

На правах рукописи

Галкин Денис Игоревич

**РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ БЕЗОБРАЗЦОВОЙ ЭКСПРЕСС-ДИАГНОСТИКИ
ПОВРЕЖДЕННОСТИ МЕТАЛЛА ЭКСПЛУАТИРУЕМЫХ
МАГИСТРАЛЬНЫХ НЕФТЕПРОВОДОВ НА ОСНОВЕ МЕТОДА
АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ**

Специальность:

05.02.11 – методы контроля и диагностика в машиностроении

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва – 2011

Работа выполнена на кафедре технологий сварки и диагностики в Московском государственном техническом университете им. Н.Э.Баумана.

Научный руководитель: доктор технических наук
Бигус Георгий Аркадьевич

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
Барзов Александр Александрович

кандидат технических наук
Хретинин Игорь Сергеевич

Ведущая организация: **ООО НПФ «Диапак»**

Защита состоится « 12 » мая 2011 г. на заседании диссертационного Совета Д 212.141.01 в Московском государственном техническом университете им. Н.Э.Баумана по адресу: 105005, г. Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5.

Ваш отзыв на автореферат в одном экземпляре, заверенный печатью организации, просим присылать по указанному адресу.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МГТУ им. Н.Э.Баумана.

Телефон для справок 8-499-267-09-63

Автореферат разослан « 30 » марта 2011 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
доктор технических наук, доцент

Коновалов А.В.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Система нефтепроводов является одним из важнейших элементов экономики страны, обеспечивающим практически все отрасли промышленности сырьем, топливом, энергией. В то же время она является источником опасности для тех регионов, где проходят нефтепроводы и расположены нефтехранилища. Аварии на нефтепроводах приводят к тяжелым последствиям, в том числе и для окружающей среды, населенных пунктов, промышленных и гражданских объектов. Некоторые аварии приводят к катастрофам.

Главной особенностью современных магистральных нефтепроводов (МН) является несоответствие между проектно-нормативными требованиями, предусматривающими срок эксплуатации 30-35 лет, и фактическим возрастным составом трубопроводной системы. Более 50% нефтепроводов эксплуатируются свыше 30 лет, и существует реальная перспектива и потребность увеличения срока эксплуатации до 50-100 лет. При таких больших сроках эксплуатации МН существенными становятся изменения по всем основным аспектам, определяющим безопасность: фактическое состояние трубопровода, условия и режимы эксплуатации, уровень развития приборной и методической базы для проведения комплексной оценки технического состояния металла МН. При длительной эксплуатации неизбежно происходит снижение защитных свойств изоляции, возникают и растут дефекты труб, появляются участки с существенными изменениями структуры и физико-химических свойств.

Процесс разрушения материалов начинается с локализации пластической деформации вблизи структурных неоднородностей и концентраторов напряжения, вызывающих формирование зоны деформации, накопление в ней микродефектов и, в конечном счете, образование трещин. Закономерностями формирования и размер зоны пластической деформации зависят от структуры материала и локального напряженного состояния. Условиями разрушения является концентрация механических напряжений и их высокий градиент. Наибольшей структурной неоднородностью обладает металл сварных соединений трубопроводов, кроме того, большинство концентраторов напряжений имеет сварочное происхождение. В этой связи длительная эксплуатация МН приводит к тому, что именно сварные соединения подвергаются более интенсивному коррозионному воздействию и изменению механических свойств (прежде всего, охрупчиванию). Если учесть большое количество сварных стыков, их роль в обеспечении безопасности нефтепроводов является весьма существенной.

Современная концепция технической диагностики и неразрушающего контроля (НК) МН базируется на методах обнаружения макродефектов в виде разрывов сплошности, снижающих прочность участка трубопровода. Совершенствование методов и средств НК в последние десятилетия позволило существенно поднять чувствительность и надежность выявления дефектов в металлоконструкциях. Однако, несмотря на высокую техническую и методическую оснащенность НК и «жесткий» технический контроль надзорными органами, техногенные аварии продолжают происходить. Более того, нередки ситуации, когда разрушение МН происходили сразу

после планового дефектоскопического и технического освидетельствования. Это обусловлено появлением новых видов разрушения, которые уже не могут быть объяснены с позиции существующих концепций макродефектов. Если при относительно небольшом времени эксплуатации МН формирование отказов зависит от условий нагружения и поведения дефектов, заложенных при изготовлении прокатного листа и труб, проведении строительно-монтажных работ, то процессы повреждения металла, возникающие при длительной эксплуатации, интенсивно протекают глобально по всему объёму металла, а особенно - в местах концентрации напряжений и деформаций. Для учета динамики изменения механических свойств металла требуется переход на новый уровень диагностики, основанный на исследовании поведения и развития микроуровня. Таким образом, проблема оценки технического состояния нефтепроводов является весьма актуальной.

Объектом исследования данной работы является линейная часть МН. Диаметры МН в основном находятся в диапазоне 530 – 1420 мм, толщина стенки 7 – 20 мм, рабочие давления 4,0 – 10 МПа. Трубопроводы выполнены из стальных труб в подземном исполнении.

Цель работы. Повышение безопасности нефтепроводов при длительной эксплуатации путем совершенствования системы технического диагностирования.

Достижение поставленной цели осуществлялось путем решения **следующих задач:**

1. Определение причин и анализ последствий изменений механических свойств металла нефтепроводов в процессе эксплуатации.
2. Выбор методов НК, позволяющих обнаруживать наличие и развитие поврежденности металла МН.
3. Выявление наиболее чувствительных к структурному состоянию материала параметров сигналов акустической эмиссии (АЭ), возникающих в процессе индентирования.
4. Исследование влияния параметров испытаний на спектральные образы сигналов АЭ.
5. Разработка методики безобразцовой экспресс-диагностики поврежденности металла эксплуатируемых нефтепроводов.

Основой для решения данных задач явились труды академических (ИМЕТ РАН им. А.А. Байкова), отраслевых (ГУП «ИПТЭР», ОАО «ВНИИСТ», ЦНИИПСК им. Н.П. Мельникова) институтов, лабораторий и кафедр высших учебных заведений (МГТУ им. Н.Э. Баумана, ТГУ, СПбГУ, ЮФУ, РГУНГ им. И.М. Губкина), специалистов ОАО «АК «Транснефть», ОАО «ВМЗ», работы ведущих ученых: Н.П. Алёшина, Г.А. Бигуса, С.И. Буйло, Е.С. Васина, В.М. Горицкого, А.Г. Гумерова, К.М. Гумерова, В.Ф., О.М. Иванцова, О.М. Недзвецкой, В.М. Матюнина, Д.Л. Мерсона, Д.Е. Мещерякова, В.Ф. Терентьева, Е.В. Черняевой, К.М. Ямалеева и других. Кроме того, в работе использованы и обобщены данные о фактическом техническом состоянии МН, результаты диагностики методами внутритрубных и шурфовых обследований. В работе использованы также результаты испытаний современных средств и методов диаг-

ностики, аналитические, эмпирические и численные методы моделирования процессов, положения теорий вероятности и математической статистики, теории прочности и механики разрушения, теории тепловых процессов и сварки.

В процессе решения поставленных задач получены следующие результаты, представляющие **научную новизну**:

1. Экспериментально доказано, что при индентировании локального участка МН информацию о сигнале АЭ, связанную с протеканием процессов пластической деформации, переносят поверхностные волны.

2. Обнаружено, что по мере приближения к месту разрушения количество сигналов АЭ, вызванных индентированием, уменьшается от 2 до 10 тем сильнее, чем ближе участок индентирования к месту разрушения; это подтверждает теоретическое предположение о том, что процесс возникновения циклической трещины в металле нефтепровода обусловлен развитием его дислокационной структуры.

3. Обнаружено, что о степени циклической поврежденности металла можно судить по форме спектра сигналов АЭ, возникающих в процессе индентирования. Установлено, что спектральный образ сигналов АЭ, возникающих при одноосном растяжении и при индентировании, одинаков.

4. Впервые обнаружено, что при увеличении степени циклической поврежденности трубных сталей более $65 \pm 5\%$ в спектре сигналов АЭ, излучаемых при индентировании, появляется дополнительный высокочастотный пик (отношение максимумов спектральной плотности в основном типе сигналов АЭ, возникающих при индентировании, более 0,1). Показано, что характер изменения спектра сигналов АЭ стали 20, возникающих при индентировании, одинаков для основного металла и заводского сварного соединения (сварка ТВЧ).

Защищаемые положения.

1. Установленные идентичные зависимости между АЭ параметрами сигналов, излучаемых при пластической деформации в процессе одноосного растяжения, и параметрами АЭ в процессе вдавливания твердосплавного элемента.

2. Результаты экспериментальных исследований процессов распространения рэлеевских волн от места индентирования до датчика АЭ.

3. Зависимости степени циклической поврежденности металла длительно эксплуатируемых трубных сталей и вида спектральных характеристик АЭ сигналов, излучаемых пластически деформируемым слоем под индентором.

4. Идентичность спектральных характеристик АЭ процессов, вызванных индентированием участков основного металла и сварного соединения.

Практическая значимость диссертации

1. Разработана практическая методика безобразцовой экспресс-диагностики поврежденности длительно эксплуатируемых МН с использованием переносных динамических твердомеров и одноканальных АЭ приборов, использующих широкополосный датчик, устанавливаемый в непосредственной близости от места индентирования.

2. Доказано, что степень поврежденности металла МН и сварных соединений, вызванная циклическим воздействием при длительной эксплуатации МН,

определяет спектральные характеристики сигналов АЭ, регистрируемых датчиком, расположенным в непосредственной близости от места индентирования.

3. Сформулирована концепция определения частоты контроля степени поврежденности различных участков нефтепроводов при их регулярном освидетельствовании путем оценки величины изменения между спектральными максимумами спектров сигналов АЭ, регистрируемых при индентировании. Реализация данной концепции позволит более обоснованно назначить безопасные режимы эксплуатации нефтепроводов, определить необходимый объем ремонтных работ, исключить неоправданно жесткие требования, тем самым решать задачу оптимизации затрат.

Достоверность результатов подтверждена в ходе экспериментальных исследований на образцах, вырезанных из реальных нефтепроводов после длительной эксплуатации, испытанных на динамических разрывных машинах в условиях циклического нагружения вплоть до разрушения. Сопоставление результатов фрактографии изломов с данными индентирования и результатами обработки АЭ исследований этих же образцов указывают на совпадение предположений с окончательными выводами.

Апробация работы. Основные результаты работы докладывались на XV, XVI, XVII Международной конференции "Современные методы и средства НК и ТД" (г. Ялта, 2007, 2008, 2009 г.г.), XXVII и XXIX тематическом семинаре «Диагностика оборудования и трубопроводов компрессорных станций» (пос. Небуг, 2008, 2010 г.г.), V-ой Евразийской научно-практической конференции "Прочность неоднородных структур ПРОСТ-2010" (г. Москва, 2010 г.), II научно-технической конференции «Диагностика технического состояния оборудования и сооружений в технологических системах добычи, подготовки и трубопроводного транспорта нефти и газа» (г. Москва, 2010 г.), на научных семинарах кафедры "Технологии сварки и диагностики" МГТУ им. Н.Э. Баумана.

Публикации. По теме диссертации опубликованы 9 научных работ, из них 3 в печатных изданиях, рекомендованных ВАК.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, основных выводов и списка цитируемой литературы, включающего 82 наименования. Содержание диссертации изложено на 135 машинописных листах, включая 37 рисунков, 18 таблиц.

Первая глава является обзорной и состоит из четырёх основных разделов и выводов. В главе изложены основные литературные данные о МН, их сварке и дефектах. Приводятся сведения о распределении количества нефтепроводов (по отношению к общему числу) по годам ввода в эксплуатацию (рис. 1), из которых видно, что значительная часть МН достигла амортизационного срока свыше 33 лет.

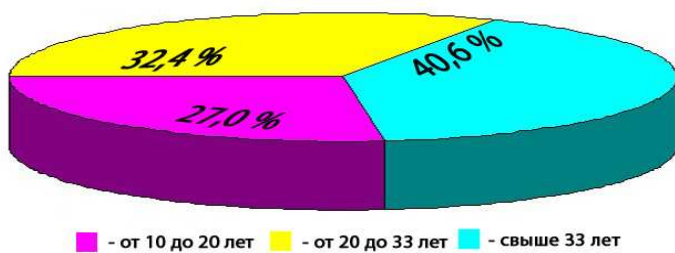


Рис. 1. Возрастной состав магистральных нефтепроводов АК «Транснефть»

Большое внимание уделено аварийности и повреждаемости МН. Анализ аварий, произошедших на МН за последние годы, показывает, что их причиной являются дефекты различных типов, среди которых чаще всего встречается коррозия и разрушения вследствие

развития трещиноподобных дефектов. К последнему типу относятся трещины, а также такие дефекты сварных соединений как непровары, несплавления и подрезы.

Одним из основных видов нагружения МН является нестабильное малоцикловое нагружение, причинами которого являются:

1. Падение внутреннего давления из-за сбоев, аварий, переключений насосов, испытаний, пропусков внутритрубных снарядов. Установлено, что в течение года в среднем происходит до 300 перепадов давления более 10% (примерно один раз в сутки).
2. Периодические температурные изменения (суточные, годовые), которые вызывают циклические изменения термонапряжений в стенках трубопровода.
3. Ремонтно-восстановительные работы, частота которых в последние годы только возрастает (выборочный ремонт на дефектных участках, ремонт при замене изоляционного покрытия). При этом трубопровод и его сварные соединения испытывают дополнительные нагрузки со стороны ремонтных машин и механизмов, грунта (подкоп, засыпка, усадка). Все это приводит к тому, что МН работает в условиях перепадов нагрузок со случайными параметрами. За 30 лет

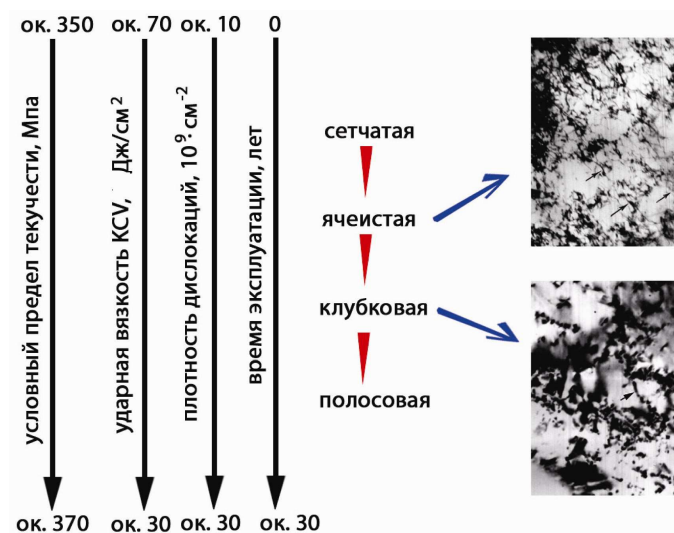


Рис. 2. Изменение микро- и макросвойств металла трубопровода из стали 17ГС за период эксплуатации

эксплуатации МН может произойти порядка 10 тысяч перепадов давления. Наибольшим числом перепадов давления характеризуются МН на участках, расположенных на выходе НПС.

Таким образом, при существующих режимах эксплуатации МН в металле труб имеются такие зоны, в которых в течение всего срока эксплуатации происходит развитие дислокационной структуры (рис. 2). Возникающие дислокации взаимодействуют друг с другом, атомами внедрения, вакансиями. При этом растет

сопротивление движению дислокаций, падает подвижность вновь образующихся дислокаций, растет внутрикристаллитная напряженность, металл становится менее пластичным (более хрупким).

Исходя из анализа причин отказов и повреждений длительно (более 30 лет) эксплуатируемых МН можно заключить, что первопричинами появления недопустимых дефектов являются участки с существенными изменениями структуры и физико-механических свойств металла МН особенно в районе исходных дефектов сварных швов.

Заканчивается глава постановкой задач исследования.

Вторая глава «содержит описание физической природы явления АЭ, механизмов излучения АЭ на уровне изменений микроструктуры, АЭ при пластической деформации, исследование возможности применения метода АЭ совместно с кинетическим индентированием для определения степени поврежденности металла.

В общем случае результирующий процесс АЭ измерения $x(t)$ записать в виде:

$$x(t) = \sum_{k=1}^N A_k \cdot f_k(t - t_k), \quad (1)$$

где A_k - амплитуда импульса, появляющегося в момент времени t_k ;
 N - число зарегистрированных импульсов.

Исходя из этого, поток импульсов АЭ может быть представлен в виде случайной последовательности импульсов, у которых случайными являются амплитуда, время появления.

В главе приводятся определение и информативность параметров сигналов для анализа АЭ.

Физическая природа акта АЭ при упругом взаимодействии дислокационного скопления с межзеренной границей показана на рис.3.

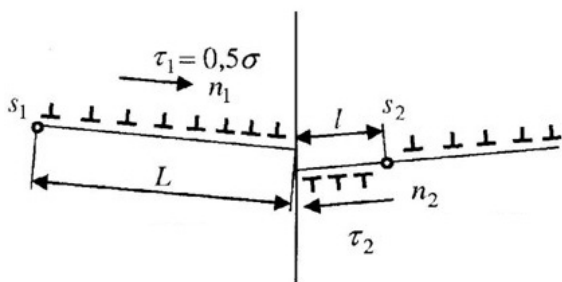


Рис. 3. Образование скоплений дислокаций у границы при механическом нагружении

Межзеренные границы являются непреодолимыми препятствиями, перед которыми скапливаются дислокации. Каждое скопление дислокаций создает поле напряжений, отталкивающее приближающуюся дислокацию. При деформировании материалов приложенным напряжением σ движущиеся дислокации скапливаются у препятствий, что приводит к появлению касательного напряжения $\tau_2 n_2$ большего, чем активизирующее источник:

$$\tau_2 n_2 = n_2 \tau_1 (L/l)^{1/2} = 0,5 n_2 \sigma (L/l)^{1/2}, \quad (L/l) \gg 1, \quad (2)$$

где τ_1 - сдвиговое напряжение в линии скольжения длиной L первого дислокационного источника s_1 ;

τ_2 , n_2 , l – соответственно сдвиговое напряжение, число дислокаций и длина линии скольжения вторичного источника s_2 .

При большом количестве дислокаций во вторичном скоплении n_2 и учитывая, что обычно $(L/l) \gg 1$, напряжения на границе легко превышают критические даже при малом приложенном напряжении σ . Релаксация этого напряжения сопровождается излучением импульсов АЭ.

Полагая, что каждая дислокация при пересечении границы в момент времени t_i излучает короткий экспоненциальный импульс амплитудой x_{oi} и, учитывая, что их суперпозиция дает регистрируемый импульс амплитудой X , получен следующий вид нормированной амплитуды суммарного импульса АЭ:

$$A(\lambda) = \frac{X}{nx_{oi}} = \frac{1}{n} \sum_{k=0}^{n-1} \exp\left(-\frac{\lambda k}{n}\right), \quad (3)$$

где n – количество дислокаций в скоплении;

$\lambda = t_r / \tau_a$ – отношение времени $t_r = n(t_i - t_{i-1})$ пересечения границы скоплением к постоянной времени релаксации напряжения τ_a .

Далее, учитывая, что скорость деформации $\dot{\epsilon}$ линейно связана с частотой нагружения при усталостном испытании F , и перейдя от суммирования к интегрированию по k , получим:

$$A(\lambda) = \frac{X}{nx_{oi}} = \frac{1}{n} \sum_{k=0}^{n-1} \exp\left(-\frac{\lambda k}{n}\right) \approx \frac{\dot{\epsilon}}{C} \left[1 - \exp\left(-\frac{C}{\dot{\epsilon}}\right) \right], \quad (4)$$

где $C \approx \sqrt{F_{\min} F_{\max}}$ – некоторая константа.

Здесь F_{\min} , F_{\max} – соответственно минимальные и максимальные в эксперименте частоты деформации. Соотношение (4) достаточно хорошо описывает наблюдаемую экспериментально зависимость АЭ от частоты нагружения.

АЭ является наиболее чувствительным к структурному состоянию методом, позволяющим проводить обнаружение (а во многих случаях и идентификацию) наноструктурных изменений по сигналам АЭ. В свою очередь процессы пластической деформации, связанные с массовым образованием и перемещением дефектов кристаллической решетки при ее нагружении, являются главными источниками АЭ. Согласно многочисленным экспериментам, АЭ в процессе нагружения появляется только с началом микропластической деформации, т.е. связана с движением дефектов кристаллической решетки.

Излучение отдельной дислокацией не может быть зарегистрировано современной аппаратурой, поскольку энергия единичных элементарных источников АЭ составляет 10^{-23} - 10^{-18} Дж, тогда как минимальная энергия, которую может зарегистрировать лучшая аппаратура, только 10^{-16} Дж. Следовательно, на данном уровне развития техники наблюдаемая АЭ является суперпозицией сигналов от огромного числа элементарных источников, т.е. следствием коллективных дислокационных процессов. Следовательно, измерение динамических, энергетических, спектральных параметров сигналов АЭ позволяет количественно исследовать кинетику процессов структурных преобразований, в том

числе и накопления микроповреждений, что позволяет диагностировать самые ранние стадии разрушения.

Для инициирования АЭ с целью исследования поврежденности предлагается использовать метод кинетического индентирования. В результате вдавливания индентора поверхностные слои металла, находящиеся под индентором и вблизи его, получают пластическую деформацию. Плотность дислокаций вдоль трассы индентора с увеличением нагрузки возрастает и наблюдается переход от упругого поведения материала в контактной зоне индентора к пластическому.

В третьей главе приводятся результаты экспериментальных исследований повреждаемости металла. Рассматривается влияние степени пластической деформации на параметры АЭ, возникающей при одноосном растяжении и индентировании.

Исследование АЭ при пластической деформации проводилось в условиях одноосного растяжения гладких образцов с приблизительно постоянной скоростью деформирования $\dot{\epsilon}$. При этом деформация удлинения $\epsilon = \dot{\epsilon}t$ пропорциональна времени растяжения t и параметры АЭ можно выражать как в функции ϵ , так и в функции t . Результаты исследований гладких образцов на растяжение с применением метода АЭ позволили соотнести АЭ с основными закономерностями пластической деформации металлов.

На рис. 4 представлены зависимости напряжения в образце $\sigma(\epsilon)$ и скорости счета АЭ $\dot{N}(\epsilon)$ от деформации для трубной стали (0,07% С) при различном числе циклов нагружения ($\sigma_A = 250$ МПа).

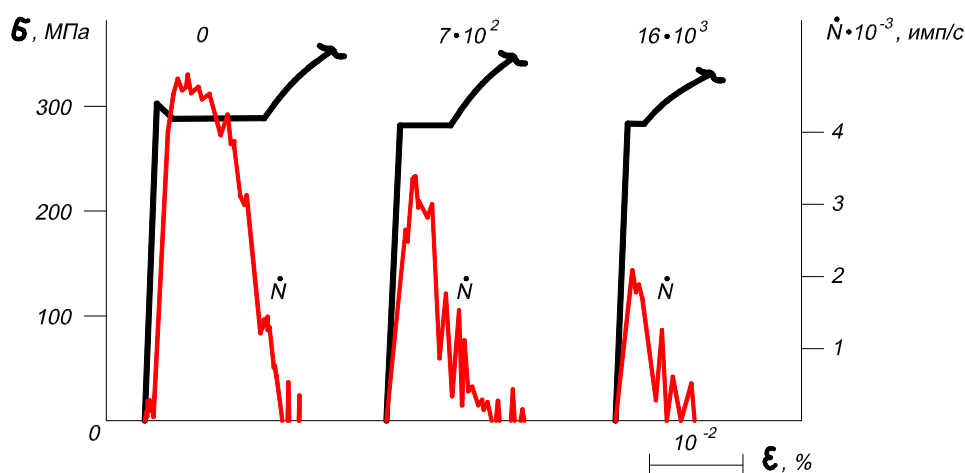


Рис. 4. Зависимость скорости счета акустической эмиссии – \dot{N} от деформации ϵ и кривая нагружения $\sigma(\epsilon)$

Кривая $\dot{N}-\epsilon$ близка к известной зависимости Гилмана, т.е. зависимости плотности подвижных дислокаций при деформации алюминиевых сплавов. Уравнение зависимости плотности подвижных дислокаций от пластической деформации имеет вид:

$$P = (P_0 + m_p \epsilon_p) e^{-\mu \epsilon_p}, \quad (5)$$

где P – плотность подвижных дислокаций;

P_0 – число исходных подвижных дислокаций;

m_p – коэффициент размножения;

ε_p – пластическая деформация;

$\mu = H/\sigma$ (H – коэффициент работы упрочнения, σ – среднее квадратическое значение сдвигового напряжения).

Схожесть формы кривых скорости счета АЭ и плотности подвижных дислокаций доказывает дислокационную природу АЭ при пластической деформации скольжением. Вид зависимости $\dot{N}(\varepsilon)$ характерен для металлов и сплавов с ГЦК-решеткой. Кривая подобного типа получается и для среднее квадратического значения сигнала АЭ \bar{u} .

Из экспериментов получено выражение, связывающее среднее квадратическое значение АЭ \bar{u} с величиной пластической деформации ε_p и скоростью деформации $\dot{\varepsilon}$:

$$\bar{u} = k_0 \sqrt{\dot{\varepsilon}} e^{-d\varepsilon_p}, \quad (6)$$

где k_0 и d – константы эксперимента.

Экспериментальные данные свидетельствуют о влиянии скорости деформирования на параметры АЭ: чем выше скорость, тем большие значения они принимают. Объяснение этому может быть следующее: чем выше скорость деформирования, тем при более высоких напряжениях происходит пластическое

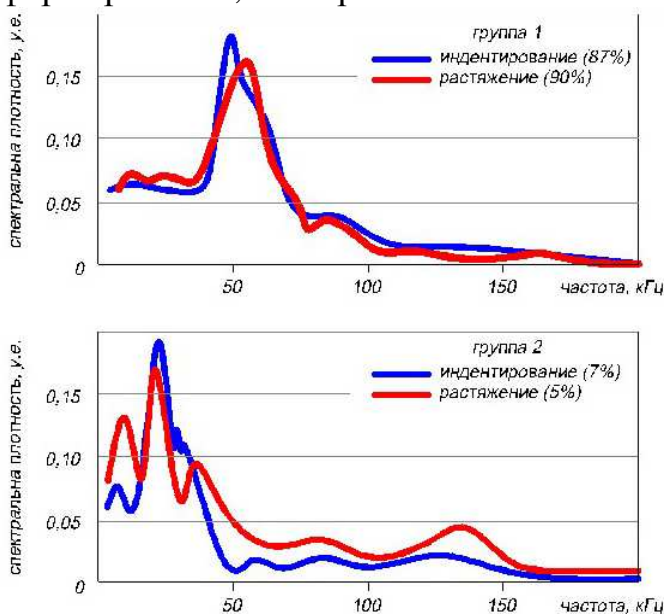


Рис.5. Деление сигналов на типы (по форме кривой средней спектральной плотности мощности) на примере основных двух групп сигналов, полученных при индентировании и растяжении.

Сталь 20 (в исх. состоянии)

пластической деформацией. В этом случае «звучит» слой материала, находящийся под индентором.

деформирование образцов. А более высоким напряжениям соответствует большая скорость движения дислокаций при их отрыве от препятствий. Все это приводит к увеличению значений параметров АЭ. Переход от упругих к упруго-пластическим деформациям сопровождается быстрым увеличением \bar{u} и \dot{N} до максимума. Дальнейшее пластическое деформирование приводит к плавному снижению практически до уровня шумов аппаратуры в области удлинения более 6%.

По мере исчерпания остаточной пластичности наибольшим изменениям подвергается спектральный состав сигналов АЭ.

При индентировании появление сигналов АЭ так же, как и при одноосном растяжении, связано с

Оценка сопоставимости результатов анализа параметров АЭ при растяжении и индентировании приведены на рис. 5. Сопоставление основных спектральных характеристик сигнала АЭ при индентировании и одноосном растяжении образцов стали 20 показало, что при обеих схемах нагружения материала спектральный состав АЭ качественно одинаков, т.е. регистрируются одни и те же типы сигналов. Это подтверждает предположение о единых механизмах деформирования материала при растяжении и индентировании.

Результаты проведенных экспериментов по влиянию параметров испытаний на спектральные образы сигналов АЭ при индентировании показали, что:

- для регистрации импульсов АЭ с минимальными искажениями в процессе индентирования необходимо устанавливать датчик на поверхности индентирования, т.к. в этом случае наибольший вклад в формирование спектрального портрета вносят рэлеевские волны;
- расстояние от места индентирования до датчика АЭ, при котором спектральный портрет формируется только за счет рэлеевских волн, зависит от толщины и материала объекта контроля и определяется экспериментально;
- влияние скорости нагружения и тип индентора не целесообразно использовать как показатель процессов.

Исследования влияния изменение спектральных образов с увеличением повреждаемости проводились как для основного металла, так и для металла со сварными соединениями.

Для оценки влияния циклического нагружения на параметры АЭ, были проведены сравнительные исследования образцов основного металла, предварительно разрушенных в результате: статических испытаний на одноосное растяжение (А) и малоцикловых испытаний (выдержавших соответственно 3400 (Б) и 16000 (В) циклов нагружений).

Индентирование проводилось на трех характерных участках (рис. 6): в недеформированную область I (зона захвата), в область относительно равномерной деформации II и область локализованной деформации («шейка»). Датчик АЭ устанавливался на образцах через слой контактной жидкости с постоянным усилием прижима 2 Н.

Эксперименты показали, что при индентировании статически разорванных образцов АЭ практически однородна: 90–100% составляют сигналы со спектром одного вида, что свидетельствует о действии единственного источника АЭ. Очевидно, что этот источник АЭ имеет дислокационную природу. Причем, независимо от места индентирования: в зону захвата, на которой материал не подвергался деформации при растяжении или вдоль рабочей части образца, вид кривой спектральной плотности сигналов (спектрального портрета) основной группы практически идентичен (табл. 1).

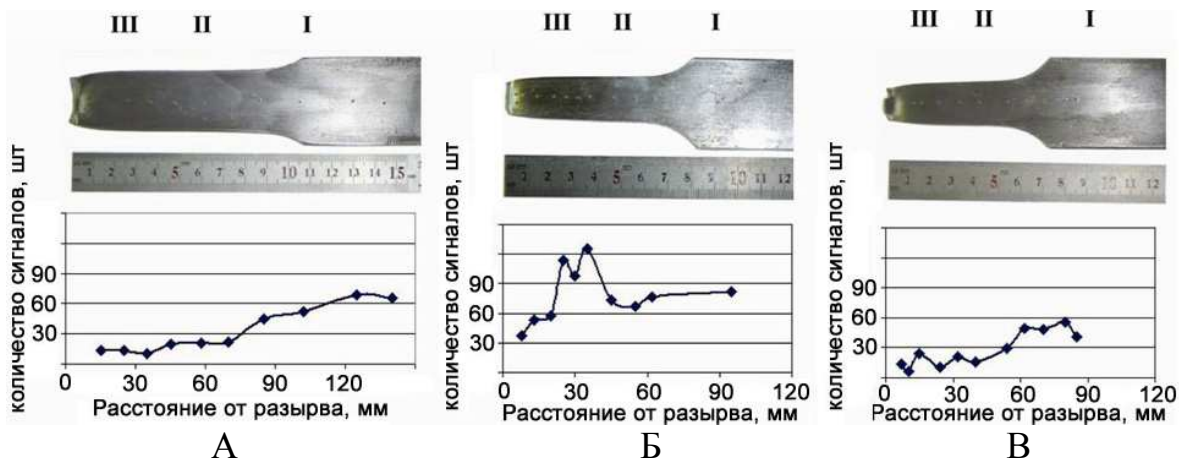


Рис. 6. Распределение количества сигналов акустической эмиссии при индентировании вдоль образцов: А - разрушенного при одноосном растяжении; Б - выдержавшего 3400 циклов нагружения; В - выдержавшего 16000 циклов нагружения

Таблица 1.

Спектральные портреты основного типа сигналов акустической эмиссии в различных зонах (I-III) образцов (А-В)

Зона	Образец А	Образец Б	Образец В
I			
II			
III			

1 – дополнительный пик кривой спектральной плотности сигналов

По мере приближения к зоне разрыва растет степень деформационного упрочнения (поврежденность) материала, т.е. снижается подвижность дислокаций. Поэтому чем в более поврежденную область образца производится индентирование, тем меньше сигналов АЭ регистрируется и тем меньше, как правило, их энергия.

В отличие от статически разрушенного образца, для образцов после циклических испытаний спектральный состав сигналов АЭ, зарегистрированных при уколах в разные области образцов, не одинаков: для всей рабочей части на кри-

вой спектральной плотности появляется «ступенька», которая в зоне разрыва трансформируется в дополнительный пик, т.е. в спектрах увеличивается доля высокочастотной составляющей. И хотя природа этого явления пока не ясна, уже сейчас можно утверждать, что АЭ при индентировании «чувствует» предысторию формирования структуры: под действием статического или циклического нагружения.

При большом количестве циклов до разрушения (16000, образец *B*) происходит уменьшение общего количества сигналов и снижение их энергии по сравнению с образцом *B* (3400 циклов). Тот факт, что образец *B* разрушился при существенно меньшем, по сравнению с образцом *B*, количестве циклов, позволяет предположить присутствие в его материале микродефектов на уровне структурных неоднородностей, которые и могли инициировать раннее разрушение. Возможно, именно с такими дефектами связано и наличие на рабочей части образца локальной области с повышенной активностью АЭ (рис. 6 *B*), (это явление наблюдалось на большом количестве образцов разных партий).

Для металла со сварными соединениями проводились испытания, аналогичные описанным выше, исходя из которых можно сделать вывод о том, что существуют общие закономерности изменения параметров АЭ при индентировании образцов после циклических испытаний для основного металла и металла в области сварного соединения. При индентировании образцов в разном состоянии или в различные зоны одного образца АЭ может существенно отличаться, но в процессе каждого конкретного индентирования регистрируются АЭ-сигналы практически только одного вида. В исходном материале спектр этих сигналов содержит один низкочастотный пик. Вследствие структурных изменений, связанных со сваркой и последующей локальной нормализацией области шва, происходит смещение основного пика в сторону высоких частот и некоторое искажение спектров в прилегающих областях. Циклическое нагружение приводит к немонотонному увеличению количества регистрируемых сигналов и их энергии. Однако в случае индентирования в зоне, непосредственно примыкающей к месту разрушения, количество сигналов и их энергия резко уменьшаются, а искажения спектров, заключающиеся в увеличении высокочастотной составляющей (появление второго пика на кривой спектрально плотности) становятся все более ярко выраженными.

Четвертая глава посвящена разработке методики безобразцовой экспресс-диагностики поврежденности металла эксплуатируемых нефтепроводов, сочетающей методы индентирования и АЭ.

При разработке методики учитывался тот факт, что на основании многочисленных экспериментов и сопоставления результатов анализа можно утверждать, что основные источники АЭ при одноосном растяжении и индентировании имеют одну и ту же природу происхождения, что позволяет говорить о возможности перехода от разрушающих методов определения характеристик металла и оценки его состояния к неразрушающим.

Разработанная методика дополняет существующие методики:

- экспресс-оценки механических свойств металла методом кинетического индентирования;
- оценки дефектов на основе акустико-эмиссионного контроля.

При определении характеристик механических свойств металла МН по результатам испытаний на твердость:

- используются предварительно установленных корреляционных соотношений между значениями твердости и искомыми механическими свойствами;
- механические свойства определяются по диаграмме вдавливания шарового индентора, регистрируемой приборами, реализующими кинетические методы определения твердости.

В основе методики оценки дефектов на основе акустико-эмиссионного контроля положен следующий факт – наличие объективных методов реализации зависимостей параметров дефектов и соответствующих параметров АЭ.

Для определения природы источников АЭ используется классификация сигналов, различающихся по определённому спектральному параметру (параметрам), который в свою очередь оценивается для каждого отдельного события АЭ. Для решения этой задачи используется два параметра: медианная частота и средняя энергия либо медианная частота и полная энергия. Данные АЭ, построенные в пространстве признаков «энергия – медианная частота», образуют скопления – кластеры. Наличие нескольких кластеров свидетельствует о различной природе источников АЭ и позволяет сортировать сигналы по природе их происхождения. Для учета распределения энергии внутри сигнала по частотам применяется методика цифрового распознавания образов, которая заключается в определении спектральных характеристик сигналов АЭ при следующих предположениях:

- сигнал АЭ рассматривается как случайный квазистационарный непрерывный сигнал с короткими импульсами, которые могут перекрываться внутри каждого кадра.
- каждый кадр состоит из 2^n отчетов (например, 4096, n – целое число).
- обрабатывается серия кадров, соответствующая одному испытанию.

Основными этапами определения спектральных характеристик сигналов АЭ являются следующие.

Перед каждым испытанием записывается 5–6 кадров шума, по которым вычисляется спектральная плотность шума и затем усредняется по всем этим отсчетам, что дает некоторый «образ» шума $G_\phi(f)$.

На втором этапе происходит регистрация сигналов АЭ.

На третьем для каждого кадра серии выполняется дискретное преобразование Фурье (по алгоритму быстрого преобразования Фурье Кули–Тьюки) и вычисляется спектр мощности - $G_i(f)$, сглаживаемый скользящим окном, (ширину окна можно задавать программно).

Блок схема последовательности вычисления спектральных характеристик сигналов АЭ представлена на рис. 7.

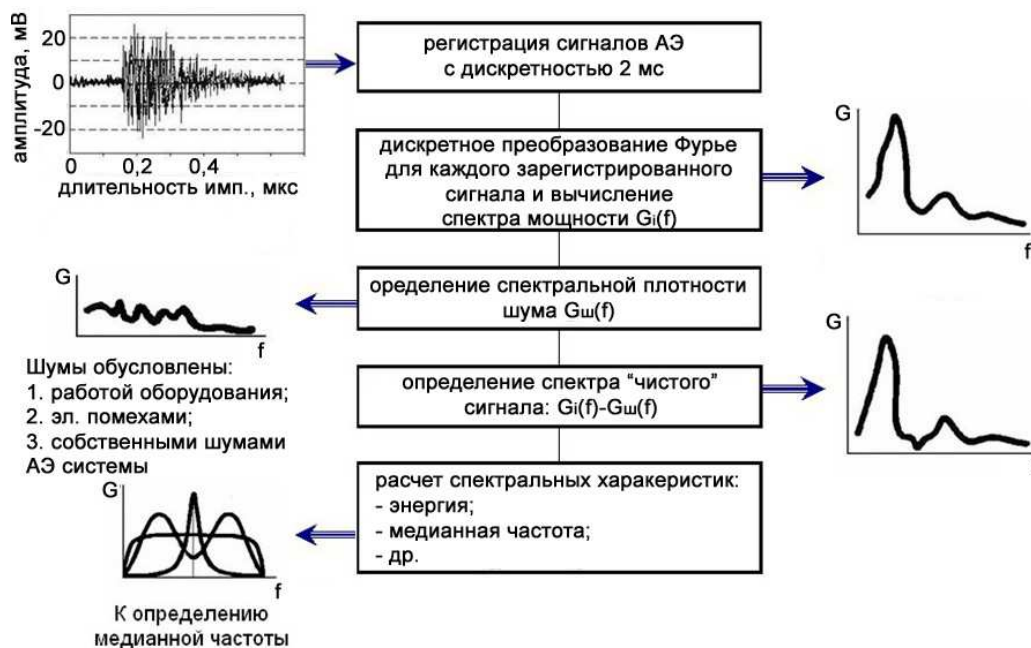


Рис. 7. Блок-схема последовательности вычисления спектральных характеристик сигналов акустической эмиссии

Для распознавания и классификации спектральных образов была применена методика анализа спектральной плотности сигналов АЭ на основе математических принципов распознавания образов. В качестве исходных данных используются функции нормированной спектральной плотности.

Блок схема последовательности обработки данных для распознавания и классификации спектральных образов сигналов АЭ представлена на рис. 8.

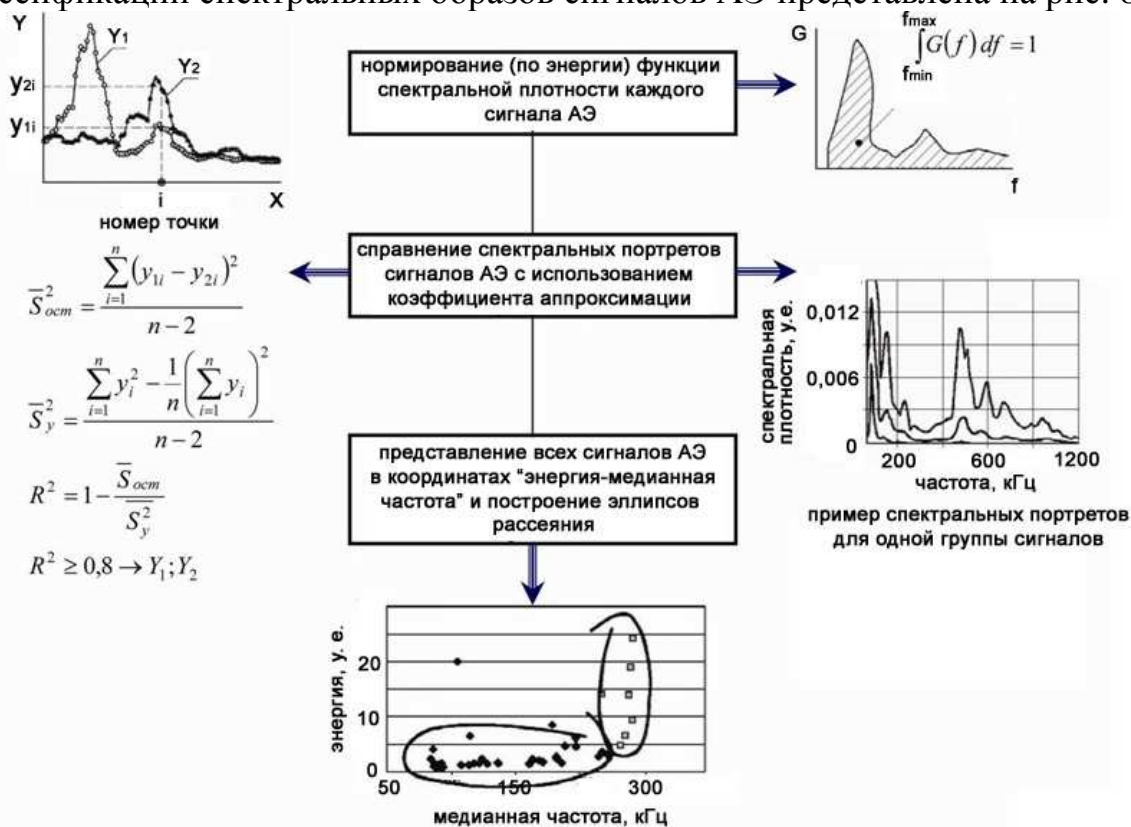


Рис. 8. Последовательность обработки данных для распознавания и классификация спектральных образов сигналов акустической эмиссии

Окончательное определение стадии повреждения металла длительно эксплуатируемого МН происходит в следующей последовательности:

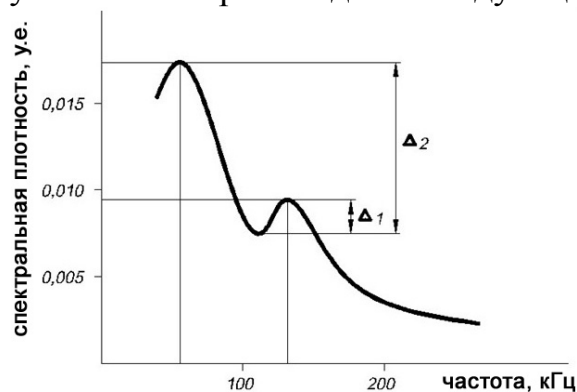


Рис. 9. Пояснения к выявлению «двугорбой» формы спектрального портрета

1. Определяются участки, на которых спектральный портрет основного типа сигналов, возникающих при индентировании, имеет характерную «двугорбую» (с двумя явными максимумами) форму: $\frac{\Delta_2}{\Delta_1} \geq 0,1$ (рис. 9).

Отношение $\frac{\Delta_2}{\Delta_1} \geq 0,1$ соответствует 60...70% степени поврежденности металла МН.

2. При $\frac{\Delta_2}{\Delta_1} \geq 0,3$ эксплуатация МН должна быть приостановлена, т.к. дальнейшее нагружение может привести к лавинообразному разрушению.

Основные выводы и результаты:

1. Объединение традиционного метода кинетического индентирования с методом АЭ позволяет дополнительно проводить оценку поврежденности металла длительно эксплуатируемого МН. Использование информативного параметра - отношение максимумов спектральной плотности в основном типе сигналов АЭ, возникающих при индентировании - позволяет обоснованно выбирать периоды между очередным освидетельствованием МН.
2. Количество сигналов АЭ уменьшается в несколько раз по мере приближения к месту разрушения, что подтверждает предположение о том, что причиной появления сигналов АЭ при индентировании является срабатывание источников дислокационной природы.
3. Спектральный образ сигналов АЭ при индентировании статически разрушенных образцов одинаков для всех исследуемых зон, что свидетельствует об одном типе источников.
4. Появление второго пика в спектральном образе сигнала АЭ при индентировании циклически нагруженных образцов свидетельствует о том, что происхождение данного сигнала связано со срабатыванием источников, появившихся в результате циклического нагружения.
5. Степень охрупченности поверхности тем выше, чем более выражен высокочастотный пик в спектре и чем дольше после начала индентирования срабатывают высокочастотные источники, формирующие второй пик спектрального образа сигнала.
6. Несмотря на различие исходной структуры и механических свойств сварного соединения и основного металла спектральные образы сигналов АЭ при индентировании на схожих стадиях развития поврежденности одинаковы. Та-

ким образом, можно говорить об одинаковых закономерностях развития процесса поврежденности.

Публикации по теме диссертации:

1. Бигус Г.А., Галкин Д.И. Методы неразрушающего контроля при проведении периодического контроля и мониторинга опасных производственных объектов // Сварка и диагностика. – 2007. – №1. – С. 13-16.
2. Бигус Г.А., Галкин Д.И., Харебов В.Г. Перспективы применения метода акустической эмиссии при диагностировании опасных производственных объектов // Современные методы и средства неразрушающего контроля и технической диагностики: Материалы XVI Международной конференции; г. Ялта – Киев, 2008. – С. 206-209.
3. Современные методы и средства неразрушающего контроля и технической диагностики / Г.А. Бигус [и др.] // Современные методы и средства неразрушающего контроля и технической диагностики: Материалы XVI Международной конференции; г. Ялта – Киев, 2008. – С. 154-155.
4. Перспективы использования метода акустико-эмиссионного контроля при проведении технического диагностирования сварных конструкций // Диагностика оборудования и трубопроводов компрессорных станций: Материалы XXVII тематического семинара; п. Небург, 8-13 сентября 2008 г. – Москва, 2009. – Т. 2. – С. 77-87.
5. Бигус Г.А., Галкин Д.И. Методы оценки поврежденности металла трубопроводов // Сварка и диагностика. – 2010. – №1. – С. 34-37.
6. Применение метода акустической эмиссии для неразрушающего контроля состояния основного металла и сварных соединений трубопроводов, работающих в условиях малоциклового усталости / Е.В. Черняева [и др.] // Сварка и диагностика. – 2010. – №2. – С. 50-57.
7. Галкин Д.И. Исследование поврежденности металла в процессе малоциклового нагружения // Диагностика оборудования и трубопроводов компрессорных станций: Материалы XIX тематического семинара, в 2 т.; п. Небург, 6-11 сентября 2010 г. – Москва, 2011. – Т. 2. – С. 77-87.
8. Влияние циклических испытаний на акустическую эмиссию при индентировании образцов из стали 20 / Е.В. Черняева [и др.] // Прочность неоднородных структур: Тезисы докладов V Евразийской научно-практической конференции. – Москва, 2010. – С. 199.
9. Галкин Д.И. Исследование параметров акустической эмиссии в процессе кинетического индентирования // Диагностика технического состояния оборудования и сооружений в технологических системах добычи, подготовки и трубопроводного транспорта нефти и газа: Материалы II научно-технической конференции (с участием стран СНГ) – Москва, 2010. – С. 52.