

УДК 621.791.05:620.179

Смирнов А. Н., профессор, д.т.н.

(КузГТУ, г. Кемерово)

Абабков Н. В., к.т.н.

(КузГТУ, г. Кемерово)

Smirnov Alexander, professor, doctor of engineering sciences

(KuzSTU, Kemerovo)

Ababkov Nikolay, candidate of engineering sciences

(KuzSTU, Kemerovo)

**ПРИМЕНЕНИЕ СТРУКТУРНЫХ КРИТЕРИЕВ И АКУСТИЧЕСКОЙ
ДИАГНОСТИКИ ДЛЯ ОЦЕНКИ РЕСУРСА МЕТАЛЛА ДЛИТЕЛЬНО
РАБОТАЮЩЕГО ОБОРУДОВАНИЯ ТЕПЛОВЫХ
ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ**

**APPLICATION OF STRUCTURAL CRITERIA AND ACOUSTIC DI-
AGNOSTICS FOR RESOURCE ASSESSMENT OF METAL FOR
THERMAL POWER CONTINUOUSLY OPERATING EQUIPMENT**

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 %. Для отдельных групп более 60 % промышленного оборудования отработало расчетный срок, а в энергетике – более 80 %.

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 микроразруждений 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 работоспособности 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 [5]. Среди них, особо следует отметить фундаментальную работу школы академика Махутова Н. А. [3].

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 [3]. 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.

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 ресурс барабанов котлов высокого давления определяется по величине накопленной поврежденности металла (1):

$$A = 2 \frac{n_{\text{по}}}{N_{\text{по}}} + 0,08 \frac{n_{\text{по}}}{N_{\text{ту}}} + \frac{n_{\text{по}}}{N_{\text{ги}}} + \frac{40n_{\text{по}} + \omega\tau}{N_{\text{т}}}, \quad (1)$$

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 (1) видно, что при продлении ресурса барабанов котлов высокого давления учитывается только факторы, относящиеся к режимам эксплуатации оборудования. В настоящей работе предлагается несколько иной подход к оценке ресурса оборудования, основанный на учете структурного фактора.

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

$$\tau_{\text{н.с}} = \tau_{\text{тек}} + \tau_{\text{ост}} \quad (2)$$

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

$$K_T = f(K_{\text{стр.т}}, K_{\text{реж}}, K_{\text{деф}}) \rightarrow \tau_{\text{тек}}, \quad (3)$$

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

$$K_{\text{стр}} = f(\sigma_{\text{вн}}, \tau, \rho_{\pm}, \rho, \mu, d_z, \gamma_k), \quad (4)$$

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_z – величина зерна, мкм; γ_k – коэффициент, учитывающий размеры и характер распределения карбидных фаз в металле.

Для каждого класса материалов разрабатываются инженерные методы расчета структурного коэффициента. Для ранее [5] изученных авторами сталей предложен структурный коэффициент, который отрабатывается на длительно работающих теплоустойчивых сталях оборудования топливно-энергетического комплекса на всех стадиях жизненного цикла (от исходного состояния до достижения предельного состояния и разрушения, который имеет следующий вид

$$K_{\text{стр}} = \left(\frac{\sigma_{\text{вн}}}{\mu} + \frac{\tau}{\mu} \right) \times \frac{\rho}{\rho_{\pm}} \gamma_k \cdot d_z^{-1/2}, \quad (5)$$

Все параметры структуры определяли методом просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ) и рентгеноструктурного анализа (РСА). Внутренние поля напряжений оценивали по контурам изгиба-кручения.

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

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, $K_{\text{реж}} = K_N \cdot K_P \cdot K_T \cdot K_L$, $K_{\text{деф}} = K_{\text{мет}} \cdot K_{\text{рем}} \cdot K_{\text{мон}}$. Для примера, в таблице представлены численные значения некоторых коэффициентов.

Таблица

Обозначения коэффициентов их значения

№ п/п	Обозначение коэффициента	Значение коэффициента	Условия
1.	K_T – температура среды	1,0	Эксплуатация в стационарных режимах при расчетных параметрах
		1,2...1,4	Значительные нарушения температурных режимов, перегревы
		1,1	Незначительные температурные перепады
2.	K_N –цикличность	1,0	Расчетные режимы, пуски-остановы
		1,2...1,3	Нарушения режимов цикличности
		1,05...1,1	Незначительные нарушения
3.	K_L – агрессивность среды	1,0	Расчетная среда
		1,2...1,4	Агрессивная (значительные изменения) нерасчетная среда
		1,1	Незначительные нарушения параметров среды
4.	K_P – давление, либо нагрузка	1,0	Расчетные режимы эксплуатации
		1,2...1,4	Значительные перепады давления, либо нагрузки
		1,05...1,1	Незначительные перепады давления, либо нагрузки

Как ранее отмечено – K_T , коэффициент, характеризующий техническое состояние объекта 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

$$\frac{\tau_{\text{ост}}}{\tau_{\text{тек}}} = \frac{K_{\text{п.с.}} - K_T}{K_T}, \quad (6)$$

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 (6), проведя небольшие

математические преобразования и подставляя в формулу результаты расчетов и исследований, получим искомый результат – остаточное время эксплуатации оборудования.

$$\tau_{\text{ост}} = \frac{\tau_{\text{тек}} (K_{\text{п.с.}} - K_{\text{т}})}{K_{\text{т}}}, \quad (7)$$

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 [4, 5]. Но в любом случае (для исключения больших погрешностей измерений) существует необходимость выполнения эталонных электронно-микроскопических исследований для каждой марки стали.

При локальной перестройке дислокационной структуры во время эксплуатации ТУОПО происходит образование новых источников дальнедействующих полей внутренних напряжений и изменение этих полей характеризует работоспособность металла. В исследованиях [4, 5] с применением 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.** Авторам [4, 5] 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.

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

$$K_f = \frac{W_{\tau} - W_0}{W_f - W_0} \cdot \frac{W_f}{W_{\tau}} \cdot \gamma, \quad (8)$$

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_r), 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.

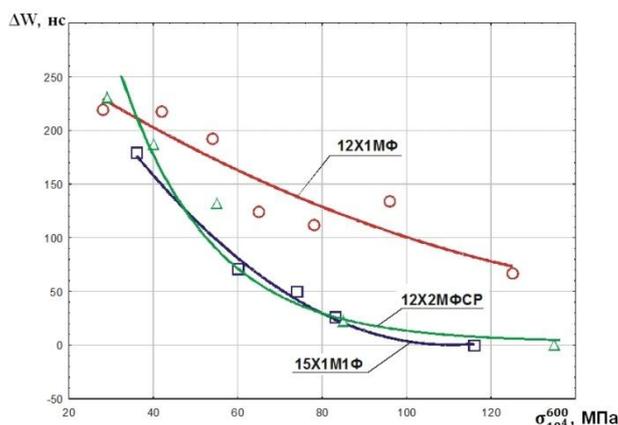


Рис. 1. Влияние длительной прочности теплоустойчивых сталей на время задержки ПАВ

В сварных барабанах котлов высокого давления, изготовленных из сталей 22К и 16ГНМ и специальной молибденовой стали [4] проводили оценку амплитуд полей внутренних напряжений, изучили структуру и фазовое состояние, как основного, так и наплавленного металла после ремонта сваркой дефектных сварных соединений.

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

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

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

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

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

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

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:

$$\Delta R_1 = \left| \Delta \bar{R}_1^{неpn} - \Delta \bar{R}_1^{нар} \right|, \quad (12)$$

$$\Delta R_2 = \left| \Delta \bar{R}_2^{неpn} - \Delta \bar{R}_2^{нар} \right|$$

Спектрально-акустический критерий апробирован на длительно работающем и наплавленном металле ряда барабанов котлов высокого давления. Экспериментально 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. 2) [6].

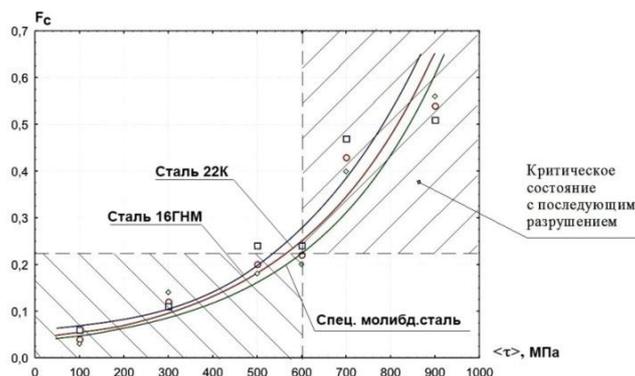


Рис. 2. Связь спектрально-акустического F_c критерия оценки ресурса металла с изменением величины полей внутренних напряжений ($\langle \tau \rangle$)

Выводы

1. Предложена модель оценки ресурса длительно работающего металла объектов ТЭК, основанная на изучении эволюции структурно-

фазового состояния металла. 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.

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

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

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

5. 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.

6. Туляков, Г. А. Термическая усталость в теплоэнергетике. – М.: Машиностроение, 1976. – 198 с.