

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Кузбасский государственный технический университет
имени Т. Ф. Горбачева»

Кафедра технологии машиностроения

Составители
А. Н. Смирнов
Н. В. Абабков
Е. Е. Левашова
М. В. Пимонов

МЕТОДЫ КОНТРОЛЯ И ДИАГНОСТИКИ РЕСУРСА ОБЪЕКТОВ РЕНОВАЦИИ

Методические указания к лабораторным занятиям

Рекомендовано учебно-методическими комиссиями
направления подготовки 15.03.01 Машиностроение
в качестве электронного издания
для использования в образовательном процессе

Кемерово 2019

Рецензент

Клепцов А. А. – кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой технологии машиностроения

Смирнов Александр Николаевич

Абабков Николай Викторович

Левашова Елена Евгеньевна

Пимонов Максим Владимирович

Методы контроля и диагностики ресурса объектов реновации: методические указания к лабораторным работам [Электронный ресурс] для обучающихся направления подготовки 15.03.01 Машиностроение, профиль 02 Реновация оборудования топливно-энергетического комплекса, всех форм обучения / сост.: А. Н. Смирнов, Н. В. Абабков, Е. Е. Левашова, М. В. Пимонов; КузГТУ. – Кемерово, 2019.

Методические указания предназначены для студентов, обучающихся по направлению 15.03.01 Машиностроение, профиль 02 Реновация оборудования топливно-энергетического комплекса при изучении дисциплины «Методы контроля и диагностики ресурса объектов реновации». В методических указаниях изложены лабораторные работы и форма контроля.

© КузГТУ, 2019

© Смирнов А. Н.,
Абабков Н. В.,
Левашова Е. Е.,
Пимонов М. В.,
составление, 2019

Содержание лабораторных работ

Лабораторная работа №1

ПРЕДМЕТ И ЗАДАЧИ ТЕХНИЧЕСКОГО ДИАГНОСТИРОВАНИЯ

1. Цель работы

Целью работы является изучение магистрами основ теоретических положений технического диагностирования.

2. Теоретические положения

2.1. История развития технического диагностирования

Научное направление фундаментальных и прикладных исследований по проблемам определения и повышения прочности, ресурса, живучести и безопасности сложных технологических систем с учетом сложных эффектов нелинейности, наследственности, неоднородности и неопределенности сформировалось в последние годы на базе большого числа научно-исследовательских работ, выполнявшихся ранее в нашей стране и за рубежом на протяжении многих десятилетий.

Большое значение для анализа прочности, ресурса и безопасности имеет сложившаяся последовательность формирования фундаментальных научных основ, разработки инженерных методов расчетов и испытаний, создания норм и правил проектирования и изготовления объектов техносферы, обеспечения их функционирования в заданных пределах проектных режимов и параметров. Важнейшими поэтапно повышающимися требованиями к штатному (нормальному) функционированию и проектным параметрам этого функционирования всех объектов техносферы на всех стадиях их жизненного цикла стали: прочность→жесткость→устойчивость→ресурс→надежность→живучесть→безопасность→риск→защищенность. На основе указанных традиционных требований и параметров можно построить так

называемую пирамиду комплексного обеспечения работоспособности объектов техносферы (рис. 1.1).

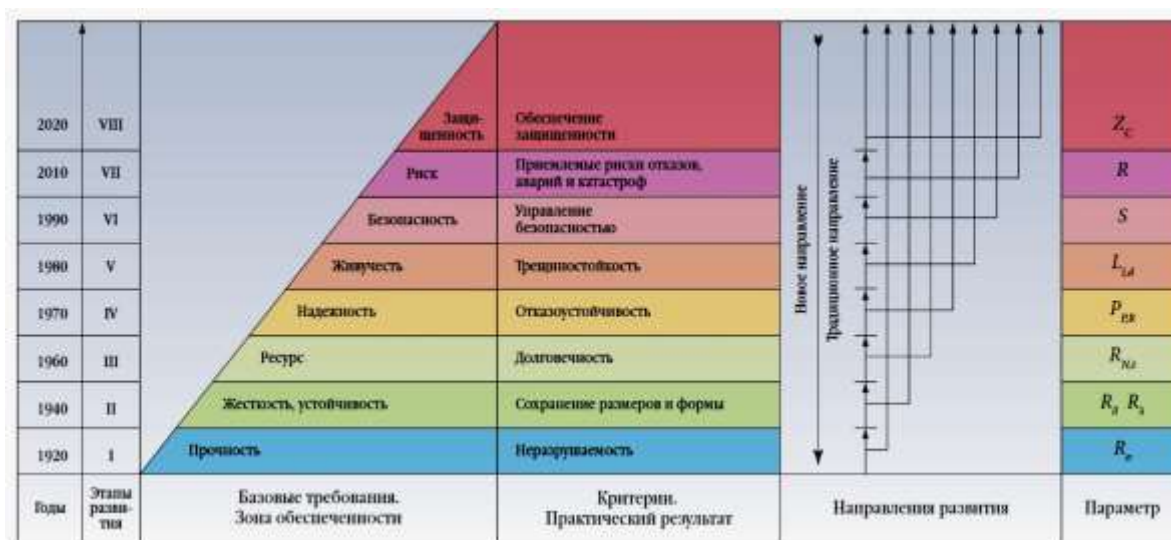


Рис. 1.1. Общая структура обеспечения работоспособности объектов техносферы

На ней (рис. 1.1) выделены годы и основные этапы развития (I–VIII), базовые требования основные практические результаты и направления взаимодействия. Видно, что каждый выше расположенный элемент пирамиды опирается на нижние элементы как на основу. Это, в конечном счете, означает, что решение вершинных проблем безопасности должно обязательно опираться на решение проблем: живучести→надежности→ресурса→жесткости→устойчивости→прочности – с прохождением через традиционные этапы их взаимодействия: I→VIII. Фундаментальные результаты определения и обеспечения прочности (этап I) были получены в течение длительного времени к началу XX в., а замкнутый анализ жесткости и устойчивости (этап II) завершился к концу 20-х годов XX в. Прошлый век стал веком формирования теории и практики обеспечения ресурса→надежности→живучести (этапы III, IV, V). На рубеже XX и XXI вв. была поставлена фундаментальная проблема анализа и обеспечения безопасности (этап VI) для всех потенциально опасных объектов гражданского и оборонного назначения с переходом на управление защищенностью (VIII этап) от катастроф по критериям рисков. На этих этапах требование безопасности было сформулировано как определяю-

щее, что потребовало развития нового направления – VII→I – как основного для будущего развития техносферы.

2.1. Предмет технической диагностики

Основное назначение технической диагностики состоит в повышении надежности объектов на этапе их длительной эксплуатации, в предотвращении брака на заводе-изготовителе объектов. Любой технический объект после проектирования проходит две основные стадии: *изготовление и эксплуатация*.

На каждом из этих этапов к объекту предъявляются определенные технические требования, установленные нормативно-технической документацией (НТД). Дефекты, заложенные на стадии проектирования и изготовления, возникающие в процессе эксплуатации, нарушают это соответствие.

Цель технического диагностирования заключается в своевременном выявлении дефектов, установлении их видов, характера возникновения и развития, расположения, причин появления.

Техническое диагностирование проводится с помощью тех или иных технических средств диагностирования (ТСД).

Система технического диагностирования (СТД) представляет собой совокупность средств и объекта диагностирования, обученных и аттестованных специалистов, нормативно-технической документации (НТД).

Различают системы: тестового диагностирования (подача на объект диагностирования специально организуемых тестовых воздействий от средств диагностирования) и функционального диагностирования (на объект диагностирования поступают только рабочие воздействия).

В системах обоих видов средства диагностирования воспринимают и анализируют *ответы объекта* на входные (тестовые или рабочие) воздействия и выдают результат диагностирования: объект работоспособен или не работоспособен, функционирует правильно или неправильно, имеет определенный дефект или в объекте повреждена какая-то его составная часть.

Системы тестового диагностирования необходимы для проверки исправности и работоспособности, для поиска дефектов, нарушающих работоспособность объекта.

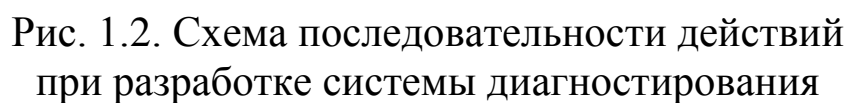
Системы функционального диагностирования необходимы для проверки правильности функционирования и для поиска дефектов, нарушающих правильное функционирование объекта.

2.2. Задачи организации диагностического обеспечения

При определении системы тестового или функционального диагностирования необходимо:

- изучить объект диагностирования (его назначение, конструкцию, параметры, материал и т. д.);
- указать типы наиболее вероятных дефектов, условия и признаки их проявления, для малоизученных объектов требуется физическое моделирование дефектов;
- выбрать известную или построить новую математическую модель объекта и соответствующие ей модели возможных дефектов;
- выбрать метод и составить алгоритм диагностирования, анализируя модели объекта;
- оценить качество полученного алгоритма: основные характеристики – полнота обнаружения возможных дефектов, глубина поиска; если указанные характеристики не соответствуют требуемым, проводят либо доработку алгоритма, либо разрабатывают новый, применяя другие методы диагностирования, либо улучшают контроле пригодность объекта;
- выбрать или разработать новые технические средства диагностирования (ТСД), которые реализуют данный алгоритм диагностирования;
- оценить характеристики выбранных или разработанных средств диагностирования (достоверность, безотказность и т. д.), если какие-либо характеристики не соответствуют требуемым, то проводят либо доработку ТСД, либо выбирают или разрабатывают другие, не меняя алгоритм;
- исследовать систему диагностирования (в том числе экспериментально).

Схема алгоритма используемого при разработке системы диагностирования приведена на рис. 1.2.



Средства функционального диагностирования обычно бывают встроенными, автоматическими, специализированными, аппаратными или программными.

7

с тем, чтобы предусмотреть требуемый уровень контролепригодности объекта и приспособленность его к диагностированию.

В общем случае системы, как тестовые, так и функционального диагностирования, можно называть системами контроля технического состояния.

С этой точки зрения, например, системы, получившие название систем неразрушающего контроля, являются классом систем тестового диагностирования, а вибродиагностические системы – классом систем функционального диагностирования.

На объектах повышенной опасности применяют как тестовые, так и функциональные системы технического диагностирования.

Формализованная модель объекта – описание его в аналитической, графической, табличной или других формах. Существуют, так называемые, *явные и неявные модели*.

Явная модель содержит описание исправного объекта и описание каждой из его неисправных модификаций.

Неявная модель предполагает наличие только одного описания (например, неисправного объекта), формализованных моделей дефектов, правил получения по описанию и по моделям дефектов описание всех неисправных модификаций объекта.

Модели объектов бывают функциональные и структурные. Функциональные модели отражают только выполняемые объектом функции, определенные относительно рабочих входов и выходов объекта. Структурные модели содержат информацию о внутренней организации объекта, его структуре.

Модели объектов могут быть детерминированными и вероятностными. Вероятностные модели чаще всего используют при невозможности или неумении описать детерминировано поведение объекта.

Модели объектов, как ранее отмечалось, необходимы для построения алгоритмов диагностирования.

2.3. Техническая диагностика и прогнозирование

Техническая диагностика решает три типа задач при определении технического состояния объектов:

Задачи диагностирования – определения технического состояния объекта, в котором он находится в настоящий момент времени.

Задачи прогнозирования – предсказание технического состояния, в котором окажется объект в некоторый будущий момент времени.

Задачи генеза – определения технического состояния, в котором находился объект в некоторый момент времени в прошлом.

Задачи первого типа *формально* относятся к технической диагностике, задачи второго типа – к технической *прогностике*.

Задачи третьего типа можно *назвать технической генетикой*.

Задачи технической генетики возникают чаще всего при расследовании аварий, установлении причин повреждения оборудования. Задачи эти решаются путем определения вероятных предысторий, ведущих к настоящему состоянию объекта.

Техническая прогностика решает задачи, связанные с определением срока дальнейшей эксплуатации объекта. Эти задачи решаются путем определения вероятных эволюций состояния объекта, начинающихся в настоящий момент.

Перенесение методов решения задач диагностирования на задачи прогнозирования невозможно из-за различия моделей: при техническом диагностировании моделью является описание объекта, а при прогнозировании необходима модель процесса эволюции технических характеристик во времени. Обычно при диагностировании определяется одна «точка» состояния объекта во времени (для текущего момента).

Однако при периодическом диагностировании во времени и накоплении полученной информации (числа точек) можно оценить динамику развития процесса изменения технических характеристик объекта. Данную информацию необходимо использовать для систематической коррекции прогноза и повышения его достоверности.

Периоды времени, к которым относится информация о техническом состоянии (фактическом – в прошлом, настоящем и предсказуемом – будущем) объектов диагностирования или прогнозирования, обозначим:

t_0 – настоящий момент или период времени;

T_1 – прошлый период времени;

T_2 – будущий период времени;

S_y – отдельные экземпляры объектов диагностирования или прогнозирования;

S_0 – один конкретный исследуемый экземпляр объекта;

S_1 – группа из k экземпляров объекта, подвергающегося исследованию, для получения априорной информации;

S_2 – группа из m элементов объекта, техническое состояние которых (настоящее или будущее) определяется по полученной априорной информации о техническом состоянии экземпляра S_0 , или группы S_1 экземпляров.

Априорные данные получают либо в результате однократного в момент времени t_0 , либо многократного в течение периода времени T_1 конкретных объектов.

Обозначив данные о техническом состоянии символом e , выделим четыре объема полученной априорной информации:

$e(S_1, T_1)$ – группа S_1 экземпляров объектов диагностировалась многократно в течение периода времени T_1 ;

$e(S_0, T_1)$ – экземпляр S_0 объекта диагностировался многократно в течение периода T_1 ;

$e(S_1, t_0)$ – группа S_1 экземпляров объекта диагностировалась однократно в момент времени t_0 ;

$e(S_0, t_0)$ – экземпляр объекта диагностирования однократно в момент времени t_0 .

Первая ситуация соответствует получению наибольшего, а четвертая – наименьшего объема априорной информации. Вторая и третья ситуации занимают промежуточное положение по объему информации, между собой эти ситуации несовместимы.

Аналогично можно выделить четыре вида обработки априорной информации для S_2 .

Из указанных видов обработки априорной информации первые два соответствуют задачам прогнозирования, а последние два – задачам диагностирования.

В процессе длительной эксплуатации объектов наиболее важной является задача индивидуального диагностирования и прогнозирования каждого конкретного экземпляра объекта.

При индивидуальном прогнозировании априорная информация должна быть индивидуальной для каждого экземпляра объекта.

Если эту задачу ставить и информацию получать в процессе эксплуатации, то она будет отражать не только конкретные условия применения данного экземпляра объекта по назначению, условия его эксплуатации и т. д., но и специфические особенности данного экземпляра, зависящие от конкретных условий изготовления объекта и его составных частей.

Теоретическая задача прогнозирования ставится следующим образом. На техническое состояние объекта влияют факторы (вектор \bar{X} на рис. 1.3), определяющие необратимые процессы деградации физико-механических свойств, структуры и т. д., а также случайные внешние и внутренние помехи (вектор \bar{Y}).

Для измерения выбрана совокупность $\{M_k, k=1,2,\dots,n\}$ параметров объекта (вектор \bar{M}), относительно которых предполагается, что они существенно зависят от \bar{X} и позволяют предсказать будущее техническое состояние объекта. Эти параметры называют *прогнозирующими*.

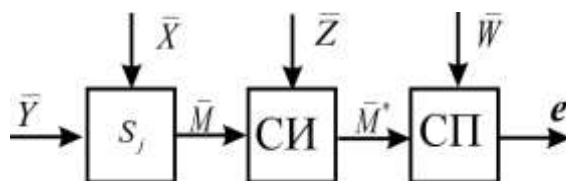


Рис. 1.3. Однолинейная схема системы прогнозирования

На значение прогнозирующих параметров в общем случае накладываются помехи \bar{Y} . При измерении параметров возможны погрешности измерения (вектор \bar{Z}), вследствие чего вместо вектора \bar{M} истинных значений получается вектор \bar{M}^* .

На результаты прогнозирования возможно влияют погрешности прогнозирования (вектор \bar{W}). Таким образом, будущее техническое состояние e объекта зависит от нескольких случайных векторных аргументов:

$$e = f(\bar{X}, \bar{Y}, \bar{Z}, \bar{W}). \quad (1.1)$$

Зависимость (1.1) является, по существу, *моделью процесса прогнозирования*. Получить зависимость (1.1) в явной аналитической форме для сложных объектов практически невозможно.

В связи с этим используют различные приемы упрощения как самой модели, так и процедур ее обработки.

К этим приемам относят расчленение общей задачи прогнозирования на две самостоятельные задачи – задачу измерения прогнозирующих параметров, когда работают с моделью

$$\bar{M}_k^* = f(\bar{X}, \bar{Y}, \bar{Z}), k = 1, 2 \dots n. \quad (1.2)$$

И задачу получения прогноза по модели вида:

$$e = f(\bar{M}^*, \bar{W}). \quad (1.3)$$

Наиболее простой была бы явная зависимость:

$$e = f_x(\bar{X}), \quad (1.4)$$

в которой отсутствует зависимость будущего технического состояния от случайных помех и погрешностей.

Стремясь к идеальной модели (1.4) применяют различные способы обработки математических моделей (1.2) и (1.3) с целью снижения влияния окончательных результатов измерения прогнозирующих параметров и прогноза от случайных функций \bar{Y} , \bar{Z} и \bar{W} , что сопряжено с необходимостью получения и обработки больших объемов априорной информации, что практически не всегда возможно.

Специфическими для технического прогнозирования являются задачи построения и обработки модели (1.3) с целью получения прогноза, а также задачи выбора прогнозирующих параметров.

Для решения задачи выбора прогнозирующих параметров не существует формализованных методов. Даже для простых объектов прогнозирующие параметры выбираются интуитивно на основе знания функциональных, структурных, физико-химических и других свойств конкретных объектов с учетом условий их эксплуатации и т. д.

Выбор и измерение прогнозирующих параметров не является строго необходимым, так как при прогнозировании в конечном итоге нас интересует зависимость (1.4), где \bar{X} представляет факторы, определяющие необратимые изменения в объекте.

Однако установить функциональную связь в явном виде между техническим состоянием и факторами \bar{X} в общем случае не представляется возможным. Поэтому связь (1.4) устанавливается через зависимость (1.2) путем измерения прогнозирующих параметров, относительно которых предполагается, что их значения изменяются во времени из-за воздействия факторов \bar{X} , а затем через зависимость (1.3) экстраполируя значения прогнозирующих параметров на будущие периоды времени.

Априорные данные о технических характеристиках объекта можно получить от средств функционального и тестового диагностирования. При условии правильной организации накопления и обработки информации имеется возможность в любой период времени жизненного цикла конкретного экземпляра объекта иметь не только абсолютные фактические значения интенсивности отказов и прогнозирующих параметров, но и динамику их изменения, например, в виде кривых.

При наличии таких кривых можно эмпирически выбрать критерий годности и назначить его предельное состояние.

Наиболее трудными являются вопросы обоснованного назначения предельного значения критерия годности, а также выбора прогнозирующих параметров. В большинстве случаев приемлемыми оказываются методы экспертных оценок.

Вопросы технического диагностирования и прогнозирования тесно связаны с качеством изготовления объектов и его элементов.

Качество продукции – есть совокупность ее свойств, обуславливающих пригодность продукции удовлетворять определенные потребности в соответствии с ее назначением. Среди многих показателей качества важное место занимают показатели ее *надежности* (безотказность, долговечность, ремонтпригодность и т. д.).

Наличие или появление дефектов (возможное на любой стадии жизненного цикла) отрицательно сказывается на качестве и надежности объекта.

Для объектов повышенной опасности при техническом диагностировании, прогнозировании и оценке остаточного ресурса (РД 09-102-95) в соответствии с ГОСТ 27.002-89 остаточный ресурс диагностируемого объекта определяется как наработка от

момента контроля технического состояния до его перехода в неработоспособное или предельное состояние.

В качестве базовой концепции предлагается подход, основанный на принципе «безопасной эксплуатации по техническому состоянию», согласно которому оценка технического состояния объекта осуществляется по параметрам технического состояния, обеспечивающим его надежную и безопасную эксплуатацию согласно нормативно-технической и (или) конструкторской (проектной) документации, а остаточный ресурс по определяющим параметрам технического состояния.

В качестве определяющих параметров технического состояния принимают параметры, изменение которых (индивидуальное или в совокупности) может привести объект в неработоспособное или предельное состояние.

3. Порядок выполнения работы

Работа выполняется в два этапа.

На первом изучаются теоретические положения, уясняются основные положения технического диагностирования

На втором этапе студент самостоятельно составляет отчет, в котором освещает по заданию преподавателя требования определенного раздела МУ.

4. Оформление отчета

Отчет по лабораторной работе оформляется на листах формата А4 и должен содержать:

1. Название и цель занятия.
2. Изложение требований заданного студенту раздела МУ.

5. Контрольные вопросы

1. В чем заключаются задачи технического диагностирования?
2. Назовите задачи организации диагностического обеспечения.
3. Что является предметом технической диагностики?

4. В чем заключаются задачи прогнозирования?
5. Каковы задачи генеза?
6. Назовите явные и неявные объекты диагностирования.
7. Какова схема последовательности действий при разработке системы диагностирования.
8. Что такое индивидуальное диагностирование?
9. Назовите определение качества продукции.
10. Что такое безопасная эксплуатация по техническому состоянию?

Список литературы

1. Махутов, Н. А. Техническая диагностика остаточного ресурса и безопасности: учеб. пособие / Н. А. Махутов, М. М. Гадинин; под общ. ред. В. В. Ключева. – Москва: Изд. дом «Спектр», 2011. – 187 с.
2. Надежность и эффективность в технике: Справочник. В 10 т. / ред. совет: В. С. Авдуревский и др. – Москва: Машиностроение, 1987. – (В пер.). Т. 9. Техническая диагностика / под общ. ред. В. В. Ключева, П. П. Пархоменко. – 352 с.
3. Ключев, В. В. Технические средства диагностирования: Справочник / В. В. Ключев, П. П. Пархоменко и др.; под общей ред. В. В. Ключева. – Москва: Машиностроение, 1989. – 672 с.

Лабораторная работа №2

ВЛИЯНИЕ ДЕФЕКТОВ СВАРКИ НА НАДЕЖНОСТЬ КОНСТРУКЦИЙ ОБЪЕКТОВ РЕНОВАЦИИ

1. Цель работы

Целью работы является изучение влияния дефектов сварных соединений на надежность сварных соединений металлоконструкций объектов реновации.

2. Теоретические положения

В настоящее время около 70–80 % отказов в металлоконструкциях (МК) связаны с состоянием сварных соединений, хотя объем зоны таких соединений в сварных конструкциях не превышает 1,0–1,5 % общего объема.

По данным *Международного института сварки* (МИС), основными причинами разрушения являются:

- нерациональность спроектированных конструкций;
- нарушение технологии сварки;
- наличие дефектов в сварных соединениях.

Степень опасности дефектов зависит от большого числа конструктивных и эксплуатационных факторов:

- вида дефекта и его расположения;
- типа конструкции;
- зон концентрации напряжений;
- свойств материала;
- характера нагружения;
- агрессивности среды;
- температурных воздействий;
- вероятности и опасности отказа оборудования.

Прочность конструкций зависит от формы и размеров дефектов, а также их расположения по отношению к направлению действующих усилий (главных напряжений). **Наиболее опасны** дефекты, имеющие вытянутую форму и острые очертания; **менее опасны** дефекты округлой формы.

С увеличением глубины дефектов влияние их **на прочность резко возрастает**, поэтому в ответственных конструкциях допустимы лишь неглубокие дефекты (не более 5–10 % толщины соединяемых элементов).

Для изделий, работающих при **статических нагрузках**, наиболее опасно расположение дефектов **перпендикулярно максимальному растягивающему усилию**.

Меньшую опасность представляют дефекты, расположенные параллельно или под небольшим углом к направлению действующего усилия.

При статической нагрузке основное влияние на прочность конструкции оказывает **относительная величина дефекта**, если материал сварного соединения обладает большим запасом пластичности, однако это свойственно конструкциям, работающим при температуре до $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$. При более низких температурах прочность определяется интенсивностью напряжений в зоне дефекта.

Показано, что для **пластичных материалов** при статической нагрузке влияние величины непровара на уменьшение **прочности прямо пропорционально его относительной глубине или площади**.

Для **малопластичных и высокопрочных** материалов такая пропорциональность нарушается.

Часто даже при относительно **больших непроварах** разрушение сварного соединения происходит по околошовной зоне, **что компенсируется усилением шва**.

В сварных швах труб из низколегированной стали непровары до 20 % толщины стенки, полностью уравниваются валиком усиления, однако **при низких температурах резко падают прочность и пластичность**.

По данным МГТУ им. Баумана непровар глубиной 25 % при понижении температуры до $-45\text{ }^{\circ}\text{C}$ снижает разрушающее напряжение сварного соединения в **два раза**.

Непровар в корне стыкового шва находящийся под действием растягивающей нагрузки при температуре $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ приводит к охрупчиванию соединения, которое может разрушиться при незначительных нагрузках.

Непровары оказывают значительное влияние на пластичность сварных швов. Доказано, что непровар глубиной 25...30 % снижает *пластичность в 2...4 раза*, а при отрицательных температурах пластичность снижается еще более.

Поэтому рекомендуется, чтобы глубина непровара должна быть не более 10...15 % толщины стенки металла. Непровар недопустим при работе изделия в режиме **динамических нагрузок**.

В швах, выполненных стыковой контактной сваркой наиболее опасным дефектом является **непровар**, обусловленный нарушениями технологического режима, скоплениями окислов, рыхлостями и пережогами в зоне стыка.

При этом наличие дефектов незначительно сказывается на статическую прочность в условиях положительных температур, но **резко снижает пластичность и ударную вязкость**. Например, при попадании в шов окислов, предел прочности снижается на 10...15 %, а углы загиба образцов уменьшаются до 10...20 %.

Подрезы оказывают значительное влияние на работоспособность конструкций в трех областях сварного соединения:

- **переход между швом и основным металлом.** Здесь недопустимы подрезы, крутой угол между основным металлом и усилением шва, скопление дефектов в вершине шва (поверхностной зоне);

- **корень шва.** Влияние подреза может быть значительным в случае односторонних стыковых сварных соединений и незначительным, если они выполнены на подкладке;

- **поверхность усиления шва.** В поверхностных зонах усиления швов опасными, при напряжениях действующих вдоль шва, являются соединительные точки в местах прерывания шва, **вызванного сменой электродов или сварочной проволоки**.

Степень влияния подрезов на усталостную прочность зависит от глубины подрезов, величины остаточных напряжений и вида сварного соединения. Например, у трубопроводов для горючих, токсичных и сжиженных газов допускаются подрезы в местах перехода сварного **шва к основному металлу глубиной не более 10 % толщины стенки трубы, но не более 1 мм. На одном стыке допускается подрез общей протяженностью не более 30 % длины шва.**

Поры являются менее опасными дефектами, чем трещины, однако они недопустимы в сварных соединениях изделий, работающих под давлением, в вакууме, или предназначенных для хранения и транспортировки жидких и газообразных продуктов.

Концентрация напряжений при переменных нагрузках имеет решающее значение.

Считается, что если **коэффициент концентрации напряжений** от валика усиления выше, чем от пор, то умеренная пористость (до 4 %) не ухудшает несущей способности.

При удалении валика усиления даже **небольшие поры резко снижают выносливость**. В большинстве случаев у сварных конструкций валики швов сохраняются. В большинстве случаев (несмотря на высокую пористость) разрушение сварного соединения происходит по околошовной зоне, что в значительной степени обусловлено влиянием формы шва на концентрацию напряжений.

Поры становятся очагами усталостных разрушений в первую очередь в угловых, стыковых и поперечных швах с высокими растягивающими остаточными напряжениями. Например, в сварных швах паропроводов высокого давления не допускаются одиночные поры, сплошная цепочка или сетка пор размером более 5 % толщины стенки при ее толщине до 20 мм и свыше 1 мм при большей толщине в количестве, превышающем **две на каждые 100 мм шва**.

В нахлесточных швах поры практически не влияют на их работоспособность (выносливость). Для сварных конструкций **места расположения пор играют большую роль, чем их размеры**.

Шлаковые включения. Они в меньшей степени снижают усталостную прочность по сравнению с **порами**. Однако ослабляют сечение шва, уменьшают его прочность и являются концентраторами напряжений.

Поры и шлаковые включения при их относительной суммарной площади в сечении шва до 5...10 % мало влияют на статическую прочность соединения.

Исследования, выполненные в МГТУ, показали, что допустимый размер внутренних дефектов в сварных стыках арматуры и закладных деталей составляет 15–20 % расчетного сечения шва.

Эти данные положены в основу СНиП 111-18-75. Например, суммарная величина непровара, пор и шлаковых включений при двусторонней сварке допускалась в размере 10 % толщины сварного шва, а при односторонней – 15 %.

3. Порядок выполнения работы

Работа выполняется в два этапа.

На первом изучаются теоретические положения, уясняются основные положения влияния дефектов сварки на надежность металлоконструкций.

На втором этапе студент самостоятельно составляет отчет, в котором освещает по заданию преподавателя требования определенного раздела МУ.

4. Оформление отчета

Отчет по лабораторной работе оформляется на листах формата А4 и должен содержать:

1. Название и цель занятия.
2. Изложение требований заданного студенту раздела МУ.

5. Контрольные вопросы

1. Назовите основные дефекты сварки.
2. Назовите основные причины разрушения металлоконструкций.
3. Назовите основные факторы, влияющие на прочность металлоконструкций.
4. Какое влияние на прочность конструкций оказывает относительная величина дефекта?
5. Какое влияние на прочность оказывает величина непровара?
6. Какое влияние на пластичность оказывает непровар?
7. В каких случаях непровар недопустим?
8. Какое влияние на работоспособность и надежность сварных соединений оказывают подрезы?

9. Опишите влияние пор на надежность сварных соединений.

10. Опишите влияние шлаковых включений на надежность сварных соединений.

6. Список литературы

1. Смирнов, А. Н. Теоретические основы надежности и ресурса сварных конструкций [Электронный ресурс]: учеб. пособие для студентов направления подготовки 150700.68 «Машиностроение», профиль «Оборудование и технология сварочного производства» / А. Н. Смирнов, Н. В. Абабков; ФГБОУ ВПО «Кузбас. гос. техн. ун-т им. Т. Ф. Горбачева», Каф. технологии машиностроения. – Кемерово, 2013.

<http://library.kuzstu.ru/meto.php?n=91150&type=utchposob:common>

Лабораторная работа №3

МЕТОДЫ ОЦЕНКИ НАПРЯЖЕНО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ МЕТАЛЛА КОНСТРУКЦИЙ ОБЪЕКТОВ РЕНОВАЦИИ

1. Цель работы

Целью работы является изучение методов оценки напряженно-деформированного состояния металла конструкций объектов реновации.

2. Теоретические положения

Из-за сложности процесса производства деталей машин и широкого диапазона нагрузок, которым подвергаются заготовки на пути к готовому изделию в процессе резки, формовки, сварки и других операций, точный расчет напряжений, действующих в той или иной части готовой детали, не всегда представляется возможным. Высокая эффективность современных численных методов определения напряженно-деформированного состояния (НДС), использующих ЭВМ, не устраняет необходимости применения экспериментальных методов для прямого измерения напряжений (деформаций) в материале конструкции. Расчетные методы определения НДС промышленных конструкций основаны на использовании некоторых допущений, как правило, идеализирующих реальные условия.

Несовершенство методов расчета, неполное соответствие расчетных схем действительным условиям работы, неточность задания граничных условий и действующих нагрузок, как правило, изменяющихся с течением времени, дают существенные погрешности в оценке напряжений. Иногда задача по определению напряжений в действующей конструкции вообще не поддается теоретическому решению. Поэтому задача экспериментальной оценки реального напряженного состояния детали на различных этапах изготовления, монтажа в более крупную конструкцию и дальнейшей эксплуатации весьма актуальна [2–5].

Разнообразие прочностных задач, возникающих в технике, и необходимость их решения способствовали развитию целого ряда экспериментальных неразрушающих методов и средств определения деформаций и напряжений, использующих различные физические принципы. Однако многие из них не выходят за пределы лабораторной практики. На основе литературных источников и практических знаний нами выделены основные методы, применимые для неразрушающего контроля (НК) НДС деталей машин.

Метод тензометрии [6, 7] получил широкое распространение в практике экспериментальных исследований НДС металлоконструкций. В настоящее время тензометрирование проводят в основном с помощью струнных и электротензометров.

Метод электротензометрии является наиболее разработанным и широко применяемым во многих отраслях промышленности. Он основан на зависимости омического сопротивления проводника от его деформации [2]. Существуют три основных вида тензорезисторов: проволочный, фольговый, полупроводниковый. Для устранения эффекта температурного влияния в проволочных и фольговых датчиках разработаны самотермокомпенсированные тензорезисторы двух типов: одинарный, термочувствительность которого должна соответствовать термическому расширению испытуемого материала, и комбинированный, чувствительный элемент которого выполнен из двух последовательно соединенных с разными знаками коэффициента температурного расширения [3].

Принцип работы струнных тензометров основан на зависимости собственной частоты колебания струны от степени ее натяжения [2]. Струнные тензометры обеспечивают точность измерений, сравнимую с точностью тензорезисторных преобразователей, но имеют сравнительно дорогую и сложную конструкцию. Применяются, как правило, на крупногабаритных конструкциях. Преимуществом струнных датчиков является то, что измеряется собственная частота их колебаний, на точность измерения которой не влияет изменение напряжения питания и процессы в соединительных линиях. Частота колебаний является в настоящее время одной из наиболее точно измеряемых величин. Недостатками струнных тензометров являются нелинейность теоретической градуировочной характеристики и плохая динамическая характеристика при измерении переменных напряжений.

В общем случае метод тензометрии позволяет определять лишь относительные деформации, по отношению к тому значению деформации, которое соответствует моменту наклейки датчика или закрепления измерительной струны на поверхности материала конструкции. Если тензодатчики монтируются на объекты, уже находящиеся под нагрузкой, то «начальные» значения деформаций остаются неизвестными.

Определение напряжений по данным измерения деформаций проводят с использованием закона Гука. Для определения двухосного напряженного состояния необходимо применять тензометрическую розетку из трех тензорезисторов, оси которых направлены под углами 90° и 45° друг к другу. Главные напряжения на поверхности изотропного материала с их помощью находят по формулам:

$$\sigma_1 = \frac{E}{1-\nu^2}(\varepsilon_1 + \nu\varepsilon_2); \sigma_2 = \frac{E}{1-\nu^2}(\varepsilon_2 + \nu\varepsilon_1) \quad (3.1)$$

где $\varepsilon_1, \varepsilon_2$ – главные деформации, определенные с помощью тензометрической розетки.

Открытие в ноябре 1895 г. рентгеновского излучения связывают с зарождением неразрушающего контроля и диагностики [8]. Основа метода определения деформаций **рентгеновским методом** состоит в изменении атомных межплоскостных расстояний в соответствии с действующим упругим напряжением [9].

Объемное напряженное состояние можно описать с помощью главных напряжений σ_1, σ_2 и σ_3 , действующих вдоль поверхности материала и по нормали к ней. Так как измерения проводятся в тонком (порядка 10 мкм) поверхностном слое, то нормальную составляющую напряжения σ_3 не учитывают [9], то есть считают напряженное состояние материала в области контроля плоским.

Рентгенографический метод позволяет определить величину напряжений в заданном направлении в плоскости действия напряжений, а также раздельно σ_1 и σ_2 . При измерении напряжений в конструкции с неизвестной предысторией нагружения необходимо использовать эталонный образец из такого же мате-

риала (на поверхность образца наклеивают фольгу или напыляют эталонное вещество), в котором отсутствуют напряжения.

На результаты измерения рентгеновским методом могут влиять размеры зерен, глубина проникновения луча, точность определения дифракционного угла, анизотропия и текстура материала. Рентгеновский метод широко используется в лабораторной практике для определения остаточных напряжений, обусловленных технологическими процессами термообработки, науглероживания, дробеструйной обработки, механической обработки резанием и условиями эксплуатации (например, усталостью). В отдельных случаях его применяют и в натурных условиях [5].

Достоинство метода – высокая точность измерения микродеформаций (микронапряжений). Рентгеновский метод является самым непосредственным и позволяет проводить прямые измерения деформаций кристаллической решетки нагруженных деталей, то есть определять как остаточные, так и напряжения от действующей нагрузки.

Недостатки – высокие требования к чистоте поверхности. Измерения проводят в приповерхностном слое до 0,1 мм, длительность процедуры измерений до нескольких десятков минут на одну точку, при измерении под разными углами необходимо выдерживать точное расстояние излучателя и приемника до объекта контроля.

Несмотря на то, что по сравнению с другими методами НК рентгеновский метод обладает бесспорными преимуществами в определении остаточных напряжений, в практике натурных исследований существуют препятствия для его широкого распространения.

Объясняется это, прежде всего, громоздкостью применяемой аппаратуры (самые миниатюрные комплексы порядка 20 кг [5]), длительностью процедуры измерений и сложностью обработки их результатов.

Физической основой для разработки **магнитных методов** оценки параметров НДС является магнитоупругий эффект – изменение намагниченности тела под действием механических напряжений. При этом изменяются магнитная проницаемость, остаточная намагниченность, коэрцитивная сила, величина магнитострикции и другие магнитные характеристики, которые мо-

гут быть приняты в качестве информативных при исследовании напряженного состояния ферромагнитных материалов. С помощью этих методов в принципе возможно определить в образце или детали машины одноосное напряженное состояние, разность главных напряжений и пластическую деформацию.

Метод измерения шумов Баркгаузена основан на связи между намагничиванием ферромагнетика и величиной механических напряжений. Эффект проявляется в перемещении стенок магнитных доменов, представляющих собой области спонтанной намагниченности, каждая из которых намагничена практически до насыщения, при приложении механического усилия к материалу. При этом изменяется намагниченность и пространственные размеры тела как целого [8]. Фиксирование процесса перемещения стенок доменов возможно при помещении катушки из электропроводящей проволоки рядом с образцом. Изменение намагниченности будет индуцировать ток в катушке.

Энергетический спектр шумов Баркгаузена находится в диапазоне частот, начинающемся от частоты внешнего намагничивающего поля и расширяющемся в большинстве материалов до 250–500 кГц. Этот шум экспоненциально затухает в зависимости от расстояния вглубь от поверхности материала. Основными факторами, определяющими глубину, на которой замечен эффект, являются электропроводность и магнитная проницаемость испытываемого материала, а также частотный диапазон, выбранный для анализа (для стали эта глубина варьируется от 0,01 до 3 мм). Интенсивность шумов Баркгаузена зависит от приложенного усилия и микроструктуры материала. Точность определения одно- и двухосных поверхностных напряжений зависит от соответствия микроструктуры калибровочного и испытываемого образцов.

Достоинства метода – оперативность и простота процедур измерений, относительно невысокие требования к подготовке поверхности области контроля. Недостатки метода – низкая чувствительность при измерениях на материалах с высокой твердостью, сильная нелинейность характеристики при деформациях сжатия, значительная погрешность при низких уровнях напряжений.

Метод, основанный на измерении коэрцитивной силы, использует зависимость ее величины от механических напряжений, возникающих при нагружении ферромагнитного объекта.

Приращение коэрцитивной силы при растяжении и сжатии в упругой области составляет десятки процентов от начального уровня, отсутствует гистерезис характеристик.

Это позволяет использовать экспериментально полученные тарировочные зависимости для определения механических напряжений по коэрцитивной силе. При растяжении в области упругих деформаций и последующем снятии нагрузки изменение коэрцитивной силы соответствует одной и той же зависимости от напряжений.

Превышение напряжения над пределом текучести вызывает скачок значений коэрцитивной силы, а последующая разгрузка приводит к возникновению петли гистерезиса и к увеличению коэрцитивной силы в разгруженном состоянии. Непосредственное определение напряжений при двухосном нагружении во многих случаях невозможно, однако можно определить направления главных деформаций. Направление главной наибольшей деформации совпадает с направлением, в котором коэрцитивная сила минимальна, а направление главной наименьшей деформации с направлением максимальной. При двухосном сжатии наблюдается обратная зависимость [10].

Метод магнитной анизотропии основан на изучении анизотропии магнитных свойств, возникающей в ферромагнетике при нагружении его внешней силой. Принцип действия магнитоанізотропного преобразователя основан на эффекте поворота вектора магнитной индукции, создаваемой в зоне измерений первичной обмоткой. Предполагается, что при отсутствии напряжений изучаемые металлы изотропны в отношении магнитных свойств.

Нагружение объекта создает в таком металле анизотропию, по которой судят о напряжениях, пользуясь тарировочными графиками, полученными на эталонном образце. Причем достоверная информация о напряженном состоянии объекта может быть получена при наличии тарировочных зависимостей для каждой марки стали, типоразмера и технологии изготовления деталей.

Для получения достоверных значений напряжений в изотропном материале есть два основных препятствия. Поверхностный слой (0,2 мм) материала находится в не характерном для конструкции напряженном состоянии (наклеп, азотирование, це-

ментация, механические микроцарапины и т. д.). Другим препятствием является магнитомеханический гистерезис.

Между тем, существование у материала начальной (до нагружения) анизотропии магнитных свойств определяет основную погрешность метода, которую невозможно исключить известными приемами повышения точностных характеристик магнитных методов (введением различного рода коррекций). Эта анизотропия появляется на стадии изготовления ферромагнитного материала и вносит трудно контролируемую (иногда большую) погрешность в результаты измерений.

В последнее время широко рекламируется **метод магнитной памяти металла (МПМ)**, основанный на регистрации и анализе распределения собственных магнитных полей рассеяния, возникающих в изделиях и оборудовании в зонах концентрации напряжений под действием магнитоупругого эффекта. При этом собственные магнитные поля рассеяния отображают необратимое изменение намагниченности в направлении действия максимальных напряжений от рабочих нагрузок, а также структурную и технологическую наследственность деталей и сварных соединений после их изготовления и охлаждения в магнитном поле земли.

В методе МПМ в качестве информативных параметров используют естественную намагниченность и последствие (остаточную намагниченность), которое проявляется в виде магнитной памяти металла к деформационным и структурным изменениям в материале изделий и оборудования [11].

Метод магнитной памяти позволяет провести оценку изменения напряжений во времени или пространстве, но не дает количественной оценки уровня действующих статических напряжений. В некоторых случаях он позволяет (имеются критерии) при сканировании поверхности металла отличить область упругой деформации от пластической, найти зоны концентрации напряжений, где возможно зарождение усталостных трещин. Однако некоторые положения и сама возможность оценки НДС указанным методом вызывают сомнения специалистов НК как с теоретической [12] так и с практической [13] точки зрения.

Магнитные методы оценки напряжений в целом имеют следующую особенность. При использовании переменного тока, подаваемого на датчик, глубина проникновения переменного элек-

тромагнитного поля зависит от частоты тока и заключена в диапазоне от нескольких миллиметров до долей миллиметра. Следовательно, объем металла, от которого можно получить информацию о его напряженном состоянии, очень мал. По этой причине свойства поверхностного слоя металла, в котором уже из-за технологических причин происходит вариация химического состава (например, выгорание углерода), поверхностного наклепа, скорости охлаждения, изменяются и существенно сказываются на результатах определения напряжений. При больших частотах сказывается даже тонкий слой влаги на поверхности металла. По этой причине применение постоянных магнитных полей имеет очевидное преимущество [5].

Следует также отметить, что магнитные величины зависят не только от свойств материала, но и в значительной степени определяются способами и условиями измерения.

Значения магнитных характеристик даже одного и того же металла, измеренные различными способами, могут существенно различаться и даже обладать различным характером поведения. Кроме того, при наличии в датчике ферромагнитного сердечника необходимо учитывать его вклад в результаты измерений.

К недостаткам большинства имеющихся магнитных приборов также относится значительное влияние на точность измерений воздушного зазора между датчиком и контролируемой поверхностью, есть ограничения при контроле криволинейных поверхностей.

Акустические методы, связанные с распространением упругих колебаний, широко применяются для изучения физико-механических характеристик твердых тел. Упругая волна, распространяющаяся в твердом теле, характеризуется амплитудой колебаний, их фазой и частотой, векторами распространения и поляризации. По параметрам распространения упругой волны можно судить о физических свойствах и техническом состоянии твердых тел.

Высокая проникающая способность ультразвуковых колебаний (по сравнению с методами рентгеновскими и магнитными) обусловила широкое использование ультразвука при исследовании конструкционных материалов.

Акустический метод измерения напряжений в твердых телах основан на использовании закономерностей распространения упругих волн в предварительно напряженных телах. Этот метод позволяет отдельно определить главные напряжения не только в моделях, но и непосредственно в конструкциях без дополнительных процедур разгрузки. Он обладает достаточно высокой разрешающей способностью, обеспечивает оперативность контроля, позволяет проводить измерения не только поверхностных напряжений, но и напряжений, действующих внутри материала.

Основные положения теории распространения упругих волн в напряженной твердой среде разработаны в конце первой половины 20-го века, а первые экспериментальные исследования явления акустоупругости проведены в конце 50-х–60-х годах [14, 15]. Таким образом, этот метод сравнительно молодой, но уже зарекомендовал себя как один из надежных и перспективных.

В твердых телах можно возбудить различные виды колебаний. При приложении к изотропному материалу нагрузки вдоль определенного направления возникает слабая искусственная анизотропия его упругих свойств. При распространении в таком материале произвольной сдвиговой волны в направлении, перпендикулярном приложенному напряжению, образуются две чисто сдвиговые волны со взаимно перпендикулярными векторами поляризации (наблюдается двойное лучепреломление). При этом направление поляризации одной волны параллельно направлению приложенной нагрузки, а другой – перпендикулярно этому направлению. Распространяющиеся волны имеют разные скорости, поэтому по мере прохождения толщи материала меняется разность их фаз. Эту разность фаз, пропорциональную приложенному напряжению, можно найти, например, по виду фигур Лиссажу, появляющихся на экране осциллографа при подаче соответствующих сигналов на пластины, управляющие горизонтальным и вертикальным смещением его нулевой линии.

Если сдвиговая волна распространяется вдоль приложенного напряжения, то двойного лучепреломления не происходит. В этом случае напряжение можно определить только путем сравнения скоростей продольных или сдвиговых волн до и после приложения нагрузки.

Развитие такого метода позволило определять напряжения в стержневых деталях, в том числе болтах, шпильках.

Растяжение образца иногда приводит к изменению его дислокационной структуры, которая определяет так называемое дислокационное поглощение упругих волн. Таким образом, величину растягивающей нагрузки можно оценить по изменению коэффициента затухания упругих волн. Такие эффекты действительно наблюдаются, а свое объяснение находят с помощью струнной модели дислокации Гранато-Люкке. Надо заметить, что струнная модель ничего не дает для случая сжатия материала.

Таким образом, одноосное напряжение в твердом теле может быть определено: по разности фаз волн, образовавшейся в результате двойного лучепреломления; по различию скоростей распространения упругих волн в двух специально выбранных направлениях; по изменившемуся значению скорости распространения или затухания упругих волн.

Наиболее распространены методы измерения напряжений, основанные на измерении скорости ультразвука (УЗ), так как эти зависимости хорошо описаны теоретически в рамках нелинейной механики твердого тела, являются однозначными, более того, линейными. Сам эффект зависимости скорости упругих волн от напряжений – нелинейный, так как в линейной теории упругости они полностью определяются модулями упругости и плотностью среды.

Однако эта зависимость весьма слабая ввиду малой нелинейности твердых тел по сравнению с жидкостями или газами. Для того, чтобы определять напряжения, действующие в конструкционных материалах, с погрешностью 10 и менее процентов от предела текучести, требуется проводить прецизионные измерения скоростей ультразвуковых волн с относительной погрешностью 0,1–0,01 %.

Для определения плоского напряженного состояния детали наиболее удобно использовать волны, распространяющиеся по нормали к плоскости действия напряжений. В изотропном материале без напряжений скорость распространения сдвиговой волны будет одна и та же при любой ориентации плоскости ее поляризации. Акустическая анизотропия напряженного материала проявляется в запрете на линейную поляризацию тех сдвиговых

волн, которые на входе в среду не поляризованы вдоль направлений действия главных напряжений. Разность скоростей «разрешенных» сдвиговых волн будет пропорциональна разности главных напряжений.

В отличие от многих других методов оценки НДС конструкционных материалов, где зависимости информативных параметров от напряжений (деформаций) являются феноменологическими, то есть находятся только опытным путем, здесь связь скоростей упругих волн и напряжений может быть найдена математически, в приближении пятиконстантной теории упругости. В 1953 году впервые «на кончике пера» были получены зависимости скоростей объемных волн от одноосного напряжения и давления при всестороннем сжатии. Для рассматриваемого нами случая выражения Хьюза и Келли можно представить в виде:

$$\begin{aligned}\frac{V_1^2}{V_{01}^2} - 1 &= 2 \left(\frac{V_1}{V_{01}} - 1 \right) = \frac{1}{3K_0} \left(\lambda + 2\mu + m + \frac{\lambda}{\mu} \frac{n}{4} \right) \sigma = 2k_1 \sigma, \\ \frac{V_2^2}{V_{02}^2} - 1 &= 2 \left(\frac{V_2}{V_{02}} - 1 \right) = -\frac{1}{3K_0} \left(2\lambda - m + \frac{n}{2} + \frac{\lambda}{\mu} \frac{n}{4} \right) \sigma = 2k_2 \sigma, \\ \frac{V_3^2}{V_{03}^2} - 1 &= 2 \left(\frac{V_3}{V_{03}} - 1 \right) = -\frac{1}{3K_0} \left[\frac{2\lambda}{\mu} (\lambda + 2\mu + m) - 2l \right] \sigma = 2k_3 \sigma,\end{aligned}\tag{3.2}$$

где V_1, V_2 – скорости сдвиговых волн, поляризованных вдоль и поперек направления действия напряжения, V_3 – скорость продольной волны; $\lambda, \mu, K_0 = \lambda + \frac{2}{3}\mu$ – модули линейной упругости; m, n, l – модули нелинейной упругости Мурнагана. Соответствующие комбинации этих констант обозначены k_1, k_2, k_3 . Картина распространения упругих волн схематически представлена на рис. 3.1.

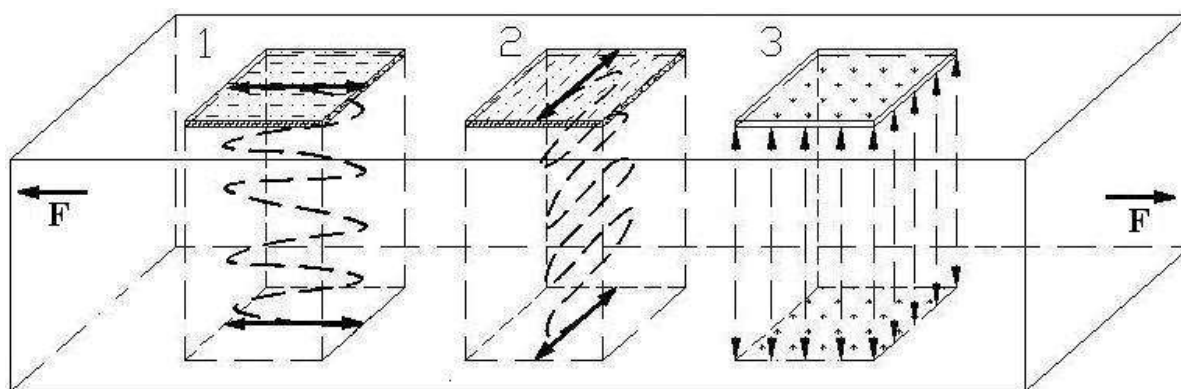


Рис. 3.1. Распространение упругих волн в напряженной среде

Одними из первых теоретические и экспериментальные исследования двухосного напряженного состояния конструкционных материалов осуществили киевские ученые под руководством А. Н. Гузя. Это были для своего времени пионерские работы, так как за границами СССР тогда мало кто из исследователей выходил за рамки измерения одноосных напряжений. На основе этих исследований была написана первая в мире монография [16], содержащая основы применения явления акустоупругости для определения двухосного (плоского) напряженного состояния изотропного материала по изменению скоростей сдвиговых волн, распространяющихся перпендикулярно плоскости действия напряжений.

Коэффициенты связи скоростей и напряжений рассчитаны для трех вариантов теории начальных деформаций и представляют собой определенные комбинации констант линейной и нелинейной упругости твердого тела.

Современное состояние проблем применения ультразвукового эхо-метода для измерения двухосных напряжений в реальных конструкциях описано в книге [17]. При разработке алгоритмов вычисления напряжений здесь уделено внимание тому факту, что скорость – величина, не измеряемая непосредственно, в отличие от времени распространения волн или частоты повторения эхо-импульсов. Вследствие малости величины акустоупругого эффекта в твердом теле изменение акустического пути (толщины элемента конструкции) при деформации оказывается сравнимым с изменениями скоростей волн. Поэтому для определения двух

значений напряжений по результатам измерения акустических параметров (в частности, времени распространения упругих волн) требуется не два, а три уравнения акустоупругости, описывающих изменения скоростей трех типов волн, распространяющихся в направлении нормали к плоскости действия напряжений.

Взяв за основу выражения вида (3.2), модифицируя их для случая двухосных напряжений и пренебрегая малостью некоторых величин, связанных с относительными изменениями скоростей волн, можно получить простые и надежные формулы для вычисления главных напряжений по данным акустических измерений:

$$\left. \begin{aligned} \sigma_1 &= K_1 \left(\frac{t_3}{t_1} \frac{t_{01}}{t_{03}} - 1 \right) - K_2 \left(\frac{t_3}{t_2} \frac{t_{02}}{t_{03}} - 1 \right) \\ \sigma_2 &= K_1 \left(\frac{t_3}{t_2} \frac{t_{02}}{t_{03}} - 1 \right) - K_2 \left(\frac{t_3}{t_1} \frac{t_{01}}{t_{03}} - 1 \right) \end{aligned} \right\} \quad (3.3)$$

$K_1 = \frac{k_1 - k_3}{(k_1 - k_3)^2 - (k_2 - k_3)^2}$, $K_2 = \frac{k_2 - k_3}{(k_1 - k_3)^2 - (k_2 - k_3)^2}$ – коэффициенты упругоакустической связи материала; t_{01} , t_{02} , t_{03} – задержки импульсов сдвиговых и продольной волн до, а t_1 , t_2 , t_3 – после приложения напряжений; k_1 , k_2 , k_3 – коэффициенты акустоупругой связи, представляющие собой комбинации упругих постоянных материала (см., например, формулы (3.2)). Они также могут быть найдены экспериментально при известном напряженном состоянии материала конструкции.

Основное преимущество метода акустоупругости, на наш взгляд, состоит в сравнительной легкости перехода от измерения одноосных к измерениям двухосных напряжений. Получение алгоритмов (3.3) на основе соотношений акустоупругости (3.2) проведено путем логичных предположений о том, что коэффициент k_1 определяет зависимость скорости волны от напряжения, приложенного вдоль направления ее поляризации, k_2 – поперек, а скорость продольной волны одинаково зависит от обеих составляющих плоского напряженного состояния с коэффициентом k_3 . Далее решается система трех уравнений, а во избежание некоторой громоздкости решения пренебрегается некоторыми величинами.

нами, связанными с малостью изменений скоростей волн под действием напряжений.

Метод позволяет измерять как одноосные, так и двухосные напряжения растяжения-сжатия, усредненные по объему прозвучивания (толщина материала, умноженная на площадь датчика). Направления главных напряжений в изотропном материале легко определяются вращением преобразователя сдвиговых волн, по отсутствию их двулучепреломления. Метод акустоупругости является логическим продолжением ультразвуковых методов дефектоскопии и толщинометрии.

Есть и другие преимущества, которые мы здесь разберем в порядке упоминания тех методов, с которыми будем проводить сравнение. Точность измерения напряжений в акустически прозрачных материалах сравнима, а иногда и превосходит точность **электротензометрии**. В режиме акустической тензометрии «начальные» акустические параметры (t_{01} , t_{02} , t_{03}) определяют непосредственно на элементе конструкции, затем датчики могут быть удалены с поверхности материала на время проведения технологических работ (при сварке, термообработке и т. п.) и установлены снова для дальнейших измерений.

Если нет возможности определить начальные параметры непосредственно (материал уже напряжен), то существует принципиальная возможность найти эти величины косвенными способами. Эта возможность основана на очевидном факте, что скорость упругих волн в ненапряженном материале – величина физически реальная и имеет конкретное значение.

Эксперименты показали, что определение напряжений в режиме «безнулевой» акустической тензометрии возможно в случае слабоанизотропных материалов, в которых величина собственной акустической анизотропии меньше или порядка наведенной напряжениями.

Такой режим недоступен не только для традиционной тензометрии, но и для многих других методов НК.

Рентгеновским методом измеряются поверхностные микродеформации (микронапряжения), которые не всегда интересны для крупноструктурных материалов, крупногабаритных металлоконструкций. Предъявляются более жесткие требования к чистоте поверхности материала. При измерении напряжений в кон-

струкции с неизвестной предысторией нагружения необходимо использовать эталонный образец такого же материала. Данные можно сравнивать с полученными акустическим методом в случае однородного по толщине напряженного состояния.

Ультразвуковым методом измеряются усредненные по толщине напряжения, которые обычно находят при расчете НДС крупногабаритных конструкций методом конечных элементов. Поэтому проводить практическую проверку таких расчетов удобнее методом акустоупругости.

Что касается **магнитных методов** оценки НДС деталей машин, то главным «плюсом» УЗ метода является его пригодность для измерения напряжений в любых конструкционных материалах, независимо от наличия у них ферромагнитных или каких-либо других специфических свойств, кроме упругих. Все этапы измерения и расчета проводятся в рамках нелинейной механики, без привлечения полей и волн другой природы: упругие волны – это, по существу, механические колебания, распространяющиеся в твердых телах.

Применение магнитных методов связано с использованием тарировочных зависимостей от одноосного напряжения шумов Баркгаузена, коэрцитивной силы, магнитной проницаемости и других характеристик магнитного поля материала. Зависимости измеряемых параметров от напряжений – эмпирические, не совсем линейные, различные для растяжения и сжатия материала. Магнитоанизотропным методом, на базе полученных на образцах тарировочных кривых, можно определять только одноосные или разность двухосных напряжений. Аналитических зависимостей измеряемых магнитных параметров от величины напряжения не существует, а ее определение магнитными методами основано на интуитивных и феноменологических соображениях.

Магнитные методы НК, сравнительно простые и недорогие, вполне подходят для экспресс-сканирования поверхностей элементов конструкций с целью дефектоскопии их приповерхностного слоя, выявления зон концентрации напряжений. Фактически такой метод сигнализирует: в этом месте что-то не так. Для уточнения этого «что-то» нужны более информативные методы, например, ультразвуковые.

В настоящее время не так много опубликованных результатов экспериментального определения двухосных напряжений в реальных конструкциях с использованием физических методов НК. Метод акустоупругости, реализованный в приборе ИН-5101А производства ООО Инженерная фирма «ИНКОТЕС», неоднократно проверен на задачах теории упругости, имеющих аналитическое решение, а именно, при нагружении закрытой трубы внутренним давлением и при одноосном растяжении пластины с вырезом. Разница результатов ультразвукового и расчетного методов не превысила 5–10 % от предела текучести сталей, из которых изготовлены указанные детали.

Учитывая рассмотренные преимущества, метод акустоупругости для определения механических напряжений в деталях машин и конструкций находит все более широкое применение в промышленности и на транспорте.

3. Порядок выполнения работы

Работа выполняется в два этапа.

На первом изучаются теоретические положения, уясняются основные положения методов оценки напряженно-деформированного состояния металла конструкций объектов реконструкции.

На втором этапе студент самостоятельно составляет отчет, в котором освещает по заданию преподавателя требования определенного раздела МУ.

4. Оформление отчета

Отчет по лабораторной работе оформляется на листах формата А4 и должен содержать:

1. Название и цель занятия.
2. Изложение требований заданного студенту раздела методических указаний.

5. Контрольные вопросы

1. Почему при оценке напряжений возникают существенные погрешности?
2. Сущность метода тензометрии.
3. Опишите принцип работы струнных тензометров.
4. Какие деформации позволяет определять в общем случае метод тензометрии?
5. Метод определения деформаций рентгеновским методом.
6. Что может повлиять на результаты измерения деформаций рентгеновским методом?
7. Достоинства и недостатки рентгеновского метода.
8. Что является физической основой для разработки магнитных методов оценки параметров НДС?
9. На каком принципе основан метод измерения шумов Баркгаузена?
10. Достоинства и недостатки метода измерения шумов Баркгаузена?
11. Сущность метода, основанного на измерении коэрцитивной силы?
12. На каком принципе основан метод магнитной анизотропии?
13. Сущность метода магнитной памяти металла.
14. Какую особенность имеют магнитные методы оценки напряжений?
15. На каком принципе основан акустический метод измерения напряжений в твердых телах?
16. Как может быть определено одноосное напряжение в твердом теле?
17. Что представляет собой явление акустоупругости?
18. Основное преимущество метода акустоупругости.

6. Список литературы

1. Махутов Н. А. Деформационные критерии разрушения и расчет элементов конструкций на прочность. – Москва: Машиностроение, 1981. – 272 с.

2. Экспериментальные методы исследования деформаций и напряжений / Б. С. Касаткин, А. Б. Кудрин, Л. М. Лобанов и др. – Киев: Наукова думка, 1981.
3. Пригоровский Н. И. Методы и средства определения полей деформаций и напряжений: Справочник. – Москва: Машиностроение, 1983. – 248 с.
4. Экспериментальная механика: в 2-х т. Т. 1 / под ред. А. Кобаяси. – Москва: Мир, 1990. – 616 с.
5. Хренов Н. Н. Основы комплексной диагностики северных трубопроводов. Наземные исследования. – Москва: Газойл пресс, 2005. – 608 с.
6. Тензометрия в машиностроении: Справочное пособие. – Москва: Машиностроение, 1975. – 288 с.
7. Дайчик М. Л. Методы и средства натурной тензометрии / М. Л. Дайчик, Н. М. Пригоровский, Г. Х. Хуршудов. – Москва: Машиностроение, 1989. – 240 с.
8. Неразрушающий контроль и диагностика. Справочник под. ред. В. В. Клюева. – Москва: Машиностроение, 2005. – 656 с.
9. Горелик С. С. Рентгенографический и электронно-оптический анализ: учеб. пособие для вузов / С. С. Горелик, Ю. А. Скаков, Л. Н. Расторгуев. – Москва: МИСИС, 2002. – 360 с.
10. Неразрушающий контроль: Справочник в 7 т. / под общ. ред. В. В. Клюева. Т. 6. Кн. 1. – Москва: Машиностроение, 2004.
11. Дубов А. А. Метод магнитной памяти металла и приборы контроля: учеб. пособие / А. А. Дубов, Ал. А. Дубов, С. М. Колокольников. – Москва: Изд-во ЗАО «Тиссо», 2006.
12. Щербинин В. Е. О «новых физических эффектах», открытых А. А. Дубовым и В. Т. Власовым / В. Е. Щербинин, В. Ф. Мужичкий, В. Г. Кулеев // Контроль. Диагностика. – 2003. – № 9. – С. 27–29.
13. О проблемах применимости метода магнитной памяти металла при контроле напряженно-деформированного состояния металлоконструкций / М. Б. Аркулис, М. П. Барышников, Н. И. Мишенева, Ю. И. Савченко // Дефектоскопия. – 2009. – № 12. – С. 10–12.
14. Benson R. W., Raelson V. J. From ultrasonics to a new stress-analysis technique. Acoustoelasticity // Product Eng. – 1959. Vol. 30. – P. 56–59.

15. Гуца О. И. Влияние напряжений на скорость распространения ультразвуковых волн в металлах / О. И. Гуца, В. К. Лебедев // Прикл. механика. – 1968. – № 2. – С. 89–92.

16. Гузь А. Н. Введение в акустоупругость / А. Н. Гузь, Ф. Г. Махорт, О. И. Гуца. – Киев: Наукова думка, 1977. – 152 с.

17. Никитина Н. Е. Акустоупругость. Опыт практического применения. – Нижний Новгород: ТАЛАН, 2005. – 208 с.

Лабораторная работа №4

СПЕКТРАЛЬНО-АКУСТИЧЕСКИЙ МЕТОД ОЦЕНКИ СОСТОЯНИЯ МЕТАЛЛА КОНСТРУКЦИЙ ОБЪЕКТОВ РЕНОВАЦИИ

1. Цель работы

Целью работы является изучение аппаратуры и методологии спектрально-акустического контроля оценки состояния металла конструкций объектов реновации.

2. Теоретические положения

2.1. Преимущества акустических методов. Существующие неразрушающие физические методы исследований в задачах оценки и прогнозирования работоспособности сварных соединений металлоконструкций ориентированы, главным образом, на выявление уже существующих и развивающихся очагов разрушения, они не дают возможности выявлять стадии зарождения микроповреждений и оценивать характер изменения микроструктуры. Проблема усугубляется отсутствием научно обоснованной концепции надежного прогнозирования работоспособности длительно-работающего основного металла и сварных соединений.

Кроме того, существующий в настоящее время подход к прогнозированию работоспособности и увеличению эксплуатационного ресурса основного металла и сварных соединений энергооборудования отличается большим многообразием руководящих документов, методов, методик и средств исследований и испытаний. Все это значительно затрудняет процесс оценки работоспособности и не всегда позволяет правильно оценить состояние технических устройств и, следовательно, надежно прогнозировать срок их службы.

Акустические методы испытаний имеют ряд преимуществ, заключающихся в уникальных свойствах ультразвуковых волн выявлять множество рассеянных микроповреждений, размеры каждого из которых меньше порога чувствительности многих

других методов испытаний. Найдены основные закономерности влияния структурных факторов на скорость звука.

Одним из важнейших достоинств акустических методов является возможность контролировать поверхностные несовершенства в материалах с применением волн Рэлея (поверхностных акустических волн – ПАВ). Известно, что в различных сварных конструкциях технических устройств опасных производственных объектов накопление микроповрежденности, образование эксплуатационных микро- и макродефектов происходит, преимущественно, в поверхностных слоях и применение ПАВ может привести к их выявлению и определению предельного состояния сварных соединений. Среди многих акустических методов контроля большой интерес представляет спектрально-акустический метод.

2.2. Автоматизированная акустическая система «АСТРОН».

В настоящее время разработано и эксплуатируется несколько конфигураций автоматизированной акустической системы «АСТРОН», предназначенной для оценки физико-механических характеристик и напряженно-деформированного состояния материала ответственных элементов различных технических объектов. Ниже описаны аппаратно-программные компоненты системы (рис. 4.1), а также используемые оригинальные пьезоэлектрические преобразователи.

Аппаратная часть системы 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 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) про-

изводится последовательное преобразование осциллограммы отраженных импульсов с определенным шагом дискретизации с момента зондирования исследуемого материала и до прихода n -го отраженного импульса.

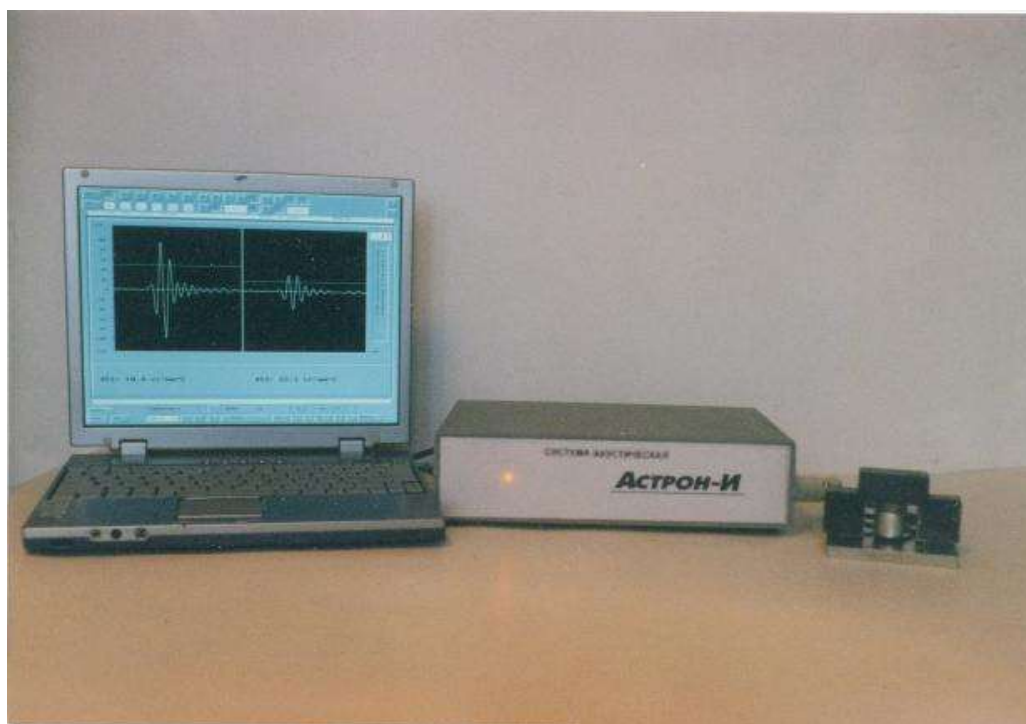


Рис. 4.1. Внешний вид системы

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

Для эталонирования всего тракта «аппаратная часть-датчик-материал» использован метод «эталонирующего датчика», который заключается в следующем. К системе подключается датчик продольных волн, наклеенный на призму из оргстекла, которая перед измерением устанавливается на исследуемый материал для приведения их к одной температуре. После этого проводится цикл «прием-обработка-формирование «температурных поправок». В результате этого становится возможным одновременно учитывать влияние температуры исследуемого объекта и температурного дрейфа аппаратной части системы (рис. 4.2).

Система состоит из следующих элементов:

I. Измерительный модуль.

II. Процессорный модуль (компьютер типа NOTEBOOK).

III. Преобразователь первичный пьезоэлектрический («далее преобразователь»).

IV. Объект контроля.

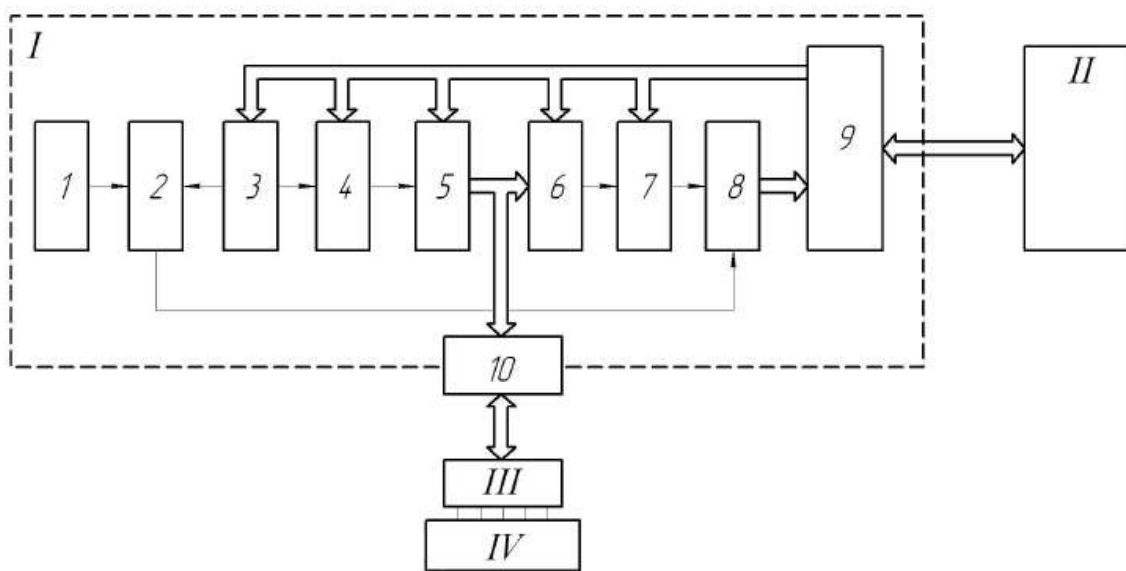


Рис. 4.2. Функциональная схема системы «АСТРОН»

Процессорный модуль является управляющим элементом системы.

Управляющие сигналы процессорного модуля поступают в измерительный модуль на устройство ввода-вывода (9). С него раскодированные сигналы по шинам данных идут на:

- управляющее устройство (3);
- формирователь длительности зондирующего импульса (4);
- многоканальный усилитель мощности (5);
- многоканальный входной усилитель (6);
- регулируемый усилитель (7).

При поступлении от процессорного модуля команды о начале работы управляющее устройство запускает стробоскоп (2) который по стабильным временным меткам кварцевого генератора (1) формирует серию импульсов для запуска аналого-цифрового преобразователя (8). Одновременно запускается формирователь

зондирующего импульса. Сформированный с заданной длительностью зондирующий импульс через выбранный канал многоканального усилителя мощности поступает через наружный разъем измерительного модуля на преобразователь. Преобразователь осуществляет преобразование электрического импульса в механические колебания, возбуждающие в объекте контроля (*IV*) акустические импульсы. Прошедшие через объект контроля акустические импульсы за счет пьезоэффекта создают электрические импульсы, поступающие на выбранный канал предварительного усилителя. С предварительного усилителя через регулируемый усилитель сигналы поступают на аналогово-цифровой преобразователь. Через устройство ввода-вывода цифровой код передается в процессорный модуль. Процессорный модуль осуществляет прием цифрового кода, его преобразование, вывод визуальной информации о форме отраженных импульсов на экран. В соответствии с выбранной пользователем программой производятся временные или амплитудные измерения отраженных импульсов. По результатам этих измерений программно производится расчет временных интервалов и коэффициентов затухания.

Измерительный модуль состоит из печатной платы, с расположенными на ней элементами электрической схемы. Печатная плата расположена в корпусе. Органов регулировки на корпусе нет. Для связи с преобразователем имеется многотыревой разъем. Связь с процессорным модулем осуществляется многожильным кабелем.

Система допускает два варианта эксплуатации: стационарный и переносной.

В первом варианте система представляет собой многофункциональное автоматизированное рабочее место.

Стационарный режим эксплуатации системы может быть реализован в виде двух подрежимов:

1. Режим сканирования объекта контроля, который заключается в том, что оператор производит многократные измерения в различных зонах объекта с одновременной регистрацией результатов на устройствах визуализации – дисплее, принтере, плоттере.

2. Режим непрерывного слежения за поведением материала.

Этот режим особенно удобен для контроля состояния материала ответственных объектов, нахождение вблизи которых опе-

ратора недопустимо вследствие загазованности, повышенного радиоактивного фона, угрозы внезапного разрушения и т. п.

В данном режиме датчики (до нескольких сотен единиц) можно устанавливать на объект стационарно, накопитель акустической информации периодически опрашивает датчики и по линии связи (это может быть телефонная линия) передает информацию в компьютер оператора, который может находиться на любом удалении от объекта. Может быть предусмотрена возможность передачи информации по каналам радиосвязи.

При эксплуатации системы в переносном варианте оператор обследует объект или путем сканирования штатными датчиками системы или подключаясь к датчикам, стационарно установленным на объекте.

Разработанные варианты системы, являясь базовыми, предусматривают широкие возможности реконфигурации аппаратных и программных компонентов системы.

Система удовлетворяет всем требованиям, предъявляемым Ростехнадзором к подобной аппаратуре.

Программная часть системы содержит пакет программ, состоящий из двух модулей:

- системная часть программного обеспечения, обеспечивающая функционирование и взаимодействие всех компонентов системы в реальном масштабе времени;
- алгоритмическая часть, обеспечивающая обработку информации и оперативную выдачу заключения о состоянии материала на основании сравнения результатов текущей спектрально-акустической обработки с содержанием базы данных, сформированной в ходе обучающего акустомеханического эксперимента для данного материала и данного диапазона внешних воздействий.

Программная поддержка системы обеспечивает удобный диалоговый режим, не требующий от оператора знаний программирования. В алгоритмах обработки первичной акустической информации чрезвычайно важен учет температуры окружающей среды, а в случае использования датчиков с фиксированной базой (например, датчиков релеевских волн) – и температуры самого датчика.

В разработанной системе эта проблема решена путем использования интеллектуализированных датчиков, содержащих в

себе кроме пьезоэлементов и микродатчики температуры. При этом результат каждого измерения представляет собой информационный массив длиной, задаваемой оператором системы и зависящей от толщины материала и типа используемых упругих волн. Этот массив кроме первичной информации содержит несколько служебных байтов, в том числе байт, кодирующий значение температуры, соответствующей данному измерению. Программное обеспечение системы поддерживает режим самодиагностики системы и режим интеллектуального запуска, заключающийся в следующем. После настройки расчетных алгоритмов и установки датчика на объект происходит пробный запуск системы, в результате которого полученная первичная акустическая информация передается в программный блок предварительного анализа. Этот блок поддерживает ряд алгоритмов корреляционной и спектральной обработки, позволяющих на основе многокритериального сравнения принятого массива с эталонными массивами, содержащимися в банке данных системы, сделать заключение о корректности принятой информации. В том случае, если данный массив не выходит за границы «акустического портрета» исследуемого материала, система (при необходимости) повторяет измерение заданное число раз, усредняет исходную информацию и направляет ее в основной обрабатывающий блок. Если принятая информация не соответствует «акустическому портрету» материала, система блокирует запуск основных обрабатывающих алгоритмов и выдает соответствующее диалоговое сообщение.

С системой «АСТРОН» широко используются преобразователи поверхностных волн, представляющие собой выполненные в одном корпусе излучатель и приемник (рис. 4.3).

Датчик состоит из двустороннего клина из оргстекла 1 с углом ввода ультразвука 27° (для объектов контроля из стали), излучателя 2 и приемника 3 релеевских волн с центральной частотой 5 МГц. База (расстояние между поверхностями излучения и приема) может варьироваться в широких пределах в зависимости от геометрических размеров зон измерения.

Датчики могут быть изготовлены разных типов: с различной базой; с различными центральными спектральными частотами; с

различной формой спектров импульсов; с различной конфигурацией излучающих поверхностей.

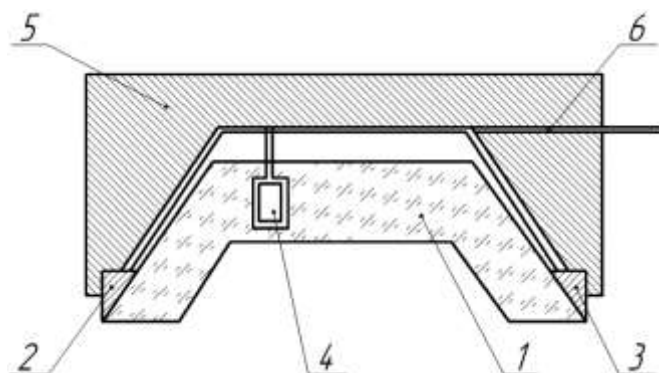


Рис. 4.3. Малобазный релейский датчик:

1 – двусторонний клин из оргстекла; 2 – излучатель релейских волн; 3 – приемник релейских волн; 4 – излучатель-приемник термоимпульсов; 5 – корпус; 6 – высокочастотный кабель

Двусторонний клина 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 (рис. 4.4).



Рис. 4. Типичная осциллограмма импульсов:

1 – рабочий импульс релейской волны; 2 – первый отраженный термоимпульс; 3 – второй отраженный термоимпульс

Задержка термоимпульса определяется временем его прохождения только в оргстекле и зависит от температуры преобразователя линейным образом. В процессе проведения тарировочного эксперимента, устанавливаются параметры зависимости задержки продольного импульса от температуры преобразователя. В дальнейшем в процессе определения физико-механических характеристик в расчетный алгоритм вносятся соответствующие корректирующие поправки.

3. Порядок выполнения работы

Работа выполняется в два этапа.

На первом изучаются теоретические положения, уясняются основные положения спектрально-акустического метода контроля различных конструкций.

На втором этапе студент самостоятельно составляет отчет, в котором описывает по заданию преподавателя требования определенного раздела МУ.

4. Оформление отчета

Отчет по лабораторной работе оформляется на листах формата А4 и должен содержать:

1. Название и цель занятия.
2. Изложение требований заданного студенту раздела МУ.

5. Контрольные вопросы

1. Что такое непрерывный мониторинг?
2. Достоинства прибора АСТРОН.
3. Из каких блоков состоит аппаратная часть системы АСТРОН?
4. Назовите преимущества акустических методов контроля.
5. Назовите точность оценок трещин спектрально-акустическим методом.
6. Какой принцип положен в работу аппаратной части системы?
7. Опишите функциональную схему системы АСТРОН.

8. Назовите два подрежима стационарного режима работы системы.

9. Назовите недостатки существующих методов НК

10. Опишите устройство преобразователя ПАВ.

6. Список литературы

1. Степанова, Л. Н. Акустико-эмиссионный контроль железнодорожных конструкций. – Новосибирск: Наука, 2011. – 270 с.

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

Содержание

Содержание лабораторных работ.....	3
Лабораторная работа №1. Предмет и задачи технического диагностирования	3
Лабораторная работа №2. Влияние дефектов сварки на надежность конструкций объектов реновации	16
Лабораторная работа №3. Методы оценки напряжено-деформированного состояния металла конструкций объектов реновации.....	22
Лабораторная работа №4. Спектрально-акустический метод оценки состояния металла конструкций объектов реновации	41