

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ АМПЛИТУДНОГО АНАЛИЗА СИГНАЛОВ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ ПРИ ЦИКЛИЧЕСКОМ И СТАТИЧЕСКОМ НАГРУЖЕНИИ СТАЛЬНЫХ ОБРАЗЦОВ

© 2021 г. Л.Н. Степанова<sup>1,\*</sup>, М.М. Кутень<sup>1,\*\*</sup>, А.Л. Бобров<sup>1,\*\*\*</sup>

<sup>1</sup>Сибирский государственный университет путей сообщения  
Россия 630049 Новосибирск, ул. Д. Ковальчук, 191  
E-mail: \*stepanova@stu.ru; \*\*mariabychkova94@mail.ru; \*\*\*beaver@stu.ru

Поступила в редакцию 17.03.2021; после доработки 07.07.2021;  
Принято к публикации 13.07.2021

Приведены результаты амплитудного анализа сигналов дискретной акустической эмиссии от развивающихся источников типа усталостных трещин. Исследования проводили на трех группах образцов с концентраторами напряжений. Образцы были изготовлены из конструкционных низкоуглеродистых сталей обыкновенного качества, качественной стали и низколегированной литой стали и нагружались растягивающей статической и комбинированной нагрузкой, включающей статическую и циклическую нагрузки. Установлена степенная зависимость плотности распределения амплитуды сигналов с высоким коэффициентом корреляции для источников акустической эмиссии, которая слабо изменяется на разных этапах роста трещины, за исключением стадии, предшествующей разрушению. Исследования позволили использовать амплитудное распределение сигналов для определения числа сигналов акустической эмиссии от источников типа трещин, находящихся на разном расстоянии от приемников и с учетом ослабления энергии волн.

*Ключевые слова:* акустическая эмиссия, амплитудный анализ, усталостная трещина, плотность вероятности появления сигналов, суммарный счет, коэффициент интенсивности напряжений.

DOI: 10.31857/S0130308221090025

### ВВЕДЕНИЕ

Обеспечение непрерывной и безопасной работы технологического оборудования (трубопроводов, сосудов, работающих под давлением, резервуаров и т.д.) является одной из приоритетных практических задач при контроле различных промышленных объектов. К числу перспективных методов мониторинга таких объектов относится акустическая эмиссия (АЭ) [1, 2]. Благодаря генерации и распространению упругих колебаний, полученных в результате деформации материала, находящегося в нагруженном состоянии, метод АЭ позволяет выявлять наиболее опасные дефекты на стадии их зарождения и развития, такие как усталостные трещины [3], коррозионные поражения [4] и повышенные напряжения около несплошностей [5]. Наряду с существующими методами неразрушающего контроля (НК) метод АЭ обладает высокой чувствительностью к процессам разрушения, происходящим в различных материалах, в том числе в низколегированных и низкоуглеродистых сталях [6, 7].

К недостаткам метода АЭ контроля можно отнести не только потребность в нагружении контролируемой конструкции, но и высокий уровень помех, которые составляют значительную долю информации и требуют применения способов их идентификации и исключения их рассмотрения при оценке состояния объекта.

Информация, полученная от развивающегося дефекта через параметры АЭ сигналов, является основной для определения типа источника, что важно для осуществления операции браковки. Повышение надежности оценки состояния опасных развивающихся дефектов в металлических конструкциях при АЭ-контроле является актуальной задачей.

Критерии оценки технического состояния объекта в нормативных источниках всегда основываются на анализе параметров сигналов АЭ, таких как амплитуда, суммарный счет, активность, суммарная энергия и т.д. При регистрации АЭ сигналов часть из них, которая имеет относительно малые амплитуды и большое расстояние между ПАЭ и источником, теряется в шумах, так как выровнять чувствительность каналов аппаратными средствами к сигналам, находящимся на разном расстоянии от источника, в этом случае можно только для зарегистрированных сигналов. При этом исследователями предполагается, что активность источника излучения [5] и величина амплитуды [3, 10], выделяемая при формировании сигналов АЭ, с развитием дефекта возрастает. Таким образом, например, идентичные источники, находящиеся на разных расстояниях от приемников, будут иметь не только разный набор амплитуд, но и разное число зарегистрированных сигналов. Известны физико-механические модели эволюции материалов под нагрузкой, например, такие как

мезомеханическая модель [8, 9], которые показывают более неоднозначную связь параметров сигналов АЭ с параметрами, характеризующими общее состояние объекта контроля.

Поскольку анализу подвергается неполное количество сигналов АЭ в силу естественного ограничения порога чувствительности каналов и различного расстояния от источников до ПАЭ, то искажается результат технической диагностики даже при оценке состояния объекта по числу сигналов и активности источника. Это может привести к необратимым последствиям, таким как внезапное разрушение конструкций или, напротив, к их преждевременной утилизации или дополнительному ремонту. Между тем ГОСТ Р ИСО 12716—2009 для анализа предполагает использовать статистические распределения параметров АЭ, которые успешно применил С. И. Буйло для анализа потоков сигналов АЭ при исследовании поведения материала в упругой и пластической области деформирования (см. работы С.И. Буйло [10] и в этом журнале за 2018 г.). Однако данных по исследованию амплитудного распределения для сигналов от развивающейся трещины и использования этих данных для практических целей в исследовательской литературе нет. Между тем распределения параметров АЭ, например, во времени [11, 12] успешно используется для получения дополнительной информации о состоянии источников.

Цель работы — разработка методики амплитудного анализа сигналов АЭ от реальных источников для повышения достоверности оценки степени опасности дефектов.

### МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ

Испытывались образцы с концентраторами напряжений, изготовленные из низколегированных и низкоуглеродистых сталей (20ГФЛ, СтЗпс, сталь 20). Образцы сначала нагружались циклической нагрузкой с частотой 5 Гц до начала образования усталостных трещин, после чего к ним прикладывалась статическая нагрузка и выполнялся контроль АЭ за развитием усталостной трещины. При этом образцы из низкоуглеродистой стали нагружались двумя способами. Первая группа состояла из шести образцов, выполненных из стали СтЗпс. Их нагружали статической растягивающей нагрузкой с равномерной деформацией (рис. 1 а) до разрушения. Вторую группу из четырех образцов из стали 20 предварительно нагружали растягивающей циклической нагрузкой, обеспечивающей на максимумах циклов напряжение  $0,95—0,98\sigma_{0,2}$  от предела текучести для данной марки стали. После выращивания усталостной трещины прикладывали статическую нагрузку до разрушения. Третью группу, состоящую из шести образцов, выполненных из стали 20ГФЛ (рис. 1 б), нагружали циклически на изгиб приложением силы в 25 кН с частотой 5 Гц, где число циклов составило  $(3—15) \cdot 10^3$ . Таким образом, выращивали усталостную трещину глубиной 8—12 мм. Затем измерялась длина усталостной трещины и проводились статические испытания, при которых нагрузка превышала нагрузку циклической фазы на 25 %. После этого повторялись описанные стадии нагружения до разрушения образца.

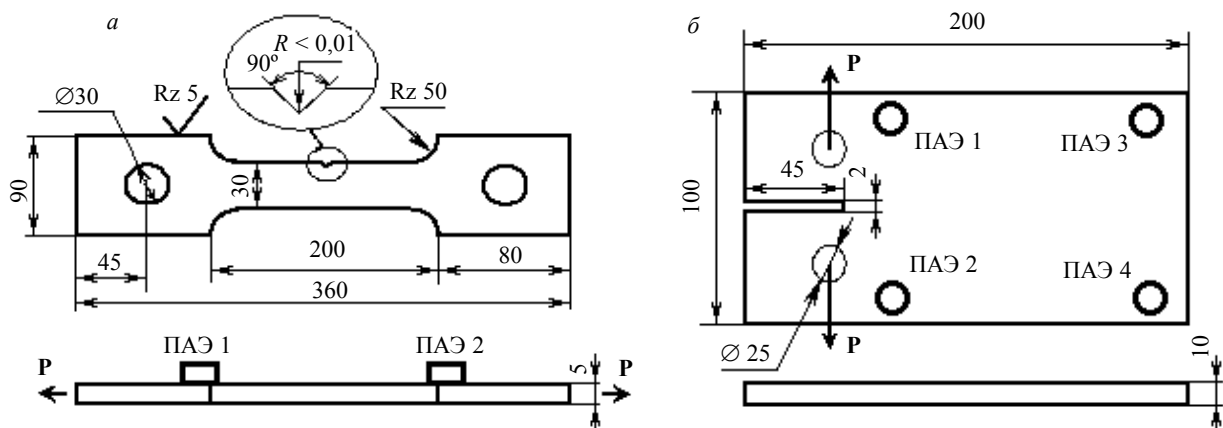


Рис. 1. Геометрические размеры образцов и места установки преобразователей при статических испытаниях на растяжение (а); при циклических испытаниях на изгиб (б).

Регистрацию сигналов, возникающих при нагружении образцов, осуществляли системой АЭ СЦАД-16.03 (зарегистрирована в Государственном реестре средств измерений № 78816-20). Порог

чувствительности измерительных каналов составлял 5 мкВ. Коэффициент усиления каждого измерительного канала был равен 1000. Для приема информации использовались четыре ПАЭ типа ПК 01-07, работающие на частоте (100—700) кГц. При этом ПАЭ располагали на образце так, чтобы выделять сигналы АЭ, связанные с ростом усталостной трещины.

Для выравнивания чувствительности измерительных каналов системы датчик имитатора сигналов АЭ с амплитудой, равной 1 В, ставился в середину зоны пьезоантенны, образованной четырьмя ПАЭ, и определялись выходные сигналы каждого канала, разброс амплитуд которых не должен был превышать 3 дБ. Выравнивание выходных сигналов АЭ измерительных каналов проводилось за счет изменения их коэффициентов усиления.

Следует отметить, что при выбранных размерах образцов основная энергия актов АЭ передавалась волнами Лэмба, и регистрируемые сигналы несли информацию, в том числе от переотражений от границ. Поэтому прямое переложение результатов исследований на реальные объекты, которые, как правило, имеют существенно большие размеры, будет некорректно, что требует дополнительных исследований в условиях, соответствующих испытаниям объектов реальных размеров и форм.

В процессе контроля с каждого ПАЭ записывались сигналы АЭ. Координаты локализованных источников определялись аналитически по методике, рассмотренной в [13]. Сигналы локализовались из области деформаций в вершине развивающейся усталостной трещины. Коэффициент интенсивности напряжений (КИН) для развивающейся трещины рассчитывался в соответствии с методикой, приведенной в п. 5.1 стандарта ГОСТ 25.506—85. Погрешность расчета КИН составляет менее 1 %.

Как следует из исследований [14], погрешность определения амплитуды сигналов, основная энергия которых сосредоточена на частотах до 500 кГц для использованной регистрирующей системы, не превышает 0,5 %.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

При циклическом нагружении образцов был отмечен значительный разброс основных параметров дискретных сигналов АЭ от времени, таких как суммарный счет, активность, средняя амплитуда, суммарная энергия. Эти параметры являются информативными при нагружении объектов с развивающимися источниками разрушения [3, 15]. Одной из основных характеристик источника сигналов АЭ является их амплитуда [8]. На рис. 2 приведена динамика изменений средней амплитуды сигналов АЭ, полученных при развитии усталостных трещин в образцах (см. рис. 1б), в зависимости от КИН. Следует отметить, что в работе приведены характерные результаты для групп образцов, и остальные результаты в основном близки к представленным на рисунках.

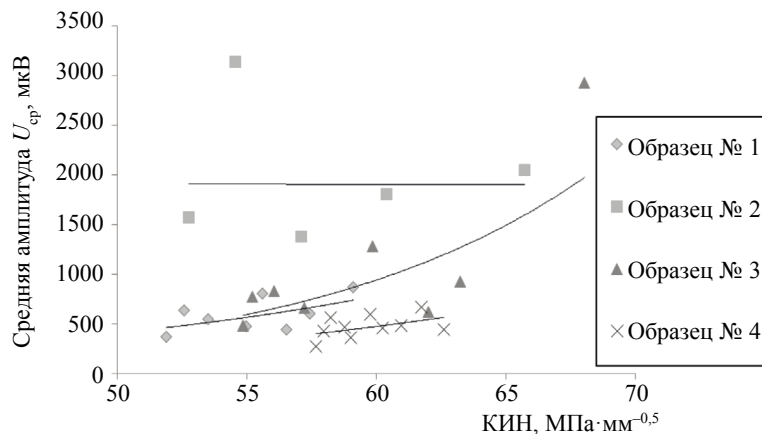


Рис. 2. Зависимость средней амплитуды сигналов АЭ от КИН при испытании образцов второй (образцы 2, 3) и третьей (образцы 1, 4) групп.

Анализ изменений средней амплитуды сигналов АЭ из зоны развивающейся усталостной трещины показывает, что с увеличением КИН данный параметр становится нестабильным. Средняя амплитуда сигналов, а также средняя суммарная энергия практически не связаны с основными

механическими параметрами развивающейся трещины. Колебания средней амплитуды связаны с неоднородностью структуры материала образцов, связь изменений параметров АЭ с которой показана в работе [15].

За счет намеренного увеличения чувствительности измерительных каналов системы АЭ при испытаниях второго образца третьей группы (см. рис. 1б) было заметно общее повышение энергетических параметров на всех этапах увеличения КИН. Полученные результаты испытаний образцов из низкоуглеродистой стали 20 и низколегированной стали 20ГФЛ показали, что амплитудный критерий обладает недостаточно выраженной корреляционной связью с параметрами развивающейся усталостной трещины (см. рис. 2). Поэтому использование амплитудных и энергетических параметров для оценки степени развития усталостных трещин возможно только при длительных режимах накопления информации АЭ.

Как показала локационная картина источников (рис. 3) с учетом погрешности определения координат, реальным источником является область в вершине трещины, которая увеличивается с ростом трещины, что логично, так как область повышенных напряжений в окрестности вершины трещины также увеличивается [16], и должна увеличиваться вероятность появления сигналов в более обширной области у вершины.

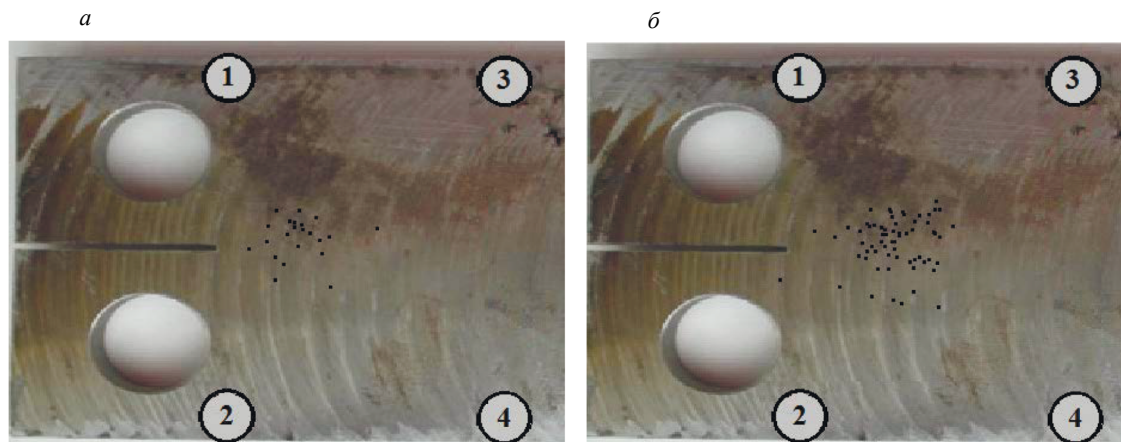


Рис. 3. Локация сигналов в образце 5 третьей группы образцов при КИН, равном  $55,2 \text{ МПа} \cdot \text{мм}^{0,5}$  (а) и  $62,0 \text{ МПа} \cdot \text{мм}^{0,5}$  (б).

При этом, как видно из рис. 3, с увеличением числа сигналов АЭ и развитием трещины объем металла, испытывающий напряженное состояние и генерирующий акты АЭ, увеличивается и, следовательно, снижается чувствительность к размеру дефекта по критерию, содержащему концентрацию источника.

Для расширения информативности метода АЭ после регистрации сигналов АЭ от источников типа усталостных трещин были проанализированы амплитудные распределения зарегистрированных сигналов. На первом этапе анализа получаются гистограммы частоты попадания этих сигналов в каждый диапазон амплитуд. Чтобы понять закономерность этого распределения, данные для большого числа сигналов можно представить в виде непрерывного распределения плотности вероятности попадания сигналов в тот или иной диапазон амплитуд. Для этого определялось среднее экспериментальное значение плотности вероятности  $p(U)$  появления сигналов АЭ в каждом интервале амплитуд как отношение числа зарегистрированных сигналов в этом амплитудном интервале. Из полученных гистограмм распределения амплитуд рассчитали мгновенное значение плотности вероятности появления  $N_{U_i-U_{i-1}}$  сигналов в интервале амплитуд для каждого среднего значения амплитуды в каждом из этих диапазонов от  $U_{i-1}$  до  $U_i$ :

$$p_i(U) = \frac{N_{U_i-U_{i-1}}}{U_i - U_{i-1}}. \quad (1)$$

После этого по полученным рассчитанным мгновенным значениям плотности вероятности  $p_i(U)$  для каждого значения амплитуды были построены распределения сигналов по амплитудам для всех образцов на разных стадиях развивающейся трещины, а результаты представлены на рис. 4. При этом величину трещины в данном случае может характеризовать КИН.

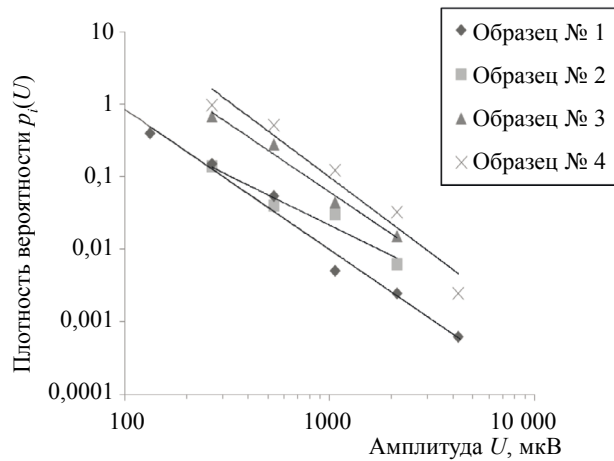


Рис. 4. Зависимость плотности вероятности появления сигналов АЭ от амплитуды образцов второй и третьей групп: образец 1 при КИН = 63,93 МПа·мм<sup>-0,5</sup>; образец 2 при КИН = 63,12 МПа·мм<sup>-0,5</sup>; образец 3 при КИН = 62,02 МПа·мм<sup>-0,5</sup>; образец 4 при КИН = 59,77 МПа·мм<sup>-0,5</sup>.

Для анализа умышленно были выбраны активные локализованные источники, от которых было зарегистрировано более 300 сигналов АЭ, что позволило получить более точные параметры распределения. При построении графиков зависимости плотности вероятности появления сигналов АЭ от амплитуды не учитывались сигналы, амплитуды которых меньше 10 мкВ и которые не были локализованы из окрестности развивающейся трещины.

Полученное распределение сигналов по амплитудам можно было описать степенной функцией, каждая кривая имела коэффициент корреляции выше 0,97, что видно из рис. 4, по формуле:

$$p(U) = A \cdot U^n, \quad (2)$$

где  $A$ ,  $n$  — соответственно безразмерные множитель и показатель степенной зависимости.

Далее был проведен анализ связи параметров степенного распределения (множителя  $A$  и показателя степени  $n$ ) от КИН, рассчитанного с учетом размеров развивающихся усталостных трещин (рис. 5).

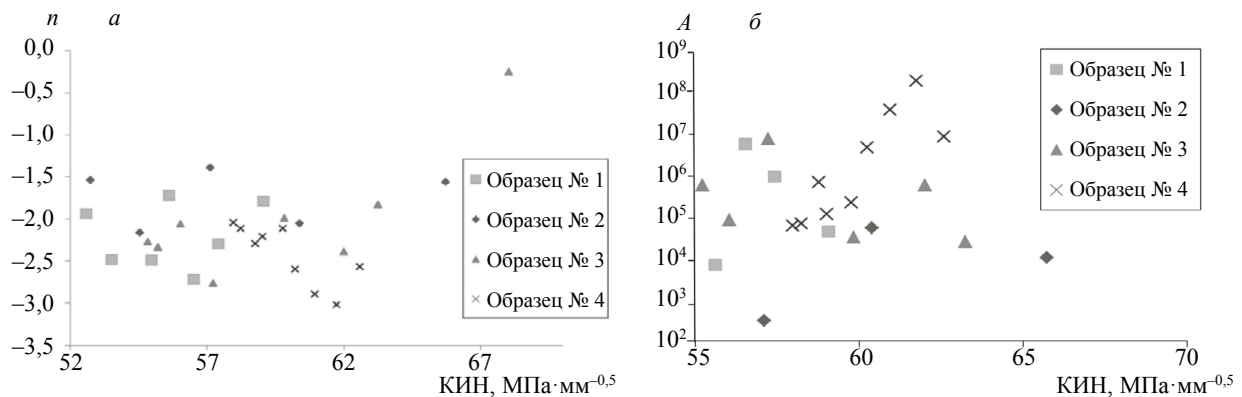


Рис. 5. Динамика изменения параметров степенного распределения  $n$  (а) и множителя  $A$  (б) в зависимости от КИН для разных образцов.

Показатель степени  $n$  изменялся в диапазоне от  $-3$  до  $-1,5$  и не имел выраженной тенденции к изменению при увеличении КИН, особенно хорошо это заметно, если все данные представить для нескольких образцов (рис. 5а). Исключение составил только случай, предшествующий разрушению образца № 3, с самым высоким КИН, полученным перед его разрушением. В распределении плотности вероятности сигналов от амплитуды показатель степени  $n$  был выше  $(-1,0)$ .

Аналогично с ростом КИН параметр  $A$  изменялся достаточно сильно и был чувствителен к количеству сигналов в каждой анализируемой выборке (рис. 5б), что следует из свойств исследуемой степенной зависимости.

Подводя итоги исследованию связи параметров степенной зависимости с КИН, можно сказать, что величины амплитуд, а значит и энергий сигналов АЭ, формируемые при развитии усталостных трещин в каждый конкретный момент статических испытаний образца с трещиной, носят, в большой степени, случайный характер. Это, видимо, во многом связано с достаточно неоднородными структурным и напряженным состояниями в области вершины развивающейся трещины.

Однако дальнейший анализ параметров степенной зависимости показал, что между показателем степени  $n$  и множителем степенной зависимости  $A$  для различных образцов наблюдалась связь с коэффициентом корреляции, равным 0,96 (рис. 6). Такая устойчивая связь между параметрами степенной зависимости связана с математическими свойствами степенной зависимости и, возможно, физические свойства разрушающегося материала на них влияют слабо. Перераспределение сигналов в сторону сигналов с повышенной амплитудой приводит к увеличению  $n$  и снижению параметра  $A$  при одном и том же их количестве. Смещение связи этих параметров между собой может происходить только за счет изменения числа сигналов в испытании.

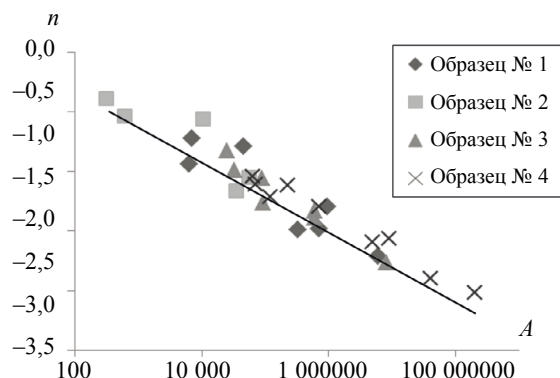


Рис. 6. Зависимость показателя степенного распределения  $n$  от множителя  $A$ .

При контроле реальных объектов можно отметить, что за исключением стадии их критического состояния, находящегося перед разрушением, степень опасности развивающихся усталостных трещин практически невозможно оценивать по таким параметрам как амплитуда или энергия.

Очевидно, что в этом случае критерии оценки развивающихся трещин можно основывать на количественных показателях активности источника либо на динамике изменений индивидуальных характеристик сигналов АЭ. Для первого случая характерна существенная зависимость полученной информации от чувствительности измерительных каналов системы АЭ. Лабораторные испытания образцов с усталостными трещинами подтверждают увеличение суммарного числа сигналов и их активности с ростом длины усталостных трещин и их КИН (рис. 7). При этом следует отметить, что для образцов из литой стали (образец 1 и 4) связь числа регистрируемых в ходе испытаний сигналов АЭ с КИН менее очевидна, что является следствием макроструктурной неоднородности такого материала (наличия ликваций, пористостей и других дефектов, обнаруженных в данных образцах).

Различная чувствительность измерительных каналов, связанных с ПАЭ, находящихся на разных участках объекта контроля или для источников, находящихся на разном расстоянии от ПАЭ, существенно изменяет число зарегистрированных сигналов, так как максимальное число сигналов с малой амплитудой и энергией может быть получено при испытаниях, в которых чувствительность каналов высокая. Еще одной особенностью является то, что при нагружении образцов, приведенных на рис. 1а, количество сигналов и их активность, зарегистрированных из зоны разрушения, на порядок меньше по сравнению с этими же параметрами, полученными при испытании образцов, приведенных на рис. 1б. В нашем случае это было связано с разными видами нагружения.

Проанализируем, каким образом можно стабилизировать чувствительность каналов. Если в лабораторных условиях есть достаточно много аппаратных средств для решения этой задачи, то на



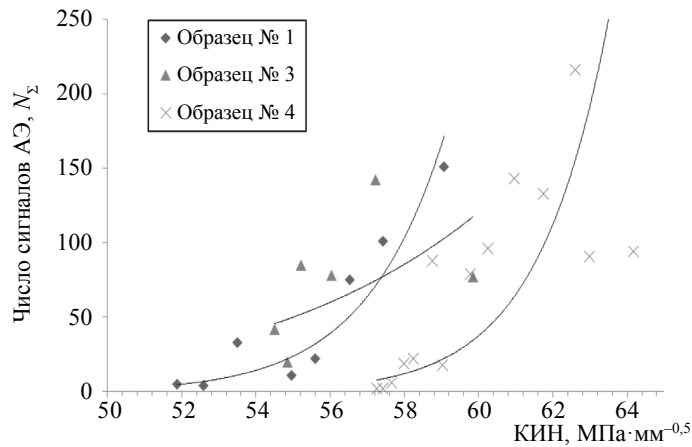


Рис. 7. Зависимость суммарного числа сигналов АЭ от КИН при развитии усталостной трещины в образце 1 второй группы и образцах 3, 4 третьей группы.

реальных объектах это часто сделать практически невозможно из-за ограниченности доступа к отдельным поверхностям объекта контроля, неоднородности его акустических свойств, сложности и ряда других причин.

В этом случае возникает задача методического выравнивания чувствительности измерительных каналов с возможностью корректировки результатов после проведения испытаний. Полученные и обработанные экспериментальные данные можно использовать для анализа состояния источников сигналов АЭ от размеров усталостных трещин. При наличии большого числа сигналов (например, более 100) их можно разделить на амплитудные диапазоны, аналогично показанным на рис. 4. Дальнейшая обработка данных позволяет получить эмпирическую зависимость плотности вероятности сигналов АЭ от их амплитуды, представленной в логарифмических координатах на рис. 8, у которой порог чувствительности канала приводит к снижению числа низкоамплитудных локализованных сигналов. Поэтому именно число низкоамплитудных сигналов будет определено с погрешностью.

Далее, для устранения недочета низкоамплитудных сигналов находилась минимальный порог срабатывания по амплитуде  $U_n$ , при котором плотность вероятности является степенной функцией и не отклоняется от нее (рис. 8). По данным правой части графика (при  $U > U_n$ ) определялись параметры степенной зависимости (множитель  $A$ , показатель  $n$ ). Затем в зависимости от местонахождения источника относительно приемных преобразователей ПАЭ и экспериментально определенного для данного образца затухания ультразвуковых волн на пути от источника до преобразователей определялось значение минимальной амплитуды зарегистрированного сигнала  $U_k$ .

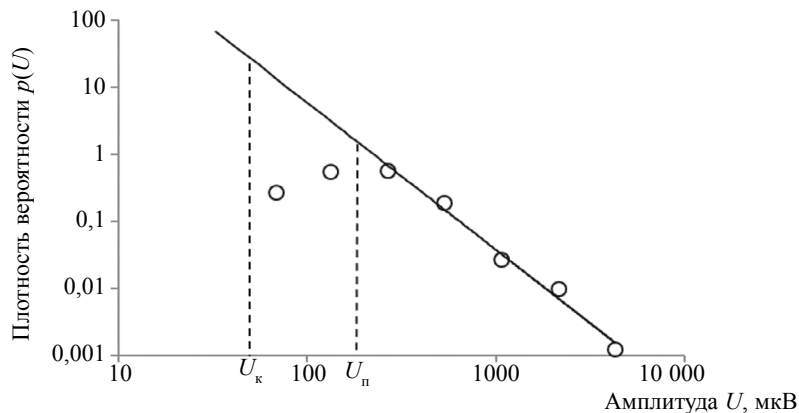


Рис. 8. Зависимость плотности вероятности распределения частоты попадания сигналов АЭ в интервал со средней амплитудой  $U$ .

Сигналы, превышающие амплитудный порог регистрации  $U_k$ , подлежат учету и использованию для определения степени опасности источника разрушения. Сигналы, амплитуды которых ниже максимального порога регистрации  $U_k$ , в дальнейшей обработке информации не учитываются. Расчет восстановленного числа сигналов АЭ  $N_B$  от источника определялся по формуле:

$$N_B = \int_{U_k} p(U) dU. \quad (3)$$

Рассмотренный амплитудный анализ сигналов АЭ применим при мониторинге конструкций, когда массив зарегистрированных сигналов большой и позволит надежно проводить такие расчеты. При этом повышается достоверность оценки степени развития усталостных трещин, находящихся на разных стадиях развития.

Основным ограничением для использования методики корректировки данных параметров сигналов АЭ является их малое число, что обычно характерно для пассивных источников. Однако при увеличении числа зарегистрированных сигналов прогноз о состоянии объекта контроля будет более объективным.

## ВЫВОДЫ

1. Исследования показали, что некоторые традиционные критерии, используемые для оценки состояния материала конструкции, такие как средняя амплитуда или энергия, концентрация источника малоэффективны для оценки развивающейся усталостной трещины. Для определения степени опасности такого типа дефекта нужны другие подходы к анализу сигналов АЭ, регистрируемых в процессе испытаний.

2. В исследовании предложена методика анализа амплитудного распределения зарегистрированных от источника сигналов и прогнозирования числа сигналов на заданном уровне чувствительности для источников, находящихся на большем расстоянии от приемников.

3. Анализ процесса развития усталостных трещин методом АЭ при циклическом и статическом нагружении образцов из низколегированных и низкоуглеродистых сталей показал, что усталостные трещины на всех стадиях излучают поток актов, амплитудное распределение которых можно характеризовать степенной зависимостью с достаточно устойчивыми параметрами такой связи, которая нарушается только на стадии, предшествующей разрушению образца.

4. При анализе степени опасности усталостных трещин целесообразно использовать суммарное число сигналов АЭ или их активность. Для этого, исходя из числа полученных сигналов от источников, находящихся, например, на разных расстояниях от ПАЭ, можно построить амплитудное распределение и определить параметры этого распределения. Затем на основе этих параметров можно определить число сигналов от источника на заданном уровне чувствительности по амплитуде с учетом затухания и расхождения ультразвуковой волны в объекте. Использование данной методики целесообразно при достаточно большом числе зарегистрированных сигналов АЭ, полученных при разрушении конструкции.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-38-90090.

Авторы выражают благодарность доктору физико-математических наук, профессору Сергею Ивановичу Буйло за сделанные замечания и предложения по содержанию статьи.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Чаусов Н.Г., Недосека С.А., Лебедев А.А. Исследование кинетики разрушения сталей на заключительных стадиях деформирования методом акустической эмиссии // Проблемы прочности. 1996. № 1. С. 82—90.
2. Wang H.-J., Lin Z., Zhao D.-Y. Application and prospect of acoustic emission technology in engineering structural damage monitoring // Journal of Vibration and Shock. 2007. № 6 (26). P. 157—161.
3. Chernov D.V., Matyunin V.M., Barat V.A., Marchenkov A.Y., Elizarov S.V. Investigation of Acoustic Emission in Low-Carbon Steels during Development of Fatigue Cracks // Russian Journal of Nondestructive Testing. 2018. V. 54. № 9. P. 638—647.
4. Бигус Г.А., Попков Ю.С. Определение глубины язвенной (питтинговой) коррозии и слежение за ее развитием методом акустической эмиссии // Сварка и диагностика. 2011. № 3. С. 57—60.
5. Носов В.В., Ямилова А.Р., Зеленский Н.А., Матвеев И.В. Оптимизация акустико-эмиссионного контроля прочности сварных соединений // Вестник Московского энергетического института. Вестник МЭИ. 2017. № 2. С. 96—101.



6. *Merson E., Vinogradov A., Merson D.L.* Application of acoustic emission method for investigation of hydrogen embrittlement mechanism in the low-carbon steel // *Journal of Alloys and Compounds*. 2015. Т. 645. № 1. P.460—463.
7. *Никулин С.А., Ханжсин В.Г., Никитин А.В., Турилина В.Ю., Заболотникова В.И.* Анализ кинетики и механизмов разрушения стали 20ГЛ различной прочности по параметрам акустической эмиссии // *Деформация и разрушение материалов*. 2016. № 12. С. 41—45.
8. *Shenao Zou, Fengying Yan, Guoan Yang, Wei Sun.* The Identification of the Deformation Stage of a Metal Specimen Based on Acoustic Emission Data Analysis // *Sensors*. 2017. 17 (4). P. 789.
9. *Башков О.В., Панин С.В., Бяков А.В. и др.* Стадийность деформации поликристаллических материалов. Исследование акустико-эмиссионным и оптико-телевизионным методами. Томск: Изд-во НИУ ТПУ, 2014. 301 с.
10. *Буйло С.И.* Физико-механические, химические и статистические аспекты акустической эмиссии // *Известия Алтайского государственного университета*. 2019. № 1 (105). С. 11—21.
11. *Бехер С.А., Попков А.А.* Временные характеристики потока сигналов акустической эмиссии при развитии трещин в стекле при ударном нагружении // *Вестник ИжГТУ имени М.Т. Калашникова*. 2019. Т. 22. № 1. С. 62—71.
12. *Nosov V.V., Grigoriev E.V., Pavlenko I.A., Gilyazetdinov E.R.* Acoustic-emission diagnosis of technical objects based on the information and kinetic approach // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. International Conference on Innovations and Prospects of Development of Mining Machinery and Electrical Engineering 2019*. 2019. P. 012067.
13. *Stepanova L.N., Petrova E.S., Chernova V.V.* Strength tests of a cfrp spar using methods of acoustic emission and tensometry // *Russian Journal of Nondestructive Testing*. 2018. Т. 54. № 4. P. 243—248.
14. *Козлов В.В.* Определение параметров гармонических сигналов в условиях действия шумов и помех на основе метода разложения сигнала на собственные числа // *Современные проблемы науки и образования*. 2013. № 6. С. 43.
15. *Степанова Л.Н., Бобров А.Л., Канифадин К.В., Чернова В.В.* Исследования основных параметров сигналов акустической эмиссии при статических и циклических испытаниях образцов из стали 20ГЛ // *Деформация и разрушение материалов*. 2014. № 6. С. 41—47.
16. *Pollock Adrian A.* Acoustic emission inspection, Technical report, TR-103-96-12/89, Physical Acoustics corporation., 195 Clarksville Road, Princeton Jct., NJ., 1989, USA.