ТЕХНОЛОГИЯ МАШИНОСТРОЕНИЯ

УДК 621.791.05:620.179

Н.В. Абабков, А.В. Бенедиктов, А. Н. Смирнов, О. Н. Дегтярева, А.С.Глинка

СОВРЕМЕННОЕ МЕТОДИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДЛЯ ОЦЕНКИ СОСТОЯНИЯ МЕТАЛЛА ПОТЕНЦИАЛЬНО ОПАСНОГО ОБОРУДОВАНИЯ. ЧАСТЬ 2. СПЕКТРАЛЬНО-АКУСТИЧЕСКИЙ МЕТОД КОНТРОЛЯ

Цель работы – оценка связей акустических характеристик с параметрами микроструктуры, структурной поврежденностью и физико-механическими характеристиками изученных сталей. Исследования проводились на базе портативной многофункциональной акустической системы "Астрон", предназначенной для использования в задачах контроля состояния материала в составе деталей, узлов и полуфабрикатов (система разработана и изготовлена по нашему техническому заданию). В основу работы системы положен современный спектральный импульсный метод акустической структуроскопии. Система предназначена для решения широкого класса научных и инженерных задач, связанных с исследованием структурных особенностей конструкционных материалов и оценкой прочностных параметров материала ответственных деталей и узлов с целью принятия решения о возможности их безопасной эксплуатации. Специальными функциями системы являются:

- контроль физико-механических характеристик, коррелирующих с величиной времени задержки поверхностной акустической волны (ПАВ). Для выполнения этих исследований используется датчик контроля поверхностных волн (в дальнейшем, релеевский датчик);

-контроль физико-механических характеристик, коррелирующих с величиной коэффициента затухания объемных волн в материале объекта. Для выполнения этих исследований используется датчик контроля затухания объемных волн (в дальнейшем, объемный датчик).

Возможны два варианта использования системы в режиме первой и второй функции.

1. Если известен акустический параметр, коррелирующий с контролируемой характеристикой, то достаточно, выбрав первую или вторую функцию системы, провести процедуру обучения и формирования базы данных в соответствии с описанием соответствующего режима работы системы;

2. Если акустический параметр, коррелирующий с контролируемой характеристикой, заранее неизвестен, то наличие этой корреляции можно установить, используя специальный режим работы системы (режим виртуального осциллографа и спектрального анализатора).

Использовался второй вариант, предполагающий определение взаимосвязей контролируемых структурных, физико-механических и акустических характеристик.

Режим контроля указанных характеристик, коррелирующих с величиной времени задержки ПАВ в материале объекта, обеспечивает:

- проведение обучающего эксперимента на образцах с известными характеристиками и формирование базы данных для любого числа материалов;

- проведение контроля характеристик материалов, содержащихся в базе данных системы;

- текущую корректировку базы данных для учета неоднородности свойств исследуемого материала с целью увеличения точности оценки исследованных характеристик (режим эталонирования).

Режим определения параметров микроструктуры при использовании релеевского датчика предназначен для оценки величины длительной прочности, структурной поврежденности, внутренних напряжений и других физико-механических характеристик исследованных материалов на различных этапах жизненного цикла. Относительная погрешность измерения величины измеряемых характеристик при использовании релеевского датчика не более 10% от максимальной ее величины.

В соответствии с инструкцией режим контроля физико-механических характеристик, коррелирующих с величиной коэффициента затухания объемных волн в материале объекта, позволяет оценить степень пористости сплавов как эффективное средство замены трудоемкого металлографического метода.

В режиме виртуального осциллографа и спектрального анализатора обеспечивает: аппаратную поддержку излучения и приема волн различных типов в диапазоне частот 2,5 – 10 МГц; цифровое преобразование серии импульсов, обеспечивающее временную дискретизацию сигналов с шагом 5, 10 или 20 наносекунд (нс); выбор длины принимаемой реализации в диапазоне 0,5 – 80 мкс; передачу акустической информации в IBM-совместимую ПЭВМ; вы-

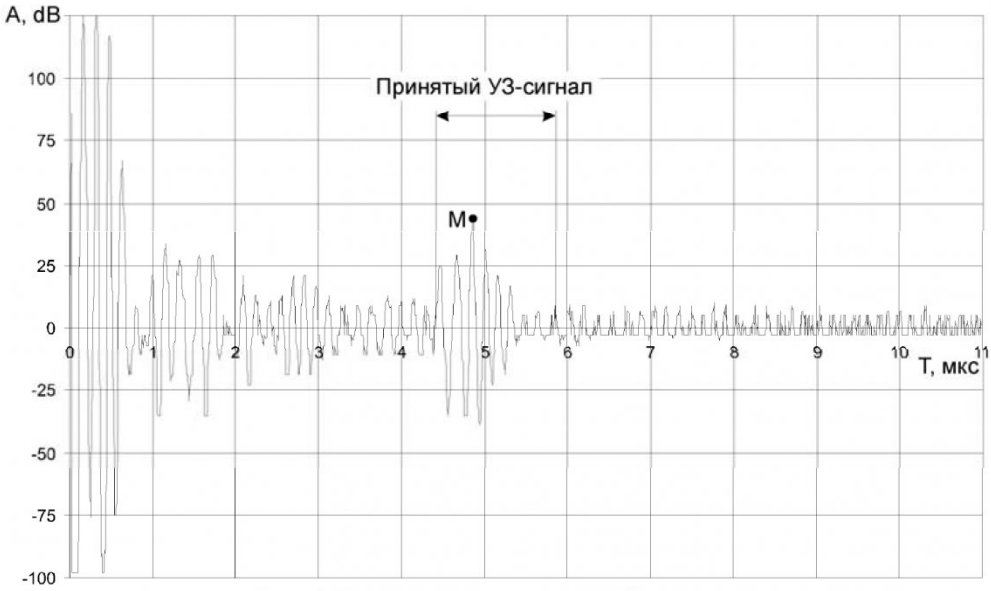

Рис. 1. Полная осциллограмма УЗ-сигнала

числение акустических задержек с абсолютной погрешностью не более 1 нс на базе 10 мкс (при постоянном акустическом контакте и нормальных условиях); вычисление частотно-зависимых коэффициентов затухания с относительной погрешностью не более 5% (при постоянном акустическом контакте и нормальных условиях); спектральную амплитудную и фазовую обработку принятых импульсов и др.

Исследования проводились в несколько этапов.

На первом этапе исследовали образцы, вырезанные из изучаемых сталей после различных режимов термической обработки с различными типами структур и разными механическими свойствами в исходном состоянии. Задачей данного этапа являлось установление требуемых взаимосвязей и выполнение тарировки ультразвуковых сигналов относительно параметров состояния материала.

На втором этапе проводили оценку влияния эволюции микроструктуры, изменения физико-механических свойств при длительной эксплуатации на характер УЗ-колебаний.

На третьем этапе выполняли исследования параметров ультразвука в зависимости от внутренних напряжений, выявленных электронно-микроскопическим методом.

Исходными данными являлись осциллограммы, представляющие собой значения амплитуд УЗ-сигнала, следующие через 10 нс (рис. 1). Из осциллограммы выделялся принятый системой УЗ-сигнал, время начала которого соответствовало времени появления сигнала с максимальным значением амплитуды принятого импульса (точка М), а время окончания соответствовало моменту затухания сигнала.

Для принятых УЗ-сигналов определялись координаты точек с указанной выше дискретностью, включая характерные максимумы и минимумы. Для обработки УЗ-сигналов использовались методы математической статистики и математический аппарат теории затухающих колебаний. Затухающие колебания – это те, энергия которых уменьшается с течением времени; затухание свободных колебаний обусловлено диссипацией энергии. В общем виде дифференциальное уравнение малых затухающих колебаний системы имеет вид:

$$\ddot{x} + 2\delta\ \dot{x} + \omega_0^2 x = 0, \qquad (1)$$

где $\delta = r/2b_0$ - коэффициент затухания;

$\omega_0 = \sqrt{\beta/b_0}$ -циклическая частота свободных колебаний системы в отсутствие трения; $r > 0$ - обобщенный коэффициент трения. Если $\delta < \omega_0$, то система совершает затухающие колебания, описываемые уравнением:

$$x(t) = A_0 \cdot e^{-\delta \cdot t} \cdot \sin(\omega \cdot t + \varphi_0) \qquad (2)$$

где A_0 и φ_0 - постоянные величины, определяемые из начальных условий, а $\omega = \sqrt{\omega_0^2 - \delta^2}$ - собственная циклическая частота колебаний диссипативной системы. Величина $A_0(t) = A_0 \cdot e^{-\delta \Delta t}$ называется амплитудой затухающих колебаний. Значения амплитуды для моментов времени t, $t+\Delta t$, $t+2\Delta t$ и т.д. образуют убывающую геометрическую прогрессию, знаменатель которой равен $e^{-\delta \Delta t}$. Условным периодом затухающих колебаний называется промежуток времени между двумя последовательными состояниями системы, при которых колеблющаяся величина x проходит через равновесное значение, изменяясь в одном и том же направлении:

$$T = \frac{2\pi}{\omega} = \frac{2\pi}{\sqrt{\omega_0^2 - \delta^2}} \qquad (3)$$

Логарифмическим декрементом затухания называется натуральный логарифм отношения амплитуд колебаний в моменты времени t и $t+T$:

$$\vartheta = \ln \frac{A(t)}{A(t+T)} = \delta T \qquad (4)$$

Логарифмический декремент затухания – величина, обратная числу колебаний N, по истечении которых амплитуда уменьшается в e раз:

$$\vartheta = \frac{1}{N} \qquad (5)$$

Промежуток времени, необходимый для совершения числа колебаний N, называется временем релаксации:

$$\tau = NT = \frac{1}{\delta} \qquad (6)$$

Аппаратная часть системы "Астрон" содержит: оригинальный блок накопления акустической информации, назначение которого – излучение и прием зондирующих акустических импульсов мегагерцового диапазона, их преобразование в цифровой код, запись в устройство хранения и передача в ПЭВМ; комплект оригинальных акустических датчиков; ПЭВМ типа NOTEBOOK. В основу работы аппаратной части системы "Астрон" 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.

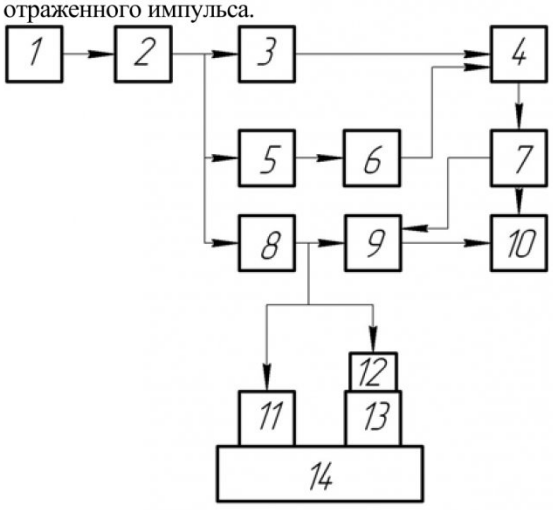

Рис. 2. Структурная схема аппаратной части системы "Астрон":
1 – интерфейс; 2 – тактовый генератор; 3 – генератор пилообразного напряжения;
4 – компаратор; 5 – счетчик; 6 – ЦАП; 7 – генератор строба; 8 – генератор зондирующих импульсов; 9 – устройство выборки-хранения;10 – АЦП; 11 – рабочий датчик; 12 – эталонирующий датчик; 13 – металлическая призма; 14 – исследуемый образец.

Электронный блок системы работает следующим образом (рис. 2). По сигналу с ПЭВМ интерфейс *1* включает тактовый генератор *2*, который на каждом тактовом импульсе запускает генератор пилообразного напряжения *3*, зондирующий генератор *8* и подает импульсы на счетчик *5*, управляющий работой ЦАПа *6*. ЦАП подает напряжение, пропорциональное номеру цикла, на один вход компаратора *4*. При достижении напряжения на другом входе компаратора *5*, поступающего с ГПИ *3*, напряжения ЦАПа *6*, компаратор *4* запускает генератор строба *7*. В этот момент сигнал с приемного датчика *11* записывается в устройство выборки-хранения *9*. АЦП *10* преобразует аналоговый сигнал в цифровой код, после передачи которого в ПЭВМ интерфейс *1* организует следующий цикл. После передачи заданного количества стробов интерфейс *1* останавливает работу системы.

При исследовании взаимосвязей параметров механического состояния материала и параметров ультразвукового сигнала использовались релеевский и объемный датчики. Схема измерений с помощью релеевского датчика показана на рис. 3, используемый релеевский датчик – на рис. 4. Датчик поверхностных волн представляет собой выполненные в одном корпусе излучатель и приемник и состоит из двустороннего клина из оргстекла *1* с углом ввода ультразвука 27°, излучателя *2* и приемника *3* релеевских волн с центральной частотой 5 МГц. Дополнительно датчик содержит излучатель – приемник продольных объемных волн *4*, генерирующий последовательность импульсов, распространяющихся перпендикулярно плоскости клина.

Двусторонний клин из оргстекла имеет большой коэффициент теплового расширения. Температурное изменение суммарного акустического пути приводит к значительным погрешностям временных измерений. Для учета этих температурных эффектов используется специальный дополнительный преобразователь *4*, формирующий термоимпульс.

В процессе измерения между экспериментальным образцом и датчиком наносился слой глицерина для обеспечения надежного акустического контакта. Шероховатость поверхности всех исследуемых образцов не превышала *Ra1,6*.

Основные полученные экспериментальные закономерности и зависимости

Влияние термической обработки на время задержки ПАВ. Установлено, что после закалки, отжига и нормализации, закалки с низким, сред-

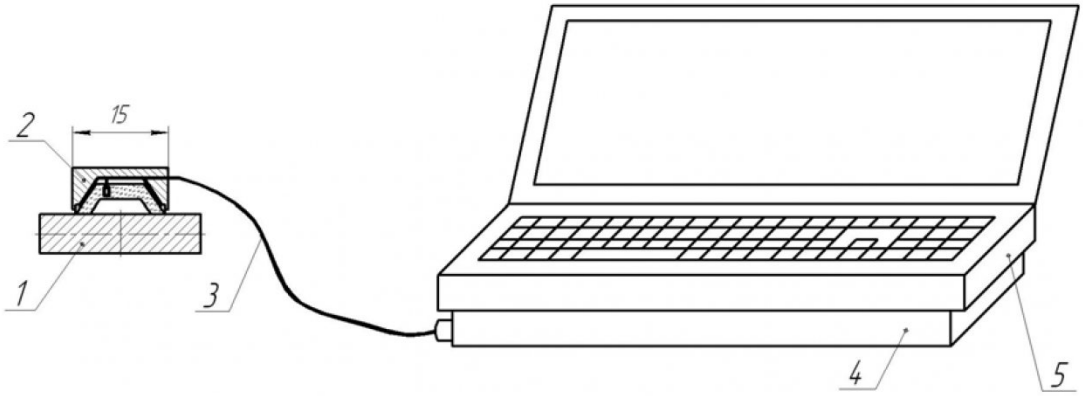

Рис. 3. Схема измерения с использованием релеевского датчика:
1 – экспериментальный образец; 2 – релеевский датчик (база–15 мм); 3 – высокочастотный кабель; 4 – система "Астрон"; 5 – ПЭВМ

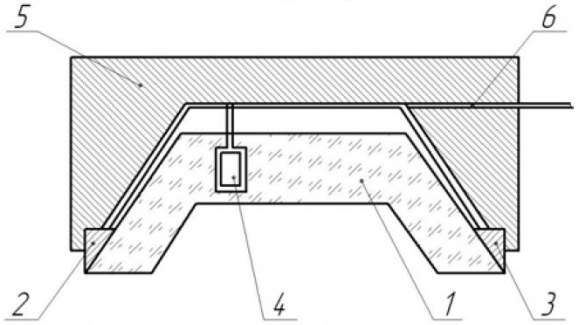

Рис. 4. Малобазный релеевский датчик:
1 – двусторонний клин из оргстекла; 2 – излучатель релеевских волн; 3 – приемник релеевских волн; 4 – излучатель–приемник термоимпульсов; 5 – корпус;6 – высокочастотный кабель

ним и высоким отпуском сталей 20, 17ГС, 09Г2С и 16Г2АФ время задержки ПАВ (ΔW) в них зависит от характера микроструктуры и связано с механическими характеристиками. Анализ результатов показал, что увеличение времени задержки ПАВ в исследованных сталях связано с повышением степени искаженности кристаллической решетки при образовании пересыщенных твердых растворов после закалки, а уменьшение времени задержки ПАВ – со снижением искаженности кристаллической решетки за счет распада пересыщенных твердых растворов при отпуске, вследствие чего растут упругие модули и уравновешивается структура.

Для исследованных сталей с увеличением температуры отпуска пластические свойства увеличиваются, а прочностные характеристики (твердость, пределы прочности и текучести) снижаются.

Результаты исследований влияния структурного состояния длительно-работающих теплоустойчивых сталей на акустические характеристики. Для подтверждения высокой чувствительности и правильности выбора спектрально-акустического метода исследовали два поврежденных гиба паропроводов, разрушенных после 160 537 и 176 256 часов эксплуатации, изготовленных из стали 12Х1МФ. Во всех участках исследованных гибов скалярная плотность дислокаций изменяется случайным образом, тем не менее, имеется тенденция к ее уменьшению по мере удаления от зон разрывов. Средняя амплитуда кривизны-кручения и плотность экстинкционных контуров уменьшаются с увеличением расстояния от берегов магистральных трещин. Локальные внутренние поля напряжений (изгиба-кручения) велики, приближаются к пределу прочности и превосходят его у кромок разрыва. В этих же зонах зарегистрирован повышенный уровень времени задержки ПАВ.

На основе широкого набора экспериментальных данных по исследованию теплоустойчивых хромомолибденованадиевых сталей впервые установлены физические закономерности распространения ПАВ при изменении плотности контуров изгиба-кручения, величины локальных внутренних (дальнодействующих) полей напряжений и длительной прочности. Доказано, что уменьшение плотности контуров изгиба-кручения, значений амплитуды кривизны-кручения кристаллической решетки, величины локальных внутренних напряжений приводит к уменьшению степени ослабления ультразвука и снижению время задержки ПАВ.

Установлено (рис. 5), что с уменьшением длительной прочности во всех исследованных (теплоустойчивых) сталях происходит рост времени задержки ПАВ, вызванный увеличением плотности источников внутренних полей напряжений.

Комплексный критерий предельного состояния.

Применение базы данных технических устройств опасных производственных объектов (БД ТУОПО) создает условия для решения задач автоматизации в области технического надзора потенциально опасного оборудования, способствует повышению уровня его безопасной эксплуатации. На основе результатов эксперимента и БД ТУОПО разработан комплексный критерий предельного состояния длительно-работающего металла

$$K_f = \frac{W_\tau - W_0}{W_f - W_0} \cdot \frac{W_f}{W_\tau} \cdot \gamma \qquad (7)$$

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 [1, 2. 3].

После длительной эксплуатации (316 тыс. час.) барабана котла №3 Южно-Кузбасской ГРЭС в металле было выявлено растрескивание в зонах приварки водоопускных труб.

Трещины в сечении шва развивались в наплавленном металле по зернам и по их границам. Проведен уникальный ремонт дорогостоящего барабана. Методом конечных элементов выполнен расчет напряженно-деформированного состояния барабана до и после ремонта.

Время задержки ПАВ измеряли в одних и тех же точках до и после ремонта После ремонта интенсивность напряжений снизилась от 19,3 до 17,4 МПа, а ККПР изменился от 0,756 до 0,199, что подтверждает высокую чувствительность разработанного метода и целесообразность его широкого применения. Разработана методика определения предельного состояния длительно-работающего металла энергооборудования по акустическим характеристикам, которая была рекомендована к применению Госгортехнадзором России при проведении работ по экспертизы промышленной безопасности ТУОПО [4, 5, 6].

Преимущества и недостатки спектрально-акустического метода. Направления дальнейших исследований

Достоинства. Предлагаемая методика позволяет путем проведения неразрушающего контроля без проведения длительных разрушающих испытаний теплоустойчивых сталей определять их длительную прочность (жаропрочность). Методика основана на уникальных свойствах ультразвуковых волн выявлять множество рассеянных микроповреждений, размеры каждого из которых меньше порога чувствительности многих других методов испытаний. Методика запатентована.

Анализ результатов эксперимента показывает высокую чувствительность спектрально-акустического метода к определению изменений параметров микроструктуры. Неоднократно предпринимались попытки связать акустические характеристики с механическими свойствами сталей для организации системы неразрушающего контроля промышленного оборудования. Однако большинство этих экспериментов решали частный вопрос неразрушающего контроля прочности одной марки стали после определенной термической обработки. Результаты этих испытаний не дают полного представления о причинах изменения акустических характеристик в металлических материалах и об их зависимости от структурного состояния и др.

В результате нашего эксперимента для теплоустойчивых хромомолибденованадиевых сталей установлена определяющая роль локальных (дальнодействующих) полей внутренних напряжений в изменении времени задержки ПАВ.

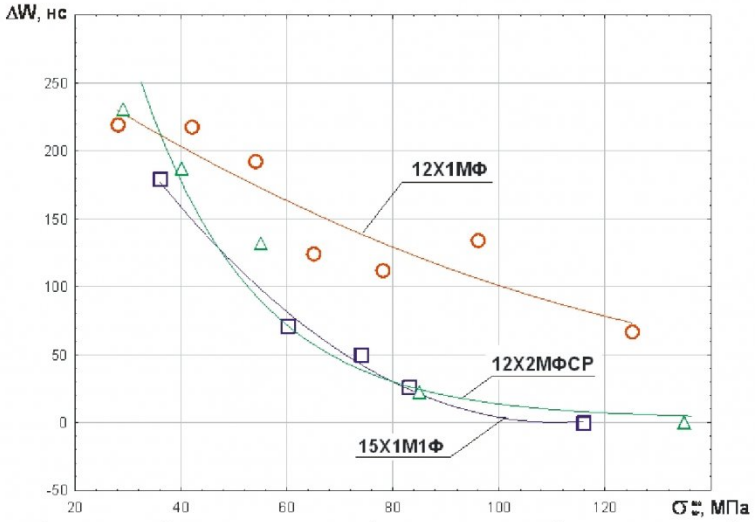

Рис. 5. Связь длительной прочности исследованных сталей с временем задержки ПАВ

Недостатки. Для определения длительной прочности по предлагаемой методике необходимо провести ряд дорогостоящих подготовительных мероприятий включающих: выведение энергетического оборудования из работы, выбор доступной зоны для контроля в техническом устройстве и подготовка контролируемого участка с высокой степенью чистоты обработки поверхности.

Направления дальнейших исследований. Для широкого внедрения метода в промышленность необходимо проведение ряда дополнительных экспериментов и исследований различных классов сталей, эксплуатирующихся как в агрессивных средах, так и при различных напряжениях и условиях с целью выявления характеристик структуры, оказывающих определяющее влияние на параметры акустических характеристик. Необходимо для каждой марки сталей разработать номограммы, определяющие критерии предельного состояния по акустическим характеристикам с учетом комплекса эксплуатационных характеристик обследуемого оборудования.

Необходима разработка теории формирования и трансформации локальных полей внутренних напряжений и остаточного напряженного состояния в основном металле и сварных соединениях как научной основы создания расчетного аппарата оценки их работоспособности в процессе длительной эксплуатации.

Создание новой методологии описания деформируемого твердого тела как многоуровневой системы позволяет представить перспективы развития экспертизы промышленной безопасности, технического диагностирования и оценки остаточного ресурса ТУОПО. Самовосстановление поверхностного слоя при наличии эксплуатационных дефектов – одна из актуальнейших задач современного металловедения. Процесс самовосстановления может осуществляться под непосредственным контролем акустическими методами (спектрально-акустический, акустико-эмиссионный и т. д.), которые ускоренно развиваются в последнее время. Интенсивное развитие технологий получения интеллектуальных материалов (самовосстанавливающихся) и восстановление структурно-фазового состояния длительно-работающих материалов позволит свести к минимуму число техногенных катастроф из-за выработки ресурса. Самособирающиеся структуры можно использовать для придания высокой жаропрочности, жаростойкости, коррозионной стойкости и т. д. оборудованию, эксплуатирующемуся в сложных напряженных условиях. Проектирование интеллектуальных материалов является важнейшей технической задачей и главной экономической возможностью нанотехнологий.

Следовательно, развитие идей синергетики и практическое применение разрабатываемых материалов и новых неразрушающих физических способов и методов оценки их структурно-фазового состояния приведет к повышению безопасной эксплуатации потенциально-опасного оборудования, к снижению аварийности и травматизма и произведет переворот в развитии материаловедения и технического диагностирования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Смирнов, А.Н.* Диагностирование технических устройств опасных производственных объектов / А.Н. Смирнов, Б.Л. Герике, В.В. Муравьев. – Новосибирск: Наука, 2003. – 244 с.

2. *Смирнов А.Н.* Исследование структурного состояния и твердости основного металла и сварных соединений жаропрочных сталей акустическими методами // Безопасность труда в промышленности. – 2003. – № 3. – С. 37-41.

3. Пат. № 2231057 Российская Федерация. Способ неразрушающего контроля степени поврежденности металлов эксплуатируемых элементов теплоэнергетического оборудования / А. Н. Смирнов, Н. А. Хапонен. – 2004.

4. Оценка состояния длительно работающего металла технических устройств опасных производственных объектов / А.Н. Смирнов [и др.] // Безопасность труда в промышленности. – 2004. – №3. – С.28-31.

5. *Смирнов, А.Н.* Акустический критерий предельного состояния длительно работающего металла технических устройств опасных производственных объектов / А.Н. Смирнов, В.В. Муравьев, Н.А. Хапонен // Контроль. Диагностика. – 2004. – №5. – С. 19-23.

6. Повреждаемость сварных соединений. Спектрально-акустический метод контроля / А.Н. Смирнов, Н.А. Конева, С.В. Фольмер, Н.А. Попова, Э.В. Козлов. – М.: Машиностроение. 2009. – 325с.

Авторы статьи:

Абабков Николай Викторович - инженер каф. технологии машиностроениях КузГТУ Тел. 8-904-994-3154, Email: n.ababkov@rambler.ru

Бенедиктов Александр Викторович - инженер Кемеровской ГРЭС Тел. (384-2) 36-45-27

Смирнов Александр Николаевич - докт. техн. наук, проф. каф. технологии машиностроения КузГТУ Тел. (384-2) 36-45-27

Дегтярева Ольга Николаевна - ст. преп. каф. технология машиностроения, КузГТУ Тел. (384-2) 39-63-75 Email: don.tma@kuzstu.ru

Глинка Александра Сергеевна - ассистент каф. технология машиностроения, КузГТУ. Тел..(384-2) 39-63-75 Email: gas.tma@kuzstu.ru