

DOI: <https://doi.org/10.26896/1028-6861-2023-89-10-55-62>

АНАЛИЗ ЦИКЛИЧЕСКОЙ ПРОЧНОСТИ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ ПРИ СЛОЖНЫХ РЕЖИМАХ ЭКСПЛУАТАЦИОННОГО НАГРУЖЕНИЯ

© Николай Андреевич Махутов, Михаил Матвеевич Гаденин*,
Ольга Николаевна Юдина

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

*e-mail: imash-ru@mail.ru

*Статья поступила 12 января 2023 г. Поступила после доработки 20 февраля 2023 г.
Принята к публикации 30 марта 2023 г.*

Современные объекты энергетики, космического, воздушного, наземного, водного транспорта во время эксплуатации, как правило, испытывают воздействие изменяющихся во времени как основных циклических термомеханических усилий, так и сопутствующих им вибрационных и аэрогидродинамических нагрузок. При этом суммарное число циклов нагружения с учетом длительности службы оказывается в весьма широких пределах. Показано, что общий спектр изменения во времени воздействующих на такие объекты усилий оказывается весьма сложным по уровням нагрузок, частотам и времени их действия. С учетом большой вариации эксплуатационных воздействий по уровню нагруженности, частоте и общему числу циклов нагружения выполнен обобщенный анализ сопротивления деформированию, повреждению и разрушению высоконагруженных объектов современной техники. На основе полученных результатов отмечено, что при комбинированном механическом, вибрационном и аэрогидроакустическом нагружении предельное состояние по критерию циклической прочности с использованием правила линейного суммирования выраженных в деформационных параметрах повреждений будет достигаться раньше, чем при учете в расчетах только основной термомеханической нагруженности. Для обоснования прочности и ресурса рассматриваемых объектов проводят традиционные стандартные и унифицированные механические изотермические испытания на статическое и циклическое нагружение для определения базовых характеристик механических свойств материала, а также специальные механические программируемые испытания с переменными режимами, имитирующими сложные процессы эксплуатационных термомеханических, вибрационных и аэрогидродинамических воздействий. Результаты таких испытаний учитывают в процессе расчетно-экспериментальных оценок прочности и долговечности для соответствующих спектров эксплуатационного нагружения. Уточненный поверочный расчет циклической прочности и долговечности становится все более актуальным для современных машин и агрегатов, работающих в условиях возрастания скоростей их движения, рабочих давлений с повышенными уровнями пульсаций, а также возникновения сопутствующих механических колебаний, вибраций и аэрогидроакустических воздействий.

Ключевые слова: циклическая прочность; долговечность; режимы нагружения; эксплуатационная нагруженность; диаграмма деформирования; накопление повреждений; кривые усталости; расчеты прочности.

ANALYSIS OF THE CYCLIC STRENGTH OF TECHNICAL SYSTEMS IN CONDITIONS OF COMPLEX OPERATION LOADING

© Nikolay A. Makhutov, Mikhail M. Gadenin*, Olga N. Yudina

Mechanical Engineering Research Institute of the Russian Academy of Sciences. 4, Maly Kharitonievsky per., Moscow, 101990, Russia; *e-mail: kei51@mail.ru

Received January 12, 2023. Revised February 20, 2023. Accepted March 30, 2023.

The main cyclic thermomechanical loads, as well as changeable in time vibration and aerohydrodynamic loadings accompanying them affect modern energy facilities, space, air, water and ground transport. At the same time the total number of loading cycles taking into account the duration of service turns out to be within in very wide limits. It is shown that a general spectrum of loads changing in time which affect the aforementioned objects is very complicated in terms of load levels, frequency ratios and time of their action. Taking into account a large variation of service impacts in the loading levels, frequency ratio and total number of loading cycles we performed a generalized analysis of the resistance to deformation, damage and fracture of high-loaded objects of modern technics. The results obtained revealed that in condi-

tions of combined mechanical, vibration and aero-, gidro-, acoustic loadings the limit state (by criteria of cyclic strength using the rule of linear summation of damages expressed in deformation parameters) will be attained earlier, than that obtained only with allowance of the main thermomechanical loading. To substantiate the strength and service life of the objects under consideration, traditional standard and unified mechanical isothermal tests for static and cyclic loading are carried out to determine the basic characteristics of the mechanical properties of the material, as well as special mechanical programmed tests with variable modes that simulate complex processes of operational thermomechanical, vibration and aerohydrodynamic impacts. The results of testing are taken into account in computation and experimental estimations of the strength and the fatigue life for the corresponding spectra of operational loads. A refined verification calculation of the cyclic strength and durability is becoming increasingly relevant for modern machines and units operating under conditions of increasing speeds of movement, operating pressures with increased levels of pulsations, as well as in the occurrence of accompanying mechanical oscillations, vibrations and aerohydroacoustic impacts.

Keywords: cyclic strength; life-time; loading modes; service stress loading; deformation diagram; accumulation of damages; fatigue curves; strength calculations.

Введение

Современные сложные технические системы и объекты (транспортные, энергетические, металлургические, нефтегазохимические) в процессе эксплуатации подвергаются сложным, комбинированным нагрузкам — механическим, сейсмическим, тепловым, электромагнитным, аэрогидродинамическим. Объекты энергетики, космического, воздушного, наземного, водного транспорта испытывают сочетание изменяющихся во времени эксплуатации t (от 10^3 с до 50 – 60 лет) воздействий — циклических механических $Q_m(t)$ (весовых, инерционных, ударных), вибрационных и колебательных $Q_v(t)$ и аэрогидродинамических $Q_a(t)$ (от неустойчивых потоков воздуха и воды) [1 – 7]. При этом суммарное число циклов нагружения с учетом указанной длительности службы находится в достаточно широких пределах — от 10^0 (однократное нагружение) до 10^{12} (сложное нагружение всеми видами нагрузок) [7 – 10].

Для обоснования прочности и ресурса таких объектов проводят:

традиционные (стандартные и унифицированные) механические изотермические испытания на статическое и циклическое нагружение с заданными нагрузками с определением базовых характеристик механических свойств;

специальные механические программные испытания с переменными режимами, имитирующими сложные процессы эксплуатационных механических, вибрационных и аэрогидродинамических воздействий;

расчетно-экспериментальные оценки прочности и долговечности для соответствующих научно-обоснованных спектров эксплуатационного нагружения.

Научные основы указанных исследований и прикладных разработок закладывались во второй половине XX века в работах отечественных ученых — членов академии наук С. В. Серенсена, Г. С. Писаренко, Н. Д. Кузнецова, В. В. Новожи-

лова, А. П. Гусенкова, В. В. Болотина, Ю. Н. Работнова, К. В. Фролова, Р. Ф. Ганиева, профессоров С. В. Пинегина, В. П. Когаева, Р. М. Шнейдеровича, А. Н. Романова, М. Д. Генкина, О. Н. Косарева, Г. В. Москвитина, а также в трудах зарубежных коллег — К. Миллера, Е. Лангера, С. Мэнсона [7 – 13]. В последующие годы, на рубеже XX – XXI веков и в первые два десятилетия текущего столетия, эти исследования и разработки были продолжены и развиты в академических институтах (ИМАШ РАН, ИПМех РАН, ИФТПС СО РАН, ИВМ СО РАН) и ведущих отраслевых научных центрах (ЦКТИ, ВТИ, НИКИЭТ, ИАЭ, ЦАГИ, МАТИ, ЦНИИ им. Крылова, ВНИИЖТ). Их основные результаты освещены в многотомном издании «Безопасность России» [14] и на страницах журнала «Заводская лаборатория. Диагностика материалов» [15 – 24]. В данной работе приведены обобщенные закономерности влияния на эксплуатационные прочность и долговечность сочетания механической, вибрационной и аэрогидродинамической усталости, основанные на данных механических испытаний образцов из конструкционных сталей в лабораторных условиях, а также представлены критериальные выражения для расчетов долговечности в таких условиях.

Характерные условия эксплуатационного циклического нагружения

Основные механические эксплуатационные воздействия $Q^3(t)$ для энергетических и транспортных систем связаны [1 – 7, 16 – 24] с циклами начала и окончания движения объектов наземного транспорта, взлета и посадки летательных аппаратов воздушного транспорта, отплытия и причаливания судов речного и морского транспорта. Число таких циклов $N^3(t)$ эксплуатационного нагружения составляет $10^4 – 10^5$. В процессе движения анализируемых объектов происходит изменение режимов скоростей, ускорений, торможений с числом циклов $N^p(t)$, превыша-

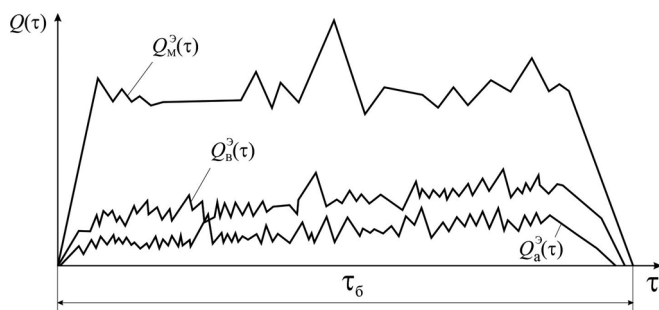


Рис. 1. Схема изменения во времени эксплуатационных механических, вибрационных и акустических воздействий

Fig. 1. Service mechanical, vibration and acoustic impacts changing in time

ющих $N^3(\tau)$ на один-два порядка. Экстремальные опасные режимы эксплуатационного нагружения с меньшим числом циклов — $N_0(\tau) \leq (10^{-1} - 10^{-2})N^3(\tau)$ — возникают при проектных ситуациях. Таким образом, циклические механические эксплуатационные воздействия $Q_m(\tau)$ находятся в диапазоне чисел циклов $N(\tau)$ от 10^2 до 10^7 . При запроектных аварийных и катастрофических ситуациях предельное число циклов может быть как ниже, так и выше — на уровне от 10^0 до 10^2 [25].

Колебательные и вибрационные эксплуатационные воздействия $Q_v(\tau)$ могут возникать вследствие неровностей дорожного покрытия, порывов ветровых, волновых и сейсмических нагрузок на определенных участках движения. При этом характерные частоты таких воздействий будут находиться в пределах от $10^{-1} - 10^0$ до $10^2 - 10^3$ Гц. Общее число циклов $N_v(\tau)$ таких воздействий оказывается в интервале $10^8 - 10^9$ [7, 20, 22].

Аэро-, гидродинамические эксплуатационные воздействия $Q_a(\tau)$ характерны для высоких скоростей движения наземных, воздушных и водных транспортных объектов. Для них характерны частоты $10^3 - 2 \cdot 10^4$ Гц с большей продолжительностью движения. Общее число циклов таких воздействий может достигать $10^{10} - 10^{12}$. Как показывает опыт, акустическая усталость наиболее опасна для воздушного транспорта.

Таким образом, общий спектр изменения во времени τ эксплуатационных воздействий $Q_m(\tau)$, $Q_v(\tau)$ и $Q_a(\tau)$ весьма сложен по уровням нагрузок, частотам и времени действия. Схема такого комбинированного блокового нагружения показана на рис. 1. Такой блок со временем τ_6 может быть построен для характерного периода эксплуатации (пуска — остановка, взлета — посадки, начала — конца маршрута) или заданного интервала времени (час, месяц, год). Для длительно экс-

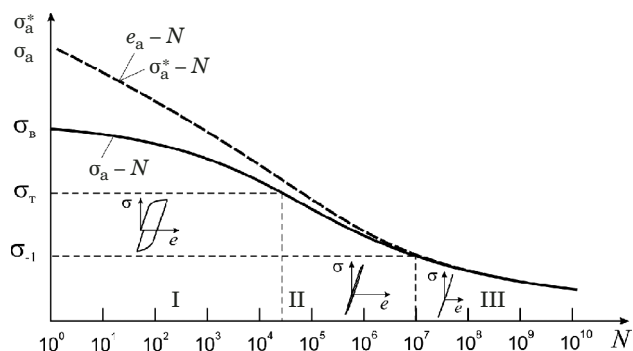


Рис. 2. Принципиальная схема обобщенной кривой усталости

Fig. 2. The schematic diagram of the generalized fatigue curve

плуатируемых объектов наиболее часто используется годовой интервал времени.

Учитывая большую вариацию эксплуатационных воздействий по уровню нагруженности $Q_m(\tau)$, $Q_v(\tau)$ и $Q_a(\tau)$, частоте и общему числу циклов N нагружения от 10^0 до 10^{12} , в последние годы большое внимание уделяют обобщенному анализу сопротивления деформированию, повреждению и разрушению для высокоответственных объектов современной техники [1, 4, 6, 7, 9, 23 – 25].

Механизмы и виды усталости при механическом нагружении

В многочисленных отечественных и зарубежных исследованиях сопротивления конструкционных металлических материалов циклическому нагружению и деформированию выделяют (рис. 2) следующие характерные механизмы и области долговечности [1 – 9, 15 – 25]:

малоцикловая усталость, когда в анализируемом цикле напряжения σ связаны с деформациями ϵ нелинейной зависимостью, а предельное число циклов N оказывается в диапазоне от 10^0 (однократное нагружение) до $10^4 - 10^5$ (область I);

классическая многоцикловая усталость, когда напряжения и деформации считаются упругими, а долговечность возрастает до $10^6 - 10^7$ (область II);

гигацикловая усталость с меньшим уровнем циклических напряжений и деформаций с долговечностью от $10^9 - 10^{10}$ до 10^{12} циклов (область III).

Научной основой анализа механической, вибрационной и аэрогидроакустической усталости является обобщенная кривая усталости при $10^0 \leq N \leq 10^{12}$ (см. рис. 2).

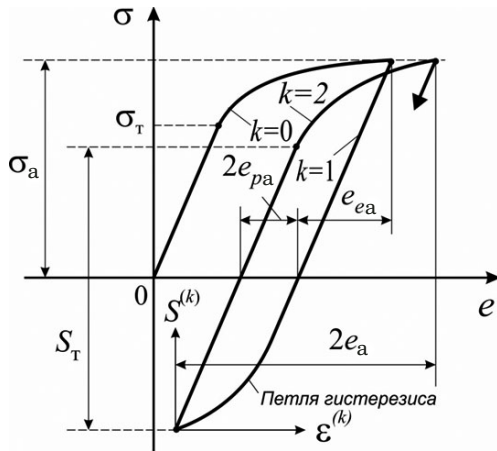


Рис. 3. Схема циклического упругопластического деформирования

Fig. 3. Scheme of a cyclic elastoplastic deformation

Для указанных областей характерными параметрами кривой усталости в номинальных напряжениях σ_a и деформациях e_a являются:

- область I — $\sigma_b \geq \sigma_a \geq \sigma_T$, $e_k \geq e_a \geq e_T = \sigma_T/E$, $10^0 \leq N \leq 10^4 - 10^5$;
- область II — $\sigma_T \geq \sigma_a \geq \sigma_{-1}$, $e_T \geq e_a \geq \sigma_{-1}/E$, $10^4 \leq N \leq 10^7$;
- область III — $\sigma_{-1} \geq \sigma_a \rightarrow 0$, $\sigma_{-1}/E \geq e_a \rightarrow 0$, $10^7 \leq N \rightarrow \infty$.

Здесь σ_a , e_a — амплитуда циклических напряжений и деформаций; σ_b , σ_T , σ_{-1} — пределы прочности, текучести и выносливости, определяемые при стандартных испытаниях; E — модуль упругости; e_T — деформация предела текучести ($e_T = \sigma_T/E$); e_k — истинная разрушающая деформация.

Сложная по форме обобщенная кривая усталости (см. рис. 2, сплошная линия) для инженерных расчетов на усталость в областях I – III с достаточной точностью аппроксимируется степенными выражениями для каждой из областей

$$\sigma_{ai} N^{m_{\sigma_i}} = C_{i\sigma}, e_{ai} N^{m_{e_i}} = C_{ie}, \quad (2)$$

где i — индекс соответствующей области; m_i , C_i — характеристики материала, зависящие от прочности и пластичности.

Для кривой усталости, используемой в традиционных инженерных расчетах при $N \leq 10^7$, в соответствии с (1) и допущением о статическом разрушении при $N = 1/4$ можно принять:

- область I — $C_i = \sigma_b (1/4)^{m_{\sigma_i}}$, $m_{\sigma_i} = 0,04 - 0,06$;
- область II — $C_i = \sigma_T$, $m_{\sigma_i} = 0,08 - 0,12$;
- область III — $C_i = \sigma_{-1}$, $m_{\sigma_i} = 0$.

В области I согласно рис. 2 в каждом из циклов имеет место нелинейная связь между напряжениями и деформациями (рис. 3).

Для циклически стабилизирующихся сталей при мягком нагружении с заданной амплитудой

напряжений $\sigma_a = \text{const}$ или при жестком нагружении с заданной амплитудой деформации $e_a = \text{const}$ в исходном полуцикле ($k = 0$) в упругой области ($\sigma \leq \sigma_T$)

$$\sigma = eE. \quad (3)$$

Для упругопластической области в нулевом и k -полуциклах

$$\sigma = \sigma_T (e/e_T)^{m(0)}, \quad S(k) = (\epsilon^{(k)}/\epsilon_T)^{m(k)}, \quad (4)$$

где $m(0)$, $m(k)$ — показатели упрочнения.

В поверочных уточненных расчетах циклической прочности при $N \leq 10^{10}$ по деформационным критериям [7, 9, 17, 24 – 26] используются условные упругие напряжения, пропорциональные реальным упругим и упругопластическим деформациям (см. рис. 2):

$$\sigma^* = eE, \sigma_a^* = e_a E. \quad (5)$$

Принимая, как и ранее, что однократное статическое разрушение происходит при реализации 1/4 цикла (в нулевом полуцикле $k = 0$), получим истинную деформацию

$$e_k = \ln \frac{1}{1 - \psi_k}, \quad (6)$$

где ψ_k — относительное сужение при статическом разрыве.

Тогда исходя из (2), можно записать

$$C_{ei} = e_k (1/4)^{m_{e_i}}. \quad (7)$$

Показатель степени m_{e_i} в (2), (7) больше m_{σ_i} и с увеличением статической прочности возрастает ($0,5 \leq m_{e_i} \leq 0,6$).

Для областей I – III в соответствии с рис. 3 амплитуда деформаций e_a складывается из пластических e_{pa} и упругих e_{ea} деформаций:

$$e_a = e_{pa} + e_{ea} = e_{pa} + \sigma_a/E. \quad (8)$$

Используя (2) и (8), получим

$$e_a = \frac{C_e}{N^{m_e}} + \frac{C_\sigma}{EN^{m_\sigma}}. \quad (9)$$

При уточненной оценке долговечности N во всем диапазоне чисел циклов (до 10^{12}) можно принять, как и ранее, разрушающей амплитудой напряжений в первой четверти цикла сопротивление разрыву в шейке S_k , определяемое экспериментально. Тогда на основе (2) находим

$$C_\sigma = S_k (1/4)^{m_\sigma}. \quad (10)$$

Окончательно на основе (2), (7), (9) и (10) уравнение обобщенной кривой усталости в деформациях примет вид

$$e_a = \frac{e_k}{(4N)^{m_e}} + \frac{S_k}{E(4N)^{m_\sigma}}. \quad (11)$$

Для конструкционных сталей можно использовать корреляционную связь между характеристиками прочности и пластичности:

$$S_k = \sigma_B(1 + 1,4\psi_k). \quad (12)$$

В области малоциклового усталости I (см. рис. 2) возникают макропластические деформации ($e_{pa} > e_{ea}$), в области классической многоциклового усталости II — микропластические деформации ($e_{pa} < e_{ea}$), а в области гигацикловой усталости III основными являются упругие деформации ($e_{ea} > e_{pa}$) [7, 9, 19, 24].

На рис. 4 показаны результаты испытаний при жестком и мягком малоцикловом нагружении и расчета для малоуглеродистой стали 22К (рис. 4, а) [7] и высокопрочной стали У10 (рис. 4, б) [9]. Расчет проводили по уравнениям (8), (11) для размахов деформаций $\Delta e_p = 2e_{pa}$, $\Delta e_e = 2e_{ea}$ и $\Delta e = 2e_a$ и долговечности N в диапазоне от $0,25$ до $1,4 \cdot 10^9$.

Для числа циклов $N \geq 10^7$ в области гигацикловой усталости III для высокоуглеродистой подшипниковой стали У10 величина $\sigma_a = \sigma_{-1}$ (предел выносливости) и по выражениям (8) и (9) $e_{pa}/e_{ea} < 0,1$. В связи с этим для сталей в области III по рис. 2 пластическими деформациями можно пренебречь.

Прямое экспериментальное определение долговечности $N = 10^{12}$ гипотетически можно получить только на магнитоэлектрических установках с частотой нагружения 20 кГц при времени непрерывного нагружения более 1 года. Пока максимально достигнутые в лабораториях разрушающие числа циклов менее 10^{10} .

Для каждого из i -режимов с числом циклов n_i эксплуатационных механических воздействий $Q_m^3(\tau)$ (см. рис. 1) можно вычислить (аналитически, численно) или определить экспериментально [7, 26] локальные амплитуды деформаций $e_{ai}^3(\tau)$, а также амплитуды фактических $\sigma_{ai}^3(\tau)$ или условных $\sigma_{ai}^{*3}(\tau)$ напряжений:

$$\{e_{ai}, \sigma_{ai}, \sigma_{ai}^*\} = F\{Q_{mi}(\tau)/F, \alpha_\sigma m\}, \quad (12)$$

где F — характеристика опасного сечения; α_σ — теоретический коэффициент концентрации напряжений.

Этим режимам по выражениям (5) и (12) соответствуют свои расчетные циклы до разруше-

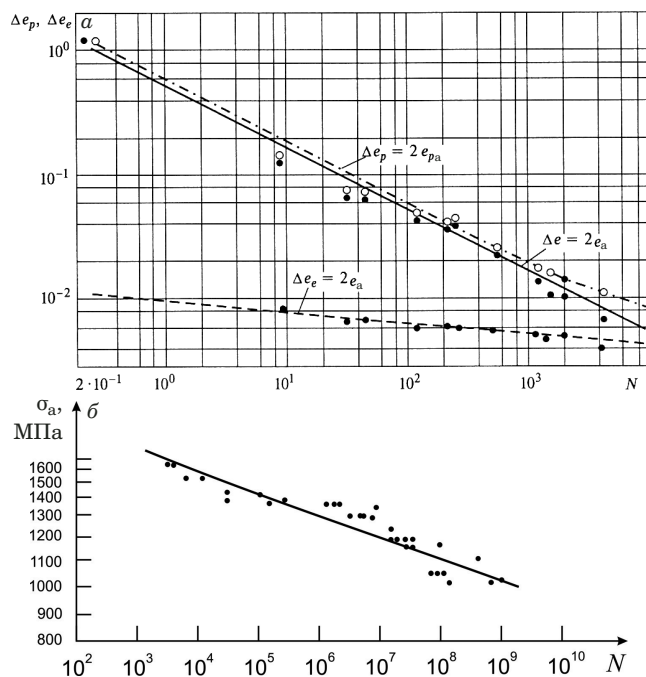


Рис. 4. Связь между размахами деформаций, амплитудами напряжений и числом циклов до разрушения: а — сталь 22К, жесткое нагружение; б — сталь У10, мягкое нагружение

Fig. 4. Dependence between the range of strains and the number of cycles to fracture: а — Steel 22K, hard loading; б — Steel U10, soft loading

ния N_i . По величинам n_i и N_i могут быть вычислены накопленные повреждения d_i для i -режима:

$$d_{mi} = n_i/N_i. \quad (13)$$

По гипотезе линейного суммирования для блока напряжения по рис. 1 общее повреждение

$$d_{m6} = \sum_i (n_i/N_i). \quad (14)$$

Рассчитанные по уравнениям (5), (14) кривые усталости в амплитудах условных напряжений σ_a^* для стали 22К показаны на рис. 5.

Разрушение при перечисленных выше режимах основного механического нагружения $Q_m^3(\tau)$ для всех i -режимов определяется по условию достижения суммарного повреждения критической величины, принимаемой равной 1,0:

$$\sum_i (n_i/N_i) = 1. \quad (15)$$

Учет наложения на основной режим колебательного, вибрационного и аэрогидроакустического нагружений

Как отмечено выше, на каждый из i -режимов основного нагружения $Q_m^3(\tau)$ в процессе эксплуатации могут накладываться колебания и вибрации с нагрузками $Q_B^3(\tau)$ в соответствии с рис. 1.

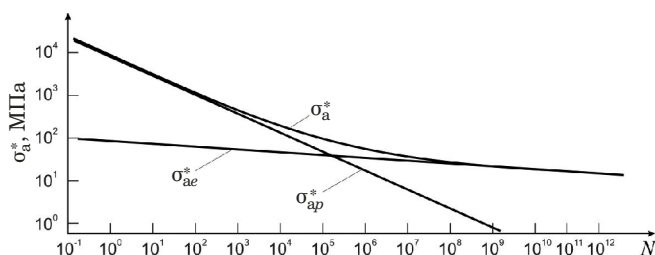


Рис. 5. Расчетные обобщенные кривые усталости для стали 22К

Fig. 5. Theoretical generalized fatigue curves for Steel 22K

В большинстве случаев штатной (нормальной) эксплуатации при надлежащем уровне расчетно-экспериментальных проектных обоснований нагрузки $Q_B(\tau)$ сравнительно невелики — $Q_B(\tau) \ll Q_M(\tau)$, а амплитуды вибронпряжений $\sigma_{ав}$ оказываются ниже амплитуд напряжений σ_a от основного нагружения $Q_M(\tau)$ даже для больших чисел циклов N_B^0 (до $10^9 - 10^{10}$).

Однако указанные выше наложенные воздействия $Q_B^0(\tau)$ на $Q_M(\tau)$ могут существенно изменить эту ситуацию.

Систематические исследования, проведенные в ИМАШ, ЦАГИ, а также ИЭС им. Патона, показали, что снижение сопротивления циклическому нагружению при двухчастотном нагружении и совместном воздействии $Q_M(\tau)$ и $Q_B(\tau)$ определяется отношением $\sigma_{ав}/\sigma_a$ (или $\sigma_{ав}/\sigma_a^*$) и соответствующими им частотами f_B и f (рис. 6) [1 – 7, 16, 19, 21, 22, 24].

В соответствии с полученными экспериментальными данными это снижение может определяться по степенной зависимости

$$N_i/N_{Bi} = (f_B/f)^{\chi(\sigma_{ав}/\sigma_a)}, \quad (16)$$

где χ — коэффициент влияния двухчастотности, определяемый экспериментально. Для исследованных конструкционных сталей влияние χ зависит от механических свойств и его значение находится в пределах от 0,5 до 2,0.

Из выражения (16) следует, что долговечность N_i при действии высокочастотных напряжений на заданном i -режиме снижается ($N_i < N_{Bi}$):

$$N_{Bi} = N_i (f_B/f)^{-\chi(\sigma_{ав}/\sigma_a)}. \quad (17)$$

Тогда дополнительные наложенные повреждения от действия $Q_M(\tau)$, $Q_B(\tau)$ и σ_a , $\sigma_{ав}$ возрастают до величины

$$d_{Bi} = d_i(n_i/N_{Bi}). \quad (18)$$

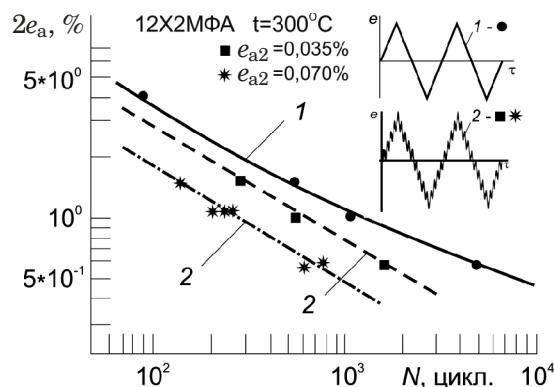


Рис. 6. Изменение долговечности при двухчастотном нагружении стали 12Х2МФА, жесткое нагружение с $f_B/f = 1500$

Fig. 6. Change of the fatigue life under two-frequency loading of steel 12Kh2MFA, a hard loading $f_B/f = 1500$

Аналогично можно учесть влияние аэрогидроакустических воздействий $Q_a(\tau)$, дополнительно снижающих долговечность

$$N_{bai} = N_{Bi} (f_a/f)^{-\chi(\sigma_{ав}/\sigma_a)} \quad (19)$$

и увеличивающих повреждение

$$d_{bai} = d_{Bi} (n_i/N_{bai}). \quad (20)$$

Тогда при комбинированном механическом $Q_M(\tau)$, вибрационном $Q_B(\tau)$ и аэрогидроакустическом $Q_a(\tau)$ нагружении по правилу линейного суммирования повреждений с использованием (15) предельное состояние по критерию циклической прочности будет достигаться раньше, чем при учете только основной механической нагруженности $Q_M(\tau)$:

$$\sum_i (n_i/N_{bai}) = 1. \quad (21)$$

Эти подходы распространяются как на анализ результатов экспериментальных исследований на образцах, так и на расчет реальных элементов при эксплуатации.

Заключение

Уточненный поверочный расчет циклической прочности и долговечности по (21) становится все более актуальным, когда возрастают все рабочие параметры эксплуатируемых высокоответственных машин. Это относится к эксплуатационным режимам с возрастающими скоростями, давлениями с повышенными пульсациями, механическими колебаниями и вибрациями, аэрогидроакустическими нагрузками.

Дальнейшие фундаментальные исследования, планируемые в ИМАШ РАН, в этих направлениях на долгосрочный период до 2030 г. отражены в п. 2.3.2 «Машиностроение» в части мно-

гокритериального связного анализа, обеспечения и повышения прочности, надежности и безопасности машин (п. 2.3.2.2) Программы фундаментальных исследований РАН [27].

Финансирование

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда. Проект 20-19-00769-П.

ЛИТЕРАТУРА

1. Проблемы прочности и безопасности водо-водяных энергетических реакторов. Серия «Исследования напряжений и прочности ядерных реакторов». — М.: Наука, 2008. — 446 с.
2. **Makhutov N. A., Gadenin M. M., Maslov S. V., et al.** Investigation of the Influence of Operational Loading Regimes on the Service Life of Nuclear Power Plants / *Advanced Structured Materials. Multiscale Solid Mechanics. Strength, Durability, and Dynamics. Chapter 24.* — Springer Nature, Switzerland AG, Cham. 2021. Vol. 141. P. 319 – 330. DOI: 10.1007/978-3-030-54928-2_24
3. **Burns D., Johnson S., Okunev V. S., et al.** Nuclear Materials. — London: IntechOpen, 2021. — 138 p. DOI: 10.5772/intechopen.83315
4. Прочность и ресурс ЖРД. Серия «Исследование напряжений и прочности ракетных двигателей». — М.: Наука, 2011. — 525 с.
5. **Makhutov N. A., Gadenin M. M., Reznikov D. O., Yudin O. N.** Analytical, experimental, and numerical methods for the analysis of strength and service life of rocket engines / *Procedia Structural Integrity*. 2022. Vol. 40. P. 264 – 274. DOI: 10.1016/j.prostr.2022.04.036
6. Локальные критерии прочности, ресурса и живучести авиационных конструкций. Исследования прочности, ресурса и безопасности летательных аппаратов. — Новосибирск: Наука, 2017. — 600 с.
7. **Махутов Н. А.** Прочность и безопасность. Фундаментальные и прикладные исследования. — Новосибирск: Наука, 2008. — 528 с.
8. **Кобаев В. П.** Расчеты на прочность при напряжениях, переменных во времени. — М.: Машиностроение, 1993. — 364 с.
9. Прикладные задачи конструкционной прочности и механики разрушения технических систем / Отв. ред. В. В. Москвичев. — Новосибирск: Наука, 2021. — 796 с. DOI: 10.7868/978-5-02-038832-1
10. **Makhutov N. A., Gadenin M. M., Reznikov D. O.** Assessment of Extreme Thermo-Mechanical States of Engineering Systems under Operating Loading Conditions / *Acta Mechanica*. 2021. Vol. 5. N 232. P. 1829 – 1839. DOI: 10.1007/s00707-020-02920-3
11. Институт машиноведения им. А. А. Благодного Российской академии наук / Кто есть кто в современном мире. Национальное достояние. Вып. VII. — М.: Международный объединенный биографический центр, 2009. С. 270 – 387.
12. Достижения и задачи машиноведения. — М.: МГФ «Знание», 2006. — 416 с.
13. **Махутов Н. А., Фортков В. Е.** Машиностроение России: перспективы и риски развития. — М.: Наука, 2017. — 104 с.
14. Безопасность России. Правовые, социально-экономические и научно технические аспекты. Тома 1–64. — М.: МГОФ «Знание», 1998 – 2022.
15. **Махутов Н. А., Гаденин М. М., Чернявский О. Ф., Чернявский А. О.** Механические свойства материалов в расчетах малоциклового деформирования конструкций / *Заводская лаборатория. Диагностика материалов*. 2022. Т. 88. № 6. С. 52 – 59. DOI: 10.26896/1028-6861-2022-88-6-52-59
16. **Гаденин М. М.** Исследование закономерностей сопротивления деформированию и накопления повреждений при нерегулярном малоциклоном нагружении / *Заводская лаборатория. Диагностика материалов*. 2021. Т. 87. № 11. С. 55 – 63. DOI: 10.26896/1028-6861-2021-87-11-55-63

17. **Махутов Н. А., Гаденин М. М., Чернявский О. Ф., Чернявский А. О.** Свойства материалов в расчетах малоциклового деформирования конструкций / *Заводская лаборатория. Диагностика материалов*. 2022. Т. 88. № 6. С. 52 – 59. DOI: 10.26896/1028-6861-2022-88-6-52-59
18. **Смирнова Л. Л., Зинин А. В.** Структурные особенности накопления повреждений при комбинированном циклическом нагружении / *Заводская лаборатория. Диагностика материалов*. 2019. Т. 85. № 5. С. 46 – 51. DOI: 10.26896/1028-6861-2019 – 85-5-46-51
19. **Гаденин М. М.** Исследование повреждаемости и долговечности при одно- и двухчастотных режимах нагружения на основе деформационных и энергетических подходов / *Заводская лаборатория. Диагностика материалов*. 2017. Т. 83. № 6. С. 44 – 52.
20. **Зинин А. В., Бычков Н. Г., Першин А. В. и др.** Термодинамическая прочность жаропрочного сплава и кинетика накопления повреждений при наложении вибрационных нагрузок / *Заводская лаборатория. Диагностика материалов*. 2017. Т. 83. № 2. С. 53 – 55.
21. **Гаденин М. М.** Исследование влияния соотношения амплитуд деформаций при двухчастотном циклическом нагружении / *Заводская лаборатория. Диагностика материалов*. 2018. Т. 84. № 12. С. 50 – 56. DOI: 10.26896/1028-6861-2018-84-12-50-60
22. **Гаденин М. М.** Расчетно-экспериментальная оценка роли соотношения частот в изменении долговечности при двухчастотных режимах деформирования / *Заводская лаборатория. Диагностика материалов*. 2019. Т. 85. № 1. Ч. I. С. 64 – 71. DOI: 10.26896/1028-6861-2019-85-1-I-64-71
23. **Лепов В. В.** Надежность и ресурс технических систем в экстремальных условиях эксплуатации / *Заводская лаборатория. Диагностика материалов*. 2020. Т. 86. № 6. С. 36 – 39. DOI: 10.26896/1028-6861-2020-86-6-36-39
24. **Гаденин М. М.** Особенности кинетики диаграмм циклического упругопластического деформирования при наличии в циклах выдержек и наложении на них переменных напряжений / *Заводская лаборатория. Диагностика материалов*. 2020. Т. 86. № 12. С. 46 – 53. DOI: 10.26896/1028-6861-2020-86-12-46-53
25. **Махутов Н. А.** Безопасность и риски: системные исследования и разработки. — Новосибирск: Наука, 2017. — 724 с.
26. Нормы расчета на прочность оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок (ПНАЭ Г-7-002 – 86. Правила и нормы в атомной энергетике). — М.: Энергоатомиздат, 1989. — 525 с.
27. Программа фундаментальных научных исследований в Российской Федерации на долгосрочный период (2021 – 2030 гг.) Утверждена распоряжением Правительства Российской Федерации от 31.12.2020 г., № 3684-п. (в ред. от 21.04.2022). <http://www.ras.ru/scientificactivity/planrf.aspx?ysclid=la0yuu4t3h62289311> (дата обращения 02.11.2022).

REFERENCES

1. Problems of strength and safety of water-moderated power reactors. The series “Researches of stresses and strength of nuclear reactors”. — Moscow: Nauka, 2008. — 446 p. [in Russian].
2. **Makhutov N. A., Gadenin M. M., Maslov S. V., et al.** Investigation of the Influence of Operational Loading Regimes on the Service Life of Nuclear Power Plants / *Advanced Structured Materials. Multiscale Solid Mechanics. Strength, Durability, and Dynamics. Chapter 24.* — Springer Nature, Switzerland AG, Cham. 2021. Vol. 141. P. 319 – 330. DOI: 10.1007/978-3-030-54928-2_24
3. **Burns D., Johnson S., Okunev V. S., et al.** Nuclear Materials. — London: IntechOpen, 2021. — 138 p. DOI: 10.5772/intechopen.83315
4. Strength and resource of liquid-fuel rocket engines. The series “Researches of rocket engines stresses and strength”. — Moscow: Nauka, 2011. — 525 p. [in Russian].

5. **Makhutov N. A., Gadenin M. M., Reznikov D. O., Yudin O. N.** Analytical, experimental, and numerical methods for the analysis of strength and service life of rocket engines / *Procedia Structural Integrity*. 2022. Vol. 40. P. 264 – 274. DOI: 10.1016/j.prostr.2022.04.036
6. 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].
7. **Makhutov N. A.** Strength and safety. Fundamental and applied researches. — Novosibirsk: Nauka, 2008. — 528 p. [in Russian].
8. **Kogaev V. P.** Strength calculations at stresses, variable in time. — Moscow: Mashinostroenie, 1993. — 364 p. [in Russian].
9. Applied problems of a structural integrity and fracture mechanics of technical systems / Ed. by V. V. Moskvichev. — Novosibirsk: Nauka, 2021. — 796 p. [in Russian]. DOI: 10.7868/978-5-02-038832-1
10. **Makhutov N. A., Gadenin M. M., Reznikov D. O.** Assessment of Extreme Thermo-Mechanical States of Engineering Systems under Operating Loading Conditions / *Acta Mechanica*. 2021. Vol. 5. N 232. P. 1829 – 1839. DOI: 10.1007/s00707-020-02920-3
11. The A. A. Blagonravov Mechanical Engineering Research Institute of the Russian Academy of Sciences / Who is who in the up-to-date world. National property. Issue VII. — Moscow: International joint biographic centre, 2009. P. 270 – 387 [in Russian].
12. Achievements and machine sciences problems. — Moscow: MGF “Znanie”, 2006. — 416 p. [in Russian].
13. **Makhutov N. A., Fortov V. E.** Machinery Manufacture of Russia: Prospects and Risks of Evolution. — Moscow: Nauka, 2017. — 104 p. [in Russian].
14. Safety of Russia. Legal, social-economic and scientifically-engineering aspects. Vols. 1 – 64. — Moscow: MGOF “Znanie”, 1998 – 2022 [in Russian].
15. **Makhutov N. A., Gadenin M. M., Cherniavsky O. F., Cherniavsky A. O.** Mechanical properties of materials in calculations of low cycle deformation of structures / *Industr. Lab. Mater. Diagn.* 2022. Vol. 88. N 6. P. 52 – 59 [in Russian]. DOI: 10.26896/1028-6861-2022-88-6-52-59
16. **Gadenin M. M.** Study of the regularities of resistance to deformation and damage accumulation under irregular low cycle loading / *Industr. Lab. Mater. Diagn.* 2021. Vol. 87. N 11. P. 55 – 63 [in Russian]. DOI: 10.26896/1028-6861-2021-87-11-55-63
17. **Makhutov N. A., Gadenin M. M., Cherniavsky O. F., Cherniavsky A. O.** Mechanical properties of materials in computations of low cycle deformation of structures / *Industr. Lab. Mater. Diagn.* 2021. Vol. 88. N 6. P. 52 – 59 [in Russian]. DOI: 10.26896/1028-6861-2022-88-6-52-59
18. **Smirnova L. L., Zinin A. V.** Structural features of damages accumulation in conditions of combined cyclic loading / *Industr. Lab. Mater. Diagn.* 2019. Vol. 85. N 5. P. 46 – 51 [in Russian]. DOI: 10.26896/1028-6861-2019-85-5-46-51
19. **Gadenin M. M.** Damage and life-time research of the structures in conditions of single and two-frequency loading modes using strain and energy approaches / *Industr. Lab. Mater. Diagn.* 2017. Vol. 83. N 6. P. 44 – 52 [in Russian].
20. **Zinin A. V., Bychkov N. G., Perchin A. V., et al.** Thermal Cyclic Strength of ZhS6U Superalloy and Kinetics of Damage Accumulation under the Impact of Vibration Loads / *Industr. Lab. Mater. Diagn.* 2017. Vol. 83. N 2. P. 53 – 55 [in Russian].
21. **Gadenin M. M.** Study of the effect of strain amplitude ratio at two-frequency cyclic loading / *Industr. Lab. Mater. Diagn.* 2018. Vol. 84. N 12. P. 50 – 56 [in Russian]. DOI: 10.26896/1028-6861-2018-84-12-50-60
22. **Gadenin M. M.** Calculation-and-experimental estimation of the role of the frequency ratio in changing the endurance at two-frequency deformation modes / *Industr. Lab. Mater. Diagn.* 2019. Vol. 85. N 1. Part I. P. 64 – 71 [in Russian]. DOI: 10.26896/1028-6861-2019-85-1-I-64-71
23. **Lepov V. V.** The Reliability and Lifetime of Engineering Systems in Extreme Operation Conditions / *Industr. Lab. Mater. Diagn.* 2020. Vol. 86. N 6. P. 36 – 39 [in Russian]. DOI: 10.26896/1028-6861-2020-86-6-36-39
24. **Gadenin M. M.** Specificities of the kinetics of the cyclic elastoplastic deformation diagrams at dwells in cycles and superimposition of variable stresses on them / *Industr. Lab. Mater. Diagn.* 2020. Vol. 86. N 12. P. 46 – 53 [in Russian]. DOI: 10.26896/1028-6861-2020-86-12-46-53
25. **Makhutov N. A.** Safety and risks: system reseacches and developments. — Novosibirsk: Nauka, 2017. — 724 p. [in Russian].
26. Norms of computation on strength of the equipment and pipelines of nuclear power installations. PNAE G-7-002 – 86. — Moscow: Énergoatomizdat, 1989. — 525 p. [in Russian].
27. The Program of fundamental scientific researches in the Russian Federation for the long-term period (2021 – 2030). It is approved as the Order of the Government of the Russian Federation of 31.12.2020, N 3684-r. (in an edition of 21.04.2022). <http://www.ras.ru/scientificactivity/planrf.aspx?ysclid=la0yuu4t3h62289311> (date of the address 02.11.2022).