

Механика материалов: прочность, ресурс, безопасность

Materials mechanics: strength, durability, safety

DOI: <https://doi.org/10.26896/1028-6861-2023-89-11-60-70>

ПРИМЕНЕНИЕ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ ДЛЯ ОЦЕНКИ ПОТЕРИ ПЛАСТИЧНОСТИ СТАЛЬНЫХ ИЗДЕЛИЙ ПОСЛЕ УДАРНОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ

© Николай Андреевич Махутов¹, Игорь Евгеньевич Васильев^{1*},
Дмитрий Витальевич Чернов¹, Артём Юрьевич Марченков²

¹ Институт машиноведения им. А. А. Благонравова РАН, Россия, 101000, Москва, Малый Харитоньевский пер., д. 4;
*e-mail: vie01@rambler.ru

² Национальный исследовательский университет «МЭИ», Россия, 111250, Москва, Красноказарменная улица, д. 14,
стр. 1.

*Статья поступила 22 июня 2023 г. Поступила после доработки 22 июня 2023 г.
Принята к публикации 30 августа 2023 г.*

Проведена акустико-эмиссионная диагностика при испытаниях на разрыв образцов из стали 20ХН2МА для изучения потери пластичности после ударного воздействия. Использовали образцы с габаритными размерами 300 × 20 × 6 мм и V-образным надрезом глубиной 3,3 мм. Ударное воздействие в зоне концентратора вызывало исчерпание пластичности материала, что сопровождалось снижением парциальной доли вязкого разрушения и возрастанием хрупкого. Испытываемые образцы разделили на шесть партий. Образцы первой партии не подвергали ударному воздействию. Во второй партии энергия удара составляла 50 Дж, в третьей — 75 Дж, в четвертой — 100 Дж, в пятой — 125 Дж и в шестой — 150 Дж. Испытания образцов на разрыв проводили при комнатной температуре и скорости перемещения подвижной траверсы 1 мм/мин. В процессе нагружения кинетику повреждений в зоне надреза контролировали с применением метода акустической эмиссии (АЭ) и видеосъемки. Хрупкие и вязкие процессы разрушения кристаллической решетки металла, вызванные сколом и сдвигом соответственно, прежде всего отличаются скоростью и длительностью волн напряжений. Для разделения генерируемых этими процессами импульсов АЭ анализировали спектрограммы частотно-временных преобразований и формы сигналов. Селекцию импульсов проводили с использованием комплексного параметра, отражающего крутизну падения амплитуды сигнала на фазе его затухания. Установлены граничные значения, позволяющие разделять регистрируемые импульсы на потоки, вызванные вязкими и хрупкими повреждениями структуры конструкционных сталей. Как показали проведенные исследования, влияние удара на исчерпание пластических свойств стали 20ХН2МА начинало заметно проявляться, когда уровень удельной работы (a_V) превышал 50 Дж/см². При возрастании a_V до 150 Дж/см² весовое содержание локационных импульсов, характеризующих кинетику хрупкого разрушения структурных связей, повышалось в 3–4 раза относительно регистрируемого для образцов без удара. Такой результат коррелирует с длительностью испытания образцов на разрыв, которая при повышении уровня a_V до 150 Дж/см² сокращалась в три раза.

Ключевые слова: акустическая эмиссия; импульс; энергетические и темпоральные параметры; спектрограмма; ударное воздействие; испытание на разрыв; вязкое и хрупкое разрушение; сдвиговые и нормальные напряжения.

THE USE OF ACOUSTIC EMISSION IN ASSESSING THE DUCTILITY LOSS IN STEEL PRODUCTS UNDER THE EFFECT OF IMPACT

© Nikolay A. Makhutov,¹ Igor E. Vasil'ev,^{1*}
Dmitry V. Chernov,¹ Artem Yu. Marchenkov²

¹ Mechanical Engineering Research Institute of the Russian Academy of Sciences, 4, Malyy Kharitonyevsky per., Moscow, 101990, Russia; *e-mail: vie01@rambler.ru

² National research university "Moscow Power Engineering Institute", 14, Krasnokazarmennaya ul., Moscow, 111250, Russia.

Received June 22, 2023. Revised June 22, 2023. Accepted August 30, 2023.

Acoustic emission (AE) diagnostics was carried out during tensile testing of 20KhN2MA steel samples to study the loss of ductility after the impact. We used V-notched samples (3.3 mm in depth) with overall dimensions of $300 \times 20 \times 6$ mm. The impact in the concentrator zone caused the depletion of the plasticity of the material, which was accompanied by a decrease in the partial fraction of ductile fracture and an increase in brittle fracture. The test samples were divided into six batches. The samples of the first batch were not subjected to the impact. In the second batch, the impact energy was 50 J, in the third — 75 J, in the fourth — 100 J, in the fifth — 125 J and in the sixth — 150 J. The rupture tests were carried out at room temperature and at a speed of the movable traverse of 1 mm/min. The kinetics of damage in the notch zone during loading was monitored using the acoustic emission (AE) method and video recording. Processes of brittle and ductile (caused by cleavage and shear, respectively) destruction of the crystal lattice of a metal differ primarily in the speed and duration of stress waves. To separate AE pulses generated by these processes, spectrograms of time-frequency transformations and waveforms were analyzed. Pulse selection was carried out using a complex parameter reflecting the steepness of the amplitude drop at the phase of signal attenuation. Boundary values were determined that allow separation of the recorded pulses into flows caused by ductile and brittle structural damage to structural steels. It is shown that manifestation of the effect of impact on the exhaustion of the plastic properties of steel 20KhN2MA becomes noticeable when the level of specific work exceeds 50 J/cm^2 . Moreover, with an increase in the specific work up to 150 J/cm^2 , the weight content of location pulses characterizing the kinetics of brittle destruction of structural bonds increased by 3–4 times, relative to that recorded for the samples without impact. This result correlates with the duration of the rupture test of the samples, which was reduced by three times when the level of the specific work increased to 150 J/cm^2 .

Keywords: acoustic emission; pulse; energy and temporal parameters; spectrogram; impact; rupture test; ductile and brittle fracture; shear and normal stresses.

Введение

Термины «вязкий» и «хрупкий» служат для обозначения способности металлов сопротивляться сдвиговым и нормальным модам напряжений на стадиях эволюции разрушения металла [1–7]. При упругопластическом деформировании материала движение дислокаций вдоль кристаллографических плоскостей приводит к образованию полос скольжения. На стадии развитой пластической деформации, при $\epsilon \geq 3–5\%$, возникает фрагментация структуры, обусловленная истощением возможности системы перераспределять возрастающие напряжения в зернах и блоках за счет уплотнения концентрации дислокаций и образования деклинаций вдоль их границ [6–8]. При этом элементы образующейся субструктуры подвергаются трансляционным, сдвиговым и поворотным модам воздействия, определяющим их ориентацию в структуре металла. Все трансформации, происходящие в структуре металла, направлены на снижение внутренней энергии.

Различные по своей природе механизмы фрагментации структуры материала генерируют заметно отличающиеся по своим энергетическим и темпоральным параметрам импульсы АЭ. Хрупкие и вязкие механизмы разрушения структуры металла, вызванные сколом и сдвигом соответственно, прежде всего отличаются скоростью и длительностью происходящих процессов. Результаты анализа форм сигналов и частотных временных преобразований (ЧВП) [9] показали, что амплитудно-временные параметры и

спектрограммы таких импульсов заметно отличаются (рис. 1).

Видно, что длительность затухания импульса АЭ, генерируемого при вязком разрушении, в пять раз больше, несмотря на то, что уровень амплитуды импульса хрупкого разрушения сколом вдвое выше.

В конструкционных сталях эволюция разрушения имеет смешанный вязкохрупкий характер [3, 6–8]. Сдвиговые процессы, происходящие в структуре металла и вызывающие движение дислокаций, изменение ориентации структурных элементов от действия касательных напряжений, более активны на начальной стадии неупругого деформирования материала. Их скорость заметно ниже, чем при хрупком разрушении фрагментов структуры металла, возникающих в результате разрыва или скола блоков и зерен от действия нормальных мод напряжений. При этом вязкие и хрупкие процессы структурных преобразований могут действовать как последовательно, так и параллельно. Например, в сдвиговых процессах перескок с одной плоскости скольжения на другую или слом перемычек при вязком срастании пор сопровождается сколами фасеток кристаллов. При ударном воздействии количество повреждений, генерируемых сдвиговыми процессами, вследствие истощения пластичности в месте удара заметно сокращается, что сопровождается увеличением парциальной доли хрупкого разрушения и синхронным снижением вязкого.

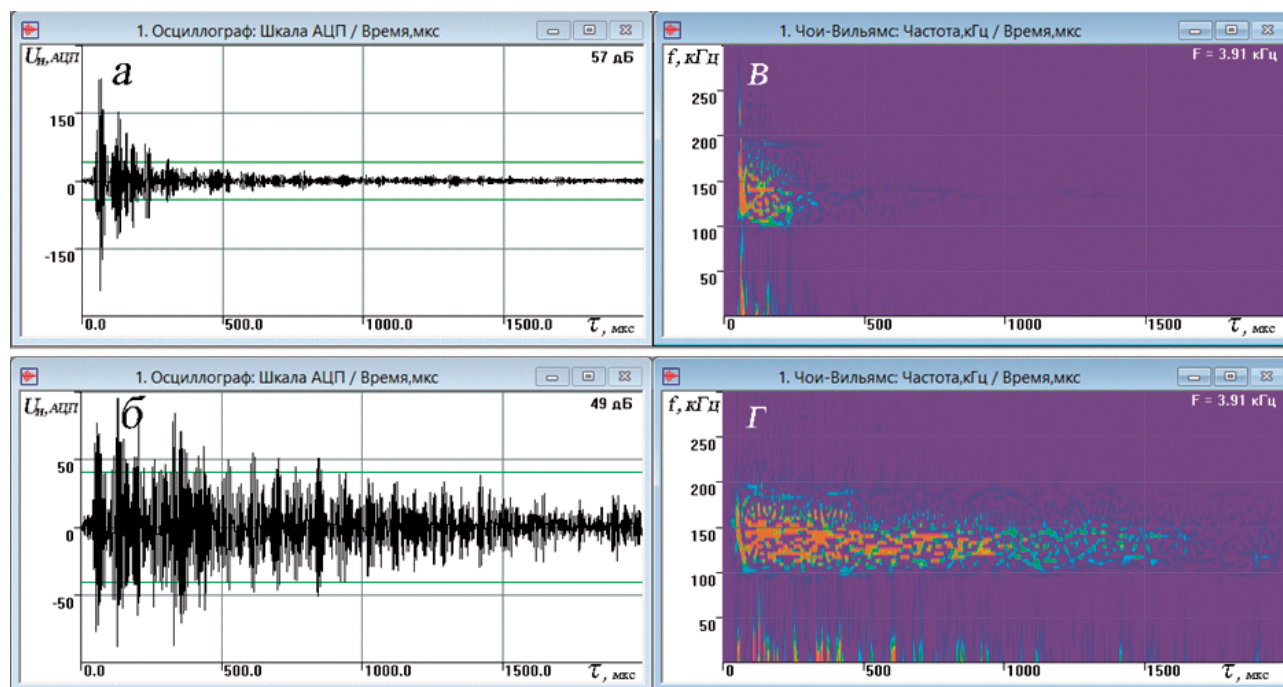


Рис. 1. Формы (а, б) и спектрограммы (в, г) сигналов № 1 и № 2, генерируемых при хрупком и вязком разрушениях

Fig. 1. Comparison of shapes (a, b) and spectrograms (c, d) of signals N 1 and N 2 generated during brittle and ductile fracture

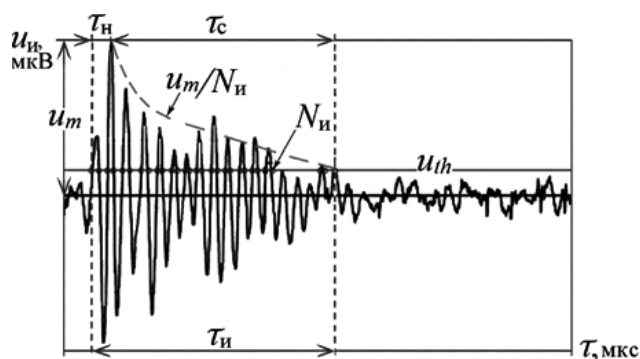


Рис. 2. Основные параметры, характеризующие форму сигналов АЭ

Fig. 2. Main parameters characterizing the shape of AE signals

Методология оценки пластических свойств материалов с применением метода акустической эмиссии

Особый интерес представляет задача разработки методологии прогнозирования истощения пластичности изделий из конструкционных сталей в зоне ударного воздействия. Для ее решения предложено использовать метод акустической эмиссии, регистрирующий импульсы АЭ, генерируемые при динамической перестройке структуры конструкционного материала [10 – 13]. Селекцию сигналов в режиме нагружения образцов на отдельные потоки, генерируемые процессами

вязкого и хрупкого повреждений структурных связей, осуществляли с использованием разработанной в ИМАШ РАН комбинационно-параметрической концепции, основанной на гипотезе подобия форм сигналов у близких по своей природе источников АЭ [14 – 17]. Как показали проведенные исследования, совместное использование спектрограмм и параметров, характеризующих форму сигналов, позволяет разделять регистрируемые импульсы на потоки, отражающие кинетику вязких и хрупких повреждений материала в процессе его деформирования.

Согласно ГОСТ ИСО Р 55045 – 2012 основные параметры, отражающие форму сигнала (рис. 2), включают: максимальную амплитуду (u_m); время нарастания сигнала (τ_n , мкс) — интервал от момента пересечения порога дискриминации (u_{th}) до достижения максимальной амплитуды (u_m); длительность импульса (τ_c , мкс) — интервал от момента пресечения сигналом порога дискриминации до ухода его под порог; количество выбросов (N_n , ед.) — пересечений фронтом сигнала порога u_{th} .

Как показали исследования [14 – 17], наиболее информативным параметром, позволяющим разделить регистрируемые импульсы на потоки, характерные для вязкого и хрупкого механизмов разрушения, является дескриптор u_m/N_n , отображающий крутизну спада амплитуды на фазе затухания сигнала (см. рис. 2), поверхность под огибающей которой характеризует энергию им-

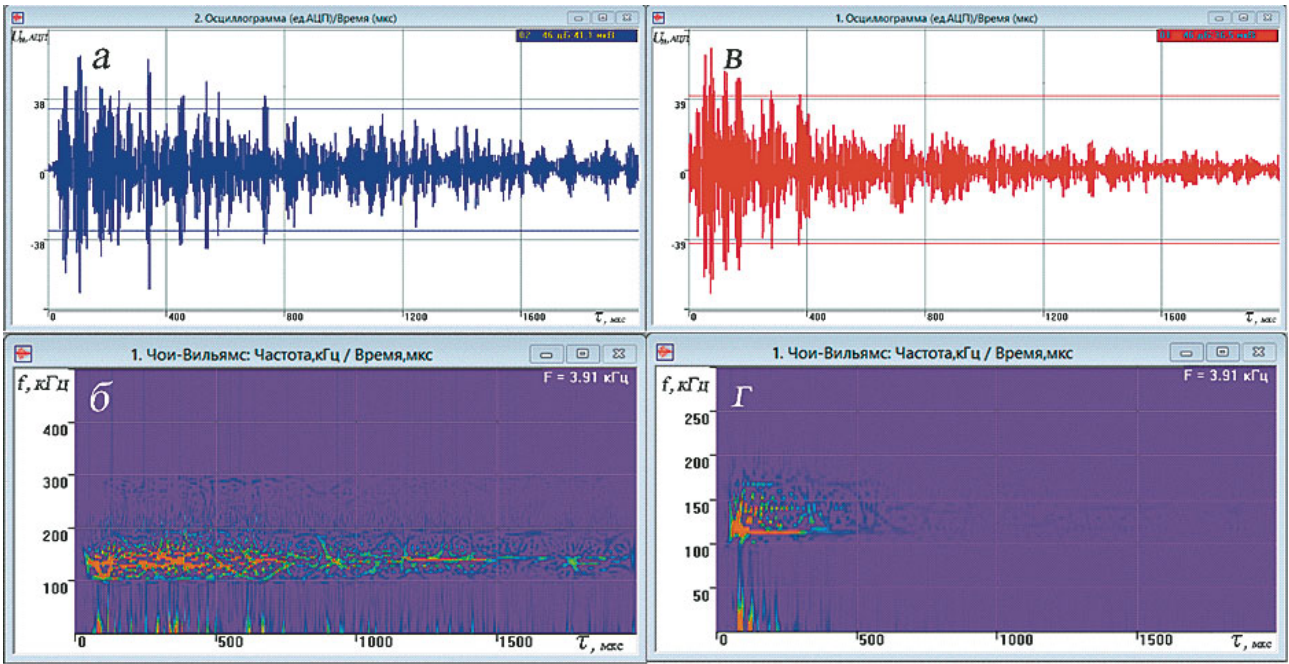


Рис. 3. Формы и спектрограммы сигналов № 1 (а, б) и № 2 (в, г) одинаковой амплитуды, вызванных вязким и хрупким разрушениями

Fig. 3. Comparison of the shapes and spectrograms of signals N 1 (a, b) and N 2 (c, d) of the same amplitude caused by ductile and brittle fracture

пульса (E_n). В практике АЭ-контроля достаточно хорошо известны методики применения амплитудно-временных параметров [11 – 19], в частности, японский стандарт [20 – 22] рекомендует использовать характеристику u_m/N_n для селекции импульсов, генерируемых нормальными и касательными модами напряжений при разрушении бетонных плит.

Для определения пороговых значений параметра u_m/N_n , разделяющих регистрируемые импульсы на два потока, генерируемые вязкими и хрупкими повреждениями, проведено сопоставление форм сигналов и свойственных им спектрограмм.

Результаты АЭ-диагностики получены при испытаниях образца из стали 20ХН2МА на разрыв. АЭ-диагностику выполняли при следующих настройках аппаратуры: порог дискриминации сигналов $u_{th} = 40$ дБ; полоса пропускания цифровых фильтров $\Delta f = 100 - 300$ кГц; по результатам тестирования расчетная групповая скорость $v_g = 2,9$ мм/мкс. На рис. 3 представлены формы (а, в) и спектрограммы Чои – Вильямса (б, г) импульсов № 1 и № 2, генерированных структурными преобразованиями от действия сдвиговых и нормальных мод напряжений, имеющих одинаковые значения максимальной амплитуды $u_m = 46$ дБ.

При сопоставимых уровнях энергетических параметров импульсы, генерируемые сдвиговыми процессами структурных преобразований,

имеют существенно большую длительность, чем сигналы хрупкого разрушения. На это указывают и представленные на рис. 3, б и г спектрограммы, которые отражают скорость затухания энергии сигналов. Видно, что диссипация энергии сигналов вязкого разрушения имеет примерно в пять раз большую длительность затухания.

В таблице представлены основные энергетические и темпоральные параметры сопоставляемых импульсов. Из нее следует, что энергетические и темпоральные параметры, за исключением длительности (τ_n), достаточно близки. Причем расхождение значений параметра u_m/N_n отличается менее чем на 0,6 мкВ/ед. Однако именно этот параметр, отражающий крутизну затухания амплитуды, или тангенс угла наклона фронта ниспадающей волны, позволяет разделять регистрируемые импульсы на два потока. На рис. 4, а показано такое разделение на потоки $N_{д}^I$ и $N_{д}^{II}$, отражающие кинетику вязкого и хруп-

Импульсы вязкого (№ 1) и хрупкого (№ 2) разрушений
Comparison of ductile (N 1) and brittle (N 2) fracture pulses

Сигна- лы АЭ	Энергетические и темпоральные параметры				
	u_m , дБ	E_n , дБ	N_n , ед.	u_m/N_n , мкВ/ед.	τ_n , мкс
№ 1	46	73,6	18	9,368	723
№ 2	46	72,7	21	9,905	391

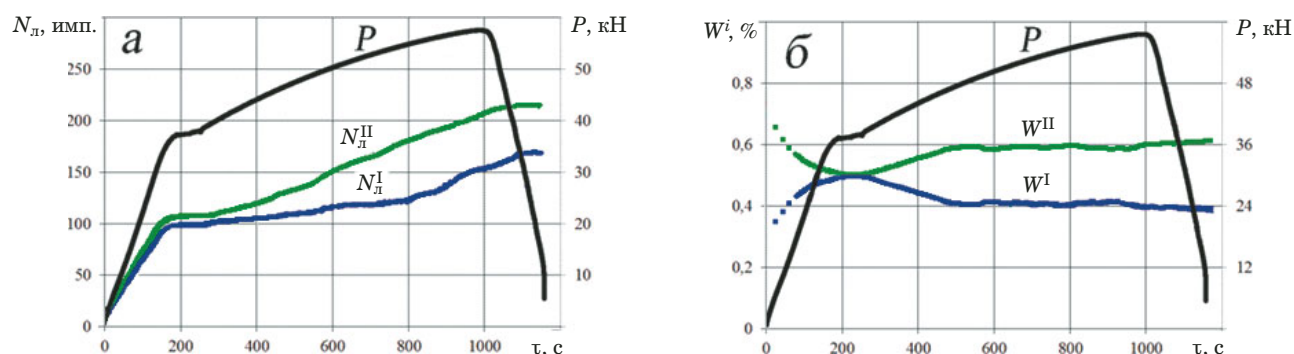


Рис. 4. Графики разделения регистрируемых импульсов на потоки N_I^I и N_I^{II} (а) по уровню параметра u_m/N_i и динамики изменения их весового содержания W^I и W^{II} (б) в режиме нагружения изделия

Fig. 4. Separation of the recorded pulses into flows N_I^I and N_I^{II} (a) by the level of the parameter u_m/N_i and by the dynamics of changes in their weight content W^I and W^{II} (b) in the loading mode

кого накопления повреждений в структуре стали 20ХН2МА, а на рис. 4, б — изменение динамики весового содержания локационных импульсов (W^I) и (W^{II}) в режиме нагружения. Сплошной линией черного цвета (P) показана динамика растягивающей нагрузки при испытаниях стального образца на разрыв. Потоки N_I^I и N_I^{II} объединяют сигналы, имеющие значение параметра u_m/N_i , соответственно меньшее 9,5 мкВ/ед. и большее 9,6 мкВ/ед.

Объект исследования, оборудование и аппаратура, используемые в ходе проводимых экспериментов

Исследовали образцы из стали 20ХН2МА с габаритными размерами $300 \times 20 \times 6$ мм, в центре которых с боковой стороны выполнен V-образный надрез глубиной 3,3 мм. Исследуемая партия включала 30 образцов, которые были разделены на шесть групп, по пять образцов в каждой. Образцы первой партии перед испытаниями на разрыв не подвергали ударному воздействию. Остальные партии образцов подвергали ударному воздействию на маятниковом копре МК-30 [23]. В зоне ударного воздействия, оппозитной месту расположения V-образного надреза глубиной 3,3 мм, пластичность материала изменялась. В результате снижалась доля вязкого разрушения и возрастала доля хрупкого разрушения — сколом. Для оценки ударного воздействия использовали параметр удельной работы [3, 7, 23, 24]

$$a_V = A/(bh), \quad (1)$$

где A , Дж, — работа ударного воздействия; $b = 1,7$ см и $h = 0,6$ см — ширина и толщина образцов в месте V-образного надреза, где площадь $F = 1$ см². При этом удельная работа удара для образцов второй партии составляла 50 Дж/см²,

третьей — 75 Дж/см², четвертой — 100 Дж/см², пятой — 125 Дж/см² и шестой — 150 Дж/см².

Для регистрации результатов ударного воздействия использовали высокоскоростную камеру Evercam 2000-16-M, выпускаемую ООО «Эверком» (Россия). На рис. 5 представлены результаты такого воздействия при уровне удельной работы $a_V = 50$ Дж/см² (а), 75 Дж/см² (б) и 150 Дж/см² (в), зарегистрированные при скорости съемки 7000 кадров в секунду.

На снимках слева показано положение деформируемого образца, справа — ножа маятникового копра. В области надреза образцов видны зоны пластического деформирования материала и раскрытия трещины.

Испытания образцов на разрыв проводили на универсальной испытательной машине Instron-5982. Предварительно на их боковую поверхность через слой контактной смазки симметрично (на расстоянии 60 мм) относительно надреза устанавливали ПАЭ. Перед контрольным нагружением все образцы подвергали предварительной протяжке при повышении нагрузки до 5 кН. Испытание на разрыв выполняли при перемещении подвижной траверсы со скоростью 1 мм/мин. При этом АЭ-диагностику проводили с применением преобразователей R15a-AST (фирмы Mistras, США), а также системы A-Line 32D (ООО «Интерюнис-ИТ», РФ), имеющей следующие настройки аппаратуры: порог дискриминации сигналов $u_{th} = 40$ дБ; полоса пропускания цифровых фильтров $\Delta f = 100 - 300$ кГц; по результатам тестирования расчетная групповая скорость $v_g = 2,9$ мм/мкс. В процессе нагружения образцов для контроля кинетики повреждений наряду с АЭ-диагностикой использовали видеосъемку. На рис. 6 приведены снимки поврежденного материала образца в зоне надреза после ударного воздействия ($a_V = 75$ Дж/см²) на стадиях неупругого и предельного состояния при уровне деформации, %, равной 1 (а), 3 (б), 6 (в), 9 (г), 11 (д).

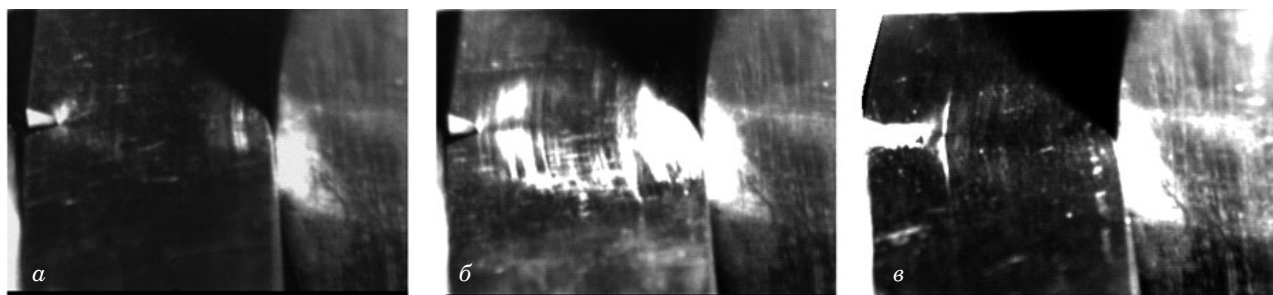


Рис. 5. Кадры деформирования образцов при ударе ножа маятника с удельной работой 50 Дж/см² (а), 75 Дж/см² (б) и 150 Дж/см² (в)

Fig. 5. Frames of the sample deformation upon the impact of a pendulum knife with a specific work of 50 J/cm² (a), 75 J/cm² (b), and 150 J/cm² (c)

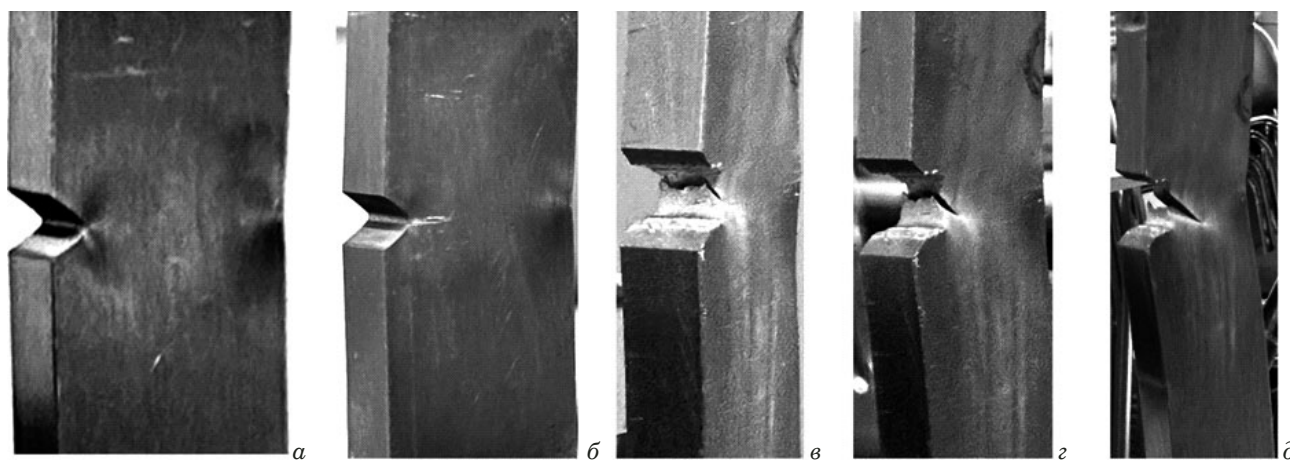


Рис. 6. Вид поврежденного образца с надрезом при испытаниях на разрыв после ударного воздействия с уровнем $a_v = 75$ Дж/см² на стадиях неупругого и предельного состояния при деформации, равной 1 (а), 3 (б), 6 (в), 9 (г), 11 % (д)

Fig. 6. Video monitoring of the notched sample during tensile tests after the impact at a level of the specific work of 75 J/cm² at the stages of inelastic and limiting states during deformation: 1 (a), 3 (b), 6 (c), 9 (d), 11% (e)

Результаты АЭ-диагностики при испытаниях образцов на разрыв после ударного воздействия

Сопоставим результаты исчерпания пластичности стали 20ХН2МА в зоне надреза для образцов партий № 1 – № 6 в зависимости от уровня удельной работы. Прежде рассмотрим динамику изменения критериального параметра u_m/N_n , используемого для разделения регистрируемых импульсов на потоки $N_{\text{л}}^{\text{I}}$ и $N_{\text{л}}^{\text{II}}$, отражающие кинетику вязких и хрупких повреждений на стадиях деформирования материала.

На рис. 7 приведены результаты АЭ-диагностики, полученные при испытаниях образца из партии № 1 на разрыв, которые включают координатную локацию индикаций источников АЭ (а), график накопления АЭ-событий (б), динамику критериального параметра u_m/N_n (в), кластеры сигналов I и II (г), сформировавшиеся в поле параметров ($u_m/N_n - E_n$) при испытании образца, накопление локационных импульсов $N_{\text{л}}^{\text{I}}$ и $N_{\text{л}}^{\text{II}}$ (д) и их весовые параметры W^{I} и W^{II} (е) в процес-

се нагружения; линия черного цвета, обозначенная P , — изменение нагрузки в кН.

Как следует из рис. 7, а, наибольшая плотность индикаций источников АЭ, достигающая 32 ед./мм, сформировалась в области бокового надреза. Всего зарегистрировано $N_{\Sigma} = 417$ источников АЭ.

Анализ диаграммы нагружения образца растягивающим усилием $P = f(\tau)$ позволяет разделить ее на пять характерных стадий, включающих упругое (1) и упругопластическое (2) деформирование, площадку текучести (3), упрочнение материала (4) и предельное состояние (5). Рассмотрим процессы, происходящие на этих стадиях.

Стадия 1 соответствует уровню деформирования материала $\varepsilon_1 \leq 0,2$ %. При таких деформациях срабатывают различные рассеянные концентраторы, в том числе поверхностные, подповерхностные и структурные, образовавшиеся на этапах изготовления образцов и изделий. Наиболее активное их накопление в зоне надреза ($N_{\text{л}} =$

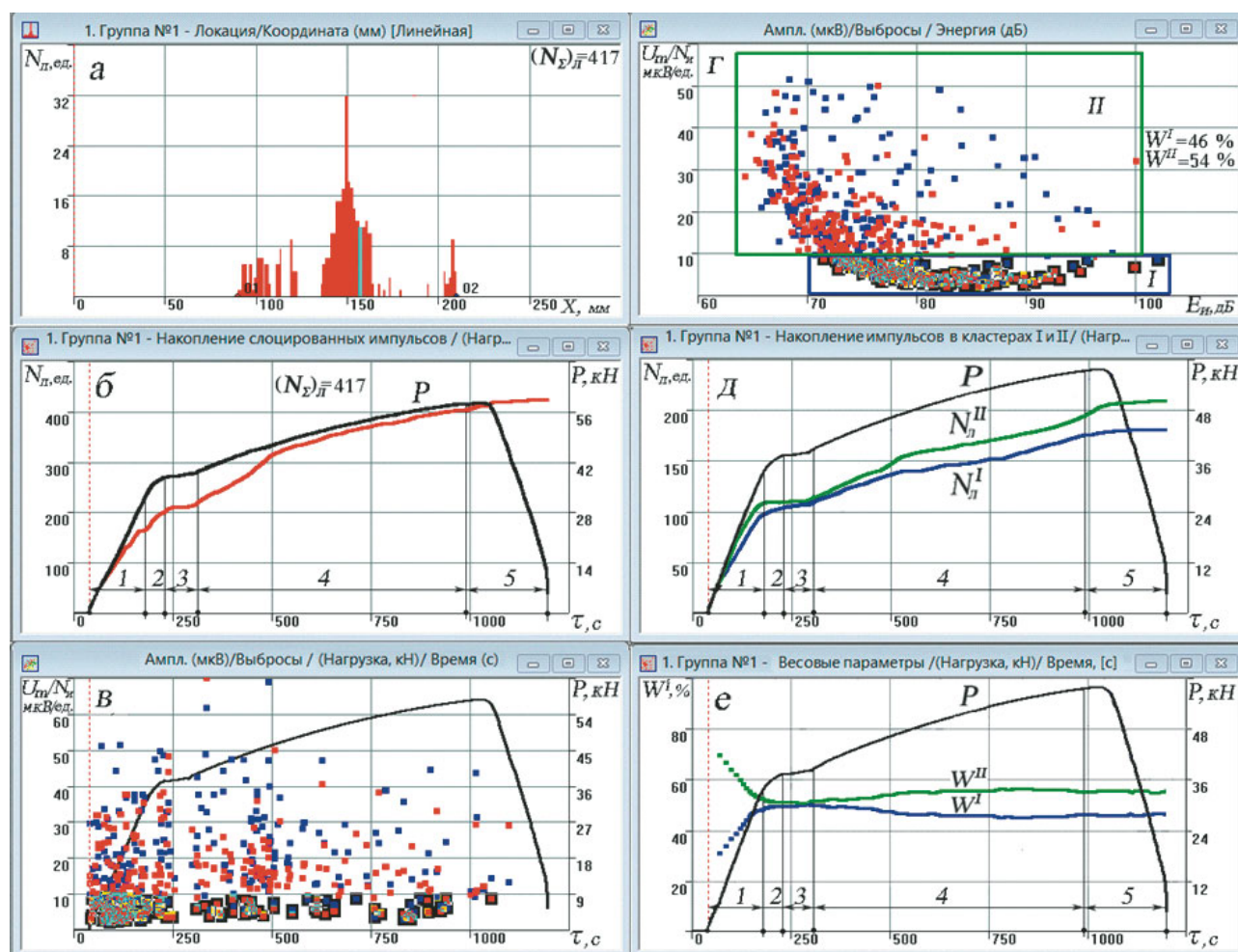


Рис. 7. Результаты АЭ-диагностики образца партии № 1 из стали 20ХН2МА с боковым V-образным надрезом глубиной 3,3 мм при испытаниях на разрыв

Fig. 7. The results of AE diagnostics of a 20KhN2MA steel V-notched sample from batch N 1 under tensile rupture tests

= 170 ед.) регистрировалось при нагрузках $P \leq 30$ кН. При этом, как следует из рис. 7, д и е, большая часть импульсов АЭ была генерирована процессами хрупкого разрушения. Весовое содержание импульсов изменялось следующим образом: параметр W^I повышался от 30 до 44 %, W^{II} снижался с 70 до 56 %.

На стадии 2 упругопластического деформирования конструкционной стали ($\varepsilon_1 > 0,2$ %) начинается процесс потери материалом сдвиговой устойчивости. Под воздействием растягивающих деформаций в зонах структурных неоднородностей происходит локальная перестройка, сопровождаемая движением дислокаций. При этом продолжались рост W^I и снижение W^{II} , уровень которых на этой стадии достигал 48 и 52 %. Основной массив импульсов, генерируемых сдвиговыми процессами, при этом не регистрировался, так как имел максимальную амплитуду ниже установленного порога дискриминации сигналов $u_{th} = 40$ дБ, выбранного исходя из угрозы возникновения непрерывной эмиссии и отстрой-

ки от сигналов помех работы испытательного стенда.

На площадке текучести (стадия 3) дислокационные процессы вдоль кристаллографических плоскостей приобретают массовый характер, что вызывает образование полос скольжения. Такие процессы перестройки структурных связей, как правило, сопровождаются массовой генерацией низкоэнергетических импульсов АЭ с амплитудой $u_m \leq 40$ дБ, вызывающей непрерывную эмиссию на этой стадии деформирования материала. Однако при выбранном уровне порога $u_{th} = 40$ дБ регистрация импульсов практически отсутствовала, о чем свидетельствует стабильность весовых параметров: $W^I = 49$ % и $W^{II} = 51$ %.

Стадия 4 связана с упрочнением материала в процессе деформирования. Она характеризуется максимальной длительностью, наибольшим диапазоном деформаций и устойчивым накоплением импульсов в потоках N_{II}^I и N_{II}^{II} (см. рис. 7, в). На стадии развитой пластической деформации при

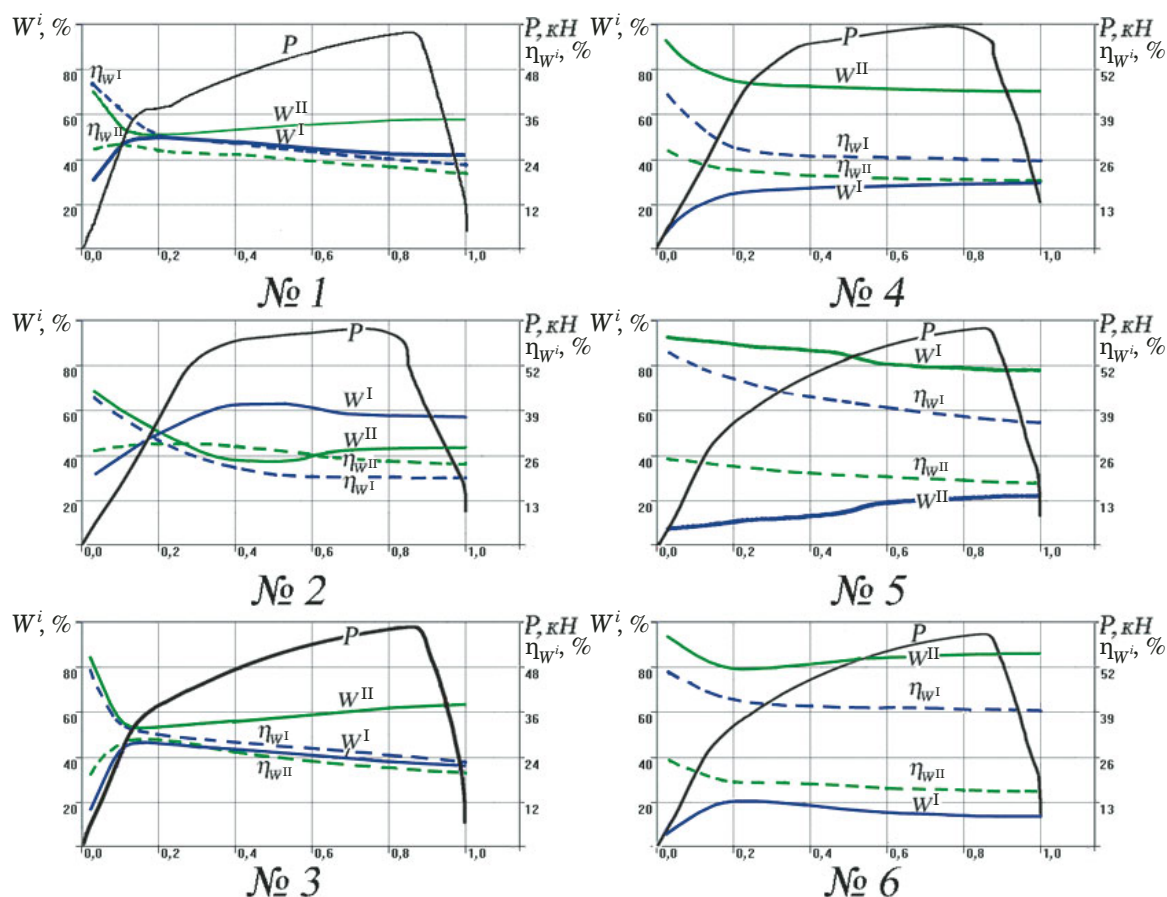


Рис. 8. Динамика изменения средних выборочных значений весового содержания локационных импульсов (W^I) и (W^{II}) и уровня их разброса η_{Wi} в интервале $\pm 2S$ при испытании образцов партий № 1 – № 6

Fig. 8. Dynamics of changes in the average sample values of the weight content of pulses (W^I) and (W^{II}) and the level of their scatter η_{Wi} in the range of $\pm 2S$ for sample batches N 1 – N 6

$\varepsilon_1 \geq 3 - 5 \%$ происходят процессы фрагментации структуры металла, обусловленные истощением дальнейшей возможности системы перераспределять возрастающие напряжения в зернах и блоках за счет уплотнения концентрации дислокаций и образования деклинаций вдоль их границ [3, 6 – 8]. При этом элементы образующейся субструктуры подвергаются трансляционным, сдвиговым и поворотным модам воздействия касательных и нормальных напряжений, определяющих их ориентацию в структуре металла. Все изменения положения образующейся субструктуры взаимосвязаны и направлены на снижение внутренней энергии. Рост упрочнения материала сопровождается истощением дислокационных процессов. В результате локализованный макроконтратор (надрез), аккумулируя трансляционные, сдвиговые и поворотные моды напряжений, генерирует зарождение микротрещин. Упрочнение материала влечет ветвление и слияние подрастающих трещин. Как следует из рис. 7, d и e , на стадии 4 накопление импульсов I и II типов происходит синхронно, вследствие чего их весовое содержание меняется незначи-

тельно: W^I снижается до 44 – 46 %, а W^{II} возрастает до 54 – 56 %.

На стадии 5 при достижении предельного уровня нагрузки $P_b = 56$ кН происходила дальнейшая фрагментация структуры металла, сопровождаемая образованием и развитием доминантной трещины, вызывающей окончательное разрушение образца в зоне надреза. При этом накопление импульсов в кластерах I и II было минимальным, а их весовые параметры сохранялись на прежнем уровне: $W^I = 46 \%$ и $W^{II} = 54 \%$.

На рис. 8 приведены результаты АЭ-диагностики, полученные при испытаниях на разрыв образцов партий № 1 – № 6. Видна динамика изменения средних выборочных значений весового содержания локационных импульсов (W^I и W^{II}) и уровня их разброса η_{Wi} в интервале $\pm 2S$, отражающая кинетику накопления вязких и хрупких повреждений в зоне надреза образцов из стали 20ХН2МА в зависимости от удельной работы ударного воздействия. По мере повышения уровня a_v от 50 до 150 Дж/см² расхождение между параметрами весового содержания локационных импульсов W^I и W^{II} постоянно возрастало. Поро-

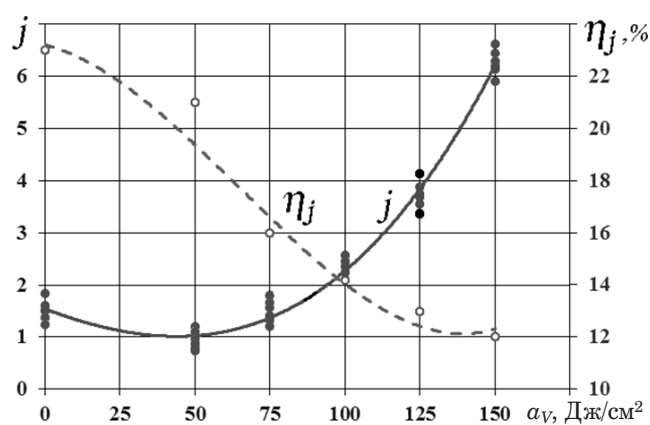


Рис. 9. Изменения соотношения пороговых параметров содержания локационных импульсов $j = [W^{\text{II}}]/[W^{\text{I}}]$ и уровня его разброса η_j в интервале $\pm 2S$ при повышении удельной работы удара a_v от 0 до 150 Дж/см²

Fig. 9. Changes in the ratio of the threshold parameters of the content of location pulses $j = [W^{\text{II}}]/[W^{\text{I}}]$ and the level of their scatter η_j in the range of $\pm 2S$ with an increase in the level of specific impact work from 0 to 150 J/cm²

говые значения $[W^{\text{I}}]$ и $[W^{\text{II}}]$, регистрируемые в момент разрушения образцов в партиях № 2 – № 6, изменялись следующим образом: по мере повышения a_v от 50 до 150 Дж/см² $[W^{\text{I}}]$ постепенно снижалось с 42 до 16 %, а $[W^{\text{II}}]$ синхронно возрастало от 58 до 84 %.

На рис. 9 показаны изменения соотношения $j = [W^{\text{II}}]/[W^{\text{I}}]$ — средних выборочных значений пороговых параметров $[W^{\text{I}}]$ и $[W^{\text{II}}]$ весового содержания локационных импульсов и уровня его разброса η_j в интервале $\pm 2S$ (S — среднее квадратичное отклонение) в зависимости от a_v , значение которого возрастало от 0 до 150 Дж/см² для партий образцов № 1 – № 6.

Как следует из представленного графика, повышение удельной работы ударного воздействия от 50 до 150 Дж/см² вызвало рост соотношения $j = [W^{\text{II}}]/[W^{\text{I}}]$ в шесть раз (от 1 до 6). Очевидно, в такой же пропорции происходит снижение парциальной доли вязких и возрастание хрупких повреждений в стали 20ХН2МА. При повышении уровня a_v от 0 до 50 Дж/см² наблюдается падение соотношения j , что характеризует рост вязкой и снижение хрупкой парциальных долей повреждений при разрушении структурных связей ферритно-карбидной стали 20ХН2МА. Как показали микроструктурные исследования, такое улучшение пластических свойств материала обусловлено локальным перераспределением карбидных включений, а также возникновением начальных напряжений сжатия в зоне надреза в результате ударного воздействия. На последнее указывает рост уровня максимальной нагрузки примерно на 10 % (до 62 кН) при испытаниях на разрыв образцов второй партии по сравнению с образцами первой, в которых разрушающая нагрузка не

превышала 57 кН. Следует отметить, что при испытаниях образцов на разрыв расхождение линий нагружения во всех партиях составляло не более 4 % в интервале $\pm 2S$ (см. рис. 8).

Если оценивать потерю пластичности материала по длительности испытания образцов на разрыв, то при повышении уровня a_v от 0 до 150 Дж/см² она сократилась с 1350 до 450 с, т.е. пластичность стали 20ХН2МА снизилась в три раза. Такой результат достаточно хорошо коррелирует с данными АЭ диагностики, согласно которым (см. рис. 9), при повышении значения a_v от 0 до 150 Дж/см² уровень j возрос в 3,5 раза (с 1,7 до 6).

Выводы

Проведенные исследования показали возможность использования АЭ диагностики для оценки истощения пластических свойств конструкционных сталей в результате ударного воздействия. Совместное использование спектрограмм и параметров, характеризующих форму сигналов, позволяет разделять регистрируемые импульсы на потоки, отражающие кинетику вязких и хрупких повреждений в процессе деформирования материала. В качестве критериального использован комплексный параметр $u_m/N_{\text{и}}$, отображающий крутизну спада амплитуды на фазе затухания сигнала (см. рис. 2), поверхность под огибающей которой характеризует энергию импульса $E_{\text{и}}$. Селекция импульсов в поле параметров $u_m/N_{\text{и}} - E_{\text{и}}$ позволяет разделять регистрируемые импульсы на потоки $N_{\text{л}}^{\text{I}}$ и $N_{\text{л}}^{\text{II}}$, отражающие кинетику вязких и хрупких повреждений конструкционных сталей. Контролируя кинетику изменения их весового содержания по параметрам W^{I} и W^{II} локационных импульсов в режиме нагружения изделия и сопоставляя ее с результатами, полученными на тестовых образцах при различном уровне удельной работы (см. рис. 8), можно оценить истощение пластичности изделия в зоне удара.

Заключение

Приведем основные положения методики оценки степени истощения пластичности материала в зоне ударного воздействия с применением АЭ-диагностики.

1. Тестовые образцы из материала исследуемого изделия подвергают ударному воздействию с различным уровнем удельной работы в зоне концентратора.

2. С применением АЭ-диагностики проводят испытания на разрыв образцов партии без ударного воздействия и партий, подвергнутых удару с различным уровнем удельной работы.

3. Строят зависимости средних выборочных значений весового содержания параметров W^I и W^{II} локационных импульсов от уровня деформаций $\varepsilon_I/\varepsilon_B$ и соотношения $[W^{II}]/[W^I]$ от уровня удельной работы ударного воздействия a_V в зоне концентратора (см. рис. 8 и рис. 9).

4. Выполняя АЭ-диагностику при испытании исследуемого изделия после ударного воздействия, сопоставляя динамику изменения весового содержания локационных импульсов и соотношения их весовых параметров W^{II}/W^I с тестовыми значениями, полученными на образцах при разном уровне ударного воздействия, оценивают степень исчерпания пластической деформации.

Благодарности

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

Результаты экспериментальных исследований получены с использованием оборудования, предоставленного центром коллективного пользования «Научное оборудование для создания машин будущего» Института машиноведения им. А. А. Благонравова.

ЛИТЕРАТУРА

1. Махутов Н. А. Безопасность и риски: системные исследования и разработки. — Новосибирск: Наука, 2017. — 724 с.
2. Проблемы прочности, техногенной безопасности и конструкционного материаловедения / Под ред. Н. А. Махутова, Ю. Г. Матвиенко, А. Н. Романова. — М.: ЛЕНАНД, 2018. — 720 с.
3. Ботвина Л. Р. Разрушение, кинетика, механизмы, общие закономерности. — М.: Наука, 2008. — 334 с.
4. Матвиенко Ю. Г. Основы физики и механики разрушения. — М.: Физматлит, 2022. — 144 с.
5. Завойчинская Э. Б. Общие закономерности и критерии разрушения твердых тел на разных масштабных уровнях при длительном нагружении (Обобщающая статья) / Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2022. Т. 88. № 7. С. 48 – 62. DOI: 10.26896/1028-6861-2022-88-7-48-62
6. Рыбин В. В. Большие пластические деформации и разрушение металлов. — М.: Металлургия, 1986. — 224 с.
7. Гуляев А. П. Металловедение. — М.: Металлургия, 1978. — 647 с.
8. Ботвина Л. Р., Белецкий Е. Н., Тютин М. Р. и др. Разрушение стали 30ХГСА в условиях смешанных мод нагружения / Физическая мезомеханика. 2023. Т. 26. № 2. С. 30 – 42. DOI: 10.55652/1683-805X_2023_26_2_30
9. Растегаева И. И., Растегаев И. А., Аглетдинов Э. А., Мерсон Д. Л. Сравнение основных частотно-временных преобразований спектрального анализа сигналов акустической эмиссии / Frontier Materials & Technologies. 2022. № 1. С. 49 – 60. DOI: 10.18323/2782-4039-2022-1-49-60
10. Pollock A. Acoustic emission testing. Metals handbook. 9th edition. Vol. 17. — AST International, 1989. P. 278 – 294.
11. Иванов В. И., Барат В. А. Акустико-эмиссионная диагностика. — М.: Спектр, 2017. — 368 с.
12. Махутов Н. А. Спектральный акусто-эмиссионный анализ в процессе деформирования и повреждения / Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2018. Т. 84. № 10. С. 53 – 58. DOI: 10.26896/1028-6861-2018-84-10-53-58
13. 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. Vol. 14. 2090. DOI: 10.3390/ma14092090

14. Пат. 2569078 РФ, МПК G01N29/14, С 1. Способ распознавания источников сигналов акустической эмиссии, возникающих при деградации материала, образовании трещин и разрушении конструкции / Васильев И. Е., Матвиенко Ю. Г., Иванов В. И., Елизаров С. В.; заявитель и патентообладатель Институт машиноведения им. А. А. Благонравова РАН. — № 2014125453/28, заявл. 24.06.2014; опублик. 20.11.2015. Бюл. № 32.
15. Махутов Н. А., Васильев И. Е., Иванов В. И. и др. Тестирование методики кластерного анализа массивов акустико-эмиссионных импульсов при формировании насыпного конуса стеклогранулята / Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2016. Т. 82. № 5. С. 44 – 54.
16. 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. ID: 42965410
17. Матвиенко Ю. Г., Васильев И. Е., Чернов Д. В., Панков В. А. Акустико-эмиссионный мониторинг процесса повреждения опорной стойки в условиях циклического нагружения / Дефектоскопия. 2019. № 8. С. 24 – 33. DOI: 10.1134/S0130308219080037
18. Ботвина Л. Р., Петерсен Т. Б., Солдатенков А. П., Тютин М. Р. О временных зависимостях характеристик акустических сигналов при разрушении металлических образцов / Доклады Академии Наук. 2015. Т. 462. № 1. С. 91 – 94.
19. Ботвина Л. Р., Солдатенков А. П., Тютин М. Р. О зависимости параметра b_{A3} от напряжения при смешанных модах нагружения / Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2011. Т. 77. № 3. С. 43 – 50.
20. Monitoring Method for Active Cracks in Concrete by Acoustic Emission / JCMS-III B5706. Federation of Construction Materials Industries. Japan, 2003. — 29 p.
21. Gong N., Hu S., Chen X., et al. Fracture behavior and acoustic emission characteristics of reinforced concrete under mixed mode I – II load conditions / Theoretical and Applied Fracture Mechanics. 2020. Vol. 109(4). P. 745 – 763. DOI: 10.1016/j.tafmec.2020.102770
22. Masayasu Ohtsu, Toshiro Isoda and Yuichi Tomoda. Acoustic emission techniques standardized for concrete structures / J. Acoustic Emission. 2007. Vol. 25. P. 21 – 32.
23. Полякова Е. В. Ударные испытания образцов на изгиб: методические указания. — Оренбург: Оренбургский гос. ун-т, 2019. — 17 с.
24. Максимов А. Б., Шевченко И. П., Ерохина И. С. Определение составляющих ударной вязкости металла при испытании на ударный изгиб / Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2018. Т. 84. № 12. С. 68 – 72. DOI: 10.26896/1028-6861-2018-84-12-68-72

REFERENCES

1. Makhutov N. A. Safety and risks: system researches and developments. — Novosibirsk: Nauka, 2017. — 724 p. [in Russian].
2. Problems of the strength of materials, industrial security and construction materials / Edited by N. A. Makhutov, Yu. G. Matvienko, A. N. Romanov. — Moscow: Lenand, 2018. — 720 p. [in Russian].
3. Botvina L. R. Fracture. Kinetics, mechanisms, general patterns. — Moscow: Nauka, 2008. — 334 p. [in Russian].
4. Matvienko Yu. G. Fundamentals of physics and mechanics of fracture. — Moscow: Fismatlit, 2022. — 144 p. [in Russian].
5. Zavoychinskaya E. B. General Principles and criteria of failure of solids on different scale-structure levels under static and alternating loading / Industr. Lab. Mater. Diagn. 2022. Vol. 88. N 7. P. 48 – 62 [in Russian]. DOI: 10.26896/1028-6861-2022-88-7-48-62

6. **Rybin V. V.** Grand plastic deformations and failure of metals. — Moscow: Metallurgiya, 1986. — 224 p. [in Russian].
7. **Gulyaev A. P.** Metallovedenie. — Moscow: Metallurgiya, 1978. — 647 p. [in Russian].
8. **Botvina L. R., et al.** Fracture of 30KhGSA steel under mixed loading modes / *Phys. Mesomech.* 2023. Vol. 26. N 2. P. 30 – 42 [in Russian]. DOI: 10.55652/1683-805X_2023_26_2_30
9. **Rastegaeva I. I., Rastegaev I. A., Agletdinov E. A., Merson D. L.** The comparison of the main time-frequency transformations of spectral analysis of acoustic emission signals / *Frontier Materials & Technologies.* 2022. N 1. P. 49 – 60 [in Russian]. DOI: 10.18323/2782-4039-2022-1-49-60
10. **Pollock A.** Acoustic emission testing. Metals handbook. 9th edition. Vol. 17. — AST International, 1989. P. 278 – 294.
11. **Ivanov V. I., Barat V. A.** Acoustic emission diagnostic. — Moscow: Spektr, 2017. — 368 p. [in Russian].
12. **Makhutov N. A.** Acoustic-emission analysis of the processes of deformation and damage / *Industr. Lab. Mater. Diagn.* 2018. Vol. 84. N 10. P. 53 – 58 [in Russian]. DOI: 10.26896/1028-6861-2018-84-10-53-58
13. **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. Vol. 14. 2090. DOI: 10.3390/ma14092090
14. Patent 2569078 RF. Method of recognition of the sources of acoustic emission signals arising during the degradation of the material, formation cracks and destroying the structure / Vasilyev I. E., Matvienko Y. G., Ivanov V. I., Elizarov S. V.; owner and applicant Mechanical Engineering Research Institute of the Russian Academy of Sciences. — N 2014125453/28; appl. 24.06.2014; publ. 20.11.2015. Byull. N 32 [in Russian].
15. **Makhutov N. A., Vasil'ev I. E., Ivanov V. I., et al.** Testing the technique for the cluster analysis of acoustic emission pulse arrays under the formation of a conical glass granulate pile / *Inorg. Mater.* 2017. Vol. 53. N 15. P. 1513 – 1524. DOI: 10.1134/S0020168517150080
16. **Vasil'ev I. E., Matvienko Y. G., Chernov D. V., Elizarov S. V.** Monitoring of damage accumulation in caisson of the planer MS-21 using acoustic emission / *Probl. Mashinostr. Avtomat.* 2020. N 2. P. 118 – 141 [in Russian].
17. **Matvienko Y. G., Vasil'ev I. E., Chernov D. V., Pankov A. V.** Acoustic-Emission Monitoring of Airframe Failure under Cyclic Loading / *Russian Journal of Nondestructive Testing.* 2019. Vol. 55. N 8. P. 570 – 580. DOI: 10.1134/S1061830919080084.
18. **Botvina L. R. et al.** About the time dependencies of the characteristics of acoustic signals during the fracture of metal specimens / *Dokl. RAN.* 2015. Vol. 462. N 1. P. 91 – 94 [in Russian].
19. **Botvina L. R., Petersen T. B., Tiutin M. R.** Assessment and Analysis of *b*-Parameter of Acoustic Emission / *Industr. Lab. Mater. Diagn.* 2011. Vol. 77. N 3. P. 43 – 50 [in Russian].
20. Monitoring Method for Active Cracks in Concrete by Acoustic Emission / *JCMS-III B5706.* Federation of Construction Materials Industries. Japan, 2003. — 29 p.
21. **Gong N., Hu S., Chen X., et al.** Fracture behavior and acoustic emission characteristics of reinforced concrete under mixed mode I – II load conditions / *Theoretical and Applied Fracture Mechanics.* 2020. Vol. 109(4). P. 745 – 763. DOI: 10.1016/j.tafmec.2020.102770
22. **Masayasu Ohtsu, Toshiro Isoda and Yuichi Tomoda.** Acoustic emission techniques standardized for concrete structures / *J. Acoustic Emission.* 2007. Vol. 25. P. 21 – 32.
23. **Poyarkova E. V.** Bending impact tests: Guidelines. — Orenburg: Orenburg State University, 2019. — 17 p. [in Russian].
24. **Maksimov A. B., Shevchenko I. P., Erokhina I. S.** Determination of the metal toughness components in impact-bending test / *Industr. Lab. Mater. Diagn.* 2018. Vol. 84. N 12. P. 68 – 72 [in Russian]. DOI: 10.26896/1028-6861-2018-84-12-68-72