

ЧЕБЫШЕВСКИЙ СБОРНИК

Том 18 Выпуск 3

УДК 531.8

DOI 10.22405/2226-8383-2017-18-3-390-412

**АНАЛИЗ
НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННЫХ
И ПРЕДЕЛЬНЫХ СОСТОЯНИЙ
В ЭКСТРЕМАЛЬНО НАГРУЖЕННЫХ
ЗОНАХ МАШИН И КОНСТРУКЦИЙ¹**Н. А. Махутов², М. М. Гаденин³, Д. О. Резников⁴, Д. А. Неганов⁵**Аннотация**

Основой анализа характеристик прочности, ресурса живучести и безопасности элементов машин и конструкций в штатных и аварийных ситуациях являются уравнения и критерии линейной и нелинейной механики деформирования и разрушения. Они входят в нормы прочности и используются как при проектировании, так при изготовлении и эксплуатации оборудования. В статье показано, что результаты исследований прочности, ресурса и живучести являются базовой составляющей создания основ механики катастроф и рисков в техногенной сфере, новых принципов, технологий и технических комплексов, обеспечивающих их безопасную эксплуатацию и позволяющих научно обоснованно предотвращать возникновение аварийных и катастрофических ситуаций, а также минимизировать возможные ущербы при их возникновении. При этом инструментом обеспечения условий безопасной работы является диагностика текущих параметров состояния материала и определение характеристик напряженно-деформированных состояний в наиболее нагруженных зонах анализируемой технической системы. Решение задачи оценки прочности и ресурса в подобных условиях включает в себя создание обобщенных математических и физических моделей сложных технологических, рабочих и аварийных процессов в

¹Работа выполнена за счет средств гранта Российского научного фонда (проект № 14-19-00776-П).

²Махутов Николай Андреевич, член-корреспондент Российской академии наук, главный научный сотрудник Института машиноведения им. А. А. Благонравова РАН, kei51@mail.ru

³Гаденин Михаил Матвеевич, ведущий научный сотрудник Института машиноведения им. А. А. Благонравова РАН, safety@imash.ru

⁴Резников Дмитрий Олегович, ведущий научный сотрудник Института машиноведения им. А. А. Благонравова РАН, mibsts@mail.ru

⁵Неганов Дмитрий Александрович, директор Центра, НИИ «Транснефть», neganovda@niitnn.transneft.ru

технических системах для анализа условий перехода от штатных состояний к условиям возникновения и развития аварий и катастроф. Такие модели характеризуются многоуровневой структурой, затрагивающей глобальные, локальные и объектовые аспекты безопасности. Эти разработки имеют междисциплинарный характер и лежат в основе нормирования безопасности и рисков.

Ключевые слова: Напряженно-деформированные состояния, предельные состояния, прочность, ресурс, живучесть, разрушение, аварии, катастрофы, диагностика, техногенная безопасность, риск, механика катастроф.

Библиография: 17 название.

ANALYSIS OF STRESS-STRAIN AND LIMIT STATES IN EXTREMELY LOADED ZONES OF MACHINES AND CONSTRUCTIONS

N. A. Makhutov, M. M. Gadenin, D. O. Reznikov, D. A. Neganov

Abstract

The basis for the analysis of such characteristics as strength, lifeendurance and safety of machine elements and structures in standard and emergency situations are the equations and criteria for linear and nonlinear mechanics of deformation and fracture. They are a part of the strength standards and are used both in the design and in the manufacture and operation of equipment. The article shows that the results of strength, resource and survivability studies are the basic component to create the foundations of the catastrophes and risks mechanics in the technogenic sphere, new principles, technologies and technical complexes that ensure their safe operation and let in a theoretically grounded manner prevent the appearance of emergency and catastrophic situations, and minimize possible damage when they occur. At the same time, the instrument for ensuring safe working conditions is to diagnose the current parameters of the material state and to determine the characteristics of stress-strain states in the most stressed zones of the analyzed technical system. The solution of the problem of strength and resource evaluation in such conditions includes the creation of generalized mathematical and physical models of complex technological, working and emergency processes in technical systems for analyzing the transition conditions from regular states to the conditions of occurrence and development of accidents and catastrophes. Such models are characterized by a multilevel structure that affects global, local and object security aspects. The developments are interdisciplinary in nature and underlie the safety and risks rationing.

Keywords: Stress-strain states, limiting states, strength, resource, survivability, fracture, accidents, disasters, diagnostics, technogenic safety, risk, mechanics of disasters.

Bibliography: 17 titles.

1. Введение (Постановка проблемы)

Научно-методическое обоснование безопасной эксплуатации сложных технических систем в пределах их срока службы от $100 \div 1000$ секунд (двигатели ракетно-космических комплексов) до 50-100 лет (ядерные реакторы, теплоэнергоустановки, гидротурбины, транспортные системы, инженерные сооружения) требует детального анализа кинетики характеристик механических свойства материала и условий эксплуатационного нагружения для установления реальных параметров прочности, ресурса и живучести, которые характеризуют переход этих сложных технических систем к предельному состоянию, угрожающему объектам, персоналу, населению и окружающей среде [1-11]. Количественное обоснование условий возможности возникновения аварийных ситуаций должно быть выполнено не только для нормальных условий эксплуатации с максимально достижимым числом циклов нагружения, но и для экстремальных условий с ограниченным числом циклов [1-3, 12, 13].

В число базовых проблем обоснования расчетных характеристик в рамках теоретической и экспериментальной механики, механики деформирования и разрушения входят три главные:

- расчетно-экспериментальный анализ напряженно-деформированных состояний (σ, e) с учетом механических P^3 , термических Q_t^3 , аэрогидродинамических Q_{ah}^3 нагрузок; при этом напряжения $\sigma_{\max}^3$ и деформации $e_{\max}^3$ оказываются зависящими от эксплуатационного числа циклов нагружения N^3 , времени τ^3 и температуры t^3

$$\{\sigma_{\max}^3, e_{\max}^3\} = F_3 \{P^3, Q_t^3, Q_{ah}^3, Q_{rc}^3, N^3, \tau^3, t^3\}; \quad (1)$$

- анализ закономерностей статического, динамического, циклического и длительного упругого и упругопластического деформирования для варьируемых в испытаниях частот f_τ , амплитуд напряжений σ_a^3 и деформаций e_a^3 , температур t^3 и времени τ^3

$$\{\sigma_{\max}^3, e_{\max}^3\} = F_{13} \{f_\tau, (\sigma_a^3, e_a^3), t^3, \tau^3\}; \quad (2)$$

- анализ критериев и условий накопления повреждений d^n , а также циклической долговечности N_c^n , в испытаниях для стадий образования и развития трещин

$$\{d^3, N_c^3\} = F_{23} \{f_\tau, (\sigma_a^3, e_a^3), t^3, \tau^3\} \quad (3)$$

Результаты экспериментальных и расчетных исследований на образцах, моделях и натурных конструкциях дают возможность определить запасы по напряжениям n_σ , деформациям n_e , числу циклов n_N , времени n_τ , воздействию внешней среды n_Φ и размеру трещин n_l

$$\{n_\sigma, n_e, n_N, n_\tau, n_\Phi, n_l\} = \left\{ \frac{\sigma_c}{\sigma_{\max}^3}, \frac{e_c}{e_{\max}^3}, \frac{N_c}{N^3}, \frac{\tau_c}{\tau^3}, \frac{\Phi_c l_c}{\Phi^3 l^3} \right\}, \quad (4)$$

где индекс «с» относится к критической (предельной) величине соответствующей характеристики прочности, долговечности, трещиностойкости, а индекс «э» - к соответствующим величинам при эксплуатации.

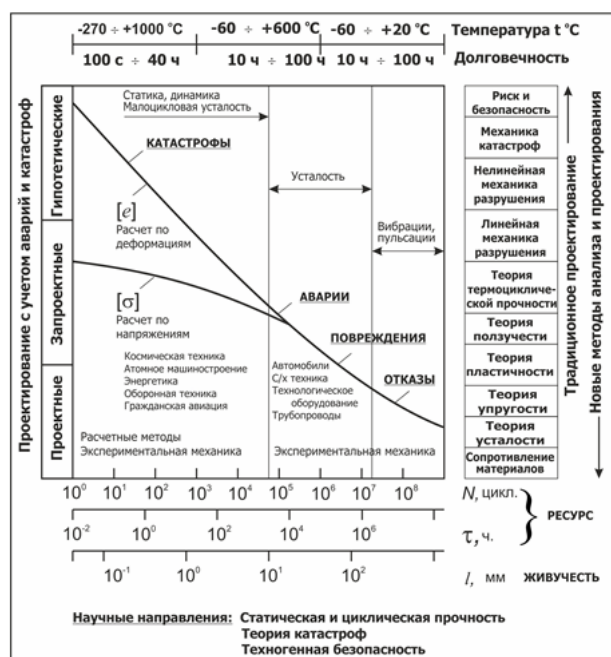


Рис. 1: Обобщенная диаграмма анализа прочности, ресурса, живучести и безопасности

Расчетно-экспериментальный анализ в соответствии с выражениями (1) – (4) является основой построения (рис. 1) обобщенных диаграмм прочности, ресурса (долговечности), живучести, термостойкости и хладостойкости на основе общих уравнений механики деформирования и разрушения (сопротивления материалов, теорий усталости, упругости, пластичности, ползучести, термоциклической прочности, линейной и нелинейной механики разрушения, механики катастроф, риска и безопасности).

2. Развитие и применение расчетных и экспериментальной методов

В соответствии с соотношениями (1)-(4) одной из важнейших задач при решении проблемы обоснования прочности, ресурса, живучести и безопасности работы функционирующих, строящихся и перспективных машин и конструкций является расчетно-экспериментальное определение реального напряженно-деформированного состояния (НДС) несущих элементов конструкций. На рис. 2 показана комплексная блок-схема решения проблем прочности, ресурса, живучести и безопасности таких потенциально опасных объектов техносферы, как атомные (АЭС), гидравлические (ГЭС) и тепловые (ТЭС) электростанции, ракетно-космические комплексы (РКК), летательные аппараты (ЛА), атомные подводные лодки (АПЛ), химические производства (ХП), магистральные трубопроводы (МТ). Эти проблемы охваты-

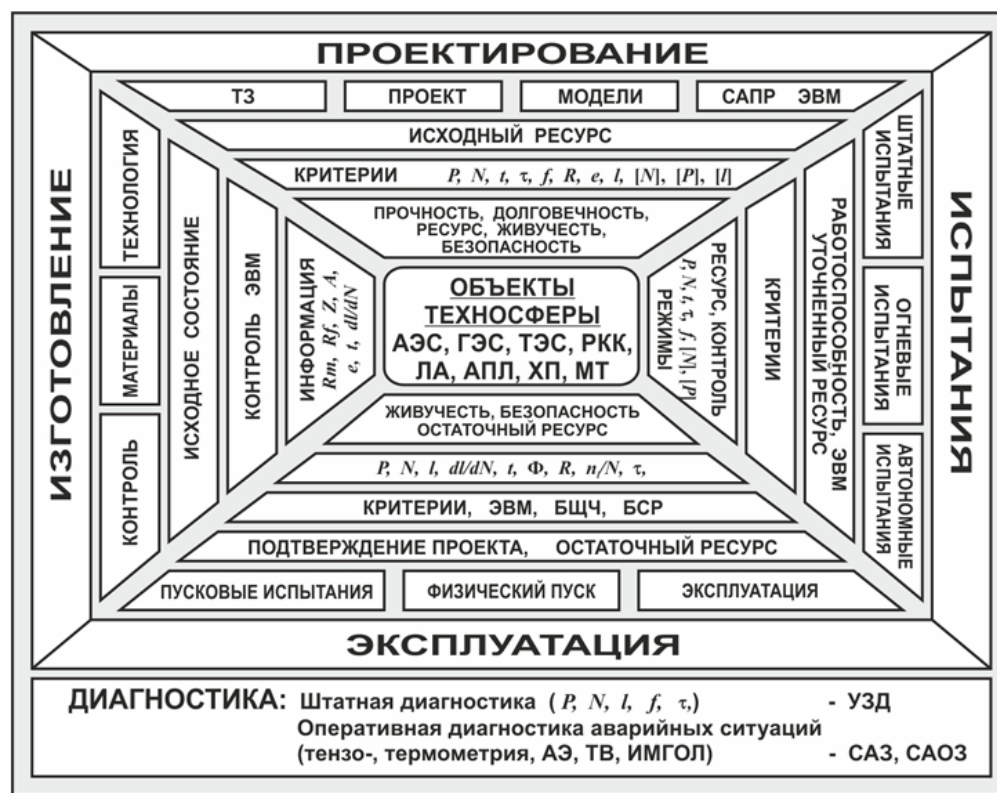


Рис. 2: Блок-схема анализа прочности, ресурса, живучести и безопасности машин и конструкций.

вают все стадии их жизненного цикла: проектирование, изготовление, испытания и эксплуатацию. При этом требования по безопасности, ресурсу и прочности закладываются на стадии проектирования, отслеживаются на стадии изготовления и испытаний, диагностируются, поддерживаются или повышаются на стадии эксплуатации [1-11, 14, 15].

Проектирование включает в себя разработку и согласование технического задания (ТЗ) с введением базовых требований по прочности, ресурсу и безопасности. Сама разработка проекта состоит из ряда стадий (принципиальные схемы, предэскизный, технический и рабочий проекты). На этой стадии разрабатываются физические и математические модели с применением быстро развивающихся алгоритмов, программ и компьютерной техники и систем традиционного автоматизированного проектирования (САПР) и цифрового проектирования. На стадии проектирования проводится анализ прочности на основании нормативных и дополнительных расчетов и обосновывается исходный ресурс. Основными критериями и характеристиками таких расчетов являются: эксплуатационные нагрузки P , температуры t , время τ , числа циклов N , частоты f , характеристики сопротивления материалов $R(\sigma_t, \sigma_v, \sigma_{дп})$, деформации e , дефекты l . В качестве допустимых с использованием соотношений (1)-(4) обосновываются характеристики $[N], [P], [l]$ с заданными величинами запасов n . По комплексу расчетных и эксплуатационных иссле-

дований составляется заключение о прочности, долговечности, ресурсе, живучести и безопасности рассматриваемых элементов машин и конструкций.

На стадии изготовления решаются вопросы выбора, обоснования и развития технологий материалов и контроля. Для изготовленных элементов машин и конструкций устанавливаются характеристики исходного состояния: фактические механические свойства и их отклонения от технических требований, уровень реальной дефектности несущих узлов, геометрические формы и их отклонения. Уточненные данные контроля заносятся в соответствующие технические паспорта и в банки данных. Все эти характеристики являются исходной информацией о параметрах прочности - $R_m(\sigma_b)$, $R_f(S_{от})$, деформативности - A (удлинений) и Z (поперечного сужения ψ), деформаций - ϵ , температуры - t , скорости роста трещин - dl/dN (или $dl/d\tau$). На их основе проводится уточнение проектных характеристик прочности, долговечности, ресурса, живучести и безопасности.

Стадия испытаний включают различные их виды и комбинации: автономные испытания ($АИ$) узлов, стендовые испытания узлов, агрегатов и изделий, огневые и имитационные испытания. Завершающими оказываются штатные испытания головных образцов с воспроизведением реальных эксплуатационных и экстремальных режимов.

С использованием тех же критериев, что и для стадий проектирования и изготовления, проводится дополнительное уточнение допустимых предельных нагрузок $[P]$ и долговечности $[N]$. На этой основе составляется заключение о ресурсе, методах последующего контроля, назначаются уточненные режимы эксплуатации.

Для стадии ввода в эксплуатацию осуществляются предпусковые и пусковые испытания, физический пуск (с корректировкой всех систем поддержания эксплуатации) и ввод в эксплуатацию. При этом назначается и уточняется система штатной диагностики основных параметров: нагрузок P , температур t , циклов N , частот f , дефектов l с использованием соответствующих систем диагностики и мониторинга состояния). Для объектов высокой потенциальной опасности, разрабатываются, создаются и применяются специальные методы и системы оперативной диагностики аварийных ситуаций - с использованием тензо-, термометрии, акустической эмиссии ($АЭ$), термовидения ($ТВ$), импульсной голографии ($ИМГОЛ$) и др. Получаемые при этом данные могут давать исходную информацию для включения систем автоматической защиты ($САЗ$) и систем автоматической оперативной защиты ($САОЗ$).

На начальной стадии эксплуатации должна быть получена важнейшая информация по подтверждению или корректировке проектных решений о прочности, долговечности, ресурсе, живучести и безопасности. По мере исчерпания уточненного проектного ресурса проводится оценка остаточного ресурса безопасной эксплуатации. Для согласования всей информации для всех стадий жизненного цикла объекта должны использоваться унифицированные критерии и расчетные программы. При этом данные о ресурсе могут выводиться на блочные щиты управления ($БЩУ$) и бортовые счетчики ре-

сурса (BCP) – n_i/N .

Для решения указанных задач наряду с современными расчетными методами успешно применяются эффективные методы экспериментальной механики на всех основных этапах создания машин и конструкций (см. рис. 2), включая стадии проектирования, испытания и доводки опытных образцов, и, особенно, в реальных условиях эксплуатации [3-8, 12]. В ряде случаев при сложностях в проведении прямых экспериментальных исследований уникальных объектов применяются комбинированные расчетно-экспериментальные методы, сочетающие преимущества каждого из используемых методов на различных этапах исследований, что обеспечивает получение необходимой информации по напряженно-деформированным состояниям, в том числе в зонах, недоступных для измерений.

3. Накопление эксплуатационных повреждений и предельные состояния

Построение поверхностей предельных состояний и включение в перечисленные выше системы измерений универсальных и специальных компьютеризированных систем и соответствующих программных продуктов позволяет не только восстанавливать историю реального эксплуатационного нагружения $P(\tau)$, $\sigma(\tau)$, $e(\tau)$, но и оценивать степень накопления повреждений d , развития трещин l_i , истощения ресурса и уровень показателей надежности [2, 3, 12, 14-17].

Наличие рассмотренной выше расчетно-экспериментальной информации об усилиях P , температурах t , напряжениях σ и деформациях e , а также критериальных величин сопротивления деформациям и разрушению соответствующих конструкционных материалов является основой для построения предельных кривых

$$P_c = \{(\sigma_{\text{пр}}, e_{\text{пр}})_{\text{maxk}}, t, \tau, N\}, \quad (5)$$

где P_c – критическое (предельное) сочетание механических P_m , тепловых P_t и других типов усилий для различных режимов нагружения по времени τ , числу циклов N , температуре t .

Величины P_c , как правило, устанавливаются по критериальным величинам местных (приведенных) напряжений $(\sigma_{\text{пр}})_{\text{maxk}}$ или деформаций $(e_{\text{пр}})_{\text{maxk}}$. Для этого используют уравнения:

– кривых изотермической усталости (мало- или многоциклового) для соответствующих материалов

$$\{(\sigma_{\text{пр}})_{\text{maxk}}, (e_{\text{пр}})_{\text{maxk}}\}_c = f_N \left\{ \frac{N, \sigma_{\text{в}}, \psi_{\text{к}}, S_{\text{к}}}{\sigma_{\text{т}}, m} \right\}, \quad (6)$$

где $\sigma_{\text{в}}$ – предел прочности, $\sigma_{\text{т}}$ – предел текучести, $S_{\text{к}}$ – сопротивление отрыву, $\psi_{\text{к}}$ – относительное сужение в шейке образца при статическом разрыве, m – показатель упрочнения в упругопластической области;

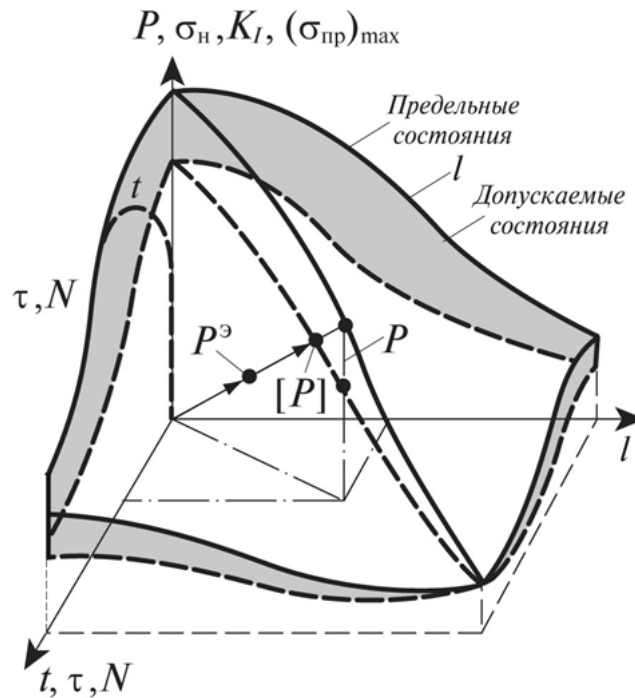


Рис. 3: Схема предельных и допускаемых состояний при анализе прочности и ресурса

– кривых длительной изотермической прочности

$$\{(\sigma_{\text{пр}})_{\text{maxk}}, (e_{\text{пр}})_{\text{maxk}}\}_c = f_{\tau} \left\{ \frac{\tau, \sigma_{\text{в}}, \psi_{\text{к}}, S_{\text{к}}}{\sigma_{\text{т}}, m} \right\}, \quad (7)$$

– кривых статической прочности при варьировании температур t

$$\{(\sigma_{\text{пр}})_{\text{maxk}}, (e_{\text{пр}})_{\text{maxk}}\}_c = f_t \left\{ \frac{t, \sigma_{\text{в}}, \psi_{\text{к}}, S_{\text{к}}}{\sigma_{\text{т}}, m} \right\}. \quad (8)$$

Кривые, описываемые уравнениями (6) и (7) для металлических конструкционных материалов, как правило, имеют (рис. 3) монотонный вид: при увеличении N и τ предельные значения разрушающих (критических) напряжений и деформаций уменьшаются. Температурные зависимости критических напряжений и деформаций (8) могут иметь в области низких температур t немонотонный характер: для радиационно-охрупченных или хладноломких состояний металла в этом случае прочность и пластичность могут снижаться.

По предельным кривым (6) – (8) для заданного i -режима, определенно-го величинами $\{(\sigma_{\text{пр}})_{\text{maxk}}, (e_{\text{пр}})_{\text{maxk}}\}_i$, устанавливают предельные (критические) величины $N_{ci}, \tau_{ci}, t_{ci}, \Phi_{ci}$. Если для i -режима заданы значения N_i, τ_i, t_i, Φ_i , то с использованием кривых усталости, трещиностойкости, длительной прочности и стойкости к внешним воздействиям можно оценить величины

накопленных повреждений

$$\{d_i\} = \left\{ \left(\frac{N_i}{N_{ci}} \right), \left(\frac{\tau_i}{\tau_{ci}} \right), \left(\frac{t_i}{t_{ci}} \right), \left(\frac{\Phi_i}{\Phi_{ci}} \right) \right\}. \quad (9)$$

Если общее число рассматриваемых режимов равно k , то суммарное повреждение на основе гипотезы линейного суммирования повреждений можно определять с использованием выражения (9), как сумму

$$d_{\Sigma} = \sum_i^k \{d_i\} \leq 1. \quad (10)$$

Вместе с этим, для случаев выраженного циклического упругопластического деформирования выражения (9) и (10) можно трансформировать, приняв положение, что определяющим фактором повреждений d_i является накопление циклических повреждений N_i/N_{ci} , а факторы t_i , τ_i , и Φ_i сказываются на предельном числе циклов до разрушения. Тогда

$$d_{\Sigma} = \sum_i^k \{d_i\} = \sum_i^k \left\{ \frac{N_i}{N_{ci}} (\tau_i, t_i, \Phi_i) \right\} \leq 1. \quad (11)$$

При сложных, например, двухчастотных режимах нагружения (рис. 4) с варьируемыми отношениями амплитуд и частот циклических напряжений (деформаций) в развитие уравнений (9) - (11), когда для одночастотного малоциклового нагружения гипотеза линейного суммирования усталостных (от основного процесса малоциклового нагружения) d_f^I и длительных статических (квазистатических) d_s повреждений представляется в виде $d_{\Sigma} = d_f^I + d_s$, накопление повреждений для двухчастотного малоциклового мягкого нагружения может быть описано на основе линейного суммирования дополнительной составляющей усталостного повреждения d_f^{II} от наложенной высокочастотной амплитуды напряжения σ_2 (деформации e_{a2}) с составляющими усталостного d_f^I и длительного статического d_s повреждения, и тогда суммарное повреждение для двухчастотного режима $d - \Sigma$ может быть выражено следующим уравнением [3, 16, 17]

$$d_{\Sigma} = d_f^I + d_f^{II} + d_s \quad (12)$$

В этом случае усталостное повреждение d_f^I от полной амплитуды деформации $e_a = e_{a1} + e_{a2}$ за один цикл малоциклового нагружения по гипотезе линейного суммирования с использованием соответствующего уравнения кривой усталости определится как $d_f^I = 1/N(e_a, t, \tau)$, и с учетом факторов времени τ и числа наработанных циклов n составит

$$d_f^I = \int_0^{N_C} \frac{1}{N[e_a(n), t, \tau]} dn. \quad (13)$$

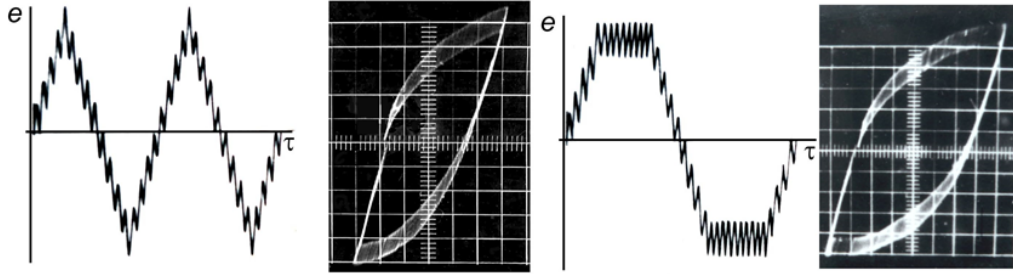


Рис. 4: Двухчастотные режимы и экспериментальные диаграммы циклического упругопластического деформирования.

Усталостная составляющая повреждения от высокочастотной деформации d_f^{II} при определении разрушающего (по высокой f_2 частоте нагружения) числа циклов N^* с учетом изменяющегося коэффициента асимметрии высокочастотных циклов $r(n^*)$ (в результате наложения двух гармонических процессов с существенно различными частотами $n = n^*(f_1/f_2)$) определится следующим образом

$$d_f^{II} = \int_0^{N_C^*} \frac{1}{N^*[e_{a2}, t, \tau, r(n^*)]} dn^*. \quad (14)$$

Как и рассматривалось выше, составляющая длительного статического повреждения d_s для соответствующих температуры и времени нагружения определится отношением односторонне накопленной необратимой деформации e_p к располагаемой (предельной) пластичности материала при длительном статическом нагружении

$$d_s = \int_0^{N_C} \frac{e_p}{e_C^{t\tau}} dn. \quad (15)$$

Тогда предельное состояние для условий двухчастотного малоциклового нагружения при разрушающем числе циклов N_c на основе линейного суммирования рассматриваемых составляющих повреждений согласно уравнениям (9) - (15) может быть определено как

$$d_\Sigma = \int_0^{N_C} \frac{1}{N[e_a(n), t, \tau]} dn + \int_0^{N_C^*} \frac{1}{N^*[e_{a2}, t, \tau, r(n^*)]} dn^* + \int_0^{N_C} \frac{e_p}{e_C^{t\tau}} dn. \quad (16)$$

На рис. 5, а показаны расчетные по уравнению (16) и соответствующие им экспериментальные данные по определению составляющих повреждения для мягкого режима высокотемпературного малоциклового двухчастотного

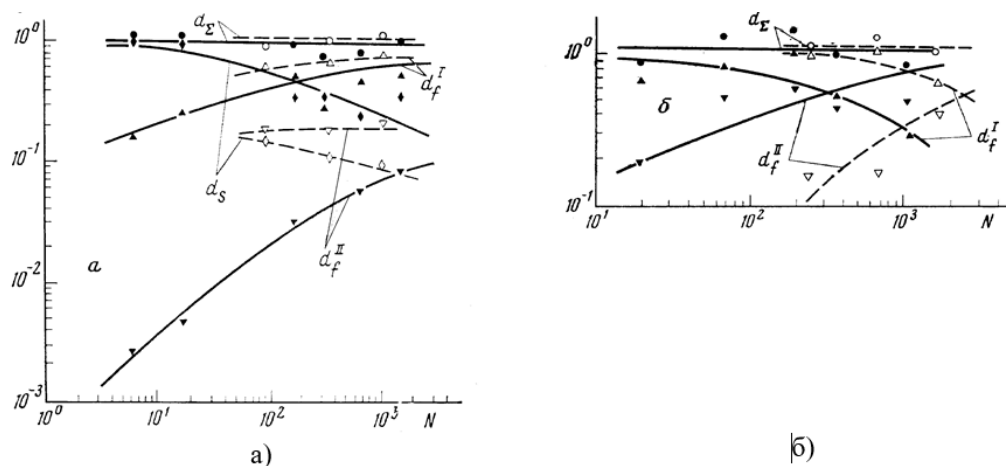


Рис. 5: Суммирование составляющих повреждения при мягком (а) и жестком (б) режимах двухчастотного нагружения для различных значений долговечностей и соотношений частот и амплитуд действующих напряжений (деформаций)

нагружения при наложении высокочастотных напряжений с двумя уровнями соотношений частот (соответственно темные точки и сплошные линии; светлые точки и пунктирные линии), а также для жесткого (рис. 5, б) двухчастотного нагружения с двумя уровнями амплитуд высокочастотных деформаций (соответственно темные точки и сплошные линии; светлые точки и пунктирные линии), из которых видно, что общее накопленное повреждение для этих условий, определенное на основе линейного суммирования его составляющих, близко к единице.

При этом следует иметь ввиду, что рассмотренное выше линейное суммирование усталостных и квазистатических составляющих повреждения при детальном анализе является нелинейным по числу циклов и времени нагружения, так как определяющие каждую из этих составляющих деформационные характеристики имеют в процессе нагружения сложную кинетику [12, 16, 17], нелинейным образом зависящую от числа циклов (циклическое упрочнение или разупрочнение материала в упругопластической области), а также от температуры и времени нагружения (температурно-временное изменение характеристик прочности и пластичности материала).

Для большинства машин и конструкций в процессе их работы в соответствии с уравнениями (1) и (11) характерно нарастание числа циклов и уровней эксплуатационного нагружения, и как следствие - накопление повреждений d_i и d_Σ , а также и интенсификация процессов циклического деформирования по выражению (2), истощение циклического ресурса по выражению (3), возникновение и развитие аварийных и катастрофических ситуаций при истощении запасов по выражению (4).

Для различных типов расчетных схем и расчетных случаев предусмотрены два уровня нормативов анализа прочности: обязательные нормы расчетов и испытаний и уточненные методики расчетов и испытаний.

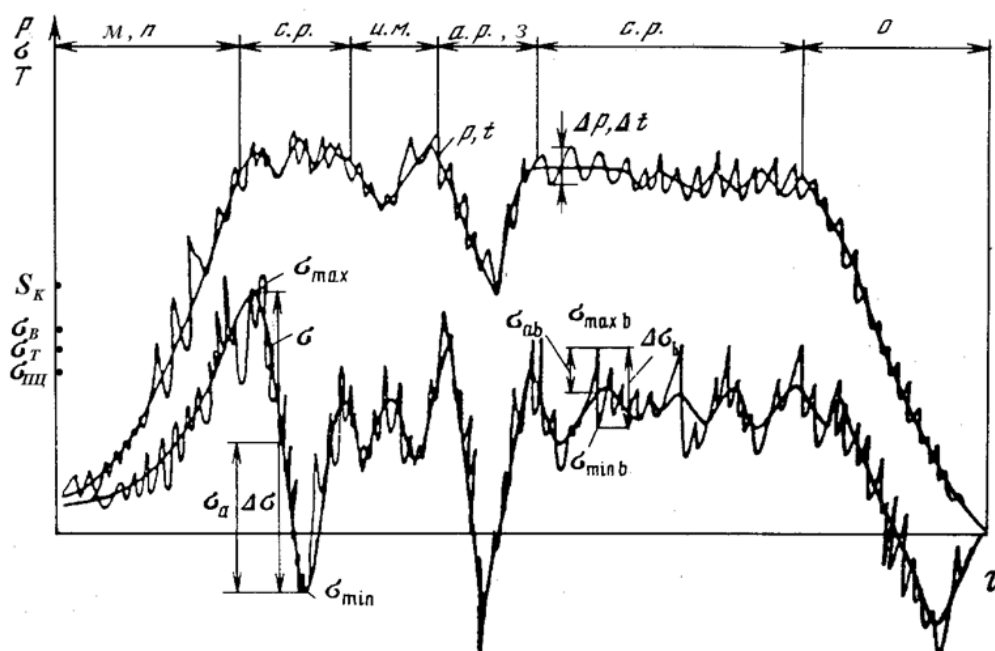


Рис. 6: Схема эксплуатационного нагружения и основные параметры эксплуатационных нагрузок

С учетом приведенных выше исходных параметров циклического нагружения машин и конструкций в штатных и аварийных режимах с общим временем эксплуатации τ от $10^1 \div 10^2$ секунд до $10^9 \div 10^{10}$ секунд можно выделить следующие области чисел циклов эксплуатационного нагружения (рис. 6):

$10^0 \div 10^1$ - экстремальные циклы (монтаж, запуск, испытания, аварийные режимы);

$10^2 \div 10^3$ - эксплуатационные циклы (выход на режим, регулирование мощности, срабатывание систем защиты);

$10^4 \div 10^5$ - эксплуатационные циклы (технологические циклы, регулирование рабочего процесса);

$10^6 \div 10^8$ - эксплуатационные циклы (технологические, транспортировочные циклы, изменения давления, изменения оборотов роторов);

$10^9 \div 10^{12}$ - эксплуатационные циклы (вибрации, локальные пульсации, изменения температур и давлений).

Усталость конструкционных материалов и сварных соединений при числах циклов в диапазоне $10^0 \div 10^{12}$, которые имеют место при реальных условиях эксплуатации, можно охарактеризовать следующими шестью видами [2, 3]:

$10^0 \div 10^1$ - инфрамалоцикловое (декацикловое) динамическое, статическое и квазистатическое разрушение при аварийных или катастрофических ситуациях за счет первичных и вторичных повреждающих факторов (когда максимальные σ_{max} и амплитудные σ_a значения напряжений превосходят пределы

текучести σ_T и прочности σ_B и достигают сопротивления разрыву S_K в макрообъемах);

$10^1 \div 10^3$ - малоцикловое (гектоцикловое) квазистатическое или усталостное разрушение при наличии больших микропластических деформаций в зоне разрушения на макроструктурном уровне (когда амплитуда напряжений $\sigma_a \gg \sigma_T$);

$10^3 \div 10^5$ - малоцикловое (килоцикловое) усталостное разрушение при наличии относительно малых микропластических деформаций в зоне разрушения на макроструктурном уровне (когда $\sigma_{ну} \leq \sigma_a \leq \sigma_T$, $\sigma_{пц}$ - предел пропорциональности);

$10^5 \div 10^8$ - классическое многоцикловое (мегацикловое) усталостное разрушение при наличии микропластических деформаций в микро- и макрообъемах вблизи зоны разрушения (когда $\sigma_a \leq \sigma_{пц}$);

$10^8 \div 10^9$ - усталостное (гигацикловое) разрушение на сверхвысоких базах (числах циклов) при наличии микропластических деформаций в микрообъемах вблизи зоны разрушения ($\sigma_a < \sigma_{пц}$);

$10^{10} \div 10^{12}$ - гиперусталостное (терацикловое) разрушение на супервысоких базах при формировании разрушения на макроструктурном уровне ($\sigma_a \ll \sigma_{пц}$).

По данным рис. 6 могут быть установлены следующие расчетные значения:

1. механическая, инерционная, электромагнитная нагрузка, давление p (p_{max} , p_a , Δp);
2. температура t (t_{max} , t_{min} , t_a , Δt);
3. номинальные и местные напряжения σ (σ_{max} , σ_{min} , σ_a) или деформации e (e_{max} , e_{min} , e_a).

При этом основные режимы эксплуатации включают в себя: монтаж (m), пуск (n) и гидроиспытания ($g.u.$), стационарные режимы ($c.p.$), изменение мощности ($u.m.$), аварийные режимы ($a.p.$), срабатывание защиты (z), вибрации (v), останов (o).

Наличие изменений давления Δp , изменения температур Δt и вибраций (v_p) обуславливает наличие высокочастотных амплитуд напряжений $\sigma_{ав}$. Это обстоятельство создает двухчастотные и многочастотные режимы нагружения с отношениями частот $f_a/f_{ав} = 10^1 \div 10^5$ и коэффициентом асимметрии $r_\sigma = \sigma_{min}/\sigma_{max} > 0$.

Диаграмма для обобщенной расчетной кривой усталости в координатах « e_a-N » и « σ_a-N » показана на рис. 7. На этом рисунке:

σ_{ai} , $(\sigma_{ав})_i$ - амплитуда основных и вибрационных напряжений для i -режима;

n_i , $(n_\sigma)_i$ - число циклов для основного и вибрационного нагружений; $[\sigma_a^*]$, $[N]$ - допускаемые амплитуды напряжений и долговечность (число циклов);

$[\sigma_n]$ - допускаемые номинальные напряжения.

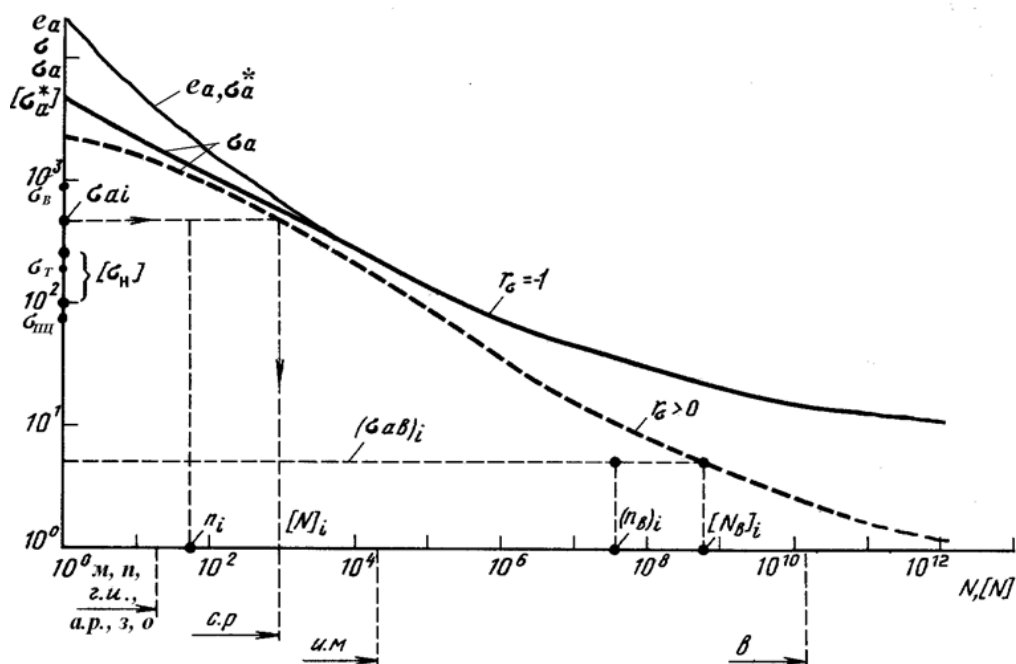


Рис. 7: Диаграмма для определения характеристик статической, циклической и длительной циклической прочности и ресурса.

Напряжения $[\sigma_n]$ можно определить на основе традиционного расчета исходной статической прочности по пределу прочности σ_B и пределу текучести σ_T . При оценках остаточной статической прочности характеристики σ_B и σ_T должны быть назначены с учетом конкретных условий эксплуатации – влияния цикличности нагружения, температур и сред в соответствии с функционалами (1) - (3).

При оценках исходного и остаточного ресурса расчетная диаграмма статической и циклической прочности (рис. 7) строится по экспериментальным данным или по расчетным данным (по исходным характеристикам механических свойств с использованием степенных уравнений, обобщающих большую экспериментальную информацию и основные положения теории усталости). Эта же диаграмма используется и для оценки накопленных циклических повреждений, как правило, с применением линейного закона суммирования циклических повреждений. Для уточнения оценок остаточного ресурса используются модифицированные уравнения кривых циклической прочности, в которые вводятся расчетные характеристики, зависящие от времени и условий нагружения.

4. Сопротивление статическому и циклическому упругопластическому деформированию и разрушению.

Для описания процессов статического ($k=0$) и циклического ($k \geq 1$) деформирования используются [2-8, 13, 16] уравнения состояния, связывающие напряжения σ , S и деформации e , ϵ по числу полуциклов нагружения $k=2N$ (рис. 8)

$$\sigma^{(0)} = \sigma_T (e^{(0)} / e_T)^{m_0}, S^{(k)} = S_T (\epsilon^{(k)} / \epsilon_T)^{m_k}, \quad (17)$$

где $\sigma^{(0)}$, $e^{(0)}$ – напряжения и деформации исходного нагружения (в нулевом полуцикле нагружения $k=0$);

$S^{(k)}$, $\epsilon^{(k)}$ – напряжения и деформации в k -ом полуцикле нагружения, отсчитываемые от точки разгрузки;

σ_T , e_T – напряжения и деформации на уровне предела текучести в исходном нагружении ($k=0$);

S_T , ϵ_T – напряжения и деформации на уровне предела текучести при циклическом нагружении ($k>0$);

m_0 , m_k – показатели упрочнения при исходном ($k=0$) и циклическом ($k>0$) нагружении.

По данным экспериментальных исследований $S_T \approx 2\sigma_T$ и

$$m_k = m_0 f_k \{e^{(0)}, m_0, k\}. \quad (18)$$

Основу расчетных кривых усталости для широкого диапазона числа циклов N ($10^0 \leq N \leq 10^{12}$) составляют два положения:

- размахи упругопластических деформаций Δe состоят из размахов пластических деформаций Δe_p и размахов упругих деформаций Δe_e :

$$\Delta e = \Delta e_p \Delta e_e \quad (19)$$

- числа циклов N до разрушения при жестком нагружении связаны с размахами деформаций степенными уравнениями:

$$N^{m_p} \cdot \Delta e_p = C_p, N^{m_e} \cdot \Delta e_e = C_e, \quad (20)$$

где m_p , m_e , C_p , C_e – характеристики материала.

Для сталей с ростом предела прочности σ_b от 400 до 1300 МПа показатели m_p и m_e увеличиваются ($0,5 \leq m_p \leq 0,65$), ($0,08 \leq m_e \leq 0,12$). Характеристики C_p и C_e зависят от статической пластичности ψ_k ($\psi_{ki} \psi_c$ – относительное сужение в шейке при статическом разрыве) и от сопротивления разрыву S_k в шейке:

$$C_p \cong \frac{1}{2} \ln \frac{1}{1 - \psi_k}, C_e \cong \frac{S_k}{1,15 \cdot E}, \quad (21)$$

где E – модуль продольной упругости.

формаций K_e для неупругой области

$$\bar{\sigma}_{\max} = \bar{\sigma}_i K_\sigma, \bar{e}_{\max} = \bar{e}_i K_e. \quad (22)$$

Коэффициенты концентрации K_σ и K_e функционально связываются с теоретическими коэффициентами концентрации напряжений α_σ , номинальными напряжениями $\bar{\sigma}_i$ и характеристиками упрочнения m для степенной аппроксимации диаграмм деформирования (или G_T для линейной аппроксимации) в упругопластической области

$$K_\sigma, K_e = f(\bar{\sigma}_i, \alpha_\sigma, m). \quad (23)$$

При номинальных напряжениях $\bar{\sigma}_i \geq 1/\alpha_\sigma$ с ростом $\bar{\sigma}_i$ величины K_σ уменьшаются, а величины K_e растут. При циклическом упругопластическом деформировании в рамках деформационной теории в рассмотрение вводится обобщенная диаграмма циклического деформирования в координатах « $\bar{S} - \bar{\epsilon}$ » с началом координат в точке разгрузки в данном k -ом полуцикле ($k=2N$). Увеличение концентрации напряжений приближает режим нагружения в зоне концентрации к жесткому (с заданными амплитудами деформаций), обуславливая применимость деформационных теорий циклической пластичности. Для циклически разупрочняющегося материала кривая « $\bar{S} - \bar{\epsilon}$ » пройдет ниже, а для циклически упрочняющегося материала выше кривой « $2\bar{\sigma} - 2\bar{e}$ ». В первом случае величины K_e при циклическом деформировании будут выше, а во втором ниже, чем при исходном нагружении; величины коэффициентов концентрации напряжений K_σ при циклическом упрочнении получаются больше, чем при циклическом разупрочнении.

При установленных по уравнению (23) значениях K_σ и K_e по уравнению (22) определяются местные напряжения и деформации для исходного (статического) и циклического нагружения; эти данные позволяют охарактеризовать амплитуды местных упругопластических деформаций и соответствующие им значения коэффициентов асимметрии цикла. Для заданной формы цикла с использованием деформационных критериев разрушения определяется число циклов N_0 до образования макротрещины. При нормальных и умеренных температурах, когда температурно-временные эффекты не проявляются, разрушающие амплитуды деформаций $\bar{e}_a$ получаются выше, чем при возникновении статических и циклических деформаций ползучести при высоких температурах. Введение запасов по числу циклов и по разрушающим амплитудам деформаций позволяет построить кривые допускаемых амплитуд деформаций $[\bar{e}_a]$ и чисел циклов $[N_0]$. Для построения этих кривых в первом приближении можно использовать результаты базовых экспериментов при длительном статическом нагружении - предельные разрушающие напряжения $\bar{\sigma}_{в\tau}$ и пластичность $\bar{e}_{с\tau}$ (определяемую через относительное сужение $\psi_{в\tau}$). При этом следует учитывать, что изменение во времени величины $\bar{\sigma}_{в\tau}$ зависит от типа материала и степени его легирования (например, никелем, хромом, молибденом и другими элементами) в меньшей степени, чем величины $\bar{e}_{с\tau}$.

5. Трещиностойкость при циклическом нагружении

Долговечность (живучесть) N_p на стадии развития трещин при циклическом нагружении в соответствии с выражением (4) должна устанавливаться по кривым « l - N » роста трещин до критического размера по мере увеличения числа циклов N . Эти кривые получаются по данным о скоростях развития трещин dl/dN .

Скорости трещин dl/dN при малоцикловом нагружении следует определять через размахи коэффициентов интенсивности деформаций $\Delta\bar{K}_{Ie}$, в отличие от размахов коэффициентов интенсивности напряжений $\Delta\bar{K}_I$ для многоциклового усталости, когда справедливы основные уравнения линейной механики разрушения. При этом уравнения состояния для статического и циклического нагружений входят в расчет значений $\Delta\bar{K}_{Ie}$ по величинам $\Delta\bar{K}_I$ при известных размерах дефектов (трещин) l_d и номинальных напряжениях $\bar{\sigma}_i$

$$\Delta\bar{K}_{Ie} = f(\bar{\sigma}_n, l_d, m) = f(\Delta\bar{K}_I, \bar{\sigma}_n, m). \quad (24)$$

Уменьшение сопротивления упругопластическим деформациям и деформациям ползучести (за счет циклического разупрочнения, увеличения температур t и времени нагружения τ) приводит согласно (24) к увеличению $\Delta\bar{K}_{Ie}$ при заданных $\bar{\sigma}_n$ и l_d , росту скоростей развития трещин dl/dN и снижению долговечности N_p . Скорости распространения трещин dl/dN и их предельные размеры зависят от кратковременной или длительной статической пластичности. По данным расчета на стадии образования и развития трещин определяются соответственно долговечности до образования трещин N_0 и до окончательного разрушения N_p для заданного в эксплуатации номинального напряжения $\bar{\sigma}_i^a$, а введение запасов n_N по выражению (4) позволяет установить допускаемые числа циклов $[N_0]$ и $[N_p]$ для напряжений $\bar{\sigma}_i^a$.

Исключительно важным и принципиально сложным является вопрос о механике циклического разрушения на базах по числу циклов N от 10^0 до 10^{12} и по времени τ от 10^0 до 10^8 час. К настоящему времени выполнен существенный объем исследований по механике статического и циклического разрушения на базах $10^0 - 10^7$ циклов и на временах кратковременного и длительного статического ($10^0 - 10^5$ час.) нагружения. В соответствии с уравнениями (1) - (11) на базе соответствующих исследований должна быть получена прямая экспериментальная информация как о средних значениях параметров диаграмм циклического и термоциклического разрушения, так и об их вариации. При этом с учетом выражения (11) в первом приближении можно ограничиться корреляционными связями этих параметров с базовыми характеристиками механических свойств на больших временных базах и решениями краевых задач линейной и нелинейной механики разрушения для коэффициентов интенсивности напряжений (K_I) и деформаций (K_{Ie})

$$\left\{ \frac{dl}{dN}, \frac{dl}{d\tau} \right\} = F_l \{ [e_c^\tau, \sigma_b^\tau, \sigma_b, e_c, \sigma_{-1}] (\Delta K_I, \Delta K_{Ie}) \}. \quad (25)$$

На фоне статических и циклических термомеханических процессов длительного циклического деформирования и разрушения протекают сложные структурные превращения в металлах и изменения микромеханизмов накопления повреждений d и разрушения по выражениям (9) – (11), что порождает изменение форм кривых деформирования по уравнениям (17), кривых усталости по (19) – (21) и диаграмм разрушения по (25).

На основе рассмотренных выше обобщенных методов экспериментальной механики и механики деформирования и разрушения устанавливается система запасов в соответствии с выражением (4), и на этой базе дается заключение о прочности, ресурсе, живучести и безопасности эксплуатируемых в соответствующих условиях машин и конструкций.

6. Перспективные задачи анализа напряженно-деформированных и предельных состояний

Для экстремально нагруженных объектов ракетно-космической, атомной, термоядерной, авиационной техники в штатных и аварийных ситуациях принципиальное значение приобретают проблемы термосвязных задач [1-6]. В них для процессов статического, циклического и динамического упругопластического деформирования, накопления повреждений и разрушения, описываемых системой выражений (1) – (25), необходимо введение в анализ временных зависимостей максимальных локальных температур $t_{\max,e}^3(\tau)$ от локальных деформаций $e_{\max,t}^3(\tau)$, с последующим совместным решением прямых и обратных термодинамических задач с переменными источниками термовыделения за счет пластических деформаций в зонах экстремальной нагруженности.

Внутреннее тепловыделение $t_{\max,e}^3(\tau)$ в сочетании с внешним тепловым воздействием $t^3(\tau)$ изменяет сопротивление упругопластическим деформациям и повышает деформации $e_{\max,t}^3(\tau)$ и суммарные эксплуатационные деформации $e_{\max}^3(\tau)$. Это в свою очередь увеличивает температуры $t_{\max,e}^3(\tau)$.

$$e_{\max,t}^3(\tau) = F_e \{ e_{\max,t}^3(t^3(\tau)), t_{\max}^3(\tau), t_{\max,e}^3(\tau) \}. \quad (26)$$

Расчеты и эксперименты при высокочастотном (с частотами до 70 Гц) динамическом нагружении (при внешних изотермических условиях) на гладких образцах и образцах с трещинами показывали увеличение температур $t_{\max,e}^3(\tau)$ до $200 \div 1200^\circ\text{C}$ и приводили к плавлению металла в вершине трещины.

В определенных средах с обогащенным содержанием кислорода и водорода становится возможным достижение двух принципиально новых предельных состояний [2, 3, 6-8]:

- полная потеря несущей способности из-за экстремально высоких температур $t_{\max,e}^3(\tau)$ и $t_{\max}^3(\tau)$;
- возгорание конструкционного материала.

7. Заключение

В связи с изложенным выше в число новых фундаментальных и прикладных расчетно-экспериментальных исследований войдет исследование напряженно-деформированных и предельных состояний с учетом штатных, аварийных и катастрофических условий эксплуатации потенциально опасных объектов новой техники.

Такой анализ, выполняемый совместно ИМАШ РАН, МГУ, МИФИ, «Фидесис» с применением универсальных алгоритмов и программ, компьютерной, голографической, термовизионной, акусто-эмиссионной техники, будет включать сложные кинетические зависимости типа (1) – (26) линейной и нелинейной механики деформирования, повреждения и разрушения в термодинамической постановке. При этом значительную роль будут играть [1-13, 16, 17] численные (прямые и обратные) решения огромного числа неклассических задач с постановкой специальных контрольных и тестовых экспериментов в лабораториях, на стендах и в натурных условиях.

СПИСОК ЦИТИРОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Безопасность России Правовые, социально-экономические и научно технические аспекты. Фундаментальные и прикладные проблемы комплексной безопасности / Научный руководитель чл.-корр. РАН Н.А.Махутов. М.: МГОФ «Знание», 2017. - 992 с.
2. Махутов Н.А. Прочность и безопасность: фундаментальные и прикладные исследования. - Новосибирск: Наука. 2008. - 528 с.
3. Махутов Н. А. Конструкционная прочность, ресурс и техногенная безопасность. В двух частях. Новосибирск: Наука, 2005. Часть 1: Критерии прочности и ресурса. – 494 с. Часть 2: Обоснование ресурса и безопасности. – 610 с.
4. Проблемы прочности и безопасности водо-водяных энергетических реакторов. / Махутов Н.А., Фролов К.В., Драгунов Ю.Г. и др. М.: Наука. 2008. – 446 с. - (Исследования напряжений и прочности ядерных реакторов).
5. Несущая способность парогенераторов водо-водяных энергетических реакторов / Махутов Н.А., Драгунов Ю.Г., Фролов К.В. и др. М.: Наука, 2003, 440 с. – (Серия «Исследования напряжений и прочности ядерных реакторов»)
6. Прочность и ресурс ЖРД / Махутов Н.А., Рачук В.С., Гаденин М.М. и др. М.: Наука, 2011. – 525 с. (Исследования напряжений и прочности ракетных двигателей)

7. Напряженно-деформированные состояния ЖРД / Махутов Н.А., Рачук В.С., Гаденин М.М. и др. М.: Наука, 2013. 646 с. (Исследования напряжений и прочности ракетных двигателей)
8. Локальные критерии прочности, ресурса и живучести авиационных конструкций / Н.А.Махутов, М.М.Гаденин, В.В.Москвичев и др. - Новосибирск: Наука, 2017. 600 с. (Исследования прочности, ресурса и безопасности летательных аппаратов)
9. Махутов Н.А. Безопасность и риски: системные исследования и разработки. Новосибирск: Наука. 2017. – 724 с.
10. Е.М.Морозов, В.А.Левин, А.В.Вершинин. Прочностной анализ. Фидесис в руках Инженера.М. ЛЕНАНД. 2015. – 408 с.
11. Левин В. А. Многократное наложение больших деформаций в упругих и вязкоупругих телах. М.: Наука. Физматлит, 1999. - 223 с.
12. Гаденин М.М. Оценка влияния режимов нагружения на условия достижения предельных состояний и назначение запасов // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2013, т. 79, № 10. С. 65-70.
13. Уравнения состояния при малоцикловом нагружении / Махутов Н.А., Гаденин М.М., Гохфельд Д.А. и др. Москва, Наука, 1981, 245 с.
14. Махутов Н.А., Гаденин М.М. Техногенная безопасность: Диагностика и мониторинг состояния потенциально опасного оборудования и рисков его эксплуатации / Федеральный справочник: Информационно-аналитическое издание. Т.26. М.: НП «Центр стратегического партнерства», 2012. – С. 307-314.
15. Гаденин М.М. Структура многоуровневого мониторинга параметров безопасности техносферы и окружающей среды // Проблемы безопасности и чрезвычайных ситуаций. 2012, № 1. С. 93-102.
16. Гаденин М.М. Особенности развития деформаций и накопления повреждений при двухчастотном малоцикловом нагружении и повышенных температурах // Машиноведение. 1976, № 1, с. 69-77
17. 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.

REFERENCES

1. 2017, *Bezopasnost' Rossii. Pravovye, socialno-ekonomicheskie i nauchno-tekhnicheskie aspekty. Fundamentalnye i prikladnye problem kompleksnoii*

- bezopasnosti* [Safety of Russia. Legal, social and economic and scientifically engineering aspects. Fundamental and application problems of integrated safety], MGOF "Znanie", Moscow, 992 p.
2. Makhutov N.A. 2008, *Prochnost' i bezopasnost': fundamentalnye i prikladnye issledovaniya*. [Strength and safety: fundamental and applied researches], Nauka, Novosibirsk, 528 p.
 3. Makhutov N.A. 2005, *Konstruksionnaya prochnost', resurs i tekhnogennaya bezopasnost', Chast' 1 "Kriterii prochnosti i resursa". Chast' 2 "Obosnovanie resursa i bezopasnosti"* [Structural strength, resource and technogenic safety. Part 1: Criteria of strength and resource. Part 2: Justification of resource and safety.], Nauka, Novosibirsk, 494 p., 610 p.
 4. Makhutov N.A., Frolov K.V., Dragunov Yu.G. 2008, *Problemy prochnosti i besopasnosti vodo-vodyanykh energeticheskikh reaktorov* [Problems of strength and safety of water-moderated power reactors], Nauka, Moscow, 446 p.
 5. Makhutov N.A., Dragunov Yu.G., Frolov K.V., 2003, *Nesushaya sposobnost' parogeneratorov vodo-vodyanykh energeticheskikh reaktorov* [Steam plants carrying capacity of water-moderated power reactors], Nauka, Moscow, 440 p.
 6. Makhutov N.A., Rachuk V.S., Gadenin M.M., 2011, *Prochnost' i resurs ZhRD* [Strength and resource of liquid-fuel rocket engines], Nauka, Moscow, 525 p.
 7. Makhutov N.A., Rachuk V.S., Gadenin M.M., 2013, *Napryazhenno-deformirovannye sostoyania ZhRD* [Stress-strain states of liquid-fuel rocket engines], Nauka, Moscow, 646 p.
 8. Makhutov N.A., Gadenin M.M., Moskvichov V.V., 2017, *Lokalnye kriterii prochnosti, resursa i zhivuchesti aviatsionnykh konstruksii* [Local criteria of strength, resource and survivability of aviation structures], Nauka, Novosibirsk, 600 p.
 9. Makhutov N.A., 2017, *Bezopasnost' i riski: sistemnye issledovaniya i razrabotki* [Safety and risks: system researches and developments], Nauka, Novosibirsk, 724 p.
 10. Morozov E.M., Levin V.A., Vershinin A.V., 2015, *Prochnostnoi analiz. Fidesis v rukakh Inzhenera* [Strength analysis. FIDESIS in the arms of the Engineer], LENAND, Moscow, 408 p.
 11. Levin V.A., 1999, *Mnogokratnoe nalozhenie bolshikh deformatsii v uprugikh i vyazkouprugikh telakh* [Multiple superposition of large deformations in elastic and elastico-viscous solids], Nauka. Fizmatlit, Moscow, 223 p.

12. Gadenin M.M., 2013, "Estimation of effect of loading regimes on conditions of limiting states reaching and assignment of margins", *Zavodskaya laboratoriya, Diagnostika materialov*, vol, 79, no. 10, pp. 65-70
13. Makhutov N.A., Gadenin M.M., Gokhfeld D.A., 1981, *Uravneniya sostoyaniya pri malotsiklovom nagruzhenii [State equations at a low cycle loading]*, Nauka, Moscow, 245 p.
14. Makhutov N.A., Gadenin M.M., 2012, "Technogenic safety: Diagnostics and monitoring of potentially dangerous equipment state and risks of its service", *Federalnyy spravochnik*, vol. 26, pp. 307-314
15. Gadenin M.M., 2012, "Structure of multilevel monitoring of technosphere safety and environment parameters", *Problemy bezopasnosti i chrezvychaynykh situatsii*, no. 1, pp. 93-102
16. Gadenin M.M., 1976, "Peculiarities of strains evolution and damages accumulation of at two-frequency low cycle loading and heightened temperatures", *Mashinovedenie*, no. 1, pp. 69-77
17. Gadenin M.M., 2017, "Research of damageability and life-time at one- and two-frequency loading regimes on the basis of deformation and energy approaches", *Zavodskaya laboratoriya, Diagnostika materialov*, vol, 83, no. 6, pp. 44-52

Получено 22.05.2017

принято в печать 14.09.2017