

КИНЕТИКА ПРОЦЕССА НАКОПЛЕНИЯ ПОВРЕЖДЕНИЙ И РАЗРУШЕНИЯ В ЗОНАХ КОНЦЕНТРАТОРОВ ПРИ ИСПЫТАНИЯХ ОБРАЗЦОВ НА РАЗРЫВ

© 2021 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 «НИИИИ МНПО Спектр», Россия 119048 Москва, ул. Усачева, 35, стр. 1

³ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский университет «МЭИ», Россия 111250
Москва, ул. Красноказарменная, 14

*E-mail: vie01@rambler.ru

Поступила в редакцию 31.08.2020; после доработки 15.11.2020

Принята к публикации 27.11.2020

Рассмотрено влияние различного рода концентраторов напряжений на процессы накопления повреждений, зарождения и распространения трещин в образцах из стали Ст3 в условиях одноосного растяжения. Исследованные образцы имели центральное отверстие диаметром $\varnothing = 5$ мм или поперечный сварной шов. Результаты акустико-эмиссионной диагностики показали, что, несмотря на различную природу концентраторов, диаграммы нагружения, характер накопления повреждений и развитие магистральных трещин, количество зарегистрированных событий акустической эмиссии (АЭ) и активность их регистрации, динамика изменения весового содержания локационных импульсов (W_i) в энергетических кластерах нижнего, среднего и верхнего уровня была достаточно похожей, также как и значения этих параметров при разрушении образцов.

Ключевые слова: концентрация напряжений, трещина, акустическая эмиссия, импульс АЭ, критериальные параметры, видеорегистрация, структура материала.

DOI: 10.31857/S0130308221010048

1. ВВЕДЕНИЕ

Сигналы АЭ событий, регистрируемые преобразователями акустической эмиссии (ПАЭ), отражают энергетические и временные параметры импульсов смещений среды, генерируемых при динамической перестройке структуры материала. Возникает задача в установлении феноменологических закономерностей между разрушениями структуры конструкционного материала на микро-, мезо- и макромасштабном уровне [1, 2] и регистрируемыми при этом импульсами АЭ, их энергетическими и темпоральными параметрами, формой и спектром. Установление таких перекрестных связей дает возможность идентифицировать природу регистрируемых процессов, оценить текущий уровень степени разрушения структуры материала и осуществить прогноз остаточной прочности изделия.

В основном кластерный анализ и классификацию регистрируемых сигналов АЭ событий по их энергетическим и временным параметрам, а также формам и спектрам проводят на этапе постобработки данных, используя различные методики кластеризации [3—8]. При этом существуют отдельные методики [9—11], позволяющие в режиме реального времени разделять регистрируемые импульсы на кластеры, свойственные различным типам источников АЭ, в поле параметров, характеризующих форму сигнала.

С целью мониторинга кинетики накопления повреждений в структуре полимерных композитных материалов (ПКМ) на микро-, мезо- и макромасштабном уровне в процессе АЭ диагностики было предложено регистрируемые массивы импульсов разделять на кластеры нижнего (H), среднего (C) и верхнего (B) уровня в поле параметров относительной энергии и усредненной частоты выбросов ($E_{\text{н}} - N_{\text{н}}/t_{\text{н}}$) [12—14]. Параметр $N_{\text{н}}/t_{\text{н}}$ характеризует усредненную плотность заполнения импульса в кГц, а параметр $E_{\text{н}}$ — относительную его энергию в дБ, вычисляемую по формуле: $E_{\text{н}} = 20 \times \lg(E/E_0)$, где $E_0 = 10^{-6}$ эВ ($1 \text{ эВ} \approx 16 \times 10^{-20}$ Дж) [16, 17]. Эти параметры дополняют основные характеристики сигналов АЭ, включающие согласно ГОСТ ИСО Р 55045—2012 максимальную амплитуду (u_m), время его нарастания ($t_{\text{н}}$) в мкс — интервал от момента пересечения порога дискриминации (u_{th}) до достижения максимального значения амплитуды (u_m), длительность импульса ($t_{\text{и}}$) в мкс — интервал от момента пресечения сигналом порога дискриминации до ухода его под порог и количество выбросов ($N_{\text{и}}$) в ед. — пересечений амплитудой сигнала порога дискриминации.

В качестве критериальных параметров, отражающих кинетику накопления повреждений и разрушение структуры материала на микро-, мезо- и макромасштабном уровне, предложено использовать активность регистрации и весовое содержание импульсов АЭ событий в энергетических кластерах. Их применение потребовало введения следующих обозначений:

N_H, N_C, N_B — количество импульсов АЭ в кластерах нижнего (H), среднего (C) и верхнего (B) энергетического уровня;

N_{Σ} — суммарное количество импульсов АЭ событий ($N_{\Sigma} = N_H + N_C + N_B$);

$W_i = (N_i / N_{\Sigma}) \times 100 \%$ — весовое содержание локационных импульсов в кластерах, где $i = H, C, B$ ($\sum W_i = W_H + W_C + W_B = 100 \%$);

$\dot{N}_i$ — активность регистрации импульсов АЭ в единицу времени в кластерах H, C, B ;

$\dot{N}_{\Sigma}$ — суммарная активность регистрации импульсов АЭ в единицу времени ($\dot{N}_{\Sigma} = \dot{N}_H + \dot{N}_C + \dot{N}_B$).

В ходе испытания образцов из стали Ст3 с центральным отверстием (ЦО) и поперечным сварным швом (СШ) на растяжение, проводимых с применением системы АЭ диагностики, синхронизированной с видеорегистрацией, изучалось влияние концентраторов на кинетику накопления повреждений и разрушение структуры материала.

Задачи проводимых исследований определялись следующими целями.

1. Сопоставить уровень предельных нагрузок и деформаций, а также характер разрушения образцов в партиях ЦО и СШ при одноосном растяжении для определения их потенциальной опасности в конструкциях из стали Ст3.

2. Протестировать на образцах из Ст3 возможность использования структурно-феноменологической концепции, разработанной для разделения импульсов АЭ событий на энергетические кластеры, соответствующие микро-, мезо- и макроструктурным разрушениям в пакете ПКМ, и критериальных параметров $\dot{N}_i$ и W_i для мониторинга кинетики накопления повреждений на всех масштабных уровнях и прогноза остаточной прочности изделий, путем сопоставления их текущих значений с пороговыми, регистрируемыми при разрушении материала, применительно к конструкционным сталям.

2. ОБЪЕКТЫ И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Объектами исследования являлись плоские образцы корсетного типа, изготовленные из стали Ст3, толщиной 3 мм. В качестве концентраторов в средней части образцов сверлилось центральное отверстие диаметром $\varnothing = 5$ мм или выполнялся поперечный сварной шов. Для получения последнего образцы разрезали пополам, по линии разреза делали скосы и с применением автоматической электросварки выполняли двухсторонний шов. Затем для снятия остаточных напряжений на расстоянии 20 мм от сварного шва фрезерованием на глубину 0,5 мм с каждой стороны образца удаляли наружный слой металла, и полученная поверхность полировалась. С целью повышения вероятности зарождения трещины в центре сварного шва в нем выполнялось отверстие диаметром $\varnothing = 1$ мм.

Испытания образцов проводили на электромеханической установке Shimadzu с максимальным растягивающим усилием 50 кН при автоматическом повышении нагрузки. Для сбора и обработки регистрируемых АЭ данных применялась восьмиканальная система A-Line 32D, выпускаемая ООО «Интерюнис-ИТ» (РФ). Регистрация импульсов АЭ осуществлялась пьезоэлектрическими преобразователями R15a—AST фирмы Mistras (США), а в качестве предусилителей сигналов использовались ПАЭФ-014 производства ООО «Интерюнис-ИТ» (РФ).

Перед проведением испытаний на контрольных образцах, выбранных из каждой партии, выполнялись пробные нагружения при ступенчатом повышении растягивающего усилия, по результатам которого определялись оптимальные настройки АЭ системы, подробное изложение которых приведено в публикации [14]. Исходя из амплитуды шумов на испытательном стенде, регистрируемых при полосе пропускания цифровых фильтров $\Delta f_p = 30\text{—}500$ кГц, устанавливался уровень порога дискриминации $u_{th} = 43$ дБ, обеспечивающий дискретную эмиссии в процессе нагружения образцов при скорости актуатора перемещений подвижной траверсы стенда $V_a \leq 2$ мм/мин.

На основании энергетических и темпоральных параметров регистрируемых импульсов АЭ событий определялись границы нижнего, среднего и верхнего кластера в поле дескрипторов $E_{ii} - N_{ii}/t_{ii}$. При выбранных значениях $u_{th} = 43$ дБ и $\Delta f_p = 30\text{—}500$ кГц эти границы составляли: $E_{ii} = 70\text{—}90$ дБ, $N_{ii}/t_{ii} = 10\text{—}210$ кГц для кластера H ; $E_{ii} = 90\text{—}110$ дБ, $N_{ii}/t_{ii} = 30\text{—}180$ кГц для кластера C ; $E_{ii} > 110$ дБ, $N_{ii}/t_{ii} = 60\text{—}150$ кГц для кластера B .

3. ИСПЫТАНИЯ ОБРАЗЦОВ И ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

В ходе проводимых исследований регистрировалась динамика изменения активности АЭ и весового содержания локационных импульсов в кластерах нижнего, среднего и верхнего энергетического уровня. Сопоставлялись тренды накопления повреждений и разрушения структуры материала на микро-, мезо- и макромасштабном уровне для партий образцов с центральным отверстием (ЦО) и поперечным сварным швом (СШ). Сравнивались текущие значения критериальных параметров с пороговыми, регистрируемыми в момент разрушения образцов, что позволяло прогнозировать их остаточную прочность в процессе нагружения.

3.1. Испытания образцов с центральным отверстием

Форма и основные габаритные размеры испытываемых образцов толщиной 3 мм приведены на рис. 1.

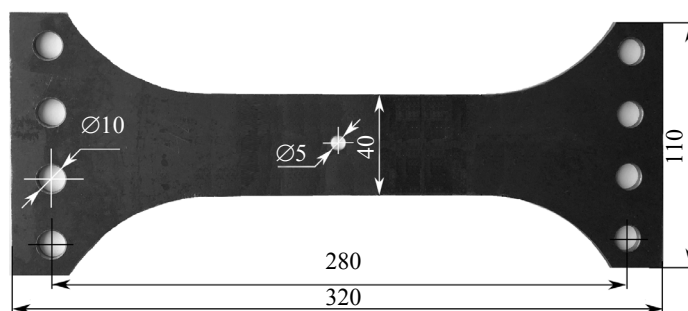


Рис. 1. Форма и габаритные размеры образцов типа ЦО толщиной 3 мм.

В образце ЦО-4 испытываемой партии с целью изучения влияния сторонних помех на динамику накопления АЭ событий и изменение критериальных параметров в процессе повышения нагрузки в канале отверстия после сверления был оставлен заусенец со стружкой, который в процессе нагружения служил источником сигналов трения.

Для локации АЭ событий в процессе мониторинга на поверхность образца на расстоянии 120 мм относительно центрального отверстия с применением металлических трубочин через слой контактной смазки устанавливались преобразователи R15a—SMA. Регистрация АЭ событий осуществлялась синхронно с процессом видеозаписи деформирования образца в области концентратора. Деформация образцов при растяжении измерялась по перемещению штока актуатора подвижной траверсы стенда и контролировалась на начальном этапе деформирования при $\epsilon_1 \leq 3\%$ экстензометром с базой измерения 25 мм.

На рис. 2 показана диаграмма нагружения образца в координатах P — ϵ_1 , построенная по данным динамометра и актуатора перемещений подвижной траверсы стенда. Разрушение материала в зоне отверстия произошло в период 1250—1282 с испытания при повышении деформации образца до $\epsilon_1 = 20$ —22 % и падении растягивающей нагрузки от 46,1 до 20 кН.

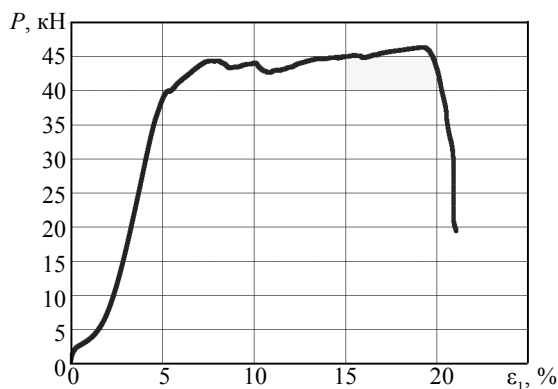


Рис. 2. Диаграмма нагружения образца ЦО-4.

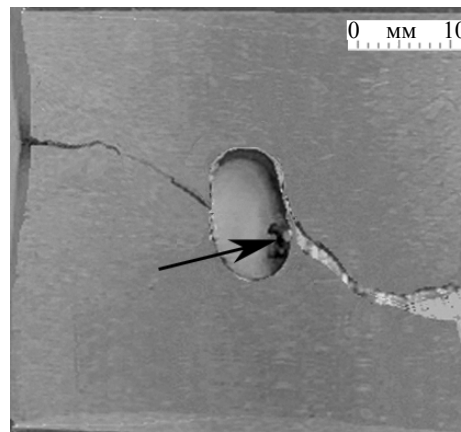


Рис. 3. Вид разрушения образца ЦО-4 в области центрального отверстия; стрелкой ($\rightarrow$) показано положение заусенца в канале отверстия.

На рис. 3 приведен вид разрушения образца в области центрального отверстия после электрохимического полирования поверхности металла.

На рис. 4 представлены результаты АЭ диагностики, полученные при испытаниях образца ЦО-4 при испытаниях на разрыв.

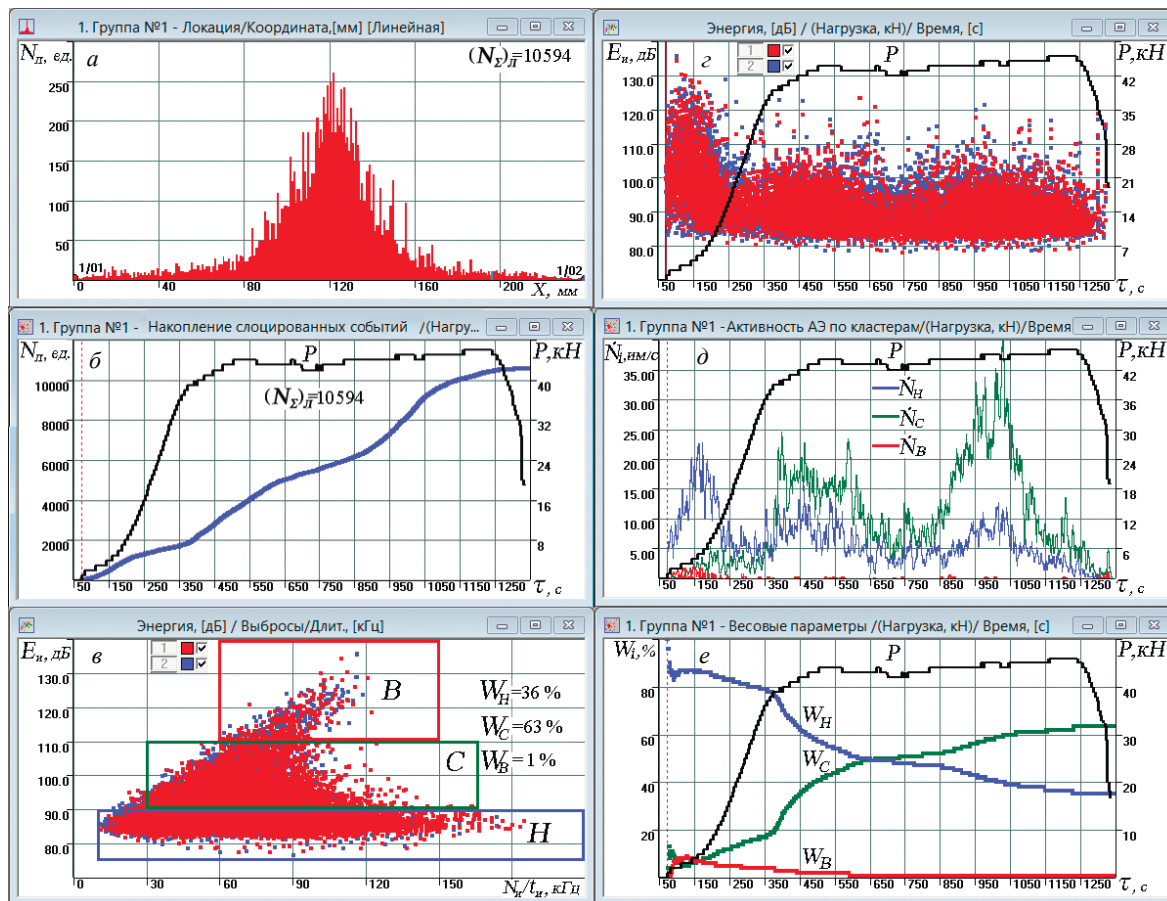


Рис. 4. Результаты АЭ диагностики при испытаниях образца ЦО-4 на разрыв, включающие: координатную локацию АЭ событий (а), их накопление (б), разделение зарегистрированных сигналов в поле параметров $E_n - N_H/t_H$ на кластеры H, C, B (в), динамику изменения относительной энергии (г), активности регистрации (д) и весового содержания (е) импульсов АЭ в энергетических кластерах.

На рис. 4а и б приведены результаты координатной локализации и накопления АЭ событий (N_n), зарегистрированные при испытаниях образца. Наибольшая плотность индикаций АЭ событий, достигающая 250 ед/мм, отмечалась в зоне центрального отверстия образца. Всего в ходе эксперимента было зарегистрировано $N_n = 10594$ событий АЭ, более 90 % из которых отмечалось на расстоянии ± 40 мм от центра отверстия.

Разделение импульсов АЭ событий на кластеры нижнего, среднего и верхнего энергетического уровня, сформировавшееся при испытаниях образца на разрыв в поле дескрипторов $E_n - N_n/t_n$, показано на рис. 4в. Индикации сигналов, регистрируемых каналами АЭ системы на графиках 4в и г, соответствующие первому каналу, отмечены красным маркером, второго — синим.

На рис. 4г—е отражена динамика изменения в процессе нагружения образца параметров относительной энергии E_n , активности регистрации $\dot{N}_i$ и весового содержания W_i импульсов АЭ событий в энергетических кластерах.

В начальный период упругого деформирования образца в течение 150—200 с эксперимента при повышении уровня нагрузки до $P=10$ кН (как следует из графиков 4з, д) регистрировалась повышенная активность АЭ событий во всех энергетических кластерах. При упругом деформировании конструкционных сталей и сплавов основными источниками АЭ событий являются зоны локальных дефектов и неоднородностей в материале изделий [15]. Таким локальным дефектом в данном случае являлся заусенец со стружкой, оставленный после сверления в канале отверстия. Поэтому в начальный период упругого деформирования образца ЦО-4 в энергетических кластерах отмечалась высокая активность АЭ, достигающая на пике в течение 150—180 с: в нижнем кластере $\dot{N}_H = 23$ им/с, в среднем — $\dot{N}_C = 5$ им/с, в верхнем — $\dot{N}_B = 3$ им/с. При этом весовое содержание импульсов АЭ событий в энергетических кластерах составляло: $W_H = 85$ %, $W_C = 7$ % и $W_B = 8$ %.

По мере деформирования образца влияние заусенца на характер накопления АЭ событий заметно снижалось. Дальнейшее повышение нагрузки сопровождалось резким падением активности АЭ событий в нижнем и верхнем энергетических кластерах и повышением параметра $\dot{N}_C$ в среднем кластере. Такое изменение активности АЭ соответствующим образом отразилось на уровне весового содержания локационных импульсов в энергетических кластерах. В течение 150—350 с эксперимента при повышении нагрузки до 35 кН весовое содержание импульсов в кластере С повысилось с 7 до 18 %, а в кластерах H и B соответственно снизилось: для параметра W_H — с 85 до 78 %, а для W_B — с 8 до 4 %.

В период упругопластического деформирования образца, длившегося в течении 350—500 с испытания образца при повышении уровня нагрузки от 35 до 43 кН отмечалось заметное возрастание активности импульсов АЭ в кластерах H и C. При этом уровень параметра $\dot{N}_C$ повысился до 20—25 им/с, а уровень параметра $\dot{N}_H$ — до 10—15 им/с, что соответствующим образом отразилось и на их весовом содержании в энергетических кластерах. К началу пластического деформирования образца уровень параметра W_H составлял 58 %, параметра $W_C = 40$ %, а параметра $W_B = 2$ %.

В период пластического деформирования материала, длившегося в течении 500—1250 с эксперимента, при повышении нагрузки от 43 до 46 кН и изменении уровня ε_1 от 7,5 до 19 % наблюдались существенные колебания активности регистрации импульсов АЭ событий в нижнем и среднем энергетических кластерах. Если до 600 с колебания этих параметров были незначительны и сохранялись в пределах: $\dot{N}_H = 6—13$ им/с, $\dot{N}_C = 15—23$ им/с, то в период 600—650 с нагружения их уровень заметно снизился и в течение 200 с эксперимента до 850 с находился в интервале значений: $\dot{N}_H = 2—7$ им/с, $\dot{N}_C = 5—12$ им/с. В период 850—1050 с эксперимента, как видно из графика 4д, отмечался значительный рост активности импульсов в кластерах H и C. При этом величина параметра $\dot{N}_H$ повышалась до 12 им/с, а параметра $\dot{N}_C$ до 40 им/с. Дальнейшее деформирование образца сопровождалось падением активности АЭ событий во всех энергетических кластерах. В момент разрушения образца на 1282 с эксперимента уровень параметров $\dot{N}_H$ и $\dot{N}_C$ имел минимальные значения, не превышающие 2 им/с. Такой характер регистрации АЭ событий обусловлен вязкоупругим деформированием материала в области центрального отверстия, когда амплитуда основного массива генерируемых импульсов не превышала уровня $u_{нн} = 43$ дБ. В этот период весовое содержание локационных импульсов в энергетических кластерах изменялось незначительно и составляло при потере образцом несущей способности: $W_H = 36$ %, $W_C = 63$ % и $W_B = 1$ %.

3.2. Испытания образцов со сварным швом

Для предотвращения непрерывной эмиссии, регистрируемой в ходе предварительных испытаний контрольных образцов со сварным швом, было предложено сузить область локализации и использовать сторожевые датчики, блокирующие отраженные импульсы и сигналы помех от силовых

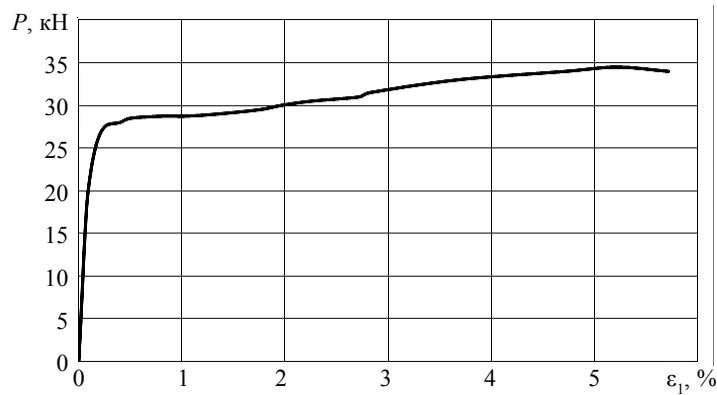


Рис. 5. Диаграмма нагружения образца СШ-1.

захватов нагружающего стэнда. Поэтому на расстоянии 45 мм относительно центра сварного шва устанавливались рабочие преобразователи R15a—AST (ПАЭ № 1 и № 2), а на расстоянии 70 мм — сторожевые датчики (ПАЭ № 3 и № 4).

На рис. 5 показана диаграмма нагружения образца СШ-1 в координатах P — ϵ_1 , построенная по данным динамометра и актуатора перемещений подвижной траверсы стэнда.

Хрупкое разрушение образца произошло на 705 с испытания при величине деформации $\epsilon_1 = 6,22$ % и уровне растягивающего усилия $P = 34,7$ кН.

Вид разрушения образца СШ-1, произошедшего в зоне термического влияния сварного шва по линии нормального отрыва, показан на рис. 6.

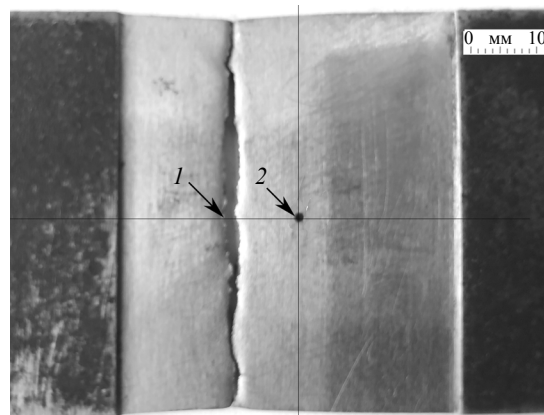


Рис. 6. Разрушение образца СШ-3 в зоне термического влияния сварного шва:
1 — трещина нормального отрыва; 2 — отверстие в центре сварного шва.

Линия разрушения проходила на расстоянии 7—8 мм относительно отверстия диаметром $\varnothing = 1$ мм, которое должно было инициировать развитие доминантной трещины в центре сварного шва.

На рис. 7 представлены результаты АЭ диагностики, полученные при испытаниях образца СШ-1 при испытаниях на разрыв, произошедший на 712 с испытания при уровне растягивающей нагрузки $P_B = 34,7$ кН и величине деформации $\epsilon_B = 6,22$ %. На графиках 7а, б приведены результаты координатной локации и накопления АЭ событий (N_d), зарегистрированные при испытаниях образца. Наибольшая плотность индикаций АЭ событий, составляющая 6—8 ед/мм, отмечалась в зоне сварного шва слева от центрального отверстия на расстоянии 7—10 мм. Всего в процессе испытаний образца на разрушение рабочей группой было зарегистрировано $(N_{\Sigma})_d = 103$ АЭ событий.

Распределение импульсов АЭ событий в кластерах H , C и B , накопленных в течение испытания образца на разрыв в поле дескрипторов $E_{ii}—N_{ii}/t_{ii}$, показано на рис. 7в. Если параметр W_B был близок нулю, то параметр весового содержания импульсов АЭ, накопленных в среднем кластере $W_C = 67$ % к моменту разрушения образца, в двое превышал параметр $W_H = 33$ %.

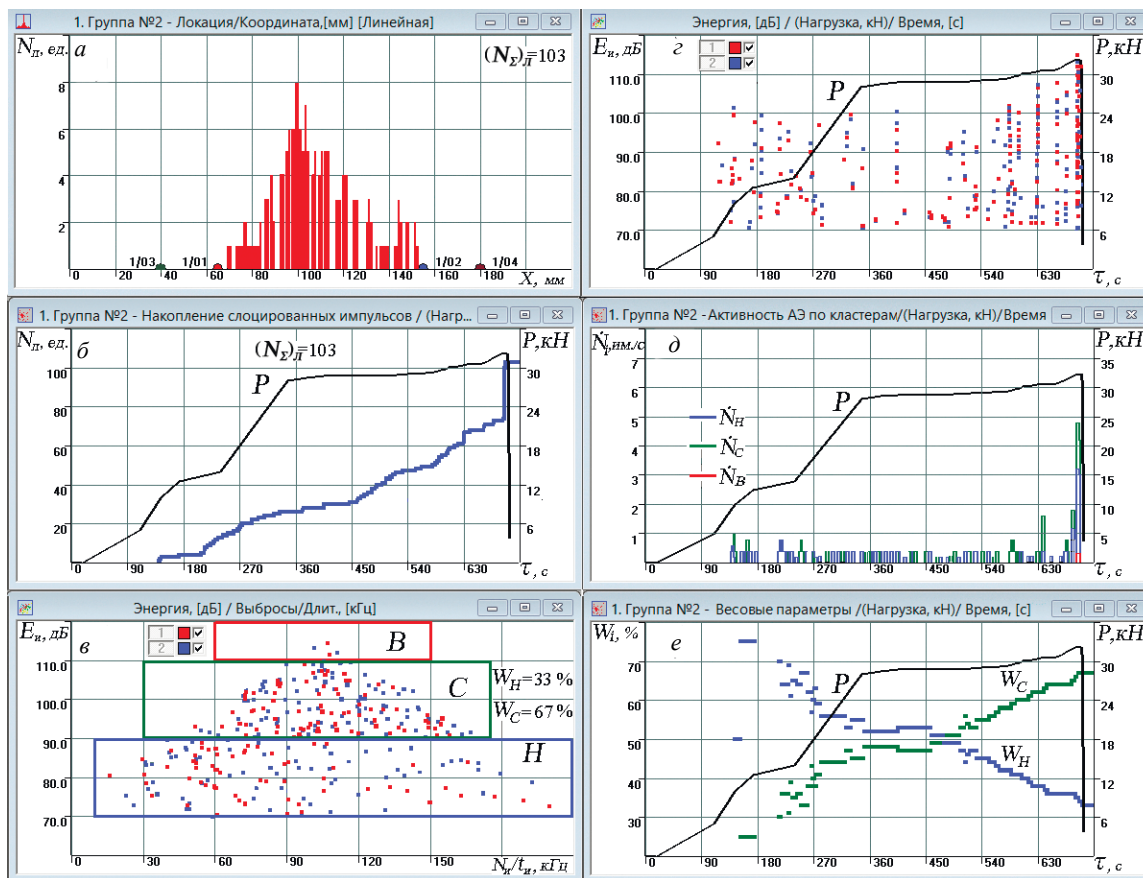


Рис. 7. Результаты АЭ диагностики при испытаниях на разрыв образца СШ-1, включающие: координатную локацию АЭ событий (а), их накопление (б), разделение зарегистрированных сигналов в поле параметров $E_n - N_i/t_n$ на кластеры H , C , B (в), динамику изменения относительной энергии (г), активности регистрации (д) и весового содержания (е) импульсов АЭ в энергетических кластерах.

Графики 7г–е отображают динамику изменения в процессе нагружения образца параметров относительной энергии E_n , активности регистрации $\dot{N}_i$ и весового содержания W_i локационных импульсов в энергетических кластерах в процессе эксперимента.

В период упругого деформирования образца при повышении уровня нагрузки до $P=15$ кН, длившегося практически до 250 с эксперимента, динамика изменения параметров $\dot{N}_i$ и W_i была неустойчивой, что характерно для начальной стадии нагружения металлов.

Период упругопластического деформирования образца, длившегося с 250 по 340 с испытания при повышении уровня нагрузки от 15 до 28 кН, отмечался низкой активностью АЭ и стабильным весовым содержанием импульсов АЭ событий в кластерах H и C : $W_H = 60\text{—}62\%$, $W_C = 38\text{—}40\%$.

Как следует из графика 7е, в период пластического деформирования образца (340—690 с испытания) при повышении уровня нагрузки от 28 до 34,5 кН наблюдался рост параметра W_C от 40 до 55 % и соответствующее снижение параметра W_H с 60 до 45 %. Активность регистрации локационных импульсов в этот период нагружения в кластере C изменялась в пределах $\dot{N}_C = 0,5\text{—}1,5$ им/с, а в кластере H не превышала $\dot{N}_H = 0,5$ им/с (рис. 7д). В период ускоренного разрушения образца (696—710 с эксперимента), как видно из графика 7д, фиксировался резкий рост активности импульсов в обоих энергетических кластерах: параметр $\dot{N}_C$ достигал 5 им/с, а параметр $\dot{N}_H = 3$ им/с. При этом какого-либо заметного изменения параметров W_H и W_C не происходило (график 7е), что обусловлено относительно коротким периодом разрушения образца (14 с) и инерционностью изменения весовых параметров, вследствие возрастания суммарного влияния накопленных импульсов АЭ событий в ходе испытания ($N_{\Sigma, \text{дл}} = 103$ ед.).

На рис. 8 представлены фрагменты микроструктуры стали Ст3 вблизи кромки разрыва образца СШ-3. Исследования микроструктуры металла проводили на продольном шлифе, вырезанном в месте разрыва образца, при увеличении в 500 раз с применением микроскопа Zeiss Observer Z1m по методу светлого поля.

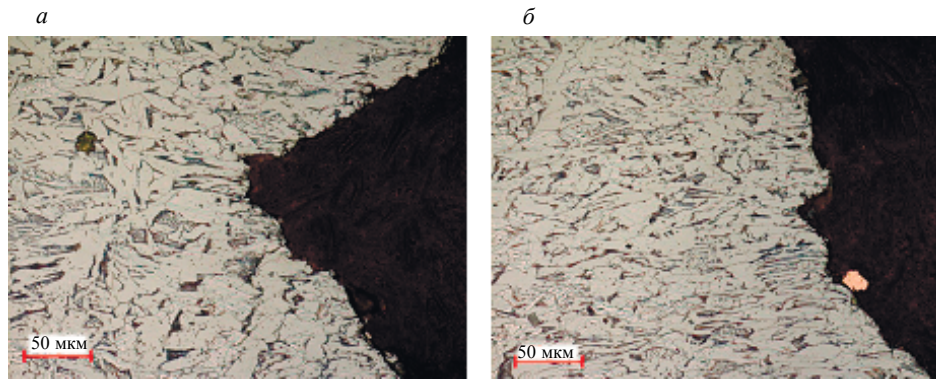


Рис. 8. Фрагменты микроструктуры стали Ст3 (а и б) в зоне термического влияния сварного соединения вблизи линии разрыва образца СШ-1.

Как видно из фрагментов микроструктуры на рис. 8, вблизи линии разрыва наблюдается градиентная структура металла, характерная для зон термического влияния сварных соединений сталей перлитного класса. В результате такого воздействия в зоне термического влияния сталь Ст3 потеряла пластичность, свойственную основному металлу, и повысилась ее хрупкость.

3.3. Результаты АЭ мониторинга и оценка остаточной прочности

Результаты испытания на разрыв партий образцов в количестве шести штук с центральным отверстием (ЦО) и поперечным сварным швом (СШ) из стали Ст3, зарегистрированные в момент их разрушения, приведены в табл. 1 и 2. Таблицы включают: длительность испытания (Δt), предельные значения нагрузки (P_B) и деформации (ϵ_B) при разрушении образцов, количество накопленных АЭ событий (N_{Σ}), весовое содержание импульсов АЭ событий в энергетических кластерах W_H , W_C и W_B , а также результаты статистической обработки этих параметров для испытанных партий образцов: среднее выборочное значение ($\bar{a}$), среднее квадратичное отклонение (S) и разброс (η), определенный в интервале $\pm 2S$.

Таблица 1

Результаты испытаний на разрыв образцов партии ЦО

№	Δt , с	P_B , кН	ϵ_B , %	$(N_{\Sigma})_A$, ед.	W_H , %	W_C , %	W_B , %
ЦО-1	1163	44,8	19,31	6792	30	70	0
ЦО-2	1085	45,4	19,67	5334	38	62	0
ЦО-3	1196	45,9	20,13	7278	33	67	0
ЦО-4	1212	46,1	21,6	10594	36	63	1
ЦО-5	1178	45,6	19,92	8282	36	64	1
ЦО-6	1293	47,7	22,1	9867	34	65	1
$\bar{a} = \Sigma a_i / n$	1188	46	20,46	8025	34	65	1
S	43,72	1,08	1,13	1968,7	3,14	3,16	0,55
$\eta = 2S / \bar{a}$, %	7,36	4,7	11,05	49,6	18,96	9,73	110

Характер разрушения образцов в каждой из испытанных партий незначительно отличался от представленных на рис. 3 и 6. Как следует из табл. 1 и 2, при достаточно низком уровне разброса предельных нагрузок и деформаций, не превышающем в выборках 5—11 %, величина разброса $\eta_{(N_{\Sigma})_A}$ накопленных АЭ событий в образцах партий ЦО и СШ достигала 50 и 100 % соответственно. При этом разброс весового содержания локационных импульсов в кластерах H и C был существенно ниже и не превышал в интервале $\pm 2S$ для параметра W_H в партиях ЦО и СШ 19 и 21 %, а для параметра W_C — 10 и 11 % соответственно.

Таблица 2

Результаты испытаний на разрыв образцов партии СШ

№	$\Delta\tau$, с	P_B , кН	ε_B , %	$(N_{\Sigma})_n$, ед.	W_H , %	W_C , %	W_B , %
СШ-1	712	34,7	6,22	103	33	67	0
СШ-2	831	35,1	6,24	172	38	62	0
СШ-3	705	34,2	5,72	78	33	67	0
СШ-4	856	36,1	6,78	263	35	65	0
СШ-5	803	35,6	6,32	121	36	64	0
СШ-6	775	34,4	6,18	98	30	70	0
$\bar{a} = \Sigma a_i / n$	791	35	6,23	139	34	67	0
S	52,62	0,73	0,34	68,5	3,51	3,51	0
$\eta = 2S/\bar{a}$, %	13,30	4,17	7,38	98,56	20,65	10,80	0

Таблица 3

Результаты статистической обработки параметров W_H и W_C при испытаниях на разрыв образцов партии ЦО

$(\varepsilon_1)_i / \varepsilon_B$, %	W_H , %			W_C , %		
	$(\bar{W}_H)_{ei}$	S_n	η_{2S} , %	$(\bar{W}_C)_{ei}$	S_n	η_{2S} , %
10	73	7,61	25,60	24	6,08	49,92
20	69	6,99	20,25	31	5,50	35,88
30	63	5,86	18,74	36	5,61	31,46
40	59	5,24	17,93	41	5,15	25,04
50	51	6,02	23,77	48	6,05	25,11
60	49	5,85	23,73	50	5,48	21,91
70	45	4,04	18,15	55	4,22	15,28
80	39	2,88	14,87	61	3,37	11,08
90	37	2,73	14,64	62	3,31	10,65
100	34	3,27	18,96	65	3,16	9,73

Таблица 4

Результаты статистической обработки параметров W_H и W_C при испытаниях на разрыв образцов партии СШ

$(\varepsilon_1)_i / \varepsilon_B$, %	W_H , %			W_C , %		
	$(\bar{W}_H)_{ei}$	S_n	η_{2S} , %	$(\bar{W}_C)_{ei}$	S_n	η_{2S} , %
30	57	6,39	22,42	43	5,78	26,88
40	55	5,85	21,28	45	4,93	21,93
50	51	5,83	22,86	48	6,03	25,11
60	47	5,18	22,04	56	5,67	20,26
70	41	2,95	14,39	59	3,55	12,05
80	38	3,51	18,48	63	3,22	10,22
90	35	3,37	19,24	64	3,41	10,65
100	34	3,61	21,25	66	4,03	12,22

В табл. 3 и 4 приведены результаты статистической обработки критериальных параметров W_H и W_C , зарегистрированных в области пластического деформирования стали Ст3, при повышении уровня $(\varepsilon_1)_i / \varepsilon_B$ от 0,1 до 1,0 для образцов партии ЦО и от 0,3 до 1,0 для образцов партии СШ. Последнее обусловлено тем, что при испытании на разрыв образцов партии СШ в интервале $(\varepsilon_1)_i = (0,1 - 0,3) \times \varepsilon_B$ регистрировалась неустойчивая динамика изменения параметров W_H и W_C .

На рис. 9 по данным табл. 3 и 4 построены графики средних выборочных значения параметров $(\bar{W}_H)_{\epsilon_i}$ и $(\bar{W}_C)_{\epsilon_i}$ (а, в) и величины их разброса η_{W_i} (б, з), посчитанные в интервале $\pm 2S$, при повышении уровня пластической деформации в интервале $(\epsilon_1)_i = (0,1-1,0) \times \epsilon_B$.

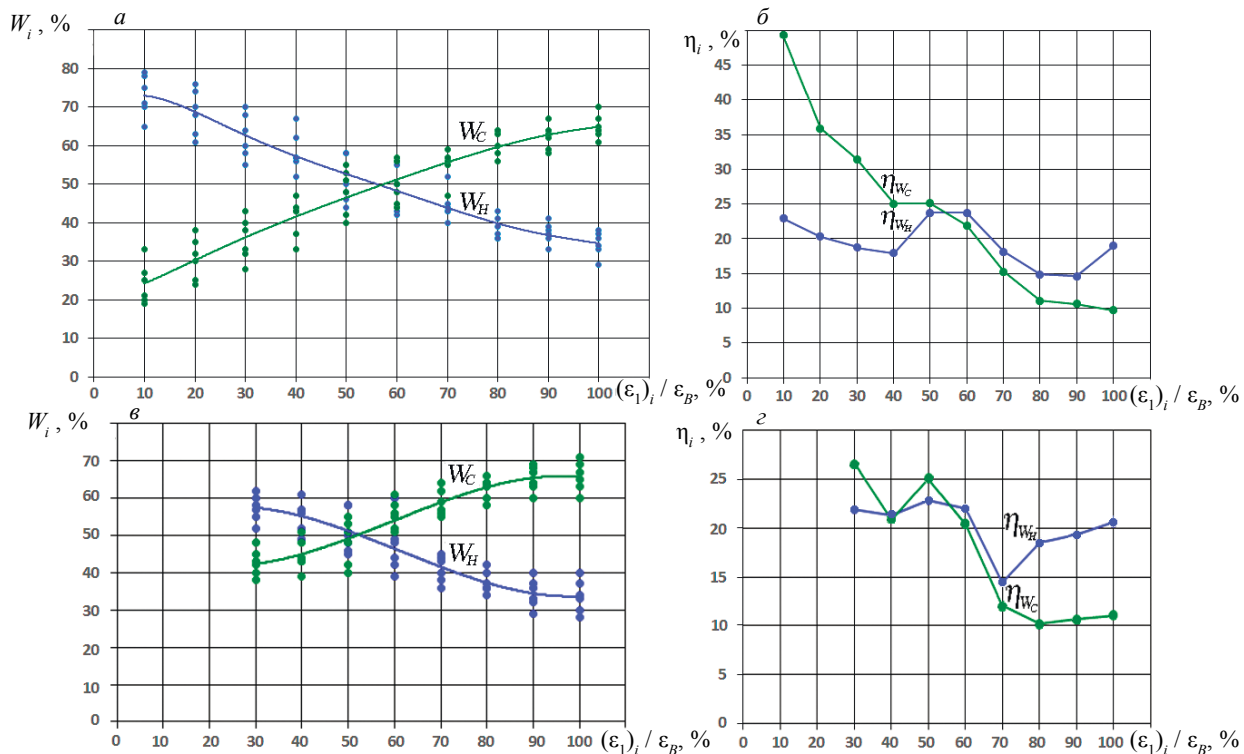


Рис. 9. Сопоставление параметров W_H и W_C , зарегистрированных при испытаниях на разрыв образцов партий ЦО (а) и СШ (в), а также величин их разброса η_{W_i} (б, з), при изменении уровня пластической деформации в интервале $(\epsilon_1)_i = (0,1-1,0) \cdot \epsilon_B$.

Как следует из рис. 9, при увеличении уровня деформации в интервале $\epsilon_1 = (0,1-0,5) \times \epsilon_B$ наиболее информативным является параметр W_H , средний уровень которого в анализируемых выборках изменялся от 73 до 51 %. При этом величина разброса этого параметра в интервале $2S$ находилась в пределах $\eta_{W_H} = 20-25$ %.

В интервале $\epsilon_1 = (0,5-1,0) \times \epsilon_B$ наиболее информативным является параметр W_C , среднее выборочное значение которого возрастало от 48 до 65—66 %, а величина разброса снижалась от $(\eta_{W_C})_{0,5} = 25$ % до $(\eta_{W_C})_{1,0} = 10-12$ %.

Полученные средние выборочные значения критериальных параметров W_H и W_C и уровни их разброса в интервале $\pm 2S$ согласуются с результатами публикации [14], в которой приведены данные испытания партии образцов из стали 20 на растяжение.

Последовательное применение параметров W_H и W_C в указанных интервалах деформирования материала может повысить точность прогноза остаточной прочности образцов и изделий. Сравнивая текущие значения регистрируемых параметров W_H и W_C в процессе АЭ мониторинга изделий с графиками изменения средних выборочных значений $(\bar{W}_H)_{\epsilon_i}$ и $(\bar{W}_C)_{\epsilon_i}$, можно в режиме реального времени с погрешностью, примерно соответствующей их разбросу η_{W_i} , осуществлять оценку остаточной прочности в области пластического деформирования материала.

4. ВЫВОДЫ

Результаты испытаний на разрыв образцов из стали Ст3 с концентраторами напряжений в виде центрального отверстия и поперечного сварного шва позволили сделать следующие выводы.

1. Сравнение результатов испытания партий образцов ЦО и СШ показало, что наиболее опасным в случае недостаточной термообработки может быть сварное соединение, не только воздействующее на характер распределения напряжений, но и существенным образом изменяющим структуру материала в зоне термического влияния. Из сопоставления данных табл. 1 и 2 следует,

что среднее выборочное значение предельной деформации $\bar{\varepsilon}_B = 6,23 \%$, при которой происходило разрушение образцов в партии СШ, оказалось в 3,5 раза меньше значения $\bar{\varepsilon}_B = 20,46 \%$, полученного для образцов партии ЦО.

2. Результаты экспериментов при испытаниях на разрыв партий образцов из стали Ст3 показали принципиальную возможность использования разработанной для композитных материалов методики и ПО для мониторинга кинетики накопления повреждений в структуре ПКМ, применительно к конструкционным сталям, а также параметров W_H и W_C для прогноза в режиме реального времени остаточной прочности образцов на этапе их пластического деформирования.

3. Несмотря на различие природы концентраторов, диаграммы деформирования образцов, характера зарождения и развития трещин, количества зарегистрированных АЭ событий и активности акустической эмиссии на этапах деформирования, а также влияния помех трения на процесс накопления повреждений, тренд изменения весового содержания локационных импульсов (W_i) в энергетических кластерах в процессе пластического деформирования материала в испытанных партиях образцов в целом совпадал также, как и уровень критериальных параметров W_H и W_C в интервале значений $(\varepsilon_i)_{i=1} = (0,3—1,0) \times \varepsilon_B$.

4. Дальнейшие исследования будут направлены на изучение механизмов кинетики разрушения структуры конструкционных сталей и сплавов на микро, мезо и макромасштабном уровне, и регистрируемых при этом импульсов АЭ, их энергетических и темпоральных параметров, формы и спектра. Это позволит уточнить границы энергетических кластеров и пороговые значения критериальных параметров для более достоверной оценки остаточной прочности диагностируемых изделий.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда — проект № 20-19-00769.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Махутов Н.А. Комплексное исследование процессов разрушения материалов и конструкций // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2018. Т. 84. № 11. С. 46—51.
2. Панин В.Е., Егорушкин В.Е. Основы физической мезомеханики пластической деформации и разрушения твердых тел как нелинейных иерархически организованных систем // Физическая мезомеханика. 2015. Т. 18. № 5. С. 100—113.
3. Li L., Lomov S.V., Yan X., Carvelli V. Cluster analysis of acoustic emission signals for 2D and 3D woven glass/epoxy composites // J. Compos Structures. 2014. V. 116. P. 286—296.
4. Ech-Choudany Y., Assarar M., Scida D., Morain-Nicolier F., Bellach B. Unsupervised clustering for building a learning database of acoustic emission signals to identify damage mechanisms in unidirectional laminates // J. Applied Acoustics. 2017. V. 123. P. 123—132.
5. 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. № 6. P. 516—524.
6. Saeedifar Milad, Najafabadi Mehdi Ahmadi, Zarouchas Dimitrios, Toudeshky Hossein Hosseini, Jalalvand Meisam. Clustering of interlaminar and intralaminar damages in laminated composites under indentation loading using Acoustic Emission // Composites Part B. 2018. V. 144. P. 206—219.
7. Lin Qing, Bin Wan, Wang Yan, Lu Yunhu, Labuz Joseph F. Unifying acoustic emission and digital imaging observations of quasi-brittle fracture // J. Theoretical and Applied Fracture Mechanics. 2019. V. 103. P. 1—9.
8. Abusrea Mahmoud R., Seung-Wook Han, Kazuo Arakawa, Nak-Sam Choi. Bending strength of CFRP laminated adhesive joints fabricated by vacuum-assisted resin transfer molding // Composites. Part B. 2019. V. 156. P. 8—16.
9. Monitoring Method for Active Cracks in Concrete by Acoustic Emission / JCMS-III B5706. Federation of Construction Materials Industries. Japan. 2003. P. 29.
10. Masayasu Ohtsu, Toshiro Isoda, Yuichi Tomoda. Acoustic emission techniques standardized for concrete structures // J. Acoustic Emission. 2007. V. 25. P. 21—32.
11. Iliopoulos Sokratis N., Dzaye Evin, Khattabi Yassir El, Schutter De Geert, Aggelis Dimitrios G. Continuous AE monitoring of fresh concrete / Progress in acoustic emission XVIII, JSNDI & IIIAE-23. December 5—9, 2016. P. 293—298.
12. Matvienko Yu.G., Vasil'ev I.E. et al. Criterion Parameters for Assessing Degradation of Composite Materials by Acoustic Emission Testing // Russian Journal of Nondestructive Testing. 2018. V. 54. No. 12. P. 811—819. [Матвиенко Ю.Г., Васильев И.Е., Чернов Д.В., Елизаров С.В. Критериальные параме-

тры для оценки степени деградации композитных материалов при акустико-эмиссионном мониторинге изделий // Дефектоскопия. 2018. № 12. С. 3—11.]

13. Матвиенко Ю.Г., Васильев И.Е., Чернов Д.В. Исследование кинетики разрушения структурных связей однонаправленного ламината с применением акустической эмиссии и видеорегистрации // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2019. № 11. С. 45—61.

14. 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.

15. Иванов В.И., Барат В.А. Акустико-эмиссионная диагностика. М.: «Спектр», 2017. 368 с.

16. 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.

17. ИНТЕРЮНИС-ИТ. «А-Line» — Руководство пользователя. Версия v181211. М.: ООО «Интерюнис-ИТ», 2018. 265 с.