

DOI: 10.26896/1028-6861-2018-84-10-53-58

СПЕКТРАЛЬНЫЙ АКУСТО-ЭМИССИОННЫЙ АНАЛИЗ ПРОЦЕССА ДЕФОРМИРОВАНИЯ И ПОВРЕЖДЕНИЯ*

© Николай Андреевич Махутов

Институт машиноведения им. А. А. Благонравова Российской академии наук, Москва, Россия; e-mail: kei51@mail.ru

Статья поступила 28 мая 2018 г.

Отмечено изменение параметров акустической эмиссии при однократном статическом нагружении плоского металлического образца с хрупким тензочувствительным покрытием, нанесенным на его поверхность. По мере увеличения времени нагружения растягивающей нагрузкой регистрировали активность сигналов акустической эмиссии — их энергии, числа и частоты. Показано, что в области малых упругих и упругопластических деформаций, сопоставимых с деформациями предела текучести, при дальнейшем нагружении до предела прочности дислокационный механизм деформирования связан с процессами, протекающими на нано- и микроуровнях с соответствующими частотами акустоэмиссионных сигналов. Развитие локальных деформаций на микро- и мезоуровнях должно сопровождаться при этом другой структурой сигналов при возникновении микродефектов — с большими амплитудами и меньшими частотами. Предположительно это происходит при образовании мезоразрывов на границах зерен и в зонах большого скопления дислокаций. В этом случае число сигналов высокой энергии должно уменьшаться при одновременном снижении акустических частот. Если испытания на растяжение проводятся на относительно крупнозернистых сталях высокой прочности и низкой пластичности, то звуковые эффекты могут регистрироваться органами слуха человека. В дополнение к традиционному анализу этих параметров построены спектры акустической эмиссии на заданных интервалах нагружения. С применением новых интегральных параметров этих спектров показаны общие закономерности изменения спектров из области повышенных в область пониженных частот с ростом числа сигналов. Это характеризует приближение опасных поврежденных состояний по мере увеличения напряжений в алюминиевом образце с покрытием. Приведены обобщенные параметры изменения спектров. Так появилась возможность исследовать указанные особенности процессов упругого и упругопластического деформирования с применением спектральных методов и новых интегральных диагностических параметров.

Ключевые слова: нагружение; напряжение; повреждения; акустическая эмиссия; спектральные характеристики; опасное состояние.

ACOUSTIC-EMISSION ANALYSIS OF THE PROCESSES OF DEFORMATION AND DAMAGE

© Nikolay A. Makhutov

Mechanical Engineering Research Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia; e-mail: kei51@mail.ru

Submitted May 28, 2018.

Change of acoustic emission parameters is observed upon a single static loading of a flat metal specimen with the brittle strain-sensitive coating deposited on the surface. The activity of acoustic emission signals (their energy, number, and frequency) was recorded as the time of tensile loading increased. It is shown that upon further loading to the ultimate strength in the region of small elastic and elastoplastic deformations comparable to the yield stress deformations, the dislocation mechanism of deformation is attributed to the processes occurring at nano and micro levels with the corresponding frequencies of acoustic emission signals. The development of local deformations at micro- and meso-levels should be accompanied by a different signal structure when microdefects occur, with larger amplitudes and lower frequencies. Presumably, this occurs during formation of mesobreaks at the grain boundaries and in zones of large dislocation clusters. In this case the number of high energy signals should decrease at simultaneous decrease of acoustic frequencies. When tensile tests are performed on relatively coarse-grained steels of high strength and low ductility, then sound effects can be recorded even by human ear. In addition to the traditional analysis of these parameters, acoustic emission spectra have been constructed for given loading intervals. With the use of new integral parameters of those spectra, the gen-

* Работа выполнена при поддержке РНФ, грант № 14-19-00776-П.

eral patterns of changes in the spectra from the region of higher to lower frequencies with increasing number of signals are shown. This fact indicates to oncoming of dangerous damaged state as the stresses increase in the coated aluminum sample. The generalized parameters of spectrum changes are presented. This provides a possibility to study the indicated features of elastic and elastoplastic deformation using spectral methods and new integral diagnostic parameters.

Keywords: loading; stress; damages; acoustic emission; spectral characteristics; dangerous state.

Для исследования макро-и микрохарактеристик упругого и пластического деформирования металлических материалов используется большое число методов и средств, в частности, оптические, профилометрические, механические, акустические, электрофизические, тензометрические, голографические, световые, радиационные, рентгеновские [1 – 3]. В последние десятилетия особое место занимают методы и системы акустической эмиссии [1, 4]. Журнал «Заводская лаборатория. Диагностика материалов» большое внимание уделял и уделяет развитию всех основных методов диагностического исследования временных процессов (по параметру τ) деформирования. Эти процессы направлены на получение прямой экспериментальной информации о состоянии материалов на заданной временной стадии τ_i нагружения $\sigma(\tau_i)$ [деформирования $e(\tau_i)$] преимущественно по текущим значениям основных первичных регистрируемых параметров $p(\tau_i)$. Построение традиционных связей [2, 5 – 11]

$$p(\tau_i) = F_e\{\sigma(\tau_i), e(\tau_i)\} \quad (1)$$

позволяет судить о накоплении повреждений $d(\tau_i)$ и о достижении критических (предельных) состояний по новой структуре спектральных изменений частотных $f(\tau_i)$ параметров $p(\tau_i)$ деформирования $e(\tau_i)$ и повреждения $d(\tau_i)$:

$$d(\tau_i) = F_{ep}\{\sigma(\tau_i), e(\tau_i), p(\tau_i)\} \leq d_e(\tau_c). \quad (2)$$

Реализация на лабораторных образцах, моделях и натурных конструкциях в экспериментах выражения (2) может рассматриваться как новая научная основа спектральной диагностики для прогнозной оценки рисков аварийных и катастрофических ситуаций [2, 6, 7, 10, 11].

Деформационные и силовые характеристики состояния и повреждений. Условные напряжения $\sigma(\tau_i)$ при растяжении образца (рис. 1) определяются нагрузками $P(\tau_i)$ и размером исходного сечения F_0 , а истинные напряжения $\sigma_n(\tau_i)$ — размером текущего, уменьшающегося сечения $F(\tau_i)$:

$$\sigma(\tau_i) = P(\tau_i)/F_0, \sigma_n(\tau_i) = P(\tau_i)/F(\tau_i). \quad (3)$$

Условные деформации $e(\tau_i)$ зависят от удлинения образца $\Delta l(\tau_i)$ и его длины l_0 , а истинные $e_n(\tau_i)$ определяются приращением длины $dl(\tau_i)$ и длиной $l(\tau_i)$:

$$e(\tau_i) = \Delta l/l_0; e_n(\tau_i) = dl(\tau_i)/l(\tau_i),$$

$$\{e(\tau_i), e_n(\tau_i)\} = F_\sigma\{\sigma(\tau_i), \sigma_n(\tau_i)\}. \quad (4)$$

Предельным условным напряжением $\sigma_k(\tau_i)$ в момент разрушения τ_k является критериальная характеристика предела прочности материала образца σ_b , а предельным истинным напряжением — сопротивление отрыву в шейке S_k :

$$\sigma_k(\tau_k) = \sigma_b; \sigma_{nk}(\tau_k) = S_k. \quad (5)$$

Деформационные критерии разрушения — относительное удлинение δ_k и относительное сужение ψ_k :

$$e_k(\tau_k) = \delta_k; \psi_k(\tau_k) = (F_0 - F_k)/F_0 = \psi_k. \quad (6)$$

Величине деформации ψ_k по (6) отвечает логарифмическая деформация

$$e_n(\tau_k) = \ln \frac{1}{1 - \psi_k} = e_k. \quad (7)$$

При регистрации в процессе нагружения до разрушения силовых по выражениям (3), (5) и деформационных по выражениям (4), (6), (7) характеристик можно детерминированным способом оценить накапливаемые повреждения $d(\tau_i)$:

$$d_o(\tau_i) = \sigma(\tau_i)/\sigma_k \leq 1; d_{on}(\tau_i) = \sigma_n(\tau_i)/S_k \leq 1, \quad (8)$$

$$d_e(\tau_i) = e(\tau_i)/\delta_k \leq 1; d_{en}(\tau_i) = e_n(\tau_i)/e_k \leq 1. \quad (9)$$

Если в процессе нагружения провести локальные измерения деформаций (методом сеток, наколов пирамидой твердомера, голографий и спекл-интерферометрией, профилометрией), то можно установить статистические характеристики локальных деформаций $e_{нл}(\tau_i)$ на базах $l_n \ll l_0$ и функции их распределения [9]

$$e_{нл}(\tau_i) = F_l\{e_n(\tau_i), l_i\}, \quad (10)$$

а по ним — накопленные повреждения

$$d_{н.л}(\tau_i) = e_{н.л}(\tau_i)/e_k. \quad (11)$$

Использование выражений (8), (9), (11) малоинформативно в области упругих ($e < e_T$) и небольших ($e, e_{н.л}, e_{н.л.} < (4-5)e_T$) деформаций, а выражение (8) для силовых характеристик [9] может дать неправильное представление о снижении повреждаемости $d_o(\tau_i)$ после достижения условного предела прочности σ_B или быть малочувствительным к деформированию в условиях $\sigma_T \leq \sigma(\tau_i) \leq \sigma_B$.

Статистические характеристики деформаций $e_{н.л}(\tau_i)$ по выражению (10) и повреждений $d_{н.л}(\tau_i)$ по (11) дают новую возможность анализа сложных локальных процессов деформирования как по средним (интегральным) деформациям $e(\tau_i)$, так и по коэффициентам их вариации.

Акустоэмиссионный спектральный метод исследования процессов деформирования. Интенсивное развитие в последние десятилетия [1, 3, 4] метода и средств исследования акустической эмиссией процессов деформирования позволило получить обширную информацию о функциональных зависимостях таких параметров акустической эмиссии, как число сигналов $N(\tau_i)$, энергия сигналов $E(\tau_i)$, интенсивность сигналов $dN(\tau_i)/dt$. При этом в измерениях параметров акустической эмиссии приоритет отдавался тем первичным преобразователям, которые имели устойчивую характеристику чувствительности в заданном диапазоне частот f . Традиционно для металлических материалов эти частоты находятся на уровне 0,4 – 1,2 МГц.

Физика, металлофизика, микроакустика и микроструктурный анализ процессов упругого и упругопластического деформирования показали, что преимущественным источником акустоэмиссионных сигналов на указанных частотах являются процессы возникновения, накопления и движения дислокаций

$$D(\tau_i) = F_D\{e(\tau_i), e_{н.л}(\tau_i), e_{н.л.}(\tau_i)\}. \quad (12)$$

Тогда применимой становится модель структурно-неоднородного деформируемого тела с заданной временной кинетикой деформаций и дислокаций, связанных с величиной деформаций:

$$\{N(\tau_i), E(\tau_i)\} = F_{e,D}\{e(\tau_i), e_{н.л}(\tau_i), e_{н.л.}(\tau_i), D(\tau_i)\}. \quad (13)$$

На основе выражений (9) – (13) и с учетом (4) можно получить зависимости повреждаемости материалов при регистрации исходных параметров нагружения — по усилиям $P(\tau_i)$, напряжениям $\sigma(\tau_i)$, $\sigma_{н.л}(\tau_i)$ и деформациям $e(\tau_i)$, $e_{н.л}(\tau_i)$, $e_{н.л.}(\tau_i)$.

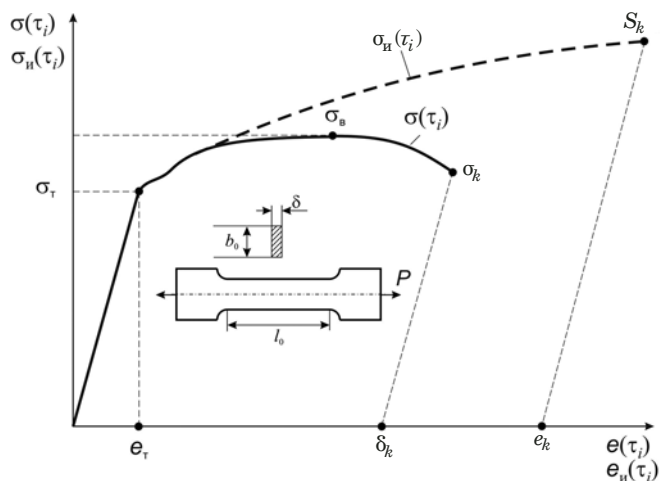


Рис. 1. Схемы нагружения образца ($l_0 = 180$, $\delta = 2,5$, $b_0 = 36$ мм) и кривых деформирования до разрушения в условных и истинных координатах

Вместе с тем в области малых упругих и упругопластических деформаций со своими характерными частотами, сопоставимых с деформациями e_T предела текучести σ_T (см. рис. 1), при дальнейшем нагружении до предела прочности σ_B дислокационный механизм деформирования $D(\tau_i)$ связан с процессами, протекающими на нано-, микроуровнях с указанными выше частотами акустоэмиссионных сигналов. Развитие локальных деформаций на микро-, мезоуровнях должно сопровождаться другой структурой сигналов при возникновении микродефектов — с большими амплитудами и меньшими частотами (0,1 – 0,4 МГц). Можно предполагать, что это происходит при образовании мезоразрывов на границах зерен и в зонах большого скопления дислокаций. В этих условиях число сигналов $N(\tau_i)$ высокой энергии должно уменьшаться при одновременном снижении акустических частот (0,05 – 0,1 МГц). Если испытания на растяжение проводятся на относительно крупнозернистых сталях высокой прочности ($1000 \leq \sigma_B \leq 2100$ МПа) и низкой пластичности ($0,05 \leq \delta_K \leq 0,12$), то звуковые эффекты могут регистрироваться органами слуха человека ($5 \cdot 10^{-5} \leq f \leq 2 \cdot 10^{-2}$ МГц).

С учетом этих допущений и при использовании первичных высокочастотных датчиков в традиционных опытах с регистрацией сигналов акустической эмиссии после прохождения предела текучести обычно наблюдается определенное затухание интенсивности эмиссии.

Изложенные особенности процессов упругого и упругопластического деформирования теперь можно исследовать с применением спектральных методов и новых интегральных диагностических параметров.

Экспериментальное получение спектров акустической эмиссии. По инициативе автора в

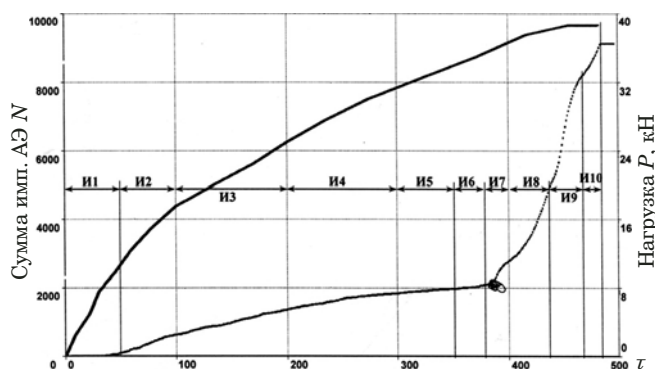


Рис. 2. Изменения суммы импульсов АЭ (N) и уровня нагрузки (P) в зависимости от времени нагружения τ

Институте машиноведения РАН группой ученых (В. И. Иванов, И. Е. Васильев, В. В. Лукьянов) с участием специалистов исследовательского центра «ДИАПАК» (В. В. Шемякин, Т. Б. Петерсон) были поставлены первые пробные эксперименты. Испытывали плоский алюминиевый образец с нанесенным на его боковую поверхность хрупким оксидным тензочувствительным покрытием (см. рис. 1).

Микро-, мезо-, макроустранение этого покрытия происходило при относительно малых упругих и пластических деформациях. Растяжение образца проводили при однократном статическом растяжении осевой нагрузкой на электрогидравлической установке МТС с предельным усилием 500 кН.

Процессы повреждения $d(\tau)$ фиксировали методом акустической эмиссии (АЭ). На рис. 2 приведены зависимости суммы импульсов АЭ [$N = N(\tau_i)$] и уровня нагрузки [$P = P(\tau_i)$] от времени τ на разных i -стадиях (И1 – И11) деформирования. Близкая к линейной активность сигналов АЭ была заметна уже в начале области упругой деформации при $P \leq 7,5$ кН; она постепенно увеличивалась с ростом нагрузки до уровня $P = 33,2$ кН, соответствующего началу перехода материала образца в область микропластической деформации. Активность АЭ достигла своего максимума при $P = 38,25$ кН, после чего заметно снизилась и вновь возрастала лишь перед разрушением образца.

Таблица 1. Исходные параметры спектров

Интервалы	f_n	f_v	$V_{\max n}$	$V_{\max v}$	ΔV_n	ΔV_v
И1	100	250	6,5	2,5	5,0	1,5
И7	80	250	21	3,8	12,0	2,8
И8	75	240	52	2,8	35,0	2,2
И9	25	230	88	2,6	40,5	2,5

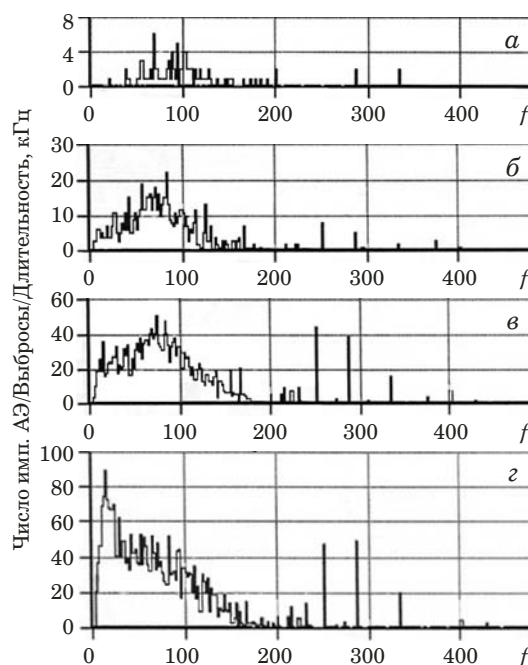


Рис. 3. Динамика изменения спектров частотного распределения сигналов АЭ для различных интервалов времени: а – г соответствуют интервалам И1, И7, И8, И9 (табл. 1)

На рис. 3 показаны спектры числа $N = N(\tau_i)$ импульсов АЭ для интервалов $\Delta\tau_i$ — И1, И7, И8, И9. За исходный был принят интервал И1.

Наблюдавшиеся резкие выбросы сигналов в диапазоне частот 220 – 300 кГц были связаны с актами разрушения покрытия.

В табл. 1 приведены основные исходные параметры спектральной диагностики по данным АЭ. Сигналы АЭ принимались как показатели переменных состояний — поэтапного накопления повреждений и приближения в процессе нагружения к предельно опасному состоянию.

Спектральный анализ диагностических акустоэмиссионных параметров. Обобщенный анализ рисков и проблем безопасности повреждаемых сложных технических систем на базе фундаментальных и прикладных исследований критически и стратегически важных объектов выполнялся на основе выражений (1) – (11). Его результаты содержатся в [2, 5 – 7, 10, 11]. В связи со сложностью прямого и обратного решения комплекса задач по выражениям (1) – (11) в [5 – 7, 10, 11] развивается новая методология спектральной диагностики перехода сложных технических систем из штатных состояний в опасные поврежденные (аварийные и катастрофические). Сущность этой диагностики состоит в том, что этому переходу соответствует изменение спектров интегральных диагностических параметров по выражениям (1) – (12) на различных стадиях и отрезках времени τ_i эксплуатации

(рис. 4). Это изменение имеет ряд характерных признаков, выявленных по отдельным спектрам каждого из параметров или их совокупности. Наиболее представительными и часто используемыми являются спектры вибраций и акустической эмиссии (числа сигналов) $V^3(\Delta\tau) = N(\tau_i)$.

По мере развития процессов деградации, накопления повреждений и роста трещин происходит следующее:

характерные зоны спектров смещаются из области высоких частот f_v в область более низких f_n ;

максимальные величины $V_{\max}^3(\tau)$ возрастают на низких частотах f_n и снижаются на высоких f_v ;

размахи $\Delta V^3(\tau)$ на низких частотах f_n растут, а на высоких f_v — снижаются.

В качестве количественных характеристик указанных изменений спектров выбираются:

относительные частоты

$$\bar{f}_n = \frac{f_{n1}}{f_{n2}}, \quad \bar{f}_v = \frac{f_{v1}}{f_{v2}}; \quad (14)$$

относительные максимальные величины сигналов на низких и высоких частотах

$$\bar{V}_{\max n} = \frac{V_{\max n2}}{V_{\max n1}}, \quad \bar{V}_{\max v} = \frac{V_{\max v1}}{V_{\max v2}}; \quad (15)$$

относительные размахи сигналов на низких и высоких частотах

$$\bar{\Delta V} = \frac{\Delta V_{n2}}{\Delta V_{n1}}, \quad \bar{\Delta V} = \frac{\Delta V_{v1}}{\Delta V_{v2}}. \quad (16)$$

На отдельных дискретных частотах для спектра 2 может возникать резкий (пиковый) рост сигналов (см. рис. 4, точки 2' и 2''), указывающий на акты разрушения отдельных элементов системы или образца.

В качестве обобщенного интегрального диагностического параметра $D(\tau_i)$ перехода сложной технической системы из штатного 1 в опасное 2 состояние можно принять произведение соответствующих величин по выражениям (14) – (16):

$$D(\tau_i) = \bar{f}_n \bar{f}_v \bar{V}_{\max n} \bar{V}_{\max v} \bar{\Delta V}_n \bar{\Delta V}_v. \quad (17)$$

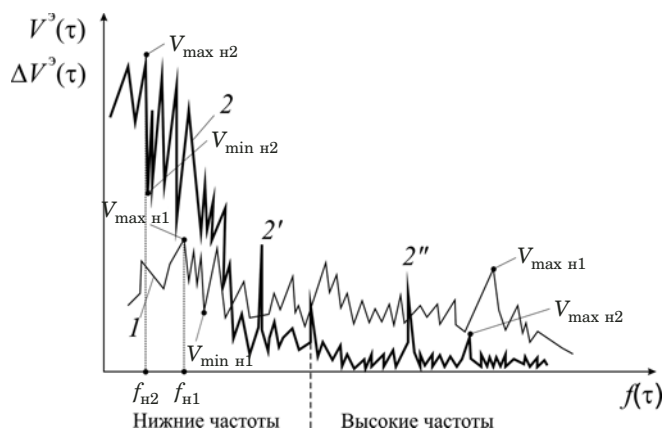


Рис. 4. Схематическое изменение частотного спектра регистрируемых сигналов $\Delta V^3(\tau)$ для интервала времени $\Delta\tau_i$ и двух состояний технических систем: 1 — начальное (допустимое); 2 — измененное после накопления повреждений $d^3(\tau)$ и роста трещин $\lambda^3(\tau)$

Если в качестве исходного (нулевого) допустимого в начале эксплуатации ($\tau = 0$) принять спектр 1 (см. рис. 4), то для него по выражению (17) величина

$$D(\tau_i) = 1. \quad (18)$$

По мере развития во времени $\tau_0 \leq \tau_i \leq \tau_k$ эксплуатации объекта или нагружения образца (см. рис. 3) деградационных процессов повреждения $d_3(\tau)$ и роста трещин $\lambda_3(\tau)$ величина $D(\tau_i)$ по (17) будет расти в большей степени, чем ее составляющие по (14) – (16).

При достижении опасного или предельного состояния в момент τ_k выполняется соотношение

$$D(\tau_0) \leq D(\tau_i) \leq D(\tau_k). \quad (19)$$

Выражения (17) – (19) показывают, что спектральная диагностика с использованием интегральных параметров $D(\tau_i)$ становится более информативной, чем простая традиционная диагностика по отдельным максимальным значениям на основе (14) – (16).

В табл. 2 приведены рассчитанные по (14) – (19) относительные диагностические параметры спектров, из которых следует, что параметр $D(\tau_i)$

Таблица 2. Расчетные диагностические параметры спектров

Интервалы	$\bar{f}_n$	$\bar{f}_v$	$\bar{V}_{\max n}$	$\bar{V}_{\max v}$	$\bar{\Delta V}_n$	$\bar{\Delta V}_v$	$D(\tau_i)$
И1	1,10	1,00	1,00	1,00	1,00	1,0	1,00
И7	1,25	1,00	3,23	1,52	2,40	1,12	16,50
И8	1,33	1,04	8,00	1,12	7,00	1,86	161,4
И9	4,00	1,07	13,50	1,04	8,1	1,67	812,5

изменяется в большей (на 1 – 2 порядка) степени, чем отдельные параметры акустической эмиссии.

Из данных общего анализа процессов деформирования и накопления повреждений с использованием выражений (1) – (13), а также дифференцированных спектральных параметров акустической эмиссии по выражениям (14) – (16) и табл. 1, 2 следует, что интегральный диагностический параметр $D(\tau_i)$ при достижении опасных состояний на 1,5 – 2,0 порядка выше, чем все отдельные параметры (см. табл. 2). При регистрации наиболее чувствительными оказались (см. рис. 4 и табл. 1): $V_{\max n2}$, $V_{\max n1}$ и размахи ΔV_n между максимальными и минимальными значениями в области низких частот $V_{\max n2} - V_{\min n2}$ и $V_{\max n1} - V_{\min n1}$, а также смещение частот в низкую область, характеризуемое отношением f_{n1}/f_{n2} .

Таким образом, для штатных и нештатных опасных ситуаций особенно важными являются регистрация первичных данных и построение спектров максимальных величин вибраций или сигналов акустической эмиссии [5 – 7, 10]. В этом отношении большое значение имеет констатация достигнутых результатов и перспектив развития спектральной диагностики состояния образцов, моделей и промышленных объектов в процессе нагружения для научного обоснования прочности, ресурса и безопасности [1 – 11]. При этом наиболее информативным оказывается диагностический параметр, получаемый по изменению частотных спектров состояния в различные отрезки времени.

ЛИТЕРАТУРА

1. Неразрушающий контроль. Т. 1 – 8 / Под ред. В. В. Клюева. — М.: Машиностроение, 2003 – 2004.
2. Махутов Н. А. Прочность и безопасность: фундаментальные и прикладные исследования. — Новосибирск: Наука, 2008. — 528 с.
3. Ультразвуковая дефектоскопия металлов с применением голографических методов / Под ред. А. Х. Вopilкина. — М.: Машиностроение, 2008. — 368 с.
4. Иванов В. И., Барат В. А. Акустико-эмиссионная диагностика. Дефектоскопист.ру. Форум по неразрушающему контролю. <http://idspektr.ru/index.php/home/551-141>.
5. Махутов Н. А. Безопасность и риски: системные исследования и разработки. — Новосибирск: Наука, 2017. — 724 с.
6. Фролов К. В., Махутов Н. А., Гаденин М. М. и др. Безопасность России. Правовые, социально-экономические и научно-технические аспекты. Функционирование и развитие сложных народнохозяйственных, технических, энергетических, транспортных систем, систем связи и коммуникаций. Раздел 1. Теоретические основы безопасного функционирования сложных технических систем. — М.: МГОФ «Знание», 1998. — 448 с.
7. Фролов К. В., Махутов Н. А., Гаденин М. М. и др. Безопасность России. Правовые, социально-экономические и научно-технические аспекты. Функционирование и развитие сложных народнохозяйственных, технических, энергетических, транспортных систем, систем связи и коммуникаций. Раздел 2. Обеспечение безопасного функционирования сложных технических систем на разных этапах жизненного цикла. — М.: МГОФ «Знание», 1998. — 416 с.
8. Махутов Н. А., Гаденин М. М., Москвичев В. В. и др. Локальные критерии прочности, ресурса и живучести авиационных конструкций. — Новосибирск: Наука, 2017. — 600 с.
9. Романов А. Н. Структура и прочность конструкционных материалов. — М.: МЦНТИ, 1998. — 155 с.
10. Махутов Н. А., Гаденин М. М., Ахметханов Р. С., Резников Д. О. и др. Безопасность России. Правовые, социально-экономические и научно-технические аспекты. Техногенная, технологическая и техносферная безопасность. — М.: МГОФ «Знание», 2018. — 1016 с.
11. Махутов Н. А., Гаденин М. М. Техническая диагностика остаточного ресурса и безопасности. Сер. Диагностика безопасности. — М.: Издательский дом «Спектр», 2011. — 187 с.

REFERENCES

1. Nondestructive inspection. Vols. 1 – 8 / V. V. Kluev (ed.). — Moscow: Mashinostroenie, 2003 – 2004 [in Russian].
2. Makhutov N. A. Strength and safety: fundamental and applied researches. — Novosibirsk: Nauka, 2008. — 528 p. [in Russian].
3. Hypersonic defectoscopy of metals with use of holographic methods / A. H. Vopilkin (ed.). — Moscow: Mashinostroenie, 2008. — 368 p. [in Russian].
4. Ivanov V. I., Barat V. A. Akoustic-emission diagnostics. Defektoskopist.ru. The forum on a nondestructive inspection. <http://idspektr.ru/index.php/home/551-141> [in Russian].
5. Makhutov N. A. Safety and risks: system researches and developments. — Novosibirsk: Nauka, 2017. — 724 p. [in Russian].
6. Frolov K. V., Makhutov N. A., Gadenin M. M., et al. Safety of Russia. Legal, social-economic and scientifically-engineering aspects. Management of service resource for highly risks objects. Functioning and development of complex economic, technical, power, transport systems, communication systems and service lines. Part 1. Theoretical bases of safe functioning of complex technical systems. — Moscow: MGOF “Znanie”, 1998. — 448 p. [in Russian].
7. Frolov K. V., Makhutov N. A., Gadenin M. M., et al. Safety of Russia. Legal, social-economic and scientifically-engineering aspects. Management of service resource for highly risks objects. Functioning and development of complex economic, technical, power, transport systems, communication systems and service lines. Part 2. Maintenance of safe functioning of complex technical systems at different stages of life cycle. — Moscow: MGOF “Znanie”, 1998. — 416 p. [in Russian].
8. Makhutov N. A., Gadenin M. M., Moskvichov V. V., et al. Local criteria of strength, resource and survivability of aviation structures. The series “Researches of strength, resource and safety of aircrafts”. — Novosibirsk: Nauka, 2017. — 600 p. [in Russian].
9. Romanov A. N. Structure and strength of construction materials. — Moscow: MZNTI, 1998. — 155 p. [in Russian].
10. Makhutov N. A., Gadenin M. M., Akhmetkhanov R. S., Reznikov D. O., et al. Safety of Russia. Legal, social-economic and scientifically-engineering aspects. Engineering, technological and technogenic sphere safety. — Moscow: MGOF “Znanie”, 2018. — 1016 p. [in Russian].
11. Makhutov N. A., Gadenin M. M. Engineering diagnostics of the remaining resource and safety. The series “Safety Diagnostics”. — Moscow: ID “Spektr”, 2011. — 187 p. [in Russian].