

А.Н. Смирнов, Н.В. Абабков, С.В. Фольмер

Кузбасский государственный технический университет им. Т.Ф. Горбачева

НОВАЯ МЕТОДОЛОГИЯ ОЦЕНКИ РАБОТОСПОСОБНОСТИ И РЕСУРСА ОСНОВНОГО МЕТАЛЛА И СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ПОТЕНЦИАЛЬНО- ОПАСНОГО ОБОРУДОВАНИЯ ТОПЛИВНО-ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА

Вопросам безопасной эксплуатации технических устройств опасных производственных объектов (ТУОПО) во всем мире уделяется повышенное внимание. В России эта проблема особенно актуальна, так как более 60 % промышленного оборудования отработало расчетный срок, а в энергетике – более 80 %. Повреждения ТУОПО могут привести и приводят к авариям и техногенным катастрофам с человеческими жертвами. За последние 10 лет можно привести достаточное количество примеров [1]. С целью оценки технического состояния потенциально-опасного оборудования в России была создана система экспертизы промышленной безопасности (ЭПБ), применение которой позволяет с достаточной степенью достоверности определять его работоспособность. Одной из составляющих ЭПБ является диагностирование и неразрушающий контроль основного металла и сварных соединений. Применение разрушающих методов для оценки микроструктуры и механических характеристик требует вырезки образцов для испытаний из действующего оборудования, поэтому эти методы практически не применяются. Следовательно, результаты неразрушающего контроля являются определяющими при экспертизе промышленной безопасности потенциально-опасного оборудования.

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 определить ресурс и прогнозировать срок их службы. Неразрушающий контроль в задачах оценки ресурса и работоспособности ТУОПО ориентирован главным образом на выявление уже существующих и развивающихся очагов разрушения, он не дает возможности выявлять стадии зарождения микрповреждений и оценивать характер из-

менения структурно-фазового состояния металла. Проблема усугубляется отсутствием научно обоснованной концепции надежного прогнозирования работоспособности длительно-работающего 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.

В процессе длительной эксплуатации потенциально-опасного оборудования в сложных напряженных условиях, зачастую в агрессивных средах, в основном металле и в металле сварных соединений происходят различные физико-химические процессы, вызывающие ползучесть, усталость, коррозию. В реальных условиях эти явления трудно отделить друг от друга, они чаще всего совместно протекают в металле (например, термоусталость, коррозионно-термическая усталость, усталость в условиях ползучести и др.).

Ранее установлено [2 – 6], что физико-химические процессы, протекающие в металле, приводят к изменению структурно-фазового состояния, в частности, в теплоустойчивых сталях происходит перераспределение легирующих элементов между твердым раствором и карбидами. В этих сталях (например, 12Х1МФ) упрочнение при термической обработке может происходить по трем механизмам:

- в результате фазового наклепа при $\gamma \rightarrow \alpha$ превращении;
- дисперсионного твердения частицами второй фазы;
- взаимодействия атомов легирующих элементов с дислокациями в твердом растворе.

В процессе эксплуатации таких сталей в течение длительного времени при высоких температурах изменяется вклад каждого механизма упрочнения. Вклад от упрочнения твердого раствора с увеличением времени эксплуатации

(или старения) уменьшается, что связано с переходом молибдена в карбидную фазу; вклад от упрочнения частицами второй фазы практически не изменяется вследствие действий двух одновременно протекающих процессов – коагуляции частиц упрочняющей фазы и выделения новых высокодисперсных частиц карбида металла MeC в результате «подстаривания». Первый процесс снижает эффект от упрочнения, а второй приводит к дополнительному упрочнению. На более поздних стадиях эксплуатации (более 100 тыс. ч) коагуляция частиц становится основным фактором, приводящим к снижению эффекта дисперсионного твердения. Вклад от фазового наклепа в общее упрочнение, определяющийся плотностью дислокаций, закрепленных карбидами MeC , меняется в зависимости от условий эксплуатации (действующих напряжений и др.), его изменение определяется главным образом термической устойчивостью карбидов MeC .

Авторами работ [7 – 9] показано, что при локальной перестройке дислокационной структуры во время эксплуатации ТУОПО происходит образование новых источников дальнodelствующий полей внутренних напряжений, и изменение этих полей характеризует работоспособность металла. Установлены зависимости между длительной прочностью хромомолибденованадиевых сталей и величиной локальных полей внутренних напряжений. В исследованиях [6, 8] с применением электронной микроскопии доказано, что для конструкционных сталей величина локальных полей внутренних напряжений и характер распределения их источников являются важнейшими показателями работоспособности и оценки ресурса потенциально-опасного оборудования. Отсюда, разработка методов неразрушающего контроля для оценки локальных полей внутренних напряжений – важнейшая проблема, которая была частично решена акустическими методами.

Для решения поставленных задач в Нижнем Новгороде была разработана принципиально новая акустическая система «АСТРОН» в соответствии с концепцией развития диагностики и прогнозирования разрушения ТУОПО и сварных конструкций. Основные задачи:

- разработка теории и методов прогноза несущей способности сварных конструкций на основе исследований разрушения материала и конструкций и сопутствующих ему распространяющихся упругих колебаний – носителей информации о процессах, протекающих в материале при разрушении;

- разработка математического обеспечения для обработки поступающей в аппаратуру информации; разработка теории, методов, алгоритмов и программ, связанных с прогнозированием и принятием решения о состоянии конструкции; разработка и совершенствование информационно-измерительных систем, предназначенных для анализа прогнозирующей информации.

В основу работы аппаратной части системы положен способ подробной регистрации всей серии отраженных акустических импульсов для ее последующей обработки средствами программной части системы.

Для передачи первичной акустической информации в обрабатывающую часть системы (компьютер типа NOTEBOOK) производится последовательное преобразование осциллограммы отраженных импульсов с определенным шагом дискретизации с момента зондирования исследуемого материала и до прихода n -го отраженного импульса.

Экспериментальные исследования показали, что оптимальной величиной для шага дискретизации является 5 – 10 нс. Эта величина позволяет в рамках решаемых задач обеспечить относительную погрешность определения временных параметров, не превышающую значения 10^{-5} .

Авторам работ [9 – 11] 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 минимальные прочностные характеристики и 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).

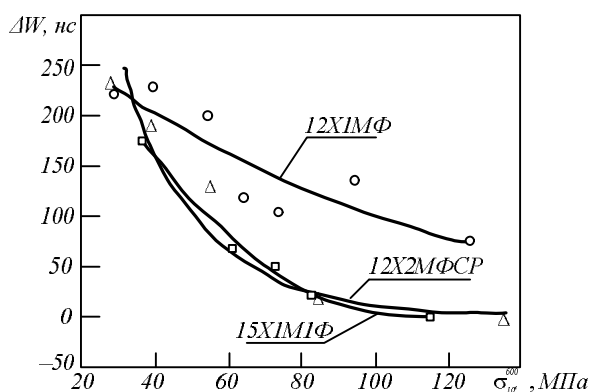


Рис. 1. Влияние длительной прочности теплоустойчивых сталей на время задержки ПАВ

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

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

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); здесь γ – коэффициент, учитывающий материал контролируемого элемента. Комплексный критерий предельного состояния (K_f) апробирован на ряде разрушенных элементов энергооборудования. Экспериментально доказано, что при $K_f \geq 0,7$ металл достигает предельного состояния.

Комплексный критерий предельного состояния 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 паротрубопроводов проводили комплекс специальных исследований. С применением методов электронной микроскопии изучали структуру, фазовый состав и внутренние напряжения в сварных соединениях из стали 20 и 12Х1МФ [12, 13] после различных сроков эксплуатации (рис. 2) и поврежденные соединения.

Анализ результатов акустических измерений сварных соединений паропроводов из стали 12Х1МФ показал, что наибольшее время задержки ПАВ зарегистрировано на участках образцов с максимальной величиной полей внутренних напряжений. 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. При этом измеряли время задержки ПАВ на поверхности сварного соединения, находящегося в исходном состоянии, и на поверхности исследуемого сварного соединения. Под исходным состоянием сварного соединения понимается сварное соединение, выполненное из тех же основных и сварочных материалов по той же технологии, что и контролируемое.

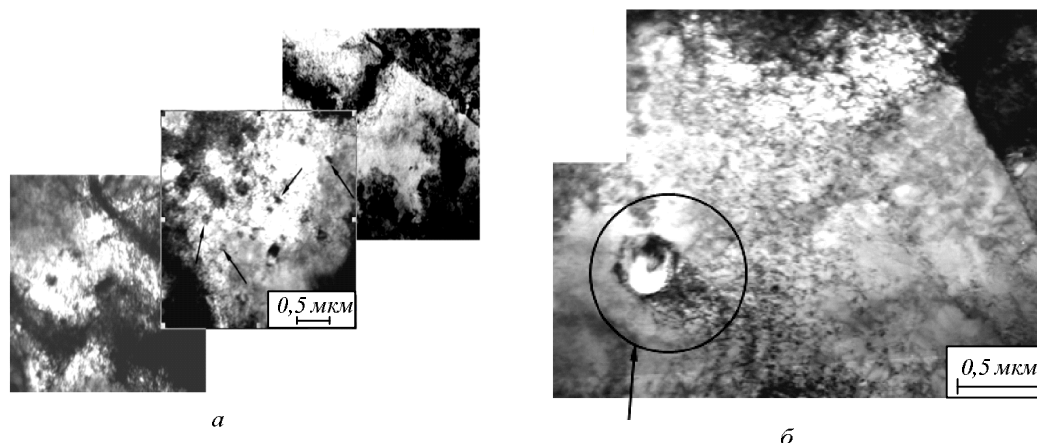


Рис. 2. Электронно-микроскопическое изображение тонкой структуры стали 12Х1МФ: а – ферритное зерно, присутствуют частицы карбида $Me_{23}C_6$, не связанные с дислокациями (основной металл); б – ферритное зерно, присутствует частица карбида $Me_{23}C_6$ (металл шва)

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

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

где R_{01} и R_{02} – среднестатистическое время задержки ПАВ, поляризованной вдоль сварного соединения и перпендикулярно сварному соединению (исходное состояние), нс; R_{t01} и R_{t02} – среднестатистическое время задержки ПАВ, поляризованной вдоль и перпендикулярно сварному соединению контролируемых элементов, нс.

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

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».

Выводы. Разработана новая методология, основанная на выявлении закономерностей изменения структурно-фазового состояния и полей внутренних напряжений в длительно-ра-

ботающем металле и в сварных соединениях потенциально-опасного оборудования топливно-энергетического комплекса спектрально-акустическим методом. Разработаны комплексный акустический критерий предельного состояния металла энергооборудования и критерий оценки ресурса сварных соединений, которые нашли применение на ряде энергетических предприятий.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. К л ю е в В.В. Деградация диагностики безопасности. – М.: Издательский дом «Спектр», 2012. – 128 с.
2. Л а н с к а я К.А. Жаропрочные стали. – М.: Металлургия, 1969. – 245 с.
3. К о н е в а Н.А., К о з л о в Э. В. Природа субструктурного упрочнения // Изв. вуз. Физика. 1982. № 8. С. 3 – 14.
4. К о н е в а Н.А., К о з л о в Э.В., Т р и ш к и н а Л.И., Л ы ч а г и н Д.В. Дальнействующие поля напряжений, кривизна-кручение кристаллической решетки и стадии пластической деформации. Методы измерений и результаты // Новые методы в физике и механике деформируемого твердого тела. Труды международной конференции. – Томск: изд. ТГУ, 1990. С. 83 – 93.
5. И в а н о в Ю.Ф., Л ы ч а г и н Д.В., Г р о м о в В.Е. и др. Мезоскопическая субструктура и электроимпульсное подавление усталостного разрушения // Физическая мезомеханика. 2000. № 1. Т. 3. С. 103 – 108.
6. С м и р н о в А.Н., Х а п о н е н Н.А., Ч е л ы ш е в А.Н., М е д в е д е в С.Н. Оценка состояния длительно-работающего металла технических устройств опасных производственных объектов // Безопасность труда в промышленности. 2004. № 3. С. 28 – 31.
7. С м и р н о в А.Н., Б л ю м е н ш т е й н В.Ю., К р е ч е т о в А.А., Х а п о н е н Н.А. Использование УЗ-сигналов для идентификации НДС // Безопасность труда в промышленности. 2002. С. 32 – 36.
8. С м и р н о в А.Н., К о з л о в Э.В. Субструктура, внутренние поля напряжений и проблема разрушения паропроводов из стали 12Х1МФ. – Кемерово: Кузбассвузиздат, 2004. – 163 с.
9. С м и р н о в А.Н., М у р а в ь е в В.В., Х а п о н е н Н.А. Акустический критерий предельного состояния длительно-работающего металла технических уст-

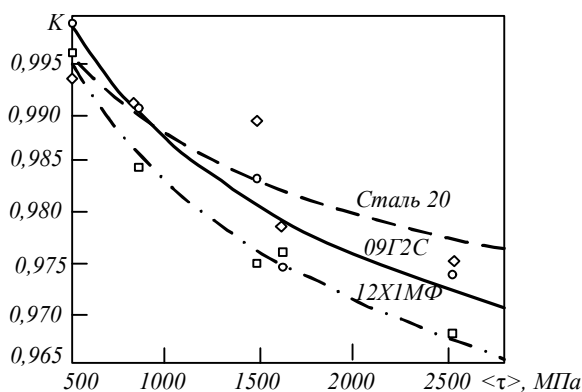


Рис. 3. Связь критерия K оценки ресурса сварных соединений с амплитудой локальных (моментных) напряжений τ

- роиств опасных производственных объектов // Контроль. Диагностика. 2004. № 5. С. 19 – 23.
10. Смирнов А.Н., Муравьев В.В., Фольмер С.В. Структурно-фазовое состояние и ресурс длительно работающего металла технических устройств опасных производственных объектов, перспективы дальнейшего развития методов оценки работоспособности // Контроль. Диагностика. 2009. № 1. С. 22 – 32.
 11. Смирнов А.Н., Муравьев В.В., Кононов П.В. и др. Жаропрочность и поля внутренних напряжений в теплоустойчивых сталях // Контроль. Диагностика. 2009. № 2. С. 45 – 51.
 12. Смирнов А.Н., Фольмер С.В., Абабков Н.В. Локальные поля внутренних напряжений в сварных соединениях, спектрально-акустический метод их выявления и синергетический подход к материаловедению // Вестник КузГТУ. 2009. № 3. С. 28 – 38.
 13. Смирнов А.Н., Фольмер С.В. Влияние исходной структуры и физико-механических свойств конструкционных сталей на их акустические характеристики // Вестник КузГТУ. 2008. № 3. С. 73 – 75.
- © 2013 г. А.Н. Смирнов, Н.В. Абабков,
С.В. Фольмер
Поступила 29 ноября 2013 г.

УДК 662.8

***В.И. Багрянцев, С.А. Бровченко, А.П. Подольский, А.А. Рыбушкин, М.В. Темлянецв,
С.А. Казимиров***

Сибирский государственный индустриальный университет

РАЗРАБОТКА АГРЕГАТА И ТЕХНОЛОГИИ ДЛЯ ЭФФЕКТИВНОГО СЖИГАНИЯ ДИСПЕРСНЫХ ОТХОДОВ УГЛЕОБОГАЩЕНИЯ ВО ВРАЩАЮЩЕМСЯ ПОТОКЕ ВОЗДУХА

К настоящему времени в Кузбассе накоплено значительное количество отходов обогащения угля. Это связано с несовершенством действующих на углеобогащающих фабриках технологий, поскольку в отходах углеобогащения содержание угля может достигать 25 % и более. Отходы углеобогащения, хотя и содержат значительное количество угля, но в качестве топлива имеют крайне ограниченную область применения, поскольку характеризуются высокой зольностью, влажностью и мелкодисперсным гранулометрическим составом [1]. Большинство современных котельных установок не предназначены для работы на таком виде топлива. Для слоевого сжигания отходов углеобогащения требуется их окомкование или брикетирование. Сжигание дисперсного топлива в кипящем слое, открытом факеле или приготовление на его основе водугольных суспензий значительно усложняет и удорожает конструкцию котельного агрегата или требует соответствующей топливподготовки [2], что снижает привлекательность отходов углеобогащения как относительно распространенного и дешевого вида топлива.

В связи с этим в Сибирском государственном индустриальном университете проведены исследования по разработке тепловой установки, работающей на принципах вихревых процессов, и технологии эффективного сжигания дисперсных отходов углеобогащения.

Поскольку теплотворная способность отходов углеобогащения значительно ниже, чем у традиционных видов топлива, в тепловой установке процессы сжигания, генерации тепла и нагрева теплоносителя разделены: сжигание реализовано в отдельной топке, теплообменник вынесен за пределы топочного объема как самостоятельный агрегат. В пользу такого решения служит то обстоятельство, что значительная часть отходов углеобогащения имеет высокое содержание золы, достигающее в некоторых случаях до 40 %. В связи с этим теплообменная часть агрегата должна быть приспособлена к большим потокам (расходам) твердого материала. Здесь же конструктивно решается вопрос улавливания золы, которая находится в пылевидном состоянии.

Конструкция разработанной цилиндрической вихревой топки (подобной [3]) схематично представлена на рис. 1.