. Критерии оценки технического состояния длительно работающего металла оборудования ТЭС на основе акустической структурископии / Смирнов А.Н., Абабков Н.В., Муравьев В.В. и др./ Дефектоскопия. – 2015. – № 2.– С. 44–51.
10. Смирнов А.Н. Критерии оценки состояния и ресурса длительно работающих барабанов котлов высокого давления / А.Н. Смирнов, Н.В. Абабков // Сварка и диагностика. – 2013. – № 4. – С. 55–58.

Поступило в редакцию 11.08.2015

UDC 621.791.05:620.179

**THE EXPERTISE OF INDUSTRIAL SAFETY AND RESOURCES
OF KUZBASS ENERGY EQUIPMENT**

Smirnov Aleksandr N.,

Dr. Sc. in Engineering, professor, e-mail:galvas.kem@gmail.com

Ababkov Nikolay V.,

Candidate Sc. in Engineering, Associate Professor, e-mail: n.ababkov@rambler.ru

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

Abstract: The information about changing the structural state of the metal in the process of long-term operation of heat-resistant steels are given. The dependences of the acoustic characteristics 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. A 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.

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

REFERENCES

1. Kljuev V.V. Degradacija diagnostiki bezopasnosti. – M.: Izdatel'skij dom «Spektr», 2012. – 128 s.
2. Smirnov, A. N. Ocenka stepeni povrezhdennosti dlitel'no rabotajushhego metalla jenergooborudovaniya akusticheskim metodom / A.N. Smirnov, A.G. Vasil'ev, E.V. Shevelev // Vestnik Kuzbasskogo gosudarstvennogo tehnicheskogo universiteta. – 2000. – № 5. – S. 46.
3. Smirnov, A. N. Kompleksnyj podhod k ocenke rabotosposobnosti jelementov jenergeticheskogo oborudovaniya / A. N. Smirnov, N. V. Ababkov // Izvestija Samarskogo nauchnogo centra RAN, 2010. – T. 12. – №1 (2). – S.520–524.
4. Smirnov, A. N. Strukturnaja povrezhdennost' stalej i ee ocenka spektral'no-akusticheskim i elektronno-mikroskopicheskim metodami // Kontrol'. Diagnostika. – 2004. – № 4. – S. 13–18.
5. Mahutov, N. A. Tehnicheskaja diagnostika ostatochnogo resursa i bezopasnosti / N. A. Mahutov, M. M. Gadenin. – ucheb. posobie pod obshh. red. V. V. Kljueva. – M.: Izd. dom «Spektr», 2011. – 187 s.
6. Mitenkov, F. M. Metody obosnovaniya resursa jadernyh jenergeticheskikh usta-novok / F. M. Mitenkov, V. B. Kajdalov, JU. G. Korotkih i dr. – M.: Mashinostroenie, 2007. – 448 s.
7. SO 153-34.17.442-2003. Instrukcija po porjadku prodlenija sroka sluzhby ba-rabanov kotlov vysokogo davlenija.
8. Uglov, A.L. Akusticheskij kontrol' oborudovaniya pri izgotovlenii i jeks-pluatacii / A. L. Uglov, V. I. Erofeev, A. N. Smirnov / M.: Nauka, – 2009. – 278 s.
9. Smirnov, A.N. Kriterii ocenki tehnicheskogo sostojanija dlitel'no rabotajushhego metalla oborudovaniya TJES na osnove akusticheskoy strukturoskopii / Smirnov A.N., Ababkov N.V., Murav'ev V.V. i dr./ Defektoskopija. – 2015. – № 2.– S. 44–51.
10. Smirnov, A.N. Kriterii ocenki sostojanija i resursa dlitel'no rabotajushhih barabanov kotlov vysokogo davlenija / A.N. Smirnov, N.V. Ababkov // Svarka i diagnostika. – 2013. – № 4. – S. 55–58.

Received 11 August 2015