

АДАПТАЦИЯ МЕТОДОЛОГИИ МОНИТОРИНГА КИНЕТИКИ ПОВРЕЖДЕНИЙ И ОЦЕНКИ НЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ ПРИМЕНИТЕЛЬНО К СТАЛЬНЫМ ИЗДЕЛИЯМ

© 2022 г. Н.А. Махутов¹, И.Е. Васильев^{1,*}, Д.В. Чернов¹, В.И. Иванов², Е.В. Терентьев³

¹ФГБУН Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, Россия 101990 Москва, Малый Харитоньевский пер., 4

²ЗАО «НИИИИИ МНПО Спектр», Россия 119048 Москва, ул. Усачева, 35, стр. 1

³ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский университет «МЭИ», Россия 111250 Москва, Красноказарменная ул., 14
*e-mail: vie01@rambler.ru

Поступила в редакцию 29.05.2022; после доработки 01.08.2022

Принята к публикации 03.08.2022

Методология мониторинга кинетики повреждений и оценки несущей способности конструкций с использованием акустической эмиссии (АЭ), разработанная применительно к изделиям из полимерных композитных материалов (ПКМ), была адаптирована к эволюции разрушения конструкционных сталей. В связи с более высокой пластичностью конструкционных сталей по сравнению с ПКМ, относительная энергия (E_u) импульсов АЭ, генерируемых при разрушении структурных связей на одном и том же масштабном уровне, оказалась примерно на 5—15 дБ ниже, чем в композитах. Поэтому при проведении АЭ-диагностики изделий из конструкционных сталей установлены следующие границы разделения импульсов АЭ на энергетические кластеры: для нижнего кластера $E_u < 80$ дБ, для среднего — $E_u = 80—100$ дБ, для верхнего — $E_u > 100$ дБ. Рассмотрено тестирование методологии мониторинга кинетики повреждений и оценки несущей способности изделий в режиме нагружения при статических и циклических испытаниях образцов из стали 08Х18Н10Т с боковым надрезом.

Ключевые слова: конструкционные стали, кинетика повреждений, несущая способность, концентратор напряжений, боковой надрез, трещина, акустическая эмиссия, импульс АЭ, критериальные параметры, видеорегистрация, структура материала.

DOI: 10.31857/S0130308222090044, EDN: BSEAIG

ВВЕДЕНИЕ

Существующие теоретические разработки эволюции разрушения конструкционных материалов [1—6], в том числе континуальная теория потери сплошности эффективного сечения и поврежденности материала Качанова—Работнова [7, 8] или концепция сдвиговой устойчивости материалов на микро, мезо- и макромасштабном уровне академика В.Е. Панина [9, 10], не могут в полной мере учесть всех особенностей эксплуатационных режимов, предистории нагружения, влияния остаточных напряжений и деградации свойств материала на процесс накопления повреждений и разрушения конструкций. Они дают лишь ориентировочные прогностические тренды эволюции разрушения материала в критически нагруженных эффективных сечениях конструкции, не позволяя оценить реальный уровень несущей способности в режиме нагружения или эксплуатации изделия. Конструкторско-проектные и прогностические расчеты, выполняемые на основании теоретических зависимостей классической механики деформирования и разрушения твердого тела с применением численных методов и экспериментальных данных, предполагают введение запасов прочности, учитывающих влияние рассмотренных выше факторов на прочностные характеристики конструкций в критически нагруженных зонах от действия эксплуатационных нагрузок. Однако при действии длительных статических и циклических нагрузок преимущественно в зонах концентраторов развиваются сложные процессы, связанные с накоплением повреждений структурных связей и деградацией свойств материала, что существенно усложняет задачу корректного научно-обоснованного определения запасов прочности и живучести изделия.

Поэтому возникает необходимость в создании концепции, отражающей текущее состояние поврежденности несущих элементов конструкций, а также методологии оценки фактического состояния несущей способности в процессе испытания и эксплуатации изделий. Применительно к изделиям из композитных материалов с использованием АЭ-диагностики была разработана концепция и методология ее реализации [11], позволяющая на разных стадиях эксплуатации или испытания высоконагруженных элементов конструкций выявлять наиболее опасные развивающиеся концентраторы напряжений, осуществлять мониторинг кинетики повреждений в этих зонах и оценивать фактический уровень несущей способности изделий.

1. Структурно-феноменологическая концепция и методология оценки несущей способности изделий

Структурно-феноменологическая концепция (СФК) [11—13] основана на гипотезе соответствия энергии генерируемых импульсов размеру поверхности разрушаемой структурной связи конструкционного материала [14—21]. Представленная на рис. 1 модель СФК отражает эволюцию весового содержания повреждений (d_i/d_Σ) в конструкционном материале на микро- (d_H), мезо- (d_C) и макроуровне (d_B) в процессе повышения нагрузки (P) относительно критического уровня (P_k) разрушения изделия.

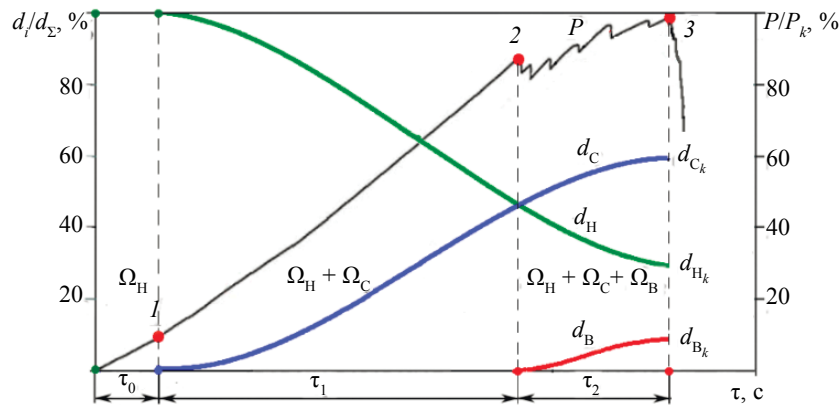


Рис. 1. Кинетика изменения весового содержания повреждений (d_i/d_Σ) в материале изделия на микро- (d_H), мезо- (d_C) и макроуровне (d_B) в режиме повышения нагрузки (P) относительно критического уровня (P_k).

В течение начальной стадии τ_0 нагружения в материале изделия возникают только рассеянные микроповреждения, поверхность разрушения которых по результатам микроскопических исследований образцов однонаправленного ламината при растяжении не превышает $\Omega_H < 100$ мкм² [12], а их весовое содержание составляет $d_H = 100$ %. При повышении нагрузки или числа циклов нагружения на стадии τ_1 в результате эволюции локальные микроповреждения достигают мезомасштабного уровня $\Omega_C = 100—1000$ мкм², что сопровождается синхронным снижением параметра d_H и ростом параметра d_C . На стадии τ_2 локальные мезоповреждения возрастают до макромасштабного уровня $\Omega_B > 1000$ мкм², вследствие чего происходит дальнейшее снижение весового содержания микроповреждений — параметра d_H и рост мезо- и макроразрушений — параметров d_C и d_B , которые при достижении пороговых значений d_{Ck} и d_{Bk} вызовут разрушение изделия.

Основой научно-методической концепции безопасной эксплуатации конструкции является ее несущая способность $B(\tau)$, характеризующая соотношение текущего уровня нагрузки, деформации, длительности, температуры и других параметров к критической величине, приводящей конструкцию в предельное состояние [1]. Параметр несущей способности в СФК представлен в следующей интерпретации:

$$B(\tau) = 1 - \bar{d}(\tau), \quad (1)$$

где $\bar{d}(\tau)$ — текущее содержание повреждений в структуре материала изделия относительно предельного (d_k), регистрируемого при разрушении.

Контролируя в процессе нагружения изделия перераспределение весового содержания микро-, мезо- и макроразрушений в структуре материала, суммарный уровень которых неизменно составляет $d_\Sigma = d_H + d_C + d_B = 100$ %, и сопоставляя их с пороговыми значениями d_{Hk} , d_{Ck} и d_{Bk} , можно осуществлять мониторинг несущей способности изделия в режиме его нагружения [11—13]. Для мониторинга весового содержания повреждений структурных связей материала на микро-, мезо- и макромасштабном уровне предложено регистрируемые в ходе АЭ-диагностики локационные импульсы, соответствующие этим разрушениям, объединять в кластеры нижнего (Н), среднего (С) и верхнего (В) энергетического уровня [11]. На основании экспериментальных данных, полученных

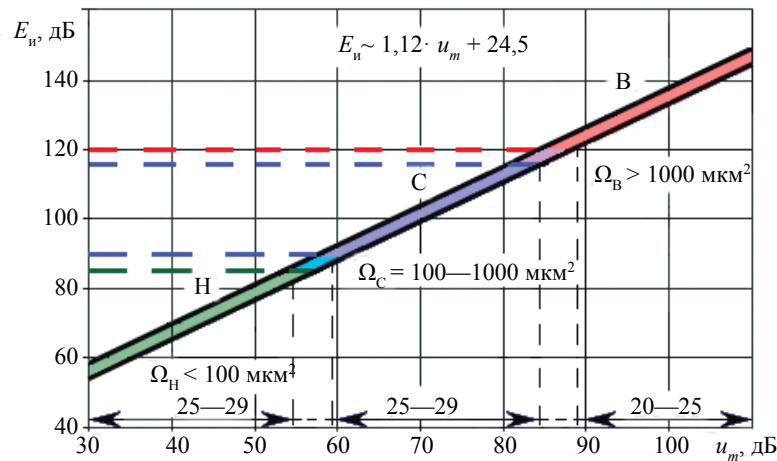


Рис. 2. Границы кластеров нижнего (Н), среднего (С) и верхнего (В) энергетического уровня импульсов АЭ, установленные в поле параметров относительной энергии (E_u) и амплитуды (u_m), соответствующие микро- (Ω_H), мезо- (Ω_C) и макро-разрушениям (Ω_B).

при испытаниях на разрыв армирующих волокон [12], а также разрушении однонаправленного ламината [13], на рис. 2 в поле параметров относительной энергии (E_u) и амплитуды (u_m) сигналов АЭ установлены границы энергетических кластеров Н, С и В, соответствующие микро-, мезо- и макро-разрушениям в пакете ПКМ. Штриховыми линиями на графике отмечены переходные зоны, в которых значения энергии регистрируемых импульсов могут быть отнесены к поверхностям разрушения Ω_i смежных энергетических кластеров, зависящих от уровня порога дискриминации и полосы пропускания сигналов.

В табл. 1 приведены обобщенные результаты исследований, включающие поверхности разрушения (Ω) структурных связей композитного материала на микро-, мезо- и макромасштабном уровне, и значения относительной энергии и амплитуды регистрируемых при этом импульсов АЭ.

Таблица 1

Поверхности разрушений (Ω) композитного материала на микро-, мезо- и макромасштабном уровне и соответствующие им значения энергии (E_u) и амплитуды (u_m) локационных импульсов

| Масштаб разрушения | Ω , мкм ² | Параметры регистрируемых импульсов АЭ | |
|--------------------|-----------------------------|---------------------------------------|------------|
| | | E_u , дБ | u_m , дБ |
| Микро | < 100 | < 85 | < 55 |
| Мезо | 100—1000 | 85—115 | 55—85 |
| Макро | >1000 | > 115 | > 85 |

В качестве критериальных параметров для мониторинга весового содержания повреждений на микро-, мезо- и макромасштабном уровне в структуре конструкционного материала предложено использовать следующие характеристики локационных импульсов, контролируемые в процессе АЭ-диагностики:

$N_{\Sigma_n} = N_{\Sigma} \times n_j$ — суммарное количество локационных импульсов, где N_{Σ} — количество зарегистрированных АЭ-событий, n_j — количество каналов в схеме локации (при линейной — $n_j = 2$, при планарной — $n_j \geq 3$);

N_H, N_C, N_B — накопление локационных импульсов в кластерах нижнего, среднего и верхнего энергетического уровня ($N_{\Sigma_n} = N_H + N_C + N_B$);

$W_H = (N_H / N_{\Sigma_n}) \times 100 \%$, $W_C = (N_C / N_{\Sigma_n}) \times 100 \%$, $W_B = (N_B / N_{\Sigma_n}) \times 100 \%$ — весовое содержание локационных импульсов в кластерах нижнего, среднего и верхнего энергетического уровня;

\dot{N}_{Σ_n} — суммарная активность локационных импульсов;

$\dot{N}_H, \dot{N}_C, \dot{N}_B$ — активность локационных импульсов в кластерах нижнего, среднего и верхнего энергетического уровня ($\dot{N}_{\Sigma_n} = \dot{N}_H + \dot{N}_C + \dot{N}_B$).

На основании установленного соответствия между кинетикой разрушения структурных связей в конструкционном материале на микро-, мезо- и макроуровневом уровне и регистрируемыми при этом импульсами АЭ, их энергетическими и темпоральными параметрами, разработан универсальный алгоритм разделения локационных импульсов в поле дескрипторов относительной энергии (E_n) и усредненной частоте выбросов (N_n/τ_n) на H, C, B кластеры с ежесекундным мониторингом изменения критериальных параметров \dot{N}_i и W_i [11—13]. Алгоритм регистрации АЭ-данных включает многоуровневую фильтрацию сигналов по полосе пропускания (Δf), амплитуде ($u_m > u_{th}$), длительности (τ_n) выбросам (N_n), их градиацию по уровню относительной энергии, разделение на энергетические кластеры в поле параметров $E_n - N_n/\tau_n$, визуализацию динамики параметров \dot{N}_i и W_i на дисплее компьютера системы сбора и обработки АЭ-данных в режиме нагружения исследуемого изделия.

Используя установленные закономерности между эволюцией разрушения структурных связей композитного материала и динамикой изменения весового содержания локационных импульсов в энергетических кластерах (см. рис. 1), на рис. 3а представлены графики параметров W_i , отражающие кинетику микро-, мезо-, макроповреждений, а на рис. 3б — снижение несущей способности изделия в режиме нагружения.

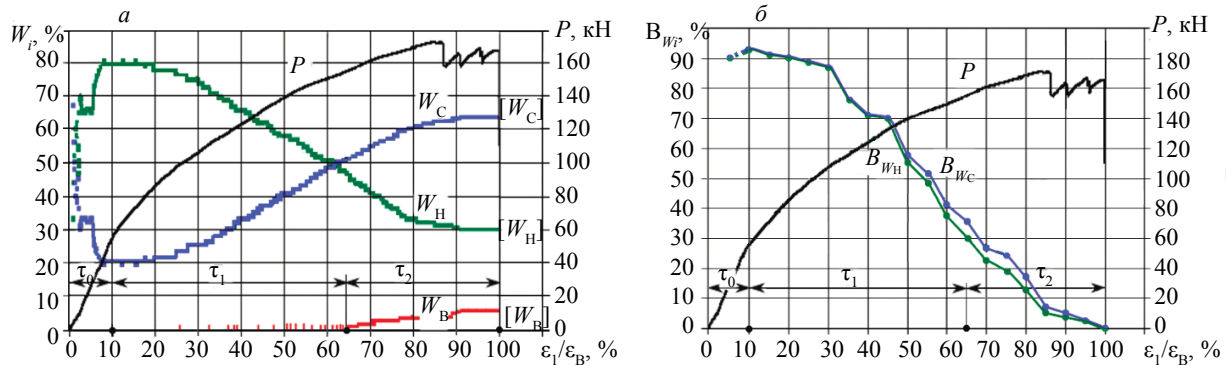


Рис. 3. Зависимости изменения весового содержания локационных импульсов АЭ (W_i) в H, C, B кластерах от уровня соотношения $j = \epsilon_1/\epsilon_B$ (а), графики изменения несущей способности B_{WH} и B_{WC} (б), построенные по формулам (3) и (4) сопоставлением текущих и пороговых значений параметров W_H и W_C в процессе нагружения изделия.

Как следует из динамики изменения параметров W_i на рис. 3а, в качестве наиболее информативных, отражающих перераспределение повреждений в структуре конструкционного материала, могут быть использованы параметры весового содержания локационных импульсов в нижнем (W_H) и среднем (W_C) энергетических кластерах. Причем, если параметр W_H может быть использован для оценки суммарного уровня мезо- и макроповреждений: $(d_C + d_B) = 100 - d_H$, то W_C отражает изменение только мезоповреждений. Сопоставление регистрируемого изменения этих параметров относительно пороговых значений ($100 - [W_H]$ и $[W_C]$), регистрируемых при разрушении материала, дает возможность вычислять фактический уровень несущей способности (B_W) испытываемых изделий в процессе их нагружения [11]. Так как уровень весового содержания импульсов в энергетических кластерах на стадии τ_0 — рассеянного накопления повреждений, как правило, отличается от условно принятого в модели СФК (см. рис. 1) и составляющего 100 % для W_H , то для оценки параметров B_{WH} и B_{WC} , характеризующих несущую способность изделий вводятся поправочные коэффициенты K_H и K_C , с учетом которых формулы для их подсчета примут следующий вид:

$$(B_{WH})_j = K_H \frac{W_{Hj} - [W_H]}{100 - [W_H]}; \quad (B_{WC})_j = K_C \frac{[W_C] - W_{Cj}}{[W_C]}. \quad (2)$$

Величина коэффициентов K_H и K_C зависит от начальной поврежденности материала, т.е. весового содержания импульсов в энергетических кластерах на стадии τ_0 , и вычисляется с учетом экстремальных значений параметров (W_{Hmax} и $(W_C)_{min}$), регистрируемых при переходе от рассеянного к локальному накоплению повреждений (см. рис. 3а):

$$K_H = \frac{100 - [W_H]}{(W_H)_{\max} - [W_H]}; \quad K_C = \frac{[W_C]}{[W_C] - (W_C)_{\min}}. \quad (3)$$

Как показали тестовые испытания образцов и изделий [22—24], при упругих деформациях на стадии рассеянного накопления повреждений наряду с микроразрушениями регистрируются разрушения и на других структурных уровнях. Причем при переходе на стадию локального накопления повреждений в зонах концентраторов весовое содержание локационных импульсов в нижнем и среднем кластерах достигает экстремальных значений: $W_H = 75\text{—}80\%$ и $W_C + W_B = 20\text{—}25\%$ (см. рис. 3а). Следовательно, начальный уровень поврежденности при переходе на стадию τ_1 может быть принят соответствующим 100 % несущей способности изделий, если весовое содержание регистрируемых при этом импульсов составляет: $(W_H)_{\max} \geq 80\%$, $(W_C + W_B)_{\min} \leq 20\%$.

С учетом поправочных коэффициентов текущий уровень несущей способности B_{W_i} , вычисляемый по параметрам W_H и W_C , $[W_H]$ и $[W_C]$, может быть определен из (2):

$$B_{W_H} = \frac{W_H - [W_H]}{(W_H)_{\max} - [W_H]} = \frac{W_H - [W_H]}{80 - [W_H]} \cdot 100\%, \quad (4)$$

$$B_{W_C} = \frac{[W_C] - W_C}{[W_C] - (W_C)_{\min}} = \frac{[W_C] - W_C}{[W_C] - 20} \cdot 100\%. \quad (5)$$

Как следует из представленных на рис. 3б графиков, значения несущей способности B_{W_H} и B_{W_C} , вычисляемые с использованием взаимосвязанных параметров W_H и W_C , $[W_H]$ и $[W_C]$ по формулам (4) и (5), могут несколько отличаться, что обусловлено влиянием параметра W_B , величина которого не учитывается при подсчете B_{W_C} [11].

Уровень возможной погрешности оценки значений B_{W_H} и B_{W_C} подчитывают на основании разброса параметров W_i и $[W_i]$:

$$\eta_{B_i} = \sqrt{(\eta_{W_i})^2 + (\eta_{[W_i]})^2}, \quad (6)$$

где η_{W_i} и $\eta_{[W_i]}$ — экспериментально устанавливаемые значения разброса параметров W_i и $[W_i]$ в доверительном интервале $\pm 2S$.

Целью рассматриваемых исследований является адаптация разработанной для конструкций из композитных материалов концепции и методологии мониторинга кинетики повреждений и оценки несущей способности в режиме их нагружения, применительно к изделиям из конструкционных сталей. Задача исследования заключалась в тестировании выбранных границ нижнего, среднего и верхнего энергетических кластеров, формируемых локационными импульсами в поле параметров относительной энергии и усредненной частоты выбросов, обеспечивающих достоверную АЭ-диагностику весового содержания микро, мезо и макроповреждений в структуре конструкционных сталей.

2. ОБЪЕКТ ИССЛЕДОВАНИЯ, ИСПЫТАТЕЛЬНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ И СРЕДСТВА ДИАГНОСТИКИ

Тестирование методологии мониторинга кинетики повреждений на разных масштабных уровнях с оценкой текущего значения несущей способности осуществлялось в ходе стендовых испытания образцов из конструкционных сталей Ст3, Ст20, 16ГС, 08Х18Н10Т на разрыв, в том числе при наличии концентраторов в виде отверстий и сварных швов [22—24]. Ниже рассмотрено тестирование методологии при испытаниях на трещиностойкость партии образцов с центральным боковым надрезом (БН) из стали 08Х18Н10Т. Всего было подготовлено к испытаниям 12 образцов с габаритными размерами $300 \times 20 \times 12$ мм, шесть из которых (БН-1, ..., БН-6) были испытаны при ступенчатом приложении растягивающей нагрузки, а остальные шесть (БН-7, ..., БН-12) при циклическом. На рис. 4 показано испытание на разрыв образца серии БН в захватах установки «Shimadzu» (Япония). Мониторинг накопления повреждений в зоне надреза осуществлялся с применением преобразователей R15α—AST (фирмы «Mistras», США), системы A-Line 32D (ООО «Интерюнис-ИТ», РФ) и цифрового микроскопа «Olympus» (Япония), нагружающей установки Shimadzu.

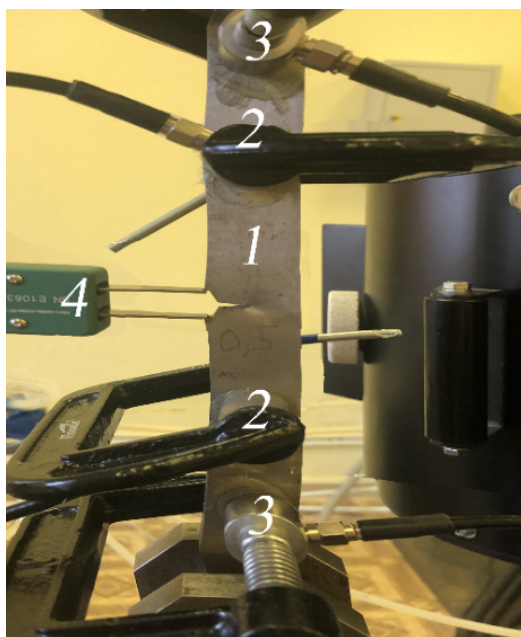


Рис. 4. Испытания на разрыв стального образца с боковым надрезом с применением АЭ-диагностики и видеосъемки: 1 — образец; 2 — рабочие ПАЭ; 3 — сторожевые ПАЭ; 4 — датчик раскрытия трещины.

3. АЭ-ДИАГНОСТИКА СТАЛЬНЫХ ОБРАЗЦОВ В УСЛОВИЯХ СТУПЕНЧАТОГО ПОВЫШЕНИЯ НАГРУЗКИ

При испытаниях образцов БН-1, ..., БН-6 на трещиностойкость их нагружение осуществлялось ступенчато в ручном режиме с выдержкой на полках не менее 5 с. На рис. 5а показано измерение подрастания трещины (ΔL) и ее раскрытия (Δd) с применением датчика Epsilon 3541 COD (компания «Epsilon», США) от действия растягивающей нагрузки, а на рис. 5б приведены графики изменения величины раскрытия трещины (Δd) и уровня прикладываемой нагрузки (P) в ходе испытания образца БН-5.

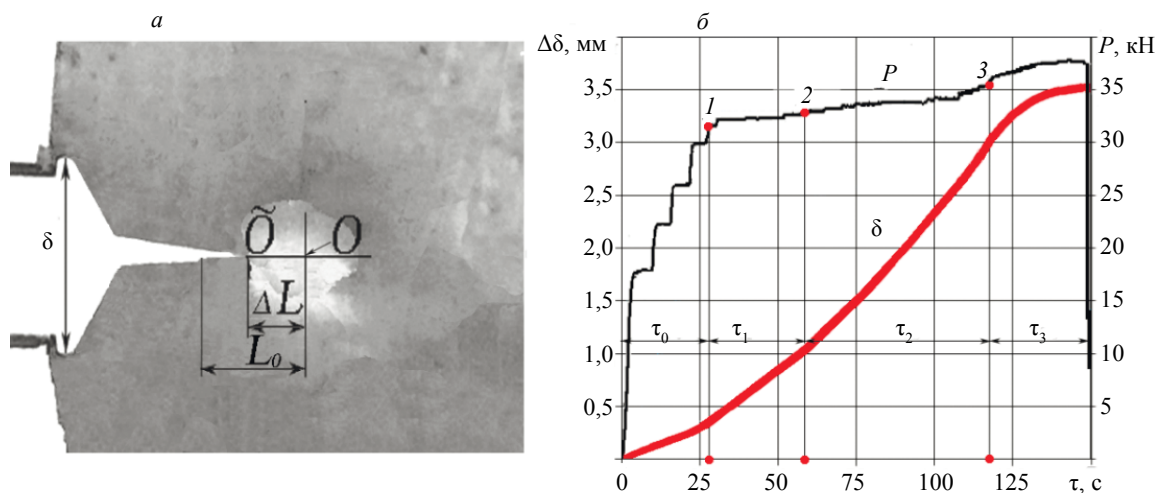


Рис. 5. Измерение раскрытия ($\delta - \delta_0$) и подрастания трещины ($L_0 - \Delta L$) в зоне надреза (а), графики изменения раскрытия трещины ($\Delta \delta$) и уровня прикладываемой нагрузки (P) в процессе деформирования образца БН-5 (б); δ_0 и L_0 — начальные размеры.

В процессе АЭ-диагностики образцов использовали следующие настройки аппаратуры: порог дискриминации сигналов $u_{th}=40$ дБ, полоса пропускания фильтров $\Delta f = 100\text{—}300$ кГц, SCETO — 200 мкс. Как показали проведенные экспериментальные исследования, в том числе рассмотренные в публикациях [22—24], в связи с более высокой пластичностью конструкционных сталей по сравнению с ПКМ, энергия, выделяемая при разрушении их структурных связей на одном и том же масштабном уровне примерно на 5—15 дБ ниже, чем в ПКМ. Для разделения локационных импульсов на энергетические кластеры в поле дескрипторов $E_{ii} - N_{ii}/\tau_{ii}$, на основании проведенных тестовых экспериментов применительно к выбранным аппаратурным настройкам были установлены следующие интервалы параметров: $E_{ii} < 80$ дБ, $N_{ii}/\tau_{ii} = 20\text{—}200$ кГц — для Н кластера; $E_{ii} = 80\text{—}100$ дБ, $N_{ii}/\tau_{ii} = 40\text{—}180$ кГц — для С кластера; $E_{ii} > 100$ дБ, $N_{ii}/\tau_{ii} = 60\text{—}160$ кГц — для В кластера.

На рис. 6 представлены результаты АЭ-диагностики, полученные при испытаниях образца с боковым надрезом серии БН-5 на трещиностойкость.

Потеря несущей способности образца произошла на 148 с эксперимента при уровне растягивающей нагрузки $P_B = 35,6$ кН и размере раскрытия трещины $\delta = 3,5$ мм. Как следует из графика ба, наибольшая плотность индикаций источников АЭ, достигающая 100 ед/мм, регистрировалась на расстоянии ± 10 мм от места надреза образца. Всего в ходе испытания было зарегистрировано $(N_{S})_L = 1360$ ед. индикаций источников АЭ. Анализ процессов, представленных на графиках бб—е, свидетельствует о том, что накопление повреждений в структуре конструкционного материала может быть разделено на следующие характерные стадии: $\tau_0 = 0\text{—}29$ с, $\tau_1 = 30\text{—}60$ с, $\tau_2 = 61\text{—}115$ с, $\tau_3 = 116\text{—}148$ с.

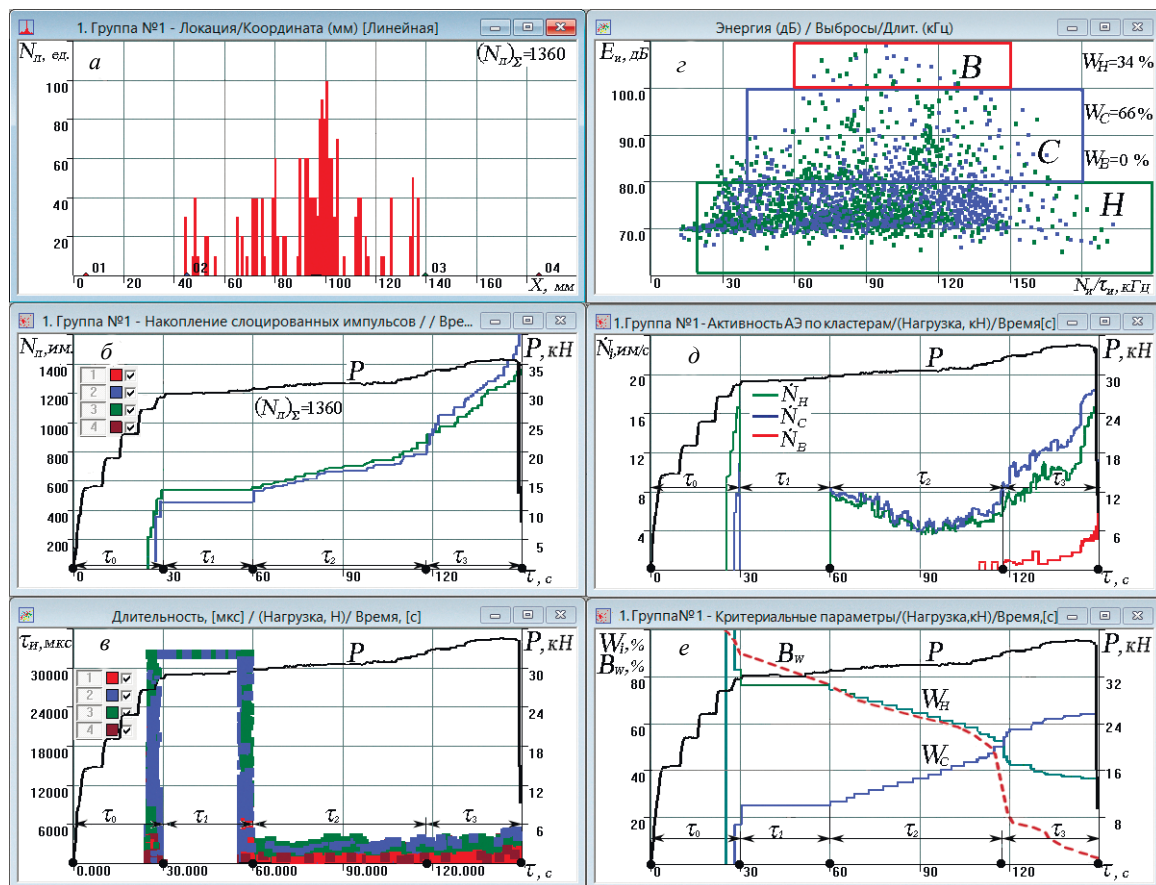


Рис. 6. Результаты АЭ-диагностики при испытаниях образца БН-5 на трещиностойкость: графики координатной локации источников АЭ (а); накопления локационных импульсов каналами АЭ-системы (б) и их длительности (в); распределения сигналов в энергетических кластерах (г) на момент завершения испытаний (148 с); динамики активности АЭ (д) и весового содержания (е) сигналов в Н, С, В кластерах.

На стадии τ_0 при повышении уровня нагрузки до 30 кН, как видно из рис. 5б, материал в области надреза деформировался упруго, после чего на стадии τ_1 , начиная с 30 с испытания (графики

6б, 6д) при переходе материала в упругопластическое состояние отмечалась непрерывная эмиссия, когда из-за высокой плотности сигналы, слипаясь, образовывали непрерывный поток осцилляций.

После 60 с нагружения на стадии τ_2 непрерывная эмиссия сменилась дискретной, что сопровождалось восстановлением динамики регистрируемых параметров: накоплением импульсов каналами аппаратуры (график 6б), снижением длительности импульсов $\tau_{\text{и}} \leq 5000$ мкс (график 6в), возрастанием активности АЭ в Н и С кластерах до 8—10 им/с (график 6д), сопровождаемое падением параметра $W_{\text{Н}}$ с 78 до 57 % и синхронным ростом параметра $W_{\text{С}}$ от 22 до 43 %, что отражает уменьшение несущей способности B_{W} с 78 до 50 % (график 6е).

На стадии τ_3 произошло резкое повышение активности АЭ не только в кластерах Н и С, но и в кластере В, достигающее соответственно до $\dot{N}_{\text{Н}}=16$ им/с, $\dot{N}_{\text{С}}=18$ им/с и $\dot{N}_{\text{В}}=6$ им/с, сопровождаемое изменением весового содержания локационных импульсов. В период с 116 по 148 с испытания образца, параметр $W_{\text{Н}}$ последовательно снижался с 54 до 37 %, а параметр $W_{\text{С}}$ синхронно возрастал от 46 до 63 % (потери образцом на 148 с испытания несущей способности), $W_{\text{В}}$ был ниже 1 %.

На графике 6е штриховой линией показано изменение уровня несущей способности B_{W} образца БН-5 в процессе его растяжения. Линия B_{W} построена с использованием расчетно-экспериментальной зависимости (4), сопоставлением текущих и пороговых значений весового содержания локационных импульсов в Н кластере.

Для проведения цифровой микроскопии структуры образца в зоне надреза его поверхность в области контрольной точки (светлое пятно вблизи т. О на рис. 5а) подвергалась предварительному полированию и электрохимическому травлению. Фрагменты структуры материала, представленные на рис. 7, зарегистрированные в т. О при размере раскрытия берегов трещины $d = 0,25, 1,75, 3,0, 3,25$ мм и уровне несущей способности $B_{\text{W}} = 100, 60, 40, 20$ %, наглядно демонстрируют эволюцию разрушения аустенитной стали 08X18H10T в зоне локальной пластической деформации.

Так, если на снимке 7а отсутствует какие-либо заметные признаки фрагментации структуры материала, то на следующих снимках 7б—г они явно просматриваются. На снимке 7б видны образующиеся полосы скольжения и четко различимые блоки и зерна процесса фрагментации структуры материала. Снимки 7в и 7г отображают эволюцию структуры материала на стадии предразрушения аустенитной стали, характеризуемую дальнейшей ее фрагментацией, образованием и развитием микротрещин по границам блоков и зерен, их слиянием и возникновением мезо- и макромасштабных трещин.

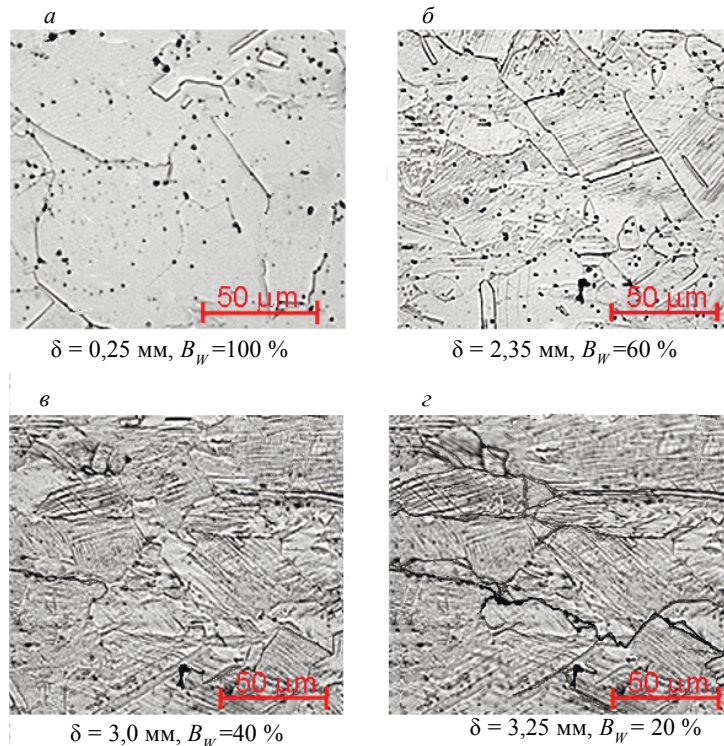


Рис. 7. Эволюция структуры аустенитной стали 08X18H10T, зарегистрированная в процессе деформирования образца при размере раскрытия трещины $\delta = 0,25, 1,75, 3,0, 3,45$ мм и уровне несущей способности $B_{\text{W}} = 100, 60, 40, 20$ %.

Таблица 2

Результаты испытаний образцов БН-1, ..., БН-6

| № образца | Δt , с | P_B , кН | ε_B , % | $(N_{\Sigma})_{л}$, ед. | $[W_H]$, % | $[W_C]$, % |
|------------------------|----------------|------------|---------------------|--------------------------|-------------|-------------|
| БН-1 | 112 | 34,7 | 6,22 | 1031 | 37 | 63 |
| БН-2 | 131 | 35,1 | 6,24 | 1725 | 38 | 62 |
| БН-3 | 105 | 34,2 | 5,72 | 789 | 36 | 64 |
| БН-4 | 156 | 36,1 | 6,78 | 2633 | 35 | 65 |
| БН-5 | 148 | 35,6 | 6,32 | 1360 | 36 | 64 |
| БН-6 | 125 | 34,4 | 6,18 | 988 | 37 | 63 |
| $\bar{p}=\Sigma a_i/n$ | 130 | 35,0 | 6,23 | 1390 | 36 | 64 |
| S | 18 | 0,73 | 0,34 | 685 | 3,51 | 3,51 |
| $\eta=2S/\bar{a}$, % | 28 | 4,17 | 11,05 | 49,6 | 18,96 | 9,73 |

В табл. 2 приведены результаты испытания образцов БН-1, ..., БН-6 на трещиностойкость, зарегистрированные в момент потери несущей способности, которые включают: длительность нагружения (Δt), предельную нагрузку (P_B) и деформацию (ε_B), количество накопленных АЭ-событий ($N_{\Sigma,л}$), пороговые значения параметров $[W_H]$ и $[W_C]$, а также результаты статистической обработки этих параметров для испытанных образцов (среднее выборочное значение (\bar{p}), среднее квадратичное отклонение (S) и разброс (η), определенный в интервале $\pm 2S$).

Как следует из табл. 2, при достаточно низком уровне разброса предельных нагрузок и деформаций, не превышающем в выборках 4 и 11 % соответственно, величина разброса $\eta_{(N_{\Sigma,л})}$ накопленных АЭ-событий достигала 50 %. Разброс весового содержания импульсов АЭ в кластерах Н и С был заметно ниже и составлял $\eta_{W_H} = 19\%$, $\eta_{W_C} = 10\%$. По результатам статистической обработки параметров W_H и W_C , зарегистрированным при испытаниях образцов БН-1, ..., БН-6 при повышении соотношения $j = \varepsilon_1/\varepsilon_B$ от 10 до 100 %, на рис. 8 построены графики изменения средних выборочных значений параметров (\bar{W}_H) и (\bar{W}_C) и значений их разброса η_{W_i} в интервале $\pm 2S$ (а), а также уровня несущей способности (B_W) и оценки погрешности η_{B_W} (б).

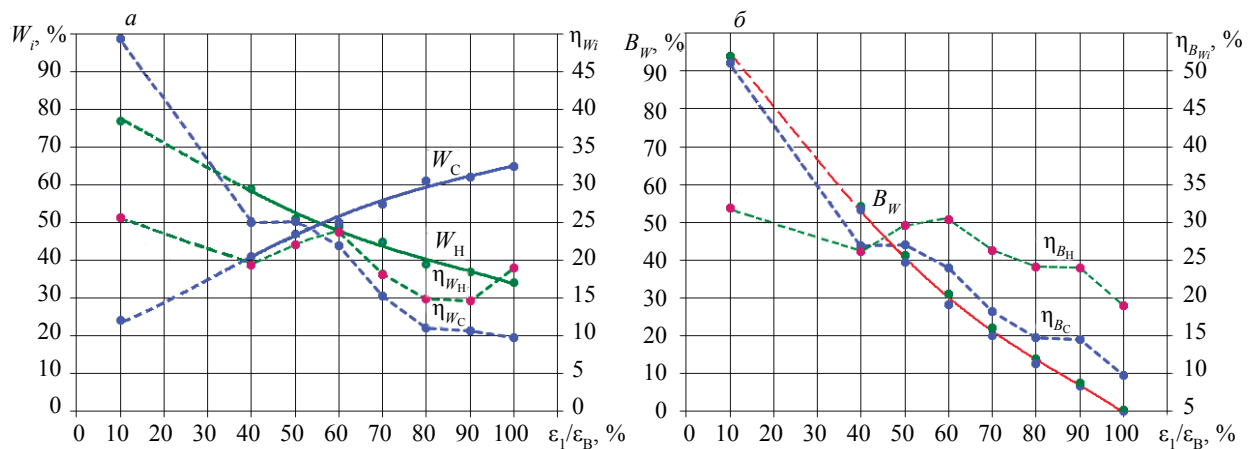


Рис. 8. Графики изменения средних выборочных значений параметров (\bar{W}_i) в Н и С кластерах и уровни их разброса η_{W_i} в интервале $\pm 2S$ (а), используемые для контроля несущей способности (B_W) образцов БН-1, ..., БН-6 и оценки погрешности η_{B_W} (б) при росте соотношения j от 10 до 100 %.

Как следует из рис. 8а, при увеличении соотношения j в интервале от 0,1 до 0,6 наиболее информативным является параметр W_H , средний уровень которого в анализируемых выборках изменялся от 78 до 49 %. При этом величина разброса этого параметра в интервале $2S$ находилась в пределах $\eta_{W_H} = 15\text{—}26\%$. В интервале $j = 0,6\text{—}1,0$ наиболее информативным становится параметр W_C , среднее выборочное значение которого возросло с 51 до 66 %, а величина разброса снижалась

с $(\eta_{W_C})_{0,6} = 22\%$ до $(\eta_{W_C})_{1,0} = 10\%$. На рис. 8б по формуле (6) с использованием значений разброса $(\eta_{W_H})_j$ и $(\eta_{W_C})_j$, параметров W_H и W_C построен график возможной погрешности (η_{B_W}) оценки снижения среднего уровня несущей способности $(\bar{B}_W >)$ образцов БН-1, ..., БН-6 при росте j от 10 до 100 %.

4. АЭ ДИАГНОСТИКА СТАЛЬНЫХ ОБРАЗЦОВ В УСЛОВИЯХ ЦИКЛИЧЕСКОГО НАГРУЖЕНИЯ

Усталостные испытания образцов БН-7, ..., БН-12 проводились при максимальной амплитуде отнулевого цикла $P_a = 7$ кН, составляющей 20 % от предельной растягивающей нагрузке $P_B = 35$ кН при статическом нагружении (см. табл. 2), и частоте приложения нагрузки $f = 4$ Гц. По результатам предварительных испытаний настройки АЭ-системы A-Line 32D были приняты такими же, как и при ступенчатом нагружении образцов БН-1, ..., БН-6.

Ниже рассмотрены усталостные испытания образца БН-7, которые продолжались в течение 18660 циклов нагружения, когда подрастающая трещина в зоне надреза перешла середину образца (т. О на рис. 5), что сопровождалось падением несущей способности ниже 10 % и снижением максимального уровня амплитуды P_a в циклах нагружения.

На графиках рис. 9 приведены результаты АЭ-диагностики, полученные в ходе усталостных испытаний образца БН-7.

Всего в ходе АЭ-диагностики в условиях циклического нагружения образца БН-7 было зарегистрировано $N_{\Sigma л} = 66074$ индикации источников АЭ. Наибольшая их плотность, достигающая 9500 ед/мм, регистрировалась в зоне бокового надреза (график 9а). Как следует из анализа графиков на рис. 9, процесс АЭ диагностики образца БН-7 в ходе циклического нагружения, отражающий накопление повреждений в его структуре, может быть разбит на следующие характерные стадии: $\tau_0 = 0-440$ с, $\tau_1 = 441-1055$ с, $\tau_2 = 1056-2563$ с, $\tau_3 = 2564-3861$ с, $\tau_4 = 3862-4156$ с, $\tau_5 = 4157-4665$ с.

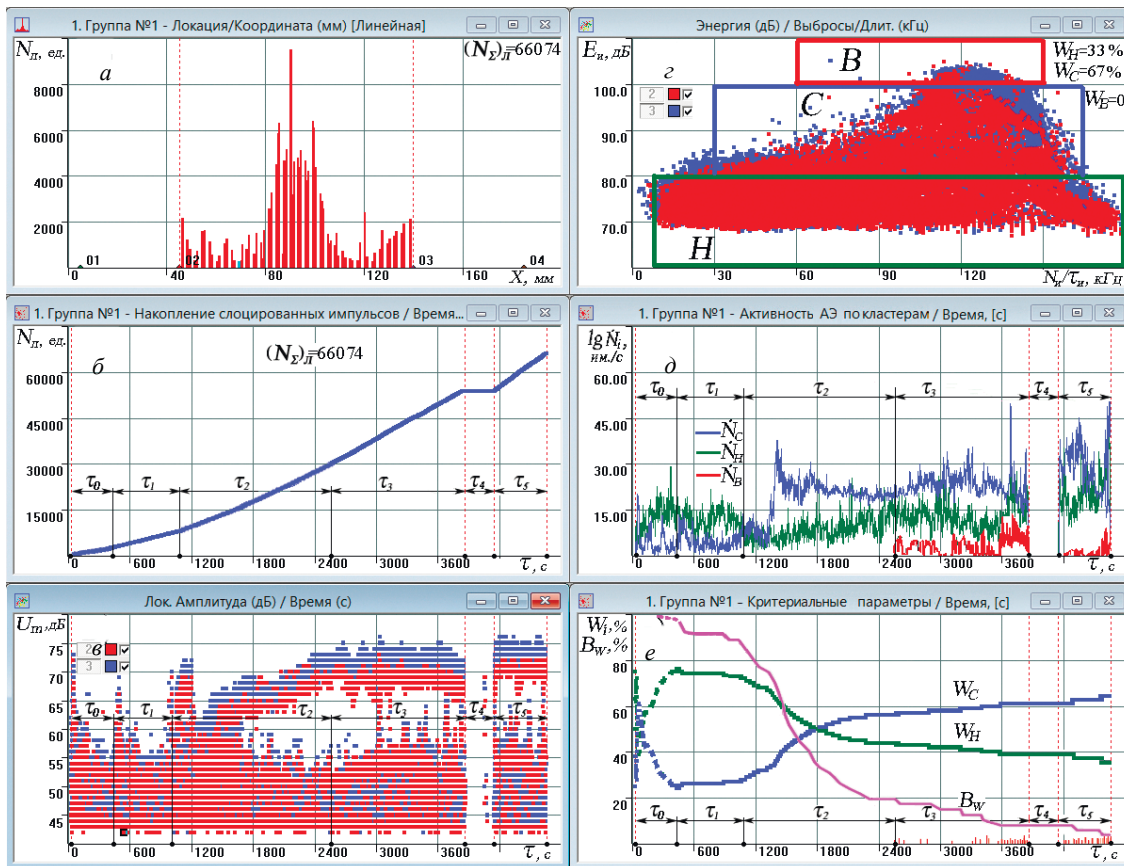


Рис. 9. Результаты АЭ-диагностики, зарегистрированные при усталостных испытаниях образца БН-7 с максимальной амплитудой отнулевого цикла $P_a = 7$ кН и частотой приложения нагрузки $f = 4$ Гц. Приведены графики координатной локации источников АЭ (а); динамики накопления АЭ-событий (б); максимальной амплитуды (в) и распределения локационных импульсов в энергетических кластерах (г); их активности (д) и весового содержания в H, C, B кластерах (е).

В начальный период τ_0 циклического нагружения активная регистрация локационных импульсов происходила непосредственно в зоне надреза, амплитуда которых достигала $u_m = 72$ дБ (см. график 9в). До 440 с испытания наибольшая активность локационных импульсов $\dot{N}_H = 30$ им/с отмечалась в кластере Н, тогда как активность АЭ в кластере С не превышала $\dot{N}_C = 5$ им/с (график 9д). Такой характер накопления локационных импульсов отразился на их весовом содержании в энергетических кластерах, достигающих, как видно из графика 9е, своих экстремальных значений: $W_H = 78\%$, $W_C = 22\%$. При этом начальный уровень несущей способности образца, вычисленный по параметрам W_H и $[W_H]$ согласно формуле (4), составлял порядка $B_w = 98\%$.

На стадии τ_1 максимальная амплитуда локационных импульсов несколько снизилась до $u_m = 60$ — 67 дБ (см. график 9в), а активность их регистрации в кластерах Н и С выровнялась и составила: $\dot{N}_H = 10$ — 15 им/с и $\dot{N}_C = 5$ — 12 им/с (график 9д). Весовое содержание локационных импульсов в период τ_1 сохранялось достаточно стабильным на уровне $W_H = 73$ — 75% , $W_C = 25$ — 28% (см. график 9е). При этом текущий уровень несущей способности образца в зоне концентратора к 1100 с испытания снизился до $B_w = 90\%$.

Стадия τ_2 характеризуется резким возрастанием активности локационных импульсов в среднем энергетическом кластере, которая в период 1350—1400 с испытания повышалась до $\dot{N}_C = 35$ — 40 им/с, тогда как уровень параметра \dot{N}_H не превышал 10 им/с (см. график 9д). Такое резкое изменение активности АЭ в энергетических кластерах отражалось и на динамике весового содержания локационных импульсов. В период τ_2 происходило снижение параметра W_H с 73 до 43 % при синхронном росте W_C от 27 до 57 %, что отразилось на уровне несущей способности B_w , уровень которой упал с 90 до 34 % (см. график 9е). При этом амплитуда регистрируемых импульсов постепенно возрастала от 63 до 73 дБ (см. график 9в).

На стадии τ_3 произошла стабилизация активности и весового содержания локационных импульсов в энергетических кластерах. Накопление импульсов происходило не только в нижнем и среднем кластере, но и верхнем с уровнем $E_H > 100$ дБ (см. график 9д). Если значение параметра \dot{N}_H колебалось в пределах 15—25 им/с, а параметра \dot{N}_C от 20 до 50 им/с, то уровень активности \dot{N}_B до 3600 с испытания не превышал 5 им/с, после чего повышался до 10—15 им/с. При этом параметр W_H снижался с 43 до 39 %, W_C возрастал от 57 до 61 %, W_B был ниже 1 % (см. график 9е). Уровень несущей способности образца БН-7 в период τ_3 упал с 34 до 18 %. Максимальная амплитуда локационных импульсов в этот период достигала $u_m = 75$ дБ и сохранялась на этом уровне до 3650 с испытания, после чего начала заметно снижаться (см. график 9в). Такое снижение происходило на фоне снижения уровня максимальной амплитуды в циклах нагружения.

На стадии τ_4 были заменены силовые штифты оправок в захватах образца, из-за износа которых снижался заданный уровень нагрузки.

На стадии τ_5 отмечался рост значений амплитуды регистрируемых импульсов, максимальный уровень которой достигал $u_m = 75$ — 77 дБ (см. график 9в). Однако, после 18400 циклов нагружения (4600 с испытания) вследствие критическим ростом усталостной трещины в зоне бокового надреза и снижения несущей способности образца $B_w < 5\%$, уровень прикладываемой нагрузки стал резко падать. При этом уровень критериальных параметров составлял: $W_H = 37\%$, $W_C = 63\%$ (см. график 9е).

В табл. 3 приведены результаты АЭ-диагностики образцов БН-7, ..., БН-12, полученные в ходе их усталостных испытаний при максимальной амплитуде отнулевого цикла $P_a = 7$ кН и частоте приложения нагрузки $f = 4$ Гц. Результаты включают длительность испытаний (Δt), число циклов нагружения до потери образцами несущей способности $n_B \leq 5\%$, суммарное количество зарегистрированных АЭ-событий (N_{Σ}), пороговые значения параметров $[W_H]$ и $[W_C]$, результаты статистической обработки анализируемых характеристик (p): средних значения (\bar{p}), средних квадратичных отклонений (S) и уровней разброса (η) в интервале $\pm 2S$.

По результатам статистической обработки параметров W_H и W_C , зарегистрированным при испытаниях образцов БН-7, ..., БН-12 при росте соотношения $j = n_j/n_B$ от 10 до 100 %, на рис. 10 построены графики изменения средних выборочных значения параметров (\bar{W}_H) и (\bar{W}_C) и значений их разброса η_{W_i} в интервале $\pm 2S$ (а), а также уровня несущей способности (B_w) и оценки погрешности η_{B_w} (б). Величина погрешности η_{B_w} оценки несущей способности B_w , вычисляемая с применением формулы (6) по уровню разброса параметров ($\eta_{W_H, j \leq 0,6}$, $\eta_{W_C, j > 0,6}$) и их пороговых значений $\eta_{[W_H]}$ и $\eta_{[W_C]}$, определенная по результатам статистической обработки весового содержания локационных импульсов, полученных при циклическом нагружении образцов БН-7, ..., БН-12 в диапазоне $n_j/n_B = 0,1$ — $1,0$, оказалась примерно на 5—10 % больше значений погрешностей, подсчитанных по данным ступенчатого нагружения БН-1, ..., БН-6 в диапазоне $\varepsilon_1/\varepsilon_B = 0,1$ — $1,0$.

Результаты усталостных испытаний образцов БН-7, ..., БН-12

| № образца | Δt , с | n_B , ед. | $(N_{j,p})$, ед. | $[W_H]$, % | $[W_C]$, % |
|-------------------------|----------------|-------------|-------------------|-------------|-------------|
| БН-7 | 4665 | 18420 | 66074 | 37 | 63 |
| БН-8 | 4873 | 19492 | 72278 | 36 | 64 |
| БН-9 | 4944 | 20215 | 86532 | 35 | 65 |
| БН-10 | 5072 | 21374 | 91447 | 34 | 66 |
| БН-11 | 5190 | 21877 | 117659 | 33 | 67 |
| БН-12 | 5332 | 22346 | 126862 | 31 | 69 |
| $\bar{p} = \Sigma p/n$ | 5013 | 20621 | 93475 | 34 | 66 |
| S | 237,50 | 1510,23 | 24298 | 2,16 | 2,16 |
| $\eta = 2S/\bar{p}$, % | 9 | 15 | 52 | 13 | 7 |

Несмотря на различия методик нагружения образцов, тренды изменения средних выборочных значений весового содержания локационных импульсов в Н и С кластерах имели сходную направленность, а их расхождение для соответствующих значений j не превышало границ имеющегося разброса параметров W_H и W_C в интервале $\pm 2S$. Полученные тренды средних выборочных значений параметров W_H и W_C и уровни их разброса в интервале $\pm 2S$ согласуются с результатами, приведенными в [22—24].

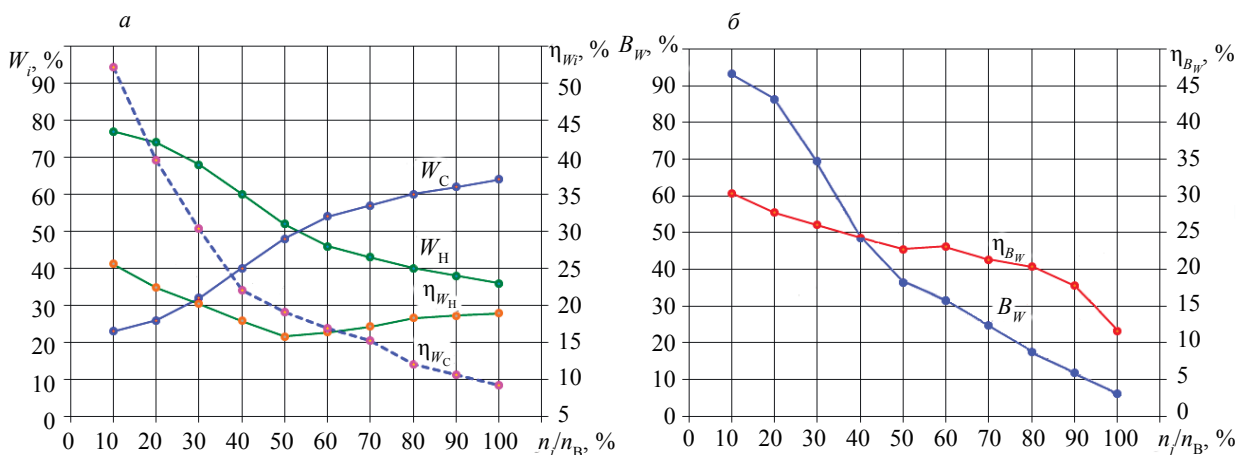


Рис. 10. Графики средних выборочных значений параметров \bar{W}_i кластерах Н, С и уровни их разброса η_{W_i} в интервале $\pm 2S$ (а), используемые для подсчета несущей способности B_W и оценки ее погрешности η_{B_W} (б), при изменении соотношения j от 10 до 100 %.

ВЫВОДЫ

1. Разработанная для композитных материалов методология кинетики накопления повреждений и оценки несущей способности конструкций в режиме их нагружения с применением АЭ-диагностики была протестирована в условиях статических и циклических испытаний стальных образцов от действия растягивающих нагрузок. Наряду с выше рассмотренными экспериментальными исследованиями образцов из стали 08Х18Н10Т, разработанная методология тестировалась при статическом и циклическом нагружении образцов и изделий из конструкционных сталей Ст3, Ст20, 16ГС, в том числе с концентраторами в виде отверстий, надрезов и сварных швов [22—24].

2. Методология кинетики накопления повреждений и оценки несущей способности конструкций с применением АЭ-диагностики была адаптирована применительно к эволюции разрушения стальных изделий. В связи с более высокой пластичностью конструкционных сталей по сравнению

с композитными материалами, упругая энергия ($E_{и}$) импульсов АЭ, генерируемых при разрушении структурных связей на одном и том же масштабном уровне, примерно на 5—15 дБ ниже, чем в ПКМ. Поэтому основной задачей адаптации являлось установление корректных границ относительной энергии ($E_{и}$) для разделения регистрируемых импульсов АЭ на кластеры нижнего, среднего и верхнего энергетического уровня, характерные для микро-, мезо- и макроразрушений структуры конструкционных сталей в процессе их деформирования в зависимости от применяемых настроек аппаратуры, в том числе порога дискриминации сигналов (u_{th}) и полосы пропускания цифровых фильтров (Δf). При проведении АЭ-диагностики в условиях статических и циклических испытаний образцов и изделий из конструкционных сталей при $u_{th} = 40$ дБ и $\Delta f = 30—500$ кГц установлены следующие границы энергетических кластеров: $E_{и} < 80$ дБ — Н кластер, $E_{и} = 80—100$ дБ — С кластер, $E_{и} > 100$ дБ — В кластер.

3. Следует отметить, что процесс АЭ-диагностики стальных изделий сопряжен с особенностями, характерными как для статического, так и циклического нагружения:

при переходе от упругого к упругопластическому деформированию большинства конструкционных сталей в диапазоне деформаций $\epsilon_1 = 0,5—3,0$ % часто возникает непрерывная эмиссия, препятствующая контролю дискретного накопления локационных импульсов, а, следовательно, мониторингу кинетики повреждений и оценки несущей способности конструкций;

в условиях циклического нагружения стальных изделий в процессе развития усталостных трещин наряду с импульсами, генерируемыми структурными разрушениями материала, регистрируют сигналы эффекта Элбера [25—27], вызванного смыканием и размыканием берегов подрастающей трещины, амплитуда которых превышает 65 дБ (см. стадии τ_2 , τ_3 , τ_5 на графике 9в).

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (грант № 20-19-00769).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Махутов Н.А. Безопасность и риски: системные исследования и разработки. Новосибирск: Наука, 2017. 724 с.
2. Москвичев В.В., Махутов Н.А., Шокин Ю.И., Лепихин А.М., Анискович Е.В., Буров А.Е., Гаденин 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.
3. Kukudzhanov V. N. Numerical continuum mechanics /Berlin: De Gruyer, 2012. 425 p.
4. Murakami S. Continuum damage mechanics. A continuum mechanics approach to the analysis of damage and fracture. Dordrecht: Springer, 2012. 402 p.
5. Czichos H. Physics of failure. Handbook of technical diagnostics / Ed. By H. Czichos. Berlin — Heidelberg: Springer —Verlag, 2013. 560 p.
6. Cherepanov G. P. Invariant Integrals in Physics. Switzerland AG: Springer Nature, 2019. 259 p.
7. Качанов Л.М. Основы механики разрушения. М.: Наука, 1974. 312 с
8. Работнов Ю. Н. Ползучесть элементов конструкций. М.: Наука, 2014. 752 с.
9. Структурные уровни пластической деформации и разрушения /Под ред. В.Е. Панина. Новосибирск: Наука, 1990. 255 с.
10. Панин В.Е., Егорушкин В.Е., Панин А.В. Нелинейные волновые процессы в деформируемом твердом теле как многоуровневой иерархически организованной системе // УФН. 2012. Т. 182. № 12. С. 1351—1357.
11. Матвиенко Ю.Г., Махутов Н.А., Васильев И.Е., Чернов Д.В., Иванов В.И., Елизаров С.В. Оценка остаточной прочности композитных изделий на основе структурно-феноменологической концепции повреждений и акустико-эмиссионной диагностики // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2022. № 1. С. 69—81.
12. Махутов Н.А., Матвиенко Ю.Г., Иванов В.И., Васильев И.Е., Чернов Д.В. Исследование на разрыв армирующих волокон и однонаправленного ламината с применением акустической эмиссии // Приборы и техника эксперимента. 2022. № 2. С. 109—117.
13. 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. V. 232. P. 1889—1900.
14. 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. No. 73.
15. Akbari Meysam, Ahmadi Mehdi. The application of acoustic emission technique to plastic deformation of low carbon steel // Physics Procedia. 2019. V. 3. No. 6. P. 795—801.
16. Степанова Л.Н., Батаев В.А., Чернова В.В. Определение связи структуры образцов из углепластика с параметрами сигналов акустической эмиссии при одновременном статическом и тепловом нагружении // Контроль. Диагностика. 2019. № 11. С. 4—13.

17. *Виноградов А.Ю., Мерсон Д.Л.* Природа акустической эмиссии при деформационных процессах в металлических материалах // *Физика низких температур*. 2018. Т. 44. № 9. С. 1186—1195.
 18. *Botvina L.R., Tyutin M.R., Petersen T.B., Levin V.P., Soldatenkov A.P., Prosvirnin D.V.* Residual Strength, Microhardness, and Acoustic Properties of Low-Carbon Steel after Cyclic Loading // *J. Machinery Manufacture and Reliability*. 2018. V. 47. No. 6. P. 516—524.
 19. *Kietov V., Henschel S., Krüger L.* Study of dynamic crack formation in nodular cast iron using the acoustic emission technique // *Engineering Fracture Mechanics*. 2018. V. 188. No. 1. P. 58—69.
 20. *Бигус Г. А., Даниев Ю. Ф., Быстрова Н. А., Галкин Д. И.* Основы диагностики технических устройств и сооружений. М.: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2015. 445 с.
 21. *Li Dong-sheng, Ou Jin-ping.* Acoustic Emission Characteristics and Damage Evolution Model of Steel Strands in Tensile Test // *Journal of Highway and Transportation Research and Development*. 2008. V. 3 (1). P. 87—90.
 22. *Васильев И.Е., Матвиенко Ю.Г., Чернов Д.В., Елизаров С.В.* Мониторинг накопления повреждений в кессоне стабилизатора планера МС-21 с применением акустической эмиссии // *Проблемы машиностроения и автоматизации*. 2020. № 2. С. 118—141.
 23. *Махутов Н.А., Васильев И.Е., Чернов Д.В., Иванов В.И., Терентьев Е.В.* Кинетика процесса накопления повреждений и разрушения в зонах концентраторов при испытаниях образцов на разрыв // *Дефектоскопия*. 2021. № 1. С. 33—44.
 24. *Матвиенко Ю.Г., Васильев И.Е., Чернов Д.В.* Диагностика разрушений и повреждений акустико-эмиссионным методом // *Приводы и компоненты машин*. 2018. № 5. С. 13—18.
 25. *Deschanel S., Ben Rhouma W., Weiss J.* Acoustic emission multiplets as early warnings of fatigue failure in metallic materials // *Scientific Reports*. 2017. V. 7. No. 13680.
 26. *Матвиенко Ю.Г.* Модели и критерии механики разрушения. М.: Физматлит. 2006. 318 с.
 27. *Elber W.* Fatigue crack closure under cyclic tension // *Eng. Fract. Mech.* 1970. V. 2. No. 1. P. 37—45.
-