

РАЗРАБОТКА ЭМПИРИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ РАСЧЕТА СТЕПЕНИ ПОВРЕЖДЕННОСТИ СТАЛЬНЫХ ОБРАЗЦОВ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ СТАТИСТИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ПОТОКА ИМПУЛЬСОВ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ

© 2023 г. А.Ю. Марченков¹, И.Е. Васильев², Д.В. Чернов^{2,*}, Д.А. Жгут¹, А.А. Панькина¹,
Т.Ю. Ковалева¹, Е.А. Куликова¹

¹Национальный исследовательский университет «МЭИ»,
Россия 111250 Москва, ул. Красноказарменная, 14

²Институт машиноведения имени А.А. Благонравова РАН (ИМАШ РАН),
Россия 101000 Москва, Малый Харитоньевский пер., 4
E-mail: *chernovdv@inbox.ru

Поступила в редакцию 05.06.2023; после доработки 08.07.2023
Принять к публикации 21.07.2023

Использование метода акустической эмиссии (АЭ) для мониторинга состояния повреждений изделий из конструкционных сталей и сплавов на стадиях неупругого и предельного деформирования является целью работы. Исследованы потенциальные возможности применения стандартных потоковых параметров акустических сигналов, регистрируемых на стадиях неупругого и предельного деформирования, для оценки состояния поврежденности стального образца. Показано, что такие параметры, как максимальная амплитуда регистрируемых импульсов и их активность АЭ, не имеют четкой взаимосвязи со степенью поврежденности конструкционного материала. Это затрудняет применение стандартных методик для оценки степени поврежденности конструкционных сталей. Показана возможность мониторинга состояния поврежденности структуры стали 30ХГСА на стадиях неупругого и предельного по изменению парциальной активности весового содержания высокоэнергетических импульсов АЭ. Для разделения процессов вязкого и хрупкого разрушения использован критерий Колмогорова—Смирнова.

Ключевые слова: акустическая эмиссия, испытание на растяжение, конструкционная сталь, неразрушающий контроль, оценка поврежденности, распространение трещины, статистический критерий.

DEVELOPMENT OF AN EMPIRICAL MODEL FOR DAMAGE DEGREE ASSESSMENT OF STEEL SPECIMENS BASED ON THE RESULTS OF ACOUSTIC EMISSION SIGNAL FLOW STATISTICAL PROCESSING

© 2023 A.Yu. Marchenkov¹, I.E. Vasiliev², D.V. Chernov^{2,*}, D.A. Zhgut¹, A.A. Pankina¹,
T.Yu. Kovaleva¹, E.A. Kulikova¹

¹National Research University «Moscow Power Engineering Institute»
Krasnokazarmennaya, st., 14, Moscow, 111250, Russia

²Mechanical Engineering Research Institute of the Russian Academy of Sciences
Maly Kharitonyevsky ave., 4, Moscow, 101990, Russia

The study is devoted to acoustic emission (AE) method application for monitoring the state of structural materials at the inelastic and ultimate deformation stages. The possibilities of using the standard AE signal parameters recorded at the inelastic and ultimate deformation stages to assess the damage degree of steel specimens were investigated. It was shown that such parameters as the maximum amplitude of the recorded AE signals and their AE activity did not have a clear correlation with the damage degree of products made of structural steel and alloys. This makes it difficult to apply standard methods for assessing the damage degree of structural steels. The feasibility of monitoring the state of damage of 30KhGSA alloyed steel at the inelastic and ultimate stages by the evaluation of partial activity of the high-energy AE signals weight content was presented. The Kolmogorov-Smirnov criterion was used to separate the processes of ductile and brittle fracture.

Keywords: acoustic emission, tensile testing, structural steel, non-destructive testing, damage assessment, crack propagation, statistical criterion.

DOI: 10.31857/S0130308223090026, EDN: EAYYUE

ВВЕДЕНИЕ

Одной из наиболее актуальных задач технической диагностики является определение степени поврежденности конструкционного материала в процессе эксплуатации высоконагруженных элементов изделий и технических систем. Для оценки состояния поврежденности материала образцов

и конструкций используют как системы периодического контроля, включающие ультразвуковой, вихретоковый и магнитный контроль, так и системы мониторинга, в том числе вибродиагностику, корреляцию цифровых изображений, акустическую эмиссию.

Как показали многочисленные экспериментальные исследования [1—8], для выявления развивающихся дефектов и повреждений в диагностируемых объектах на стадиях неупругого и предельного состояния конструкционного материала наиболее информативным является метод АЭ, который основан на регистрации преобразователями акустической эмиссии (ПАЭ) импульсов необратимых смещений среды, возникающих в результате динамической перестройки структуры материала [1, 2]. Каждое нарушение структурных связей конструкционного материала генерирует импульсы АЭ, характеризующиеся их формой и спектром, которые отражают энергетические и темпоральные параметры произошедшего разрушения [3]. Экспериментально устанавливая соответствие между поверхностью микро-, мезо- и макроразрушений структурных связей и энергией генерируемых при этом импульсов на стадиях упругого, неупругого и предельного состояния, получаем возможность контролировать кинетику повреждений в структуре конструкционного материала на разных масштабных уровнях [4—6].

К первичным параметрам, регистрируемым системой АЭ и используемым для оценки повреждаемости конструкционного материала, относят накопление каналами АЭ-системы локационных импульсов (N_Σ), их активность ($\dot{N}$), распределение максимальной амплитуды (u_m), длительности (t_n), числа выбросов (N_n) локационных импульсов. На их основе были получены наиболее информативные комбинированные параметры, характеризующие распределение относительной энергии импульсов (E_n), усредненной частоты выбросов (N_n/t_n), крутизны затухания амплитуды (u_m/N_n), парциальной активности ($\dot{N}_i$) и весового содержания (W_i) локационных импульсов в энергетических кластерах нижнего, среднего и верхнего уровня, отражающие состояние микро-, мезо- и макроповреждений в структуре конструкционного материала [4—6]. Контролируя динамику изменения этих параметров для массивов, регистрируемых в процессе АЭ диагностики локационных импульсов, определяют текущее состояние конструкционного материала в зонах накопления повреждений.

Помимо указанного известны и другие способы, использующие при проведении АЭ-диагностики для оценки степени поврежденности материала изделий различные комбинации потоковых параметров регистрируемых импульсов [1—3, 6—12]. Согласно континуальной теории Качанова—Работнова [13] под степенью поврежденности конструкционного материала понимается соотношение площади разрушения эффективного сечения изделия к площади начального бездефектного состояния.

Хорошо известно [13—18], что при нагружении изделий из высокопрочных конструкционных сталей процесс разрушения прежде всего начинается в зонах концентрации напряжений, где уже на стадии упругого деформирования материала активизируются локальные и точечные структурные дефекты, зарождаются и развиваются усталостные трещины. При упругопластическом деформировании материала движение дислокаций вдоль кристаллографических плоскостей приводит к образованию полос скольжения. На стадии развитой пластической деформации при $\varepsilon \geq 3\text{—}5\%$, возникает фрагментация структуры, обусловленная исчерпанием возможности дальнейшей аккомодации системы перераспределять возрастающие напряжения в зернах и блоках за счет уплотнения концентрации дислокаций и образования деклинаций вдоль их границ [16—18]. При этом элементы образующейся субструктуры подвергаются трансляционным, сдвиговым и поворотным модам воздействия, определяющих их ориентацию в структуре металла. Все изменения их положения взаимосвязаны и направлены на снижение внутренней энергии в материале конструкции.

На рис. 1 показан процесс фрагментации структуры аустенитной стали 08X18H10T на стадиях упругопластического (а), пластического (б), вязкого (в) и предельного (г) деформирования материала.

Если на снимке рис. 1а отсутствует какие-либо дислокационные полосы и заметные признаки фрагментации структуры материала, то на следующих снимках рис. 1б—г они явно просматриваются. На снимке рис. 1б наряду с полосами скольжения четко различимы блоки и зерна начала процесса фрагментации структуры материала. Снимки рис. 1в, г отображают эволюцию структуры материала на стадии вязкого и предельного состояния, характеризующую дальнейшую ее фрагментацией, возникновением и развитием микротрещин по границам блоков и зерен, их слиянием и образованием мезо- и макромасштабных трещин.

Различные по своей природе механизмы фрагментации структуры материала генерируют заметно отличающиеся по своим энергетическим и темпоральным параметрам импульсы АЭ.

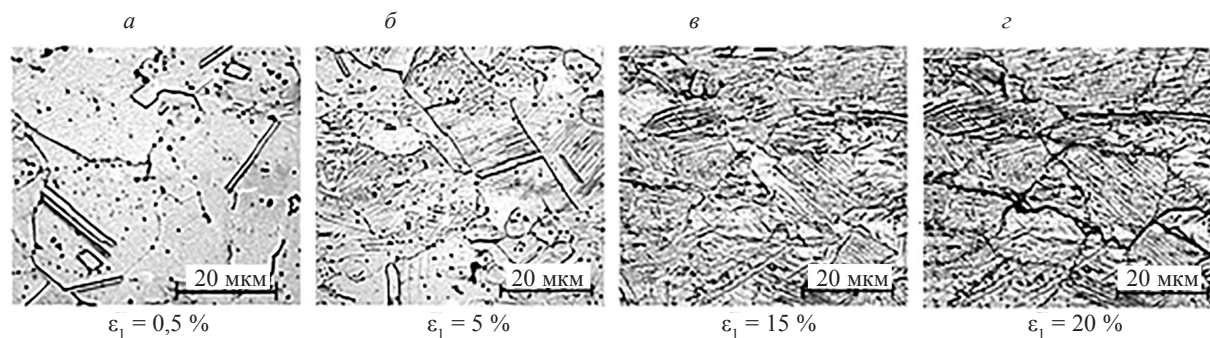


Рис. 1. Фрагментация структуры аустенитной стали 08X18N10T на стадиях: упругопластического (а), пластического (б), вязкого (в) и предельного (г) деформирования материала.

Причем, как правило, количество импульсов, генерируемых сдвиговыми процессами, сопровождаемых движением дислокаций или локальным изменением ориентации структурных элементов от действия приложенной нагрузки в разы больше, чем при разрыве или сколе кристаллической структуры, тогда как их энергия заметно ниже выделяемой в результате хрупкого разрушения. Настоящая работа посвящена выбору наиболее информативных потоковых параметров локационных импульсов, которые были бы наиболее эффективны для мониторинга состояния поврежденности высокопрочных конструкционных сталей на стадиях неупругих и предельных деформаций.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследования проводили на образцах из мартенситной стали 30ХГСА с габаритными размерами 400×20×6 мм. В средней части образцов с боковой стороны выполнялся боковой надрез, форма и основные размеры которого показаны на рис. 2а.

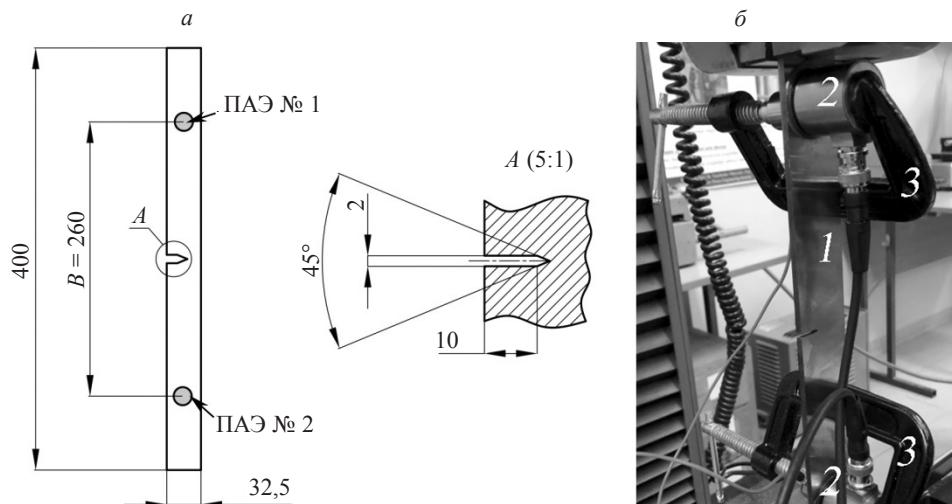


Рис. 2. Форма и основные размеры образцов с боковым надрезом, испытанных на разрыв (а) на стенде Instron 5982 (б): 1 — образец; 2 — преобразователи АЭ VS150-RIC; 3 — струбцины.

При испытаниях образцы закрепляли в захваты универсальной испытательной машины Instron 5982 (рис. 2б), на боковую поверхность которых через слой контактной смазки устанавливали ПАЭ на расстоянии 130 мм по обе стороны от надреза. В качестве ПАЭ использовали квазирезонансные интегральные датчики VS150-RIC производства фирмы Vallen (ФРГ) с встроенным преусилителем. Регистрация импульсов АЭ, возникающих в процессе растяжения стальных образцов, осуществлялась с помощью системы сбора и обработки данных АЭ Vallen AMSY-5 (ФРГ).

Перед проведением испытаний на тестовых образцах определялись оптимальные параметры настройки аппаратуры Vallen AMSY-5, включающие выбор порога дискриминации сигналов, составившего $u_{th} = 36$ дБ, и полосу пропускания цифровых фильтров, выбранной равной $\Delta f = 95\text{—}850$ кГц. Расчетная скорость распространения импульсов АЭ (V_g), определенная в ходе тестовых испытаний при размере зоны локации $B = 260$ мм, составила 3300 м/с. При испытаниях образцов скорость перемещения активной траверсы нагружающего стенда составляла 2 мм/мин.

После определения параметров измерительной аппаратуры проводили испытания основной партии образцов с регистрацией сигналов АЭ. Методология, используемая при обработке потоков импульсов АЭ, регистрируемых в процессе статического растяжения стального образца до разрушения, включала в себя совместное применение моделей механики разрушения, цифровой обработки сигналов и статистического анализа.

В настоящей работе с целью оценки степени поврежденности высокопрочной мартенситной стали 30ХГСА использована парциальная активность высокоэнергетических импульсов АЭ, отражающая процесс хрупкой фрагментации структуры материала, в зависимости от уровня соотношения $j = \varepsilon/\varepsilon_B$, характеризующего значение текущей деформации стального образца к предельной, регистрируемой при его разрушении.

ОПИСАНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Для демонстрации характера распределения параметров сигналов АЭ, регистрируемых в процессе растяжения образца, на рис. 3 показана динамика изменения максимальной амплитуды (u_m) и активности ($\dot{N}$) локационных импульсов в процессе повышения нагрузки (P).

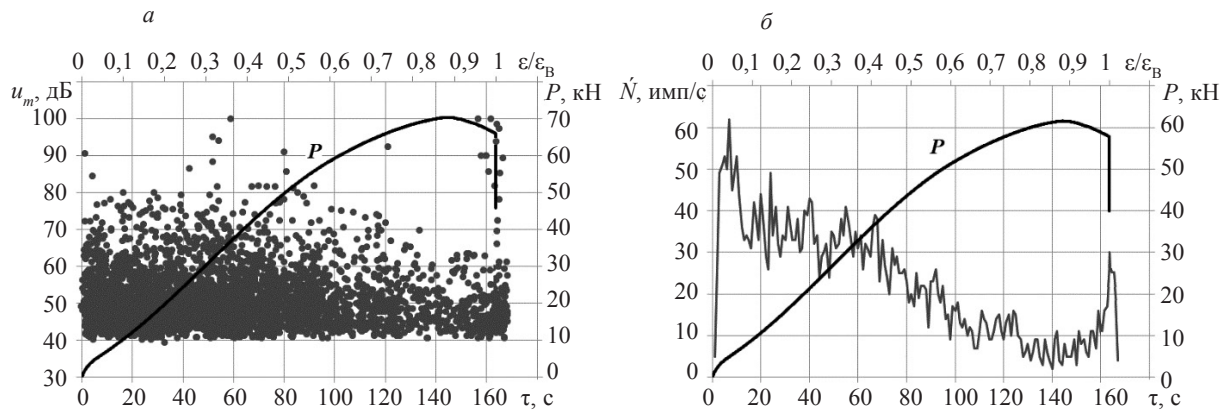


Рис. 3. Динамика изменения амплитуды u_m (а) и активности $\dot{N}$ (б) локационных импульсов, зарегистрированная при испытании образца из стали 30ХГСА на разрыв в ходе повышении уровня $j = \varepsilon/\varepsilon_B$ от 0 до 1.

Анализ приведенных на графиках рис. 3 потоковых АЭ-данных, зарегистрированных при испытаниях стального образца на разрыв, свидетельствует о сложности определения состояния поврежденности конструкционного материала на стадии неупругого деформирования материала. На начальном этапе нагружения стального образца ($\tau \leq 10$ с; $j \leq 0,06$) был зарегистрирован поток высокоамплитудных импульсов АЭ, активность которых достигала 62 имп/с, что характерно для процесса срабатывания рассеянных дефектов на стадии упругого деформирования материала. Дальнейшее повышение приложенной нагрузки в течение $\tau = 10\text{—}120$ с при $j = 0,06\text{—}0,70$ сопровождается «in situ» локализацией процесса неупругих деформаций, снижением амплитуды и активности импульсов АЭ соответственно до значений $u_m = 75$ дБ и $\dot{N} = 17$ имп/с. В период $\tau = 120\text{—}160$ с при $j = 0,7\text{—}0,93$ возникает состояние «акустического затишья» [19], при котором заметно снижается уровень максимальной амплитуды и активности регистрируемых импульсов: $u_m \leq 63$ дБ и $\dot{N} \leq 10$ имп/с. При достижении образцом предельного состояния в период $\tau = 160\text{—}172$ с при $j = 0,93\text{—}1,0$ регистрируют отдельные импульсы с уровнем амплитуды близким к $u_m = 100$ дБ. При этом активность АЭ в момент разрушения не превышала $\dot{N} \leq 25$ имп/с, что

в 2,5 раза было меньше, чем на стадии упругого деформирования образца. Как следует из проведенного анализа, потоковые параметры максимальной амплитуды $u_m(\tau)$ и активности $\dot{N}(\tau)$ регистрируемых импульсов не позволяют корректно оценить состояние поврежденности стали 30ХГСА в зоне концентратора на стадии неупругого деформирования образца.

Для решения поставленной задачи предлагается разделить поток регистрируемых импульсов на сигналы АЭ, свойственные природе вязкого и хрупкого механизмов разрушения структуры материала. Как показали проведенные исследования, такое разделение можно получить, анализируя статистические характеристики распределения энергетических параметров регистрируемых импульсов, в частности энергии переднего фронта, вычисляемой по формуле:

$$E_f = 20 \cdot \log_{10} \left(\frac{u_{\text{мкВ}} \cdot t_f}{1 \text{ мкВ} \cdot 1 \text{ мкс}} \right), \quad (1)$$

где $u_{\text{мкВ}}$ — амплитуда импульса АЭ в мкВ; t_f — время нарастания импульса АЭ.

Статистическая селекция потокового параметра (1) в регистрируемых выборках импульсов АЭ на кластеры нижнего и верхнего энергетического уровня, отражающие процессы вязкого и хрупкого разрушения структуры материала, осуществлялась с использованием критерия Колмогорова—Смирнова. Расчет эмпирической функции распределения (F_W^*) проводился для скользящего окна размером $W = 100$ импульсов [20] по формуле:

$$F_W^*(y) = \frac{1}{W} \sum_{i=1}^W I(X_i < y), \quad (2)$$

W — размер выборки оконной функции; I — количество данных АЭ, отвечающих условию $X_i < y$; X_i — значение параметра из выборки $X = (X_1, \dots, X_p, \dots, X_W)$; y — пороговое значение параметра в диапазоне $y \in [X_{\min}, \dots, X_{\max}]$.

Для выявления момента разладки потока регистрируемых импульсов, генерируемых разными по своей природе источниками АЭ, применялся двухвыборочный критерий Колмогорова—Смирнова [20], основанный на сопоставлении двух эмпирических функций распределения:

$$D_W = \sup |F_W^i(y) - F_W^{i-1}(y)|, \quad (3)$$

D_W — максимальная разность между эмпирическими функциями распределения параметров АЭ, рассчитанными на $(i-1)$ и i шаге смещения скользящего окна размером W .

Значения вычисляемых статистик свидетельствуют о схожести или различии сопоставляемых эмпирических функций в скользящем окне W . В случае схожести распределения эмпирических функций, значение параметра D_W близко к нулю. Для определения степени схожести регистрируемых выборок вычисляется значение критерия λ_α :

$$\lambda_\alpha = D_W \cdot \sqrt{\frac{W}{2}} > \lambda_{\text{кр}}, \quad (4)$$

$\alpha = 0,1$ — уровень значимости критерия при анализе сравниваемых выборок; $\lambda_{\text{кр}}$ — критическое значение критерия для выбранного уровня значимости.

Если значение λ_α больше критического, то нулевая гипотеза отвергается, а сравниваемые выборки по рассмотренному признаку отличаются существенно. Вероятность того, что λ_α примет значение большее или равное $\lambda_{\text{кр}}$, определялось по вероятностному параметру K_α с использованием табличных данных [21].

При разладке параметров потока регистрируемых импульсов, возникающей при их генерации от разных по природе источников АЭ, уровень вероятностного критерия K_α возрастает. Это позволяет разделить поток импульсов АЭ на два характерных процесса, генерируемых в процессе динамической перестройки структуры материала на всех масштабных уровнях в результате вязкого разрушения с низкой энергией и хрупкого с более высоким уровнем энергии переднего фронта сигналов.

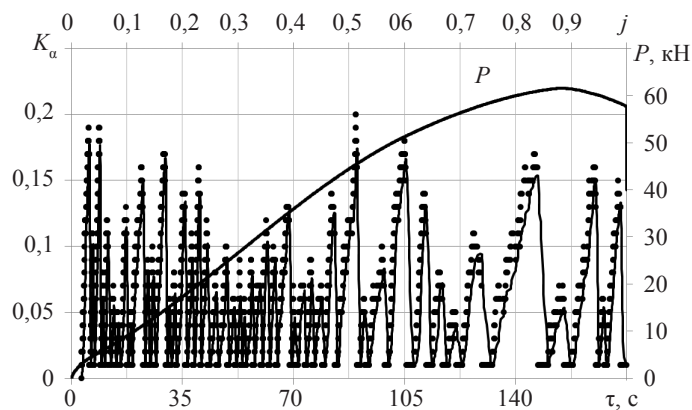


Рис. 4. Применением критерия Колмогорова—Смирнова для разделения импульсов АЭ, зарегистрированных при испытаниях образца на разрыв.

На рис. 4 приведены значения вероятностной статистики K_α , описывающей схожесть эмпирической функции распределения $F_w^{i+1}(y)$ и тестовой выборки $F_w^i(y)$ в скользящем окне W при повышении уровня $j = \varepsilon/\varepsilon_B$ от 0 до 1. Величина вероятностной статистики K_α , определяемая в диапазоне $j = 0—1$, изменялась от $K_\alpha = 0,01$ до $K_\alpha = 0,2$.

Как видно из графика рис. 4, активность регистрации выборок локальных импульсов после 80 с нагружения заметно падала с ростом нагрузки, что характерно для стадии предразрушения конструкционных материалов [19]. Максимальный уровень разладки потоковых параметров был зарегистрирован при $j = 0,51$, когда значение вероятностной статистики достигало $K_\alpha = 0,2$. При этом минимальный уровень разладки потока соответствовал значению вероятностной статистики $K_\alpha = 0,01$. Пилообразная форма функции $K_\alpha(\tau)$ обусловлена периодичностью возникновения стадий вязкого и хрупкого разрушения с низкой и высокой энергией переднего фронта импульсов.

Для пояснения предложенной методики на рис. 5 рассмотрены моменты времени $\tau_1 = 16,5$ с и $\tau_2 = 18,4$ с и свойственные им изменения значений нижнего ($p = 0,25$) и верхнего ($p = 0,75$) квартилей эмпирической функции распределения потокового параметра E_f .

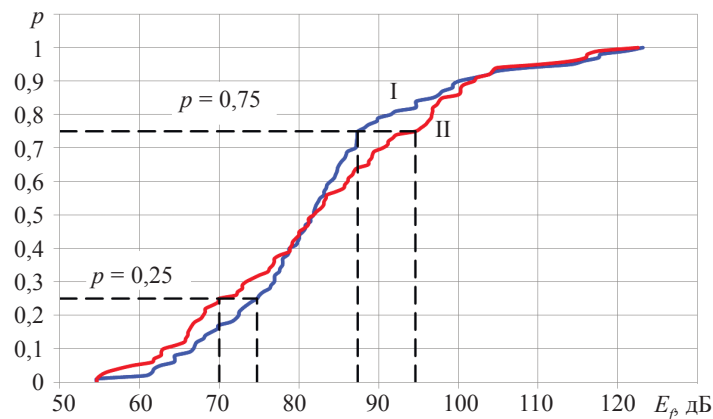


Рис. 5. Эмпирические функции распределения энергий переднего фронта импульсов АЭ, регистрируемые в моменты времени $\tau = 16,5$ с (I) и $\tau = 18,4$ с (II).

По мере повышения нагрузки значение потокового параметра E_f заметно возрастает. В выборке, регистрируемой на $\tau_2 = 18,4$ с испытания, отмечается заметное увеличение парциальной активности высокоэнергетических импульсов, значение параметра E_f верхнего квартиля которых возрастает до 95 дБ (график II на рис. 5), что отражает рост парциальной активности хрупкого раз-

рушения материала. Особенно это проявляется на стадиях вязкого и предельного деформирования материала, когда происходит активная фрагментация структуры, зарождение и подрастание доминантной трещины.

В качестве параметра, характеризующего степень повреждения конструкционного материала, было выбрано значение парциальной активности ($\dot{N}_W = N_{(Ef \geq 80\text{дБ})}/W$) высокоэнергетических импульсов АЭ регистрируемой выборки в размере скользящего окна W .

На рис. 6 представлена корреляционная зависимость парциальной активности ($\dot{N}_W$) высокоэнергетических импульсов АЭ, отражающая хрупкую составляющую разрушения стали 30ХГСА, в зависимости от уровня параметра $j = \varepsilon/\varepsilon_B$.

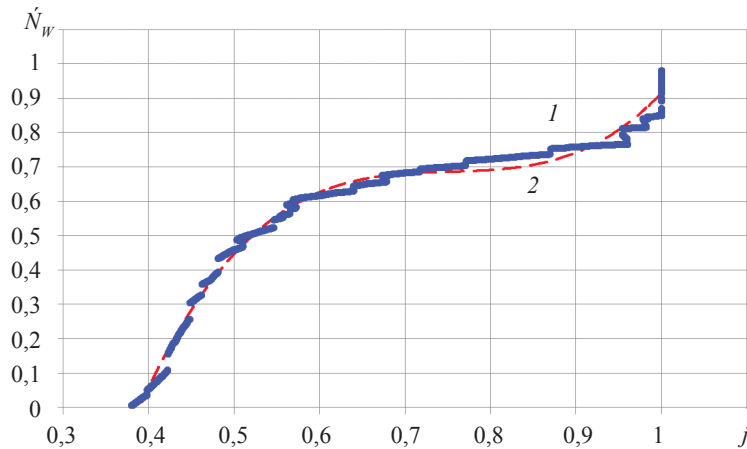


Рис. 6. Динамика изменения парциальной активности ($\dot{N}_W$) импульсов АЭ, отражающая хрупкую составляющую разрушения структуры стали 30ХГСА, в зависимости от уровня деформирования образца при растяжении $j = \varepsilon/\varepsilon_B$: 1 — экспериментальные данные; 2 — аппроксимация полиномом 3-й степени.

Как следует из рис. 6, в ходе нагружения образцов корректное разделение потока импульсов АЭ на два характерных процесса с использованием предложенной методики стало возможным только при уровне деформирования $j \geq 0,37$. На стадии упругопластического деформирования регистрировалась высокая активность локальных максимумов функции K_a , что затруднило разделение потока на импульсы, генерируемые процессами вязкой и хрупкого разрушения структуры мартенситной стали 30ХГСА.

Пунктирной линией на рис. 6 представлен результат аппроксимации экспериментальных данных с помощью дробно-рациональной функции:

$$\dot{N}_W(j) = \frac{0,37 \cdot j^3 - 0,11 \cdot j^2 - 0,39 \cdot j + 0,22}{j^2 - 1,48 \cdot j + 0,57}. \quad (5)$$

Высокая точность результатов аппроксимации подтверждается значением коэффициента детерминации $R^2 = 0,997$, близким к единице и уровнем приведенной погрешности, не превышаю-

щим: $\gamma = \frac{\left| j - \dot{N}_W \right|}{\max \left(\dot{N}_W \right)} = 6,72 \%$. Выявление корреляционной зависимости между парциальной

активностью высокоэнергетических импульсов, регистрируемых на стадиях неупругого и предельного состояния материала, и величиной параметра $j = \varepsilon/\varepsilon_B$, отражающей степень деформирования материала, позволило с высокой степенью достоверности контролировать уровень его поврежденности в зоне развивающейся трещины при испытаниях на разрыв образцов стали 30ХГСА.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для решения рассмотренной в работе задачи выполнена серия экспериментальных исследований, включающих регистрацию и статистический анализ полученных массивов данных АЭ при испытаниях стальных образцов с боковым надрезом на разрыв.

1. По результатам анализа потоковых параметров амплитуды и активности регистрируемых импульсов АЭ были определены основные закономерности их распределения в процессе нагружения образцов. Установлено, что регистрируемые потоковые параметры $u_m(\tau)$ и $N(\tau)$ не позволяют корректно оценить состояние поврежденности материала.

2. Как показали результаты проведенного исследования, параметр энергии переднего фронта E_f импульсов АЭ может быть эффективным инструментом для разделения эволюции разрушения мартенситной стали 30ХГСА на периоды активизации вязкого и хрупкого процессов повреждения структуры материала. Для их разделения предложена методика выявления момента разладки потока импульсов АЭ, использующая статистический критерий Колмогорова—Смирнова (K_a). В результате расчета статистического критерия были определены локальные максимумы функции $K_a(\tau)$ в процессе деформирования образцов при повышении уровня $\varepsilon/\varepsilon_B \geq 0,37$.

3. Для количественной оценки степени поврежденности образцов из стали 30ХГСА использована корреляционная зависимость парциальной активности $\dot{N}_w$ высокоэнергетических импульсов от параметра $j = \varepsilon/\varepsilon_B$, отражающего уровень достижения предельного состояния материала. Как следует из рис. 6, статистический анализ экспериментальных данных достаточно точно отображает аналитическая зависимость $\dot{N}_w(j)$, о чем свидетельствует коэффициент детерминации $R^2 = 0,988$ при $j \geq 0,37$.

Дальнейшим шагом развития разработанной методики является расширение диапазона j с целью мониторинга состояния поврежденности материала на ранней стадии упругопластического деформирования. Для решения поставленной задачи планируется применение искусственных нейронных сетей, для обучения которых предлагается использовать не только энергетические, но и спектральные характеристики потока регистрируемых импульсов.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 21-79-00232).

Результаты экспериментальных исследований получены с использованием оборудования, предоставленного центром коллективного пользования «Наукоемкие технологии создания машин будущего» Института машиноведения им. А.А. Благонравова РАН.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Pollock A. Acoustic emission testing. Metals handbook / Edited by. Adrian Pollock. 9 edition. AST International. 1989. V.17. P. 278—294.
2. Иванов В.И., Баран В.А. Акустико-эмиссионная диагностика. М.: «Спектр», 2017. 368 с.
3. Makhutov N.A., Ivanov V.I., Sokolova A.G., Vasil'ev I.E., Chernov D.V., Skvortsov D.F., Bubnov M.A. Monitoring composite fiber failure using acoustic emission system, vibration analyzer, and high-speed video recording // Russ. J. Nondestr. Test. 2020. V. 56. No. 12. P. 960—970.
4. Makhutov N.A., Matvienko Y.G., Vasil'ev I.E., Chernov D.V., Ivanov V.I. Rupture tests of reinforcing fibers and a unidirectional laminate using acoustic emissions // Instruments and Experimental Techniques. 2022. T. 65. № 2. С. 305—313.
5. Matvienko Y.G., Vasil'ev I.E., Chernov D.V. Damage and failure of unidirectional laminate by acoustic emission combined with video recording // Acta Mechanica. 2021.
6. Makhutov N.A., Vasiliev I.E., Chernov D.V., Ivanov V.I., Terent'ev E.V. Adaptation of Methodology for Monitoring Damage Kinetics and Assessing Load-Bearing Capacity in Relation to Steel Products // Russian Journal of Nondestructive Testing. 2022. V. 58. No. 9. P. 800—813. DOI: 10.1134/S1061830922090078
7. Lukonge A., Cao X. Leak detection system for long-distance onshore and offshore gas pipeline using acoustic emission technology. A review // Trans. Indian Inst. Met. 2020. V. 73. P. 1715—1727.
8. Acoustic emission monitoring of corrosion in steel pipes using Lamb-type helical waves. <https://doi.org/10.1177/14759217221105644>
9. Shehadeh M., Osman A., Elbatran A.A., Steel J., Reuben R. Experimental Investigation Using Acoustic Emission Technique for Quasi-Static Cracks in Steel Pipes // Assessment. Machines. 2021. V. 9. P. 73. <https://doi.org/10.3390/machines9040073>
10. Louda P., Sharko A., Stepanchikov D. An Acoustic Emission Method for Assessing the Degree of Degradation of Mechanical Properties and Residual Life of Metal Structures under Complex Dynamic Deformation Stresses // Materials. 2021. V. 14. P. 2090.
11. Uhlmann E., Holznagel T., Clemens R. Practical Approaches for Acoustic Emission Attenuation Modelling to Enable the Process Monitoring of CFRP Machining // J. Manuf. Mater. Process. 2022. No. 6. P. 118. <https://doi.org/10.3390/jmmp6050118>

12. Li P., Zhang W., Ye Z., Wang Y., Yang S., Wang L. Analysis of Acoustic Emission Energy from Reinforced Concrete Sewage Pipeline under Full-Scale Loading Test // Appl. Sci. 2022. V. 12. P. 8624. <https://doi.org/10.3390/app12178624>
13. Работнов Ю.Н. Ползучесть элементов конструкций. М.: Наука, 2014. 752 с.
14. Москвичев В.В., Махутов Н.А., Шокин Ю.И., Лепихин А.М., Анискович Е.В., Буров А.Е., Гадегинин М.М., Готовко С.А., Доронин С.В., Кашибский Н.И., Москвичев Е.В., Москвичева Л.Ф., Рейзмунт Е.М., Суходоева Н.В., Федорова Е.Н., Филиппова Ю.Ф., Чабан Е.А., Черняев А.П., Чернякова Н.А. Прикладные задачи конструкционной прочности и механики разрушения технических систем. Новосибирск: Наука, 2021. 796 с.
15. Заводчинская Э.Б. Общие закономерности и критерии разрушения твердых тел на разных масштабных уровнях при длительном нагружении (Обобщающая статья) // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2022. № 7. С. 48—62. <https://doi.org/10.26896/1028-6861-2022-88-7-48-62>
16. Рыбин В.В. Большие пластические деформации и разрушение металлов. М.: Металлургия, 1986. 224с.
17. Панин В.Е., Лихачев В.А., Гриняев Ю.В. Субструктурные уровни деформации твердых тел. Новосибирск: Наука, 1985. 226 с.
18. Сарафанов Г.Ф., Перевезенцев В.Н. Закономерности деформационного измельчения структуры металлов и сплавов. Нижний Новгород: «Новые многофункциональные материалы и нанотехнологии», 2007. 96 с.
19. Tyutin M.R., Botvina L.R., Levin V.P., Beletskii E.N., Sinev I.O., Petersen T.B. Kinetics of damage accumulation in a D16CH alloy during static loading // Russian Metallurgy (Metally). 2022. V. 2022. No. 4. P. 444—451.
20. Лагутин М.Б. Наглядная математическая статистика. М.: Бином. Лаборатория знаний, 2009. 472 с.
21. Большев Л.Н., Смирнов Н.В. Таблицы математической статистики. М.: Наука, 1983. 416 с.