



# ЛОКАЦИОННАЯ ФИЛЬТРАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ ПРИ ПРОВЕДЕНИИ ИСПЫТАНИЙ НА РАСТЯЖЕНИЕ

В. А. КОБЗЕВ, М. В. КРАВЕЦ, О. В. СУЩИЙ

*С использованием локационной фильтрации параметров акустической эмиссии (АЭ) при проведении испытаний на растяжение образцов из низколегированной низкоуглеродистой стали 09Г2С с различными концентраторами напряжений проанализированы закономерности деформирования и разрушения и связанная с ними динамика локализации локационных импульсов АЭ по отношению к положению концентратора напряжений, а величины деформации.*

*Location filtration of acoustic emission (AE) parameters during tensile test of low-alloy low-carbon steel samples 09G2S with various stress concentrators were used to analyze the regularities of deformation and fracture and the associated localization dynamic of AE location impulses relative to the stress concentrator position and deformation magnitude.*

Механические испытания на растяжение лабораторных образцов, изготовленных из материала объектов, подвергающихся диагностическому обследованию, позволяют получать характеристики, необходимые для расчетов и прогнозирования остаточной долговечности [1]. Дополнительную информацию при этом часто удается получать при использовании в ходе проведения испытаний метода акустической эмиссии (АЭ) [2–4]. Такие испытания предполагают осуществление ряда мероприятий по изъятию из рассмотрения акустической информации, источники которой находятся вне рабочей области испытываемого образца. Это достигается путем использования специальных акустических изоляторов, препятствующих проникновению акустических сигналов к образцу от привода разрывной машины через захваты [2], с помощью нанесения на поверхность образца материалов, поглощающих акустические колебания, возникающие в материале образца при испытании, и, таким образом, препятствующие многократным переотражениям акустических волн внутри образца [4, 5]. Однако, такие «механические» мероприятия не позволяют полностью разрешить проблему, так как оказывают влияние на параметры жесткости системы «разрывная машина–образец» и могут вносить определенную погрешность в получаемые при испытании механические характеристики исследуемого материала. Кроме того, нанесение на поверхность изолирующих материалов приводит к изменениям в условиях работы материала в конструкции и может стать само по себе источником акустических сигналов, возникающих на поверхности раздела «изолирующий материал–материал образца», а также привести к изменению акустических параметров испытываемого материала, таких, как затухание и групповая скорость. Проконтролировать, что это не так, крайне сложно. Поэтому,

на наш взгляд, наиболее приемлемыми средствами исключения из рассмотрения не относящейся к процессам деформации и разрушения исследуемого образца акустической информации является локационная фильтрация параметров АЭ. Основным принцип такой фильтрации не является новым и заключается в следующем. Для испытания образца используется четыре преобразователя АЭ (ПАЭ), которые устанавливаются вне рабочей области образца в соответствии со схемой, представленной на рис. 1. Для систем АЭ, принципы проведения локации которых построены на проведении линейной локации на основе локационной антенны, состоящей из минимально возможного числа ПАЭ (в данном случае — два), расстояние между ПАЭ может быть произвольным. В случае, когда локационная антенна состоит из четырех ПАЭ, программное обеспечение таких систем накладывает определенные требования к расстоянию между преобразователями. Расстояния между ПАЭ 1–2 и 3–4 в этом случае устанавливаются равными, а сама система расстановки ПАЭ является сим-

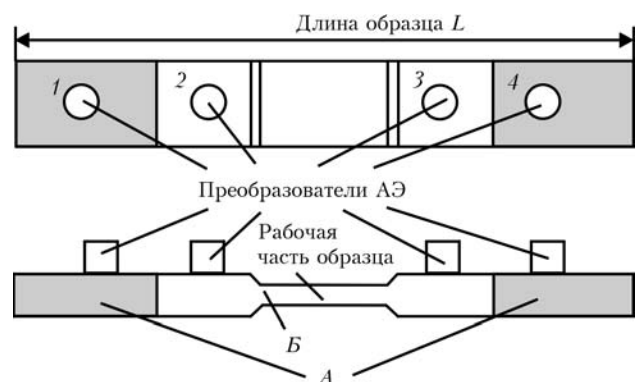


Рис. 1. Схематическое изображение образца и установленных на нем ПАЭ 1–4: А — зоны, генерация АЭ в которых не воспринимается ПАЭ 2 и 3; Б — зона локации ПАЭ 2 и 3



метричной [5]. В нашем случае система расстановки ПАЭ и, соответственно, система программного обеспечения допускает произвольное расположение ПАЭ.

При этом 1 и 4 ПАЭ выполняли функцию «сторожей», 2 и 3 — функцию локации импульсов АЭ. Известно, что для нормального функционирования любой системы АЭ необходимо предварительно определить и установить величины ряда параметров, на основании которых с помощью программного обеспечения будет проводиться расчет и измерение основных АЭ параметров и параметров локации источников АЭ в ходе проведения испытаний. Одним из таких параметров является «мертвое» время, в течение которого должно произойти затухание АЭ сигнала ниже уровня дискриминации. ПАЭ с функцией «сторожей» определяют момент начала отсчета «мертвого» времени, в течение которого вся система АЭ не работает в режиме приема. Таким образом, если ПАЭ 1 или 4 принимают АЭ сигнал первыми, то это являлся сигналом приведения системы АЭ в режим полного молчания, когда принимаемые всеми остальными преобразователями АЭ сигналы принимаются, но маркируются как принятые в период действия «мертвого» времени. Это позволяло при обработке АЭ информации проводить локационную фильтрацию сигналов АЭ, возникших в зоне А (затемненная область на рис. 1), т. е. в зоне наиболее близко расположенной к захватам образца. При проведении локации ПАЭ 2 и 3 включаются в работу только тогда, когда новый АЭ сигнал по истечении «мертвого» времени приходит к одному из них. Это может быть реализовано только в том случае, если источник АЭ находится в зоне Б (светлая область, в которую составляющей входит рабочая часть образца). Такой вид локационной фильтрации рекомендуется использовать при испытании образцов в соответствии со стандартом [5].

Обычно при испытании образцов на растяжение с использованием метода АЭ проводят синхронное построение диаграмм деформации и регистрируемых параметров АЭ. При этом одним из ПАЭ регистрируются все принимаемые сигналы АЭ не зависимо от того, являются ли они локационными или нет, т. е. без привязки к конкретным участкам зоны Б на образце, в которых эти сигналы АЭ возникли [2]. Иногда такая привязка делается (проводится в ходе растяжения образца АЭ локация), но из-за отсутствия временной развертки процесса локации возникают затруднения в интерпретации динамики процесса. В этой статье приведены результаты выделения локационных сигналов АЭ в ходе испытания стальных образцов на растяжение, и их локационное распределение по образцу во времени. Такой подход, как нам представляется, позволяет с помощью сиг-

налов АЭ характеризовать динамику процесса деформации и разрушения.

Для проведения испытаний на растяжение из стали 09Г2С были изготовлены образцы с тремя типами надрезов, характеризующихся различной степенью концентрации напряжений: образец с двухсторонним надрезом шириной 2 мм (рис. 2), образец с односторонним надрезом шириной 2 мм (рис. 3) и образец с плавным переходом от нерабочей части к минимальному сечению в рабочей части с радиусом кривизны, равным 75 мм (рис. 4). Основные характеристики прочности материала образцов составляли:  $R_T = 470$  МПа,  $R_e = 300$  МПа. Испытание образцов проводили на разрывной машине «Инстрон-1595» при скорости нагружения 2 мм/мин. Нагружение осуществляли ступенчато по 5...10 кН с остановками в течение 30 с. Образцы доводили до полного разрушения. Использована аппаратура акустической эмиссии «Кросс-16», разработанная НТП «Контроль и диагностика». ПАЭ устанавливали на образцы согласно рис. 1: 1 и 4 выполняли функцию «сторожей», 2 и 3 осуществляли локацию АЭ сигналов, генерируемых в ходе испытаний в зоне Б образца.

Регистрацию параметров сигналов АЭ и диаграммы нагружения проводили синхронно в процессе испытания, в ходе которого регистрировались координаты локационных сигналов  $d$  (мм) и их амплитуды  $A$  (мВ). Локационные координаты АЭ регистрировали с временной разверткой с тем, чтобы каждый зарегистрированный импульс при обработке результатов мог быть соотнесен к соответствующему уровню нагрузки и деформации на диаграмме нагружения.

Перед проведением испытаний после установки ПАЭ проведено измерение скорости УЗ волны в образце, генерирование которой проводили с помощью ПАЭ-имитатора, управляемого импульсным генератором.

Основные параметры при работе аппаратуры АЭ в ходе испытаний были следующими: частотный диапазон — 100...500 кГц; уровень амплитудной дискриминации (порог) — 20 дБ; мертвое время — 10000 мкс.

Результаты испытания трех образцов с различными концентраторами напряжения в области рабочей части представлены на рис. 2–4.

На рис. 2 представлен результат испытания образца с плавным утонением рабочей части. При испытании этого образца общая деформация до момента окончательного разрушения составляла около 11 мм. Образец разрушился в области с наименьшим сечением. По ходу испытания в зоне рабочей части формировались импульсы АЭ, начиная с величины деформации, равной 2 мм. Кроме этих сигналов, зарегистрированы сигналы АЭ из зон, прилежащих к рабочей части образца (зона 0...80 мм и зона 200...250 мм по длине образца).



Эти сигналы АЭ обусловлены процессами общей деформации образца на начальном этапе нагружения (до деформации, равной 2 мм) и процессами упруго-пластического деформирования под действием напряжений изгиба, возникающих вследствие одностороннего утонения рабочей части образца. Локализация источников АЭ в зоне будущего разрушения происходит при уровне деформации ~6 мм, что соответствует нагрузке 140 кН (максимальная нагрузка составляла 148 кН). Процесс локализации разрушения происходит при уровне напряжений, соответствующих участку между пределом текучести и пределом прочности. Этот процесс характеризуется началом пластического разрушения внутренних областей образца по механизму с образованием пор (ямочный механизм) [2]. Такая локализация пластического течения и разрушения при испытании образцов из низкоуглеродистой конструкционной стали подтверждает данные, полученные с помощью АЭ в работе [3]. Сигналы АЭ (являющиеся предвестниками окончательного разрушения) локализация которых соответствовала положению магистральной трещины при испытании образца, показанного на рис. 2, зарегистрированы при уровне деформации 10 мм.

При испытании образца с односторонним надрезом (рис. 3) первые сигналы АЭ из зоны будущего разрушения так же, как и в случае, представленном на рис. 2, локализованы при нагрузке, находящейся в интервале между пределом текучести и пределом прочности. В этом случае первые сигналы АЭ, соответствующие деформации 3,1 мм, локализованы из зоны максимальных локальных деформаций сдвига, располагающихся под углом 45° по отношению к оси нагружения образца вверх и вниз от острых углов надреза. В данном образце наиболее интенсивно деформации сдвига происходили в зоне, расположенной ниже надреза. Окончательная локализация разрушения наблюдалась при уровне абсолютной деформации 4,3 мм. Локализация магистральной трещины соответство-

вала верхнему углу надреза (140 мм по длине образца). На начальной стадии деформирования зарегистрировано несколько импульсов АЭ, характеризующих общую деформацию образца и процесс его взаимодействия с захватом разрывной машины.

Результат испытания образца с симметричными надрезами с двух сторон образца представлен на рис. 4. Здесь так же, как и на образцах с односторонними надрезами, на начальном этапе (до уровня деформации, равной 0,3 мм) появляются сигналы АЭ из областей, близких к ПАЭ. Это

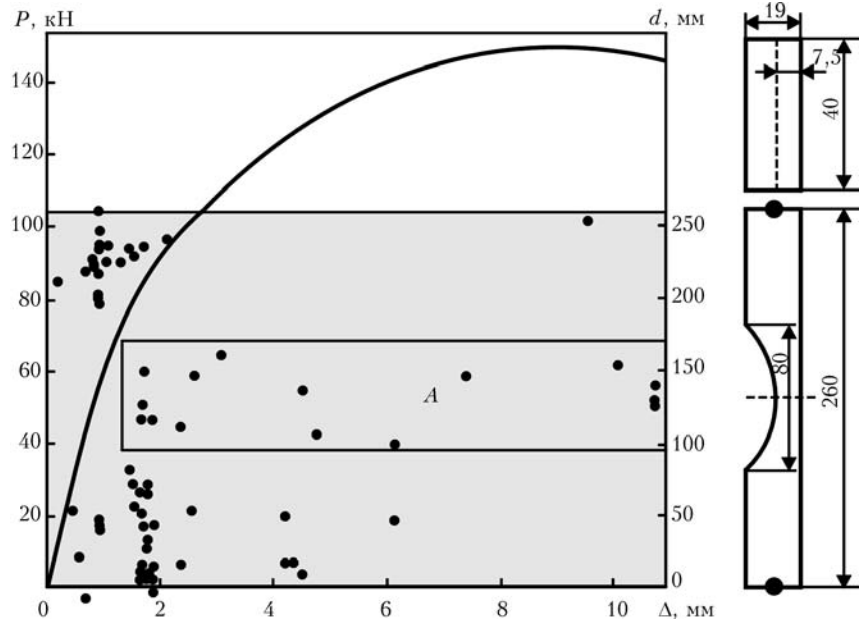


Рис. 2. Результат испытания образца с плавным утонением рабочей части ( $P$  — нагрузка испытания;  $\Delta$  — деформация образца;  $d$  — расстояние между ПАЭ 2 и 3; точками показаны местоположения локационных импульсов по отношению к расстоянию между ПАЭ 2 и 3, полученных в ходе испытания;  $A$  — зона деформации и разрушения рабочей части образца)

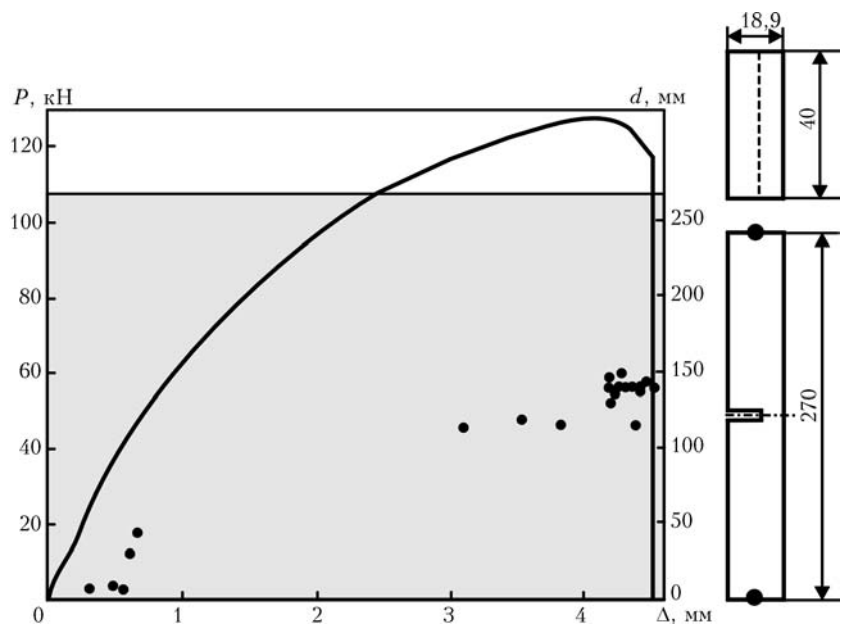


Рис. 3. Результаты испытания образца с односторонним надрезом (значения  $P$ ,  $d$ ,  $\Delta$  — см. на рис. 2)

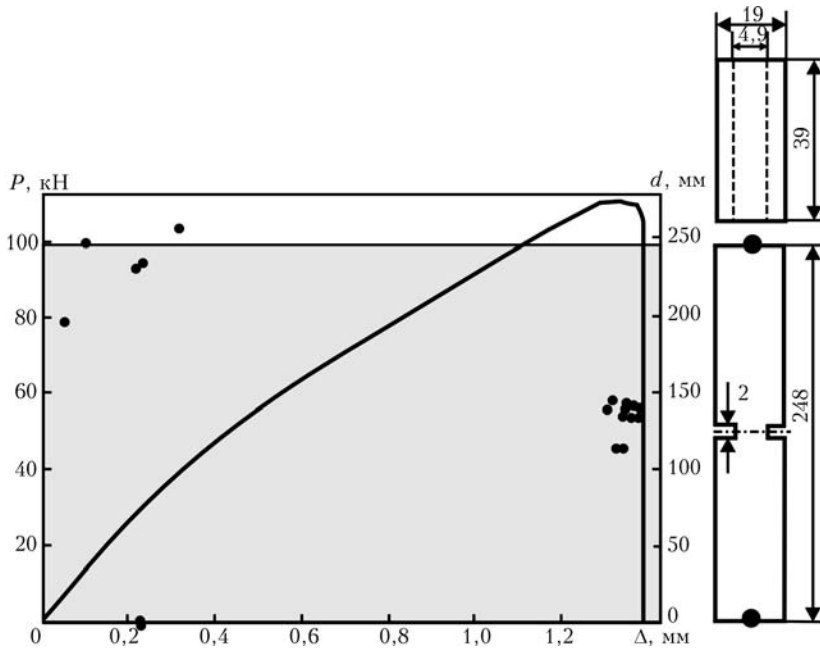


Рис. 4. Результаты испытания образца с симметричными надрезами с двух сторон образца (значения  $P$ ,  $d$ ,  $\Delta$  — см. на рис. 2)

обусловлено процессом взаимодействия образца и клинового захвата разрывной машины. Первый предупредительный сигнал АЭ из зоны будущего разрушения получен при деформации  $D = 1,24$  мм при нагрузке, равной 108 кН, что на 4 кН ниже максимальной нагрузки, равной 112 кН.

В ходе испытания образцов источником АЭ из зоны будущего повреждения могут быть процессы деформации или разрушения материала образца. Так как эти два процесса тесно связаны и обусловлены для относительно пластичных низкоуглеродистых низколегированных сталей дислокационными процессами, то с точки зрения анализа параметров АЭ эти процессы также неразделимы. В данном случае следует говорить лишь об интенсивности дислокационных процессов, которые, как известно, начинаются с движения отдельных дислокаций и завершаются последовательным образованием дислокационных скоплений, пор, разрушением перегородок между порами также по

дислокационному механизму, приводящему к окончательному разрушению образца. Такой механизм разрушения известен как «ямочный механизм разрушения» [6], поэтому АЭ из зоны будущего разрушения образца соответствует интенсивности дислокационных процессов в материале, которая пропорциональна объему материала, вовлеченного в деформационный процесс и, соответственно, обратно пропорциональна степени стесненности пластической деформации, обусловленной воздействием концентраторов напряжений. Это подтверждают результаты проведенных испытаний. Чем большее влияние на степень активности дислокационного процесса оказывают концентраторы напряжений, тем требуется большее номинальное напряжение для обеспечения необходимой акустической активности, сигнализирующей об интенсивности дислокационного процесса, предупреждающего окончательное разрушение образца (см. таблицу).

Основной целью применения метода АЭ при проведении испытания технологического оборудования является обнаружение трещиноподобных дефектов, возникших и развивающихся в условиях действия рабочих нагрузок. В зависимости от типа оборудования, условий его работы происхождение таких дефектов может быть связано с процессами коррозии, коррозии под напряжением, усталости, водородного и сероводородного воздействия, а также совместным воздействием нескольких из этих процессов. При проведении регламентных статических испытаний пробной нагрузкой, величина которой в зависимости от вида оборудования превышает рабочую нагрузку, в вершинах, образовавшихся к моменту испытаний

**Основные параметры прочности и АЭ при испытании образцов № 1–3**

Основные параметры	№ 1	№ 2	№ 3
Площадь сечения $S$ в рабочей части, мм <sup>2</sup>	300	300	191,1
Нагрузка $P$ , соответствующая началу АЭ из зоны будущего разрушения, кН	64	116	108
Деформация $\Delta$ , соответствующая началу АЭ из зоны будущего разрушения, мм	2,00	3,10	1,24
Относительное удлинение рабочей части образца к моменту начала АЭ из зоны разрушения $\delta_{АЭ}$ , %	0,77	1,14	0,51
Номинальное напряжение $\sigma$ , соответствующее началу АЭ из зоны будущего разрушения, кГ/мм <sup>2</sup>	21,7	39,4	57,6

Примечание. Образцы № 1 — с плавным утонением рабочей части (рис. 2); № 2 — с односторонним надрезом (рис. 3); № 3 — с двусторонним надрезом (рис. 4).



дефектов, возникают высокие напряжения, превышающие предел текучести. Такие напряжения активизируют дислокационный процесс, который, в свою очередь, станет источником АЭ. Наиболее адекватной моделью, характеризующей динамику дислокационного процесса при испытании оборудования с односторонним приложением нагрузки (сосуды давления, трубопроводы, элементы балочных конструкций и др.), в нашем случае является образец с односторонним надрезом, в котором, в зависимости от соотношения действующей нагрузки и площади «живого» сечения АЭ будет сигнализировать о возможном разрушении. Причем, это может происходить задолго до окончательного разрушения как в случае образца с плавным утонением рабочей части (рис. 2) или непосредственно перед окончательным разрушением, когда модельный дефект значителен (рис. 3). При этом времени для принятия решения в условиях эксплуатации или испытания объекта становится значительно меньше. Следует иметь в виду, что в обоих случаях источником АЭ являются дислокационные процессы, поэтому реальные дефекты в виде трещин после получения и обработки АЭ информации испытания реальных объектов не всегда могут быть обнаружены методами НК, так как АЭ может быть следствием начала дислокационного процесса, когда трещиноподобные дефекты еще не образовались.

## Выводы

Предложенная методика изучения закономерностей разрушения образцов конструкционных сталей с использованием локационной фильтрации позволяет выделить из общего потока АЭ ту ее часть, которая генерирована в области разрушения образца. При этом представляется возможным проведение оценки степени чувствительности АЭ метода к определенному виду концентратора напряжений. Путем регулирования чувствительности аппаратуры представляется возможным оптимальный выбор режима испытаний, когда первые импульсы АЭ из зоны будущего разрушения будут получены на той или иной стадии процесса испытания. Кроме того, с помощью предложенной методики может быть получено наглядное соотношение локализованных импульсов АЭ и силовых параметров испытания в динамике.

1. *ДСТУ 4046-2001*. Обладнання технологічне нафтопереробних, нафтохімічних та хімічних виробництв. Технічне діагностування. Загальні технічні вимоги. — 25 с.
2. *Грешиников В. А., Дробот Ю. В.* Акустическая эмиссия. Применение для испытания материалов и изделий. — М.: Изд-во стандартов, 1976. — 272 с.
3. *Акустическая диагностика разрушения стали / Л. Р. Ботвина, И. С. Гузь, В. С. Иванова и др. // Матер. IX Всесоюзной акустической конференции. Секция В.* — М., 1977. — С. 183–186.
4. *Недосека А. Я.* Основы расчета и диагностики сварных конструкций. — Киев: ИНДПРОМ, 2001. — 815 с.
5. *ДСТУ 4227-2003*. Настанови щодо проведення акустико-емісійного діагностування об'єктів підвищеної небезпеки. — 25 с.
6. *Броек Д.* Основы механики разрушения. — М.: Высш. школа, 1980. — 368 с.

ОАО «УкрНИИХиммаш»,  
Харьков

Поступила в редакцию  
17.05.06

## НОВОСТИ ИЗ ИНТЕРНЕТА

### Выпущены обновленные пьезоэлектрические преобразователи для ручного и автоматизированного ультразвукового контроля сварных соединений

МФ НИКИМТ «Эксперт-Центр» предлагает пьезоэлектрические преобразователи для ручного и автоматизированного ультразвукового контроля сварных соединений и основного металла, разработанные совместно с компанией «Эхо-импульс».

Данные изделия сочетают стабильность параметров, высокое качество, надежность, высокую чувствительность и малую стоимость при умеренных ценах.

По желанию заказчика разрабатываются и изготавливаются стандартные или специализированные ПЭП в следующих исполнениях:

- ❖ повышенной чувствительности; заданного габарита; ❖ с укороченной стрелой;
- ❖ для сканирования по криволинейной поверхности; ❖ с износостойким протектором;
- ❖ с химически стойким протектором; ❖ помехозащищенное исполнение;
- ❖ термостойкое исполнение; фокусированные; ❖ согласованные с конкретным дефектоскопом.

<http://www.ndtexpert.ru>