



ИССЛЕДОВАНИЕ АКУСТИКО-ЭМИССИОННЫХ СИГНАЛОВ ПРИ ДЕФОРМИРОВАНИИ И РАЗРУШЕНИИ ОБРАЗЦОВ ИЗ СТАЛИ 22К

Г. А. БИГУС, П. Б. СТРЕЛКОВ

Длительная эксплуатация оборудования и трубопроводов атомных энергетических станций приводит к увеличению радиационной загрязненности оборудования и соответственно увеличению доз, получаемых персоналом при проведении регламентных работ по контролю состояния металла и сварных соединений. Одним из способов, позволяющим уменьшить время на проведение контроля при высокой достоверности, может служить комбинированное использование метода акустической эмиссии (АЭ) с последующим контролем выявленных зон традиционными методами неразрушающего контроля. Однако для разработки методики контроля дефектности сварных соединений методом акустической эмиссии необходимо провести ряд исследований: определение АЭ свойств материалов элементов оборудования контура многократной принудительной циркуляции, особенностей АЭ свойств сварных швов, конструкций и т. п.

Long-term operation of equipment and piping of nuclear power stations leads to a higher level of contamination of the equipment and accordingly, greater exposure of the personnel during performance of scheduled control of the condition of metal and welded joints. One of the processes allowing reduction of the control time at a high validity, can be a combined application of the acoustic emission method (AE) with subsequent control of the detected zones by traditional NDT methods. However, development of a procedure to control the defect level in welded joints by acoustic emission method requires conducting several studies, namely determination of AE properties of materials of equipment components in the multiple forced circulation circuit, Features of ARE of welds, structure, etc.

Основная задача работы — установление связи между размерами развивающегося дефекта и параметрами сигналов АЭ.

Исследования проводили на образцах, изготовленных из стали 22К с плакировкой из стали 08Х18Н10Т. Образцы деформировали одноосным статическим растяжением на испытательной машине ивановского завода ОАО «Точприбор» ИР5143-200 (рис. 1). Для исключения перекосов образца при нагружении верхний захват был установлен в корпусе нагружающего устройства на сферический самоустанавливающийся подшипник. Отсутствие трения в шарнирах и проскальзывания образца в захватах проверялось экспериментально.

Сигналы акустической эмиссии одновременно с растяжением регистрировались акустико-эмиссионной системой A-Line 32D фирмы ООО «Интерюнис» (рис.2) [1]. В качестве датчиков были

использованы полосовые датчики GT-200. Для исключения сигналов АЭ от участков захватов их предварительно опрессовывали. Во время эксперимента осуществлялась запись всех параметров АЭ.

В процессе эксперимента использовались два канала АЭ системы A-Line 32D. Уровень дискриминации по каналам составлял 40 дБ. Для видео наблюдения за процессом деформирования образца использовалась цифровая видеокамера SONY. Для эксперимента были изготовлены образцы из стали 22К. При проведении экспериментов использовались образцы с различными сечениями (рис. 3).

Для наблюдения за развитием повреждения в образце выполнялся надрез при помощи электроэрозионного станка. Ширина надреза 0,14 мм, глубина — на 1 мм больше толщины плакированного слоя.



Рис. 1. Испытательная машина ИР5143-200

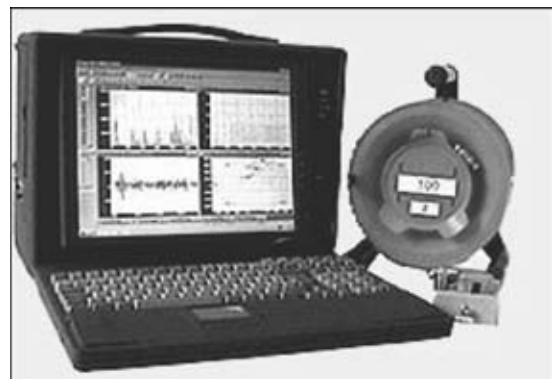


Рис. 2. Акустико-эмиссионная система A-Line 32D



Рис. 3. Образец из стали 22К с надрезом: 1, 2 — места установки датчиков

После установки образцов в захваты разрывной машины и их предварительной опрессовки проводилась съемка участка надреза цифровой камерой SONY. При этом синхронизировались времена АЭ измерений и получения телеизображения деформируемого участка в районе окончания надреза. Датчики АЭ устанавливались на расстоянии 55 мм от надреза. Рабочая часть образца составляла 110 мм.

Образец под действием квазистатической нагрузки нагружался до уровня напряжений σ , равных пределу упругости. Скорость деформации $\dot{\epsilon} \sim 10^{-4} \text{ см}^{-1}$. В зоне упрочнения скорость деформации определялась свойствами материала.

Предварительно проведены серии акустико-эмиссионных тестов с целью определения параметров акустических шумов, работающей и неработающей разрывной машиной. Было установлено, что акустические шумы разрывной машины не превышают 28 дБ. Затем проводилась калибровка датчиков и настройка АЭ системы с помощью имитатора АЭ трещины путем слома грифеля карандаша [2].

На рис. 4 приведен результат теста от слома грифеля в районе надреза, зарегистрированный датчиками 1 и 2 канала.

В данном случае к сигналам от имитаторов относятся два события с амплитудами 70 и 71 дБ (рис. 4). Оба эти события были зарегистрированы двумя каналами одновременно.

Различия по амплитуде ± 1 дБ вызваны разной чувствительностью по каналам. Калибровка прибора позволяла подобрать датчики АЭ с близкими АЧХ и абсолютной чувствительностью. Таким образом были подобраны идентичные по чувствительности 2 канала АЭ системы.

В процессе нагружения образца шла запись всех параметров АЭ сигналов, регистрируемых системой A-Line 32D. Запись проводилась без каких-либо фильтров и изменений в процессе нагружения образца (т. е. все значения порогов, усиления и т. д. оставались на одном и том же уровне

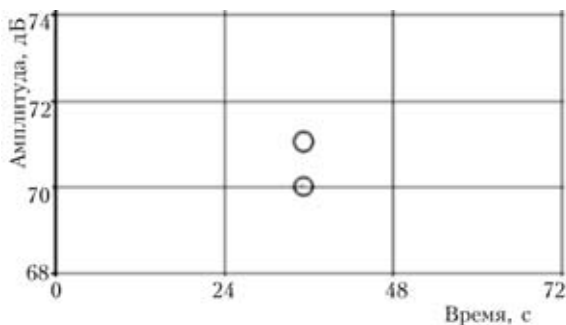


Рис. 4. Сигналы от имитатора АЭ сигналов

в течение всего эксперимента) с одновременной видеозаписью растяжения образца с помощью цифровой видеокамеры SONY.

Полученные АЭ данные не позволяли оценить взаимосвязь между сигналом АЭ и подрастанием (развитием) дефекта (трещины) (рис. 5).

Количество событий, зарегистрированных АЭ системой, как правило, превышало 200 тысяч. Обработка такого массива без фильтров требует значительных объемов расчетов, поэтому по окончании эксперимента (сбора данных) проводили необходимую фильтрацию.

Фильтрация данных АЭ проводилась по следующим параметрам:

энергия сигналов АЭ $\geq 10^{-15}$ Дж (здесь и далее под значением энергии понимается значение, определенное АЭ системой, т. е. оно может отличаться от реального);

амплитуда сигнала АЭ ≥ 55 дБ;

синхронизация по времени сигнала, полученного двумя различными каналами.

Принималось, что сигналы, пришедшие на два разных канала, должны отличаться не более, чем на 8 мкс.

Данные, обработанные с помощью такой фильтрации, приведены на рис. 6. Показана диаграмма энергии сигналов АЭ, наложенная на график нагружения. Выделенные области А и В характерны для больших энергий. Для этих областей показаны стоп-кадры, вырезанные из видеоряда.

Излучение и регистрация сигналов АЭ происходила в результате образования и развития локальных зон пластической деформации образца (рис. 7). Этот процесс сопровождался регистрацией сигналов АЭ большой длительности ($\tau > 1000$ мкс).

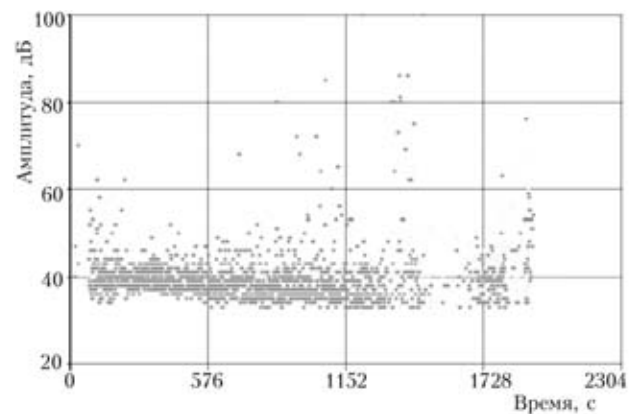


Рис. 5. Амплитуды сигналов АЭ, зафиксированные в процессе эксперимента

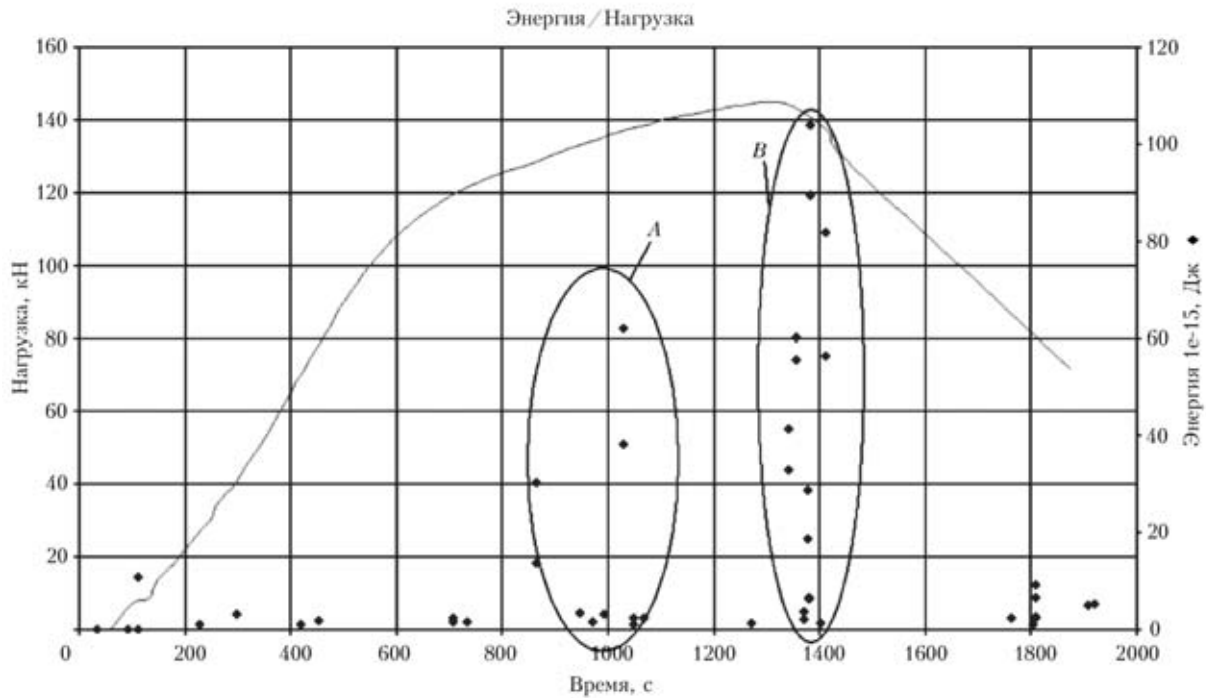


Рис. 6. Диаграмма энергии и нагрузки образца

Процесс образования локальных зон пластической деформации образца происходил в течение 3...4 мин.

На рис. 8, 9 показаны форма и спектр типичных сигналов, которые были зарегистрированы во время развития зоны пластической деформации, выделенной на рис. 7 области образца.

Сигнал, представленный на рис. 8, является реакцией пьезодатчика на воздействия нескольких механических импульсов, пришедших к датчику из различных точек локальных зон пластически деформированного объема образца. При достижении растягивающих напряжений σ в образце величины $\sigma_{0,2}$ и более наблюдается максимум скорости счета N (1000 и более импульсов в секунду); до окончания действия первого импульса на вход пьезодатчика поступает новый, который накладывается на радиоимпульс первого. Образуется радиосигнал, напоминающий «биения» большой длительности (см. рис. 8). Проанализируем форму сигналов АЭ, принимаемых датчиком на этапе пластической деформации локальных участков. Связь между входным импульсом (как правило однополярным [2]), действующем на входе датчика $y(t)$, и выходным сигналом пьезопреобразователя $x(t)$ определяется операцией свертки [3]:

$$x(t) = \int_0^{\tau_v} y(t)g(t - \tau)d\tau, \quad (1)$$

где $g(t - \tau)$ — импульсная характеристика пьезопреобразователя; τ — текущее время; $(t - \tau)$ — сдвиг во времени.

Если длительность входного импульса мала $\tau_{и}$ (порядка 1 мкс), а импульсная переходная функция $g(t - \tau)$ не зависит от момента прихода к пьезо-

датчику механического импульса, т. е. $g(t - \tau) = g(\tau)$, то (1) примет вид:

$$x(t) = g(t) \int_0^{\tau_v} y(t)d\tau = g(t)S(u),$$

где $S(u) = \int_0^{\tau_v} y(t)d\tau$ — площадь импульса $y(t)$.

Следовательно, возникший электрический сигнал пьезодатчика после воздействия на него механического однополярного импульса, будет близок к импульсной функции $g(\tau)$, а его амплитуда определяется площадью входного импульса $S(u)$. Воздействие на датчик тысяч импульсов в секунду приводят к возникновению многократных изменений фазы выходного сигнала и к соответствующему широкому ниспадающему частотному спектру электрического сигнала, регистрируемого АЭ системой, который, перемножаясь с АЧХ датчика (см. рис. 9) приводит к виду частотного спектра на рис. 8. Следовательно, на стадии пластических деформаций АЭ процесс в частотной области повторяет АЧХ датчика.

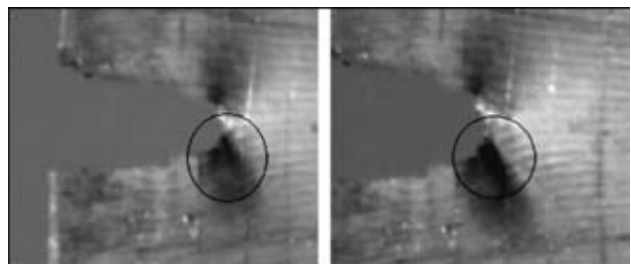


Рис. 7. Развитие пластической деформации

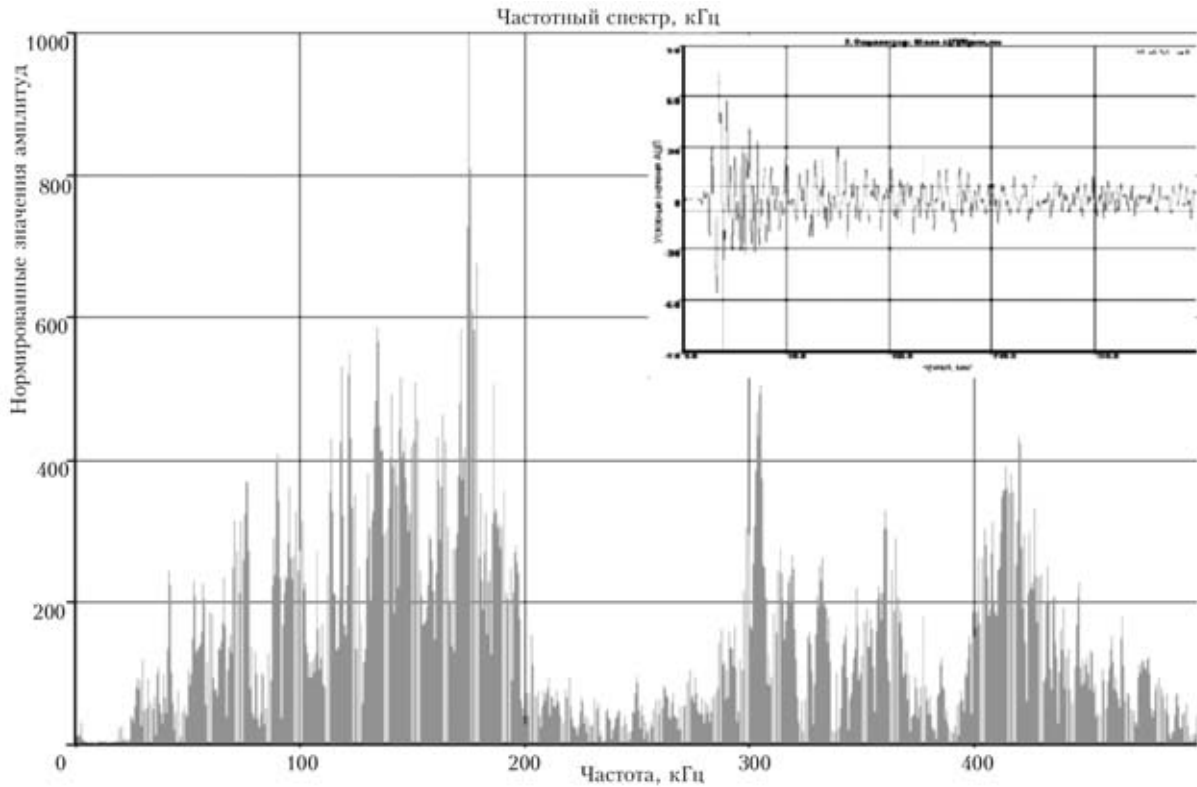


Рис. 8. Частотный спектр и форма АЭ сигнала

Максимум частотного распределения приходится на частоту 185 кГц. Такая форма АЭ сигналов и спектры (см. рис. 8) характерны для участка А.

Для определения принадлежности двух зарегистрированных сигналов разными каналами АЭ системы одному и тому же источнику излучения из зоны локальной пластической деформации вычислялась нормированная корреляционная функция двух сигналов АЭ $x(t)$ – 1-го датчика, $y(t)$ – 2-го датчика, прошедших фильтрации в соответствии с алгоритмом, описанным выше:

$$\rho_{xy}(\tau) = \frac{R_{xy}(\tau) - \mu_x \mu_y}{\sqrt{[R_{xy}(0) - \mu_x^2][R_{yy}(0) - \mu_y^2]}}$$

где $R_{xy}(\tau)$ – взаимная ковариационная функция $x(t)$ и $y(t)$; μ_x, μ_y – среднее значения $x(t)$ и $y(t)$ за время регистрации сигналов АЭ T ;

$$R_{xy}(\tau) = \frac{1}{T} \int_0^T x(t)y(t + \tau)dt.$$

Принадлежность двух зарегистрированных АЭ сигналов $x(t)$ и $y(t)$ к одному событию характеризуется средним значением $\rho_{xy}(\tau)$ при $\tau = 0$ (см. рис. 10). Для сигналов, отмеченных на рис. 6 зоной А, эти величины лежат в диапазоне 0,32... 0,62. При проведении реального контроля объекта АЭ методом зоны пластической деформации также будут характеризоваться либо низким, либо средним (менее 0,65) коэффициентом корреляции $\rho_{xy}(\tau)$.

Появление трещины и ее подрастание (рис. 11) проходило не в месте образования локальных зон пластической деформации, а в центре надреза (хотя

на части разрушенных аналогичных образцов образование трещины происходило в зоне пластической деформации). Момент образования трещины и ее первого подрастания сопровождался интенсивной АЭ, которая прекращалась после остановки трещины. Для ее последующего страгивания необходимо было увеличивать нагрузку (кривая нагружения за счет уменьшения сечения образца имела ниспадающий характер).

Разрушение образца происходило за 3-4 подрастания трещины на увеличивающиеся интервалы Δl , равные нескольким миллиметрам. Подрастание трещины, показанной на рис. 11, происходило в течение нескольких секунд.

При образовании и первичном подрастании трещины (рис. 6, область В) регистрировались сигналы (рис. 12) меньшей длительности ($\tau \approx 100... 300$ мкс), чем при пластической деформации в локальной зоне, но с большей амплитудой и энергией сигналов.

На рис. 12 показан типичный сигнал большой амплитуды в момент времени, отмеченной на рис. 6

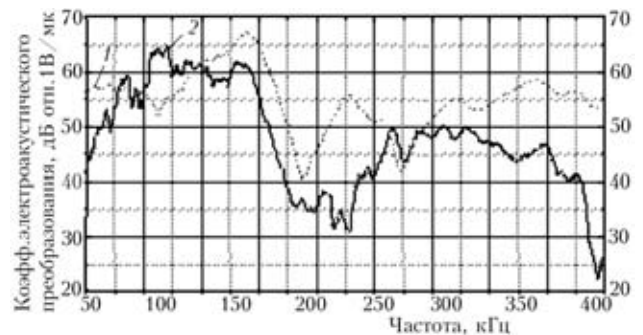


Рис. 9. Амплитудно-частотная характеристика ПАЭ GT-200: 1 – продольные волны; 2 – волны Рэлея

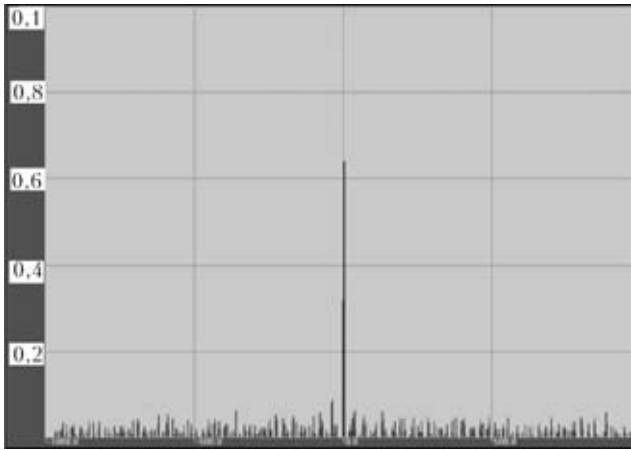


Рис. 10. Корреляция сигналов, зарегистрированных 1- и 2-м каналами одновременно

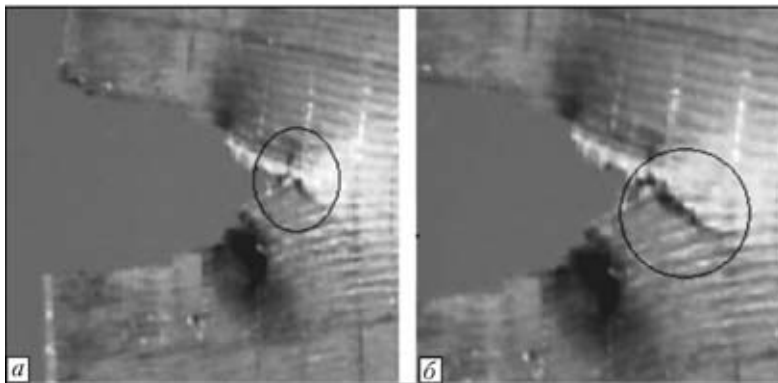


Рис. 11. Появление (а) и подрастание (б) трещины

зоной В. Из осциллограммы видно, что основная несущая частота f близка к $f = 185$ кГц, что соответствует частоте (см. рис. 9), на которой дос-

тигается максимальная абсолютная чувствительность датчика. Однако форма частотного спектра (рис. 12) отличается от формы частотного спектра основной массы сигналов, излучаемых источниками АЭ из зон пластической деформации (рис. 8). Весь спектр сосредоточен в районе резонансной частоты 185 кГц. Если ввести коэффициент Ω , равный отношению частоты, на которой наблюдается максимум в спектре (на рис. 8 и 12 он нормирован на 1), к ширине спектра, где отмечаются ослабления амплитуды до величины 0,4, то значение этого коэффициента будет существенно отличаться для случая, отмеченного на рис. 8 ($\Omega \approx 2$), и спектры АЭ сигнала, характерного для развития трещины — $\Omega \approx 8-10$. Этот коэффициент может служить отличительной особенностью развития трещины.

Второй особенностью, характерной для АЭ сигналов, вызванных развитием трещины, является значение взаимно корреляционной функции $x(t)$ и $y(t)$ двух АЭ сигналов, пришедших на два датчика. Величины $\rho_{xy}(\tau)$ лежат в интервале 0,44...0,82 (см. рис. 13) и в большинстве случаев эти значения выше 0,62 (максимального значения $\rho_{xy}(\tau)$, отмеченного до момента визуального обнаружения трещины).

Таким образом, появление сигналов АЭ высокой энергии ($80 \dots 105 \cdot 10^{-5}$ Дж, отмеченных двумя и более датчиками, удовлетворяющих заранее установленным задержкам времени, характерным для зоны контроля и фиксированных расстояний между датчиками, имеющих спектральные и кор-

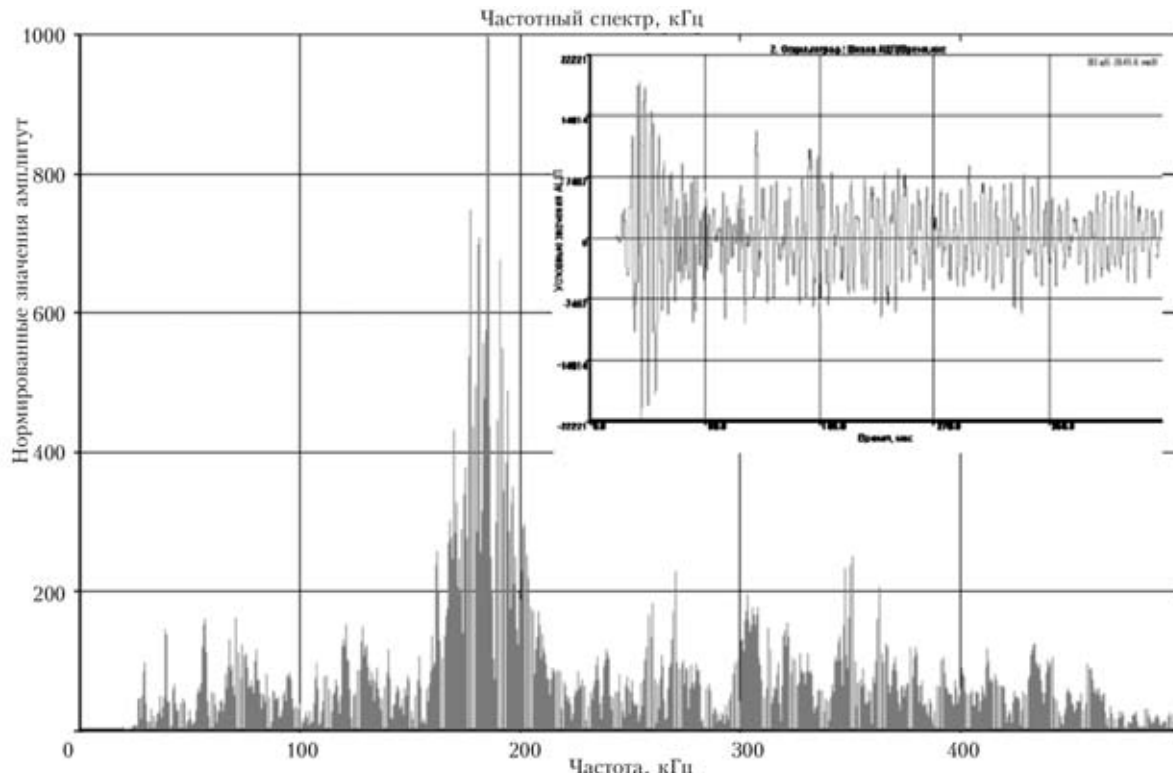


Рис. 12. Частотный спектр АЭ сигнала и форма АЭ сигнала

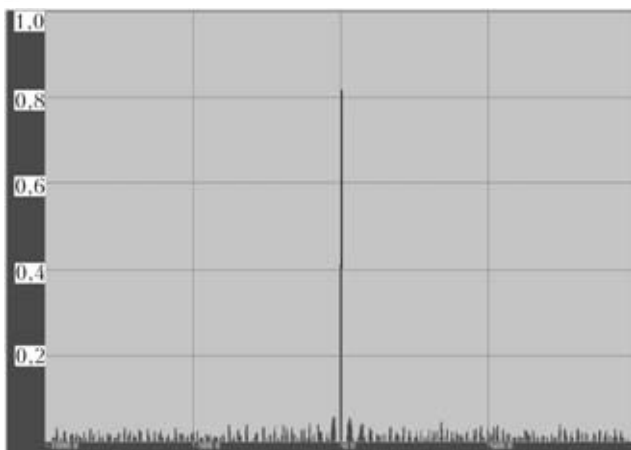


Рис. 13. Корреляция сигналов 1- и 2-го каналов

реляционные характеристики Ω и $\rho_{xy}(\tau)$, выше аналогичных характеристик АЭ источников, обусловлено локальными зонами пластической деформации и свидетельствует об образовании и развитии трещины в материале.

Выводы

Образование и подрастание трещины в диапазоне 2...4 мм сопровождается регистрацией АЭ сигналов с энергией (80...105·10⁻¹⁵) Дж.

Характеристикой, позволяющей отличить пластическую деформацию от подрастания трещины, может служить длительность АЭ сигнала. Так, для

пластической деформации будет характерна большая длительность АЭ сигнала ~1000...3000 мкс, а для подрастания трещины длительность АЭ сигнала будет ~300...500 мкс.

Коэффициент Ω , равный отношению частоты, на которой наблюдается максимум в спектре к ширине спектра, где отмечаются ослабления амплитуды до величины 0,4, будет существенно отличаться для сигналов АЭ, характерных для процесса образования зон локальной пластической деформации ($\Omega \approx 2$) и сигналов АЭ, характерных для развития трещины ($\Omega \approx 8...10$). Этот коэффициент может служить отличительной особенностью развития трещины.

Для процесса подрастания трещины характерным является средние и большие значения взаимно корреляционной функции $x(t)$ и $y(t)$ двух АЭ сигналов, пришедших на два датчика. Эти значения лежат в интервале 0,44...0,82 и в большинстве случаев эти значения выше 0,62 (максимального значения $\rho_{xy}(\tau)$, отмеченного до момента визуального обнаружения трещины).

1. Интернет ресурс. Сайт ООО «Интерюнис» www.interunis.ru.
2. Иванов В. И., Белов В. М. Акустико-эмиссионный контроль сварных соединений. — М.: Машиностроение, 1981. — 184 с.
3. Бендат Дж., Пирсол А. Применение корреляционного и спектрального анализа / Пер. с англ. — М.: Мир, 1983. — 312 с.

НУЦ «Сварка и контроль» при МГТУ им. Н. Э. Баумана, Москва

Поступила в редакцию
20.04.2004

«НЕРАЗРУШАЮЩИЙ КОНТРОЛЬ-2005»

Уважаемые коллеги!

8-я конференция-выставка «Неразрушающий контроль-2005» будет проходить с 19 по 22 апреля 2005 г. в Киеве, в Институте электросварки им. Е. О. Патона НАНУ. Конференция-выставка проводится при поддержке Украинского общества неразрушающего контроля и технической диагностики (УО НКТД), Государственного комитета по надзору за охраной труда (Госнадзорхрантруда Украины), Государственной администрации по железнодорожному транспорту (Укрзализныця), Государственного комитета по стандартизации, метрологии и сертификации (Госпотребстандарт Украины), Национальной акционерной компании «Нефтегаз Украины», НАЭК «Энергоатом», Национального авиационного университета.

В рамках конференции планируются заседания отраслевых секций:

- ✓ охрана труда
- ✓ железнодорожный транспорт
- ✓ метрология и сертификация НК
- ✓ нефтегаз
- ✓ атомная энергетика
- ✓ авиация

Участие в конференции-выставке фирм-экспонентов предполагает демонстрацию продукции, доклад на общем собрании конференции и доклады на заседаниях отраслевых секций.

По всем вопросам просим обращаться в оргкомитет конференции-выставки:
Ассоциация ОКО
тел./факс: (044) 531-37-26, 531-37-27
E-mail: ndt@carrier.kiev.ua; www.ndt.com.ua