

Методические особенности анализа накопления повреждений и достижения предельных состояний объектов при комбинированных многопараметрических воздействиях силовых факторов и среды

Н.А. Махутов, главный научный сотрудник, чл.-кор. РАН, д-р техн. наук¹

Р.С. Ахметханов, заведующий лабораторией, д-р техн. наук¹

А.В. Богданович, доцент, д-р техн. наук²

В.В. Зацаринный, ведущий научный сотрудник, канд. техн. наук¹

Д.О. Резников, ведущий научный сотрудник, канд. техн. наук¹

Л.А. Сосновский, профессор, д-р техн. наук³

С.С. Щербаков, доцент, канд. физ.-мат. наук²

О.Н. Юдина, научный сотрудник¹

¹Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт машиноведения им. А.А. Благонравова (ИМАШ РАН)».

²Белорусский государственный университет

³Белорусский государственный университет транспорта

e-mail: v.zatsar@mail.ru, mibsts@mail.ru

Ключевые слова:

предельное состояние, накопление повреждений, многопараметрическое нагружение, уязвимость, разрушение.

В статье предлагается новый методический подход, связанный с комплексным анализом достижения повреждений и предельных состояний материалов и элементов конструкций в условиях многопараметрических воздействий на них различного рода нагрузок и среды с учетом изменения напряженно-деформированного состояния, свойств материала и кинетики повреждаемости деталей, а также фактора времени. Накопление повреждений предлагается рассматривать как многоуровневый анализ, объединяющий группу микро-, мезо- и макромасштабов, и анализировать его в вероятностной постановке. При оценке степени поврежденности предлагается использовать метод вариации эффективного модуля упругости и метод, основанный на анализе изменения матрицы жесткости при модельных исследованиях. Рассматриваются вероятностные матричные методы описания сценариев достижения предельных состояний, которые предусматривают построение матрицы макроуязвимости, матрицы мезоуязвимости и вектора угроз.

1. Постановка проблемы

В процессе функционирования объектов техноферы их несущие конструкции, детали подвергаются непрерывным повреждающим и разрушающим воздействиям с постоянным ухудшением их технического состояния. Это обусловлено воздействием технологических и внешних эксплуатационных нагрузок и ряда факторов окружающей среды, которые носят случайный характер [1, 3]. Данные воздействия и факторы ведут к

возникновению и накоплению в элементах конструкции, деталях машин и оборудования различных видов повреждений $d(t)$ (износ, усталость, физическое старение, появление и рост трещин и др.). Достигнув критического уровня, накопленные в результате процесса эксплуатации повреждения приводят к нарушению работоспособного состояния оборудования, выработке и исчерпанию ресурса и, как следствие, к чрезвычайным ситуациям (отказам, авариям и катастрофам).

Расчет характеристик поврежденности и надежности конструктивных элементов и узлов сложных технических систем (СТС) в настоящее время, как правило, основан на статических и детерминированных моделях, которые не учитывают изменение напряженно-деформированного состояния и свойств материала и кинетику повреждаемости деталей во времени τ . Большинство процессов накопления повреждений $d(\tau)$ происходит в течение длительных промежутков времени при многопараметрических воздействиях.

Введение фактора времени τ в анализ поврежденности $d(\tau)$ конструкций возможно на основе кинетических представлений о процессе накопления в материале детали необратимых повреждений механического, физического и химического происхождения с учетом сценариев многофакторных статических, циклических и динамических воздействий рабочих процессов и окружающей среды. Решение данной задачи предполагает разработку методов анализа, расчета и прогноза предельных состояний отдельных ответственных деталей, машины и объекта в целом, а также разработку квалиметрии повреждений — методов численной оценки степени повреждения деталей, различных по своей природе и характеру [4].

При исследовании прочности, ресурса и надежности, основанной на расчете предельных состояний отдельных деталей и элементов конструкций и машин, используются классические и современные критерии прочности и уравнения накопления повреждений. С позиций теории прочности обычно рассматривают следующие базовые типы предельных состояний технических объектов:

- разрушение (вязкое и хрупкое);
- пластическое деформирование по всему сечению элемента;
- потеря устойчивости;
- возникновение недопустимых формоизменений;
- появление макротрещин при циклическом нагружении;
- разгерметизация (не связанная с макроразрушениями);
- износ, эрозия, фреттинг;
- коррозия.

2. Комплексный анализ истории нагружения и напряженно-деформированных состояний

Совместное рассмотрение режимов нагружения и местных напряженно-деформированных состояний позволяет подойти к анализу истории местной нагруженности и выявлению амплитуд местных напряжений $\sigma(\tau)$ и деформаций $e(\tau)$. Особенности длительного статического (по времени τ) циклического (по числу циклов N) деформирования и кинетические процессы в локальных зонах повышенных

местных напряжений σ_{\max} и деформаций e_{\max} как правило, отличаются от общих закономерностей циклической нагруженности объектов. Особое внимание здесь следует уделять анализу сочетания нагрузок $F(\tau)$, способных приводить к высоким местным напряжениям $\sigma_{\max}(\tau, N)$ и к деформациям $e_{\max}(\tau, N)$.

Анализ особенностей статических и длительных статических и циклических процессов и закономерностей эксплуатационной и местной нагруженности дает возможность оценить механизмы накопления повреждений $d(\tau, N)$ и виды предельных состояний по уровню повреждаемости $d_c(\tau, N)$. Большинство оборудования опасных промышленных объектов работает при переменных нагрузках $F(\tau)$ и температурных t воздействиях. Поэтому наиболее вероятными механизмами накопления эксплуатационных повреждений $d(\tau, N)$ будут статическая, повторно-статическая, малоцикловая и многоцикловая усталость [1, 3]. Определение допустимых (расчетных) значений нагрузок $[F(\tau, N)]$, напряжений $[\sigma(\tau, N)]$, деформаций $[e(\tau, N)]$, чисел циклов $[N]$ и времени $[\tau]$ нагружения основывается на использовании силовых, энергетических или деформационных критериев разрушения.

Выбор критерия предельного состояния позволяет подойти к расчету ресурса конструкции для различных стадий ее повреждения и разрушения. В общем случае при эксплуатации на технические системы во времени τ действуют три основных типа нагрузок $F(\tau) = F$:

- механические F_m (от давления, массы, сил инерции, контактного взаимодействия и т.д.);
- тепловые F_t (от неравномерного распределения температур t и (или) неоднородности теплофизических свойств материалов);
- электромагнитные F_{em} (от воздействия электромагнитных полей).

Суммарные эксплуатационные нагрузки

$$F(\tau) = F = \{F_m, F_{em}, F_t\} \quad (1)$$

создают соответствующие напряжения $\sigma = \sigma(\tau)$ и деформации $e = e(\tau)$:

$$\{\sigma, e\} = \{(\sigma_m, e_m), (\sigma_{em}, e_{em}), (\sigma_t, e_t)\} = F(F(\tau)). \quad (2)$$

При этом определяющими для последующих расчетно-экспериментальных оценок прочности, ресурса, надежности и безопасности принимаются следующие характеристики истории нагружения:

- максимальная расчетная нагрузка F_{\max} ;
- максимальная (или минимальная) расчетная температура t_{\max} (t_{\min});
- время заданного режима нагружения τ , и общее время всех режимов и блоков режимов τ_{Σ} (временной ресурс).

По этой истории устанавливаются дополнительные расчетные параметры:

- размахи усилий ΔF и амплитуды усилий $F_a = \frac{\Delta F}{2}$;
- размахи температур Δt ;
- размахи усилий ΔF_B вибрационного (двух- или многочастотного) нагружения.

Из анализа всех i -режимов устанавливаются наиболее неблагоприятные сочетания F и t , $F_{\max} - t_{\max}$ для повышенных и высоких температур, а также $F_{\max} - t_{\min}$ для низких и криогенных температур. Число таких сочетаний определяется с учетом числа и геометрических форм рассчитываемых деталей или элементов и числа опасных зон и сечений в них.

Комплекс базовых параметров, определяющих предельное состояние элементов технической системы, можно представить в виде функциональной зависимости

$$\Phi_{N,t,\tau} \{ \{ \sigma, e \}, N, t, \tau \} = \Phi_c \quad (3)$$

левая часть которой характеризуется совокупностью параметров (силовых, деформационных и др.) состояния технической системы, отражающих реакцию технической системы на внешние (в том числе аварийные воздействия), а правая — комплекс аналогичных, но критериальных характеристик материалов (элемента конструкции). Значение $\Phi_{N,t,\tau}$ в критериальных соотношениях устанавливаются расчетом, а критериальные характеристики материала Φ_c определяют из эксперимента на образцах, моделях или натуральных элементах конструкций.

С учетом сказанного суммарные динамические нагрузки $F(\tau, N)$ создают соответствующие напряженно-деформированные состояния $\{ \sigma, e \}$, которые определяют накопление эксплуатационных повреждений $d(\tau, N)$ по времени τ и числу циклов нагружения N при заданной температуре t . Накопленные повреждения являются функционалом напряжений, деформаций, времени, числа циклов и температур

$$d(\tau, N) = \Phi \left[\{ \sigma, e \}, \{ \tau, N \}_t \right]. \quad (4)$$

Характер нагружения технических систем — последовательность приложения нагрузок с различным уровнем возникающих напряжений в элементах, перегрузки, нестационарный характер нагружения — влияют на напряженно-деформированные состояния « σ - e » и на величину накопленных повреждений $d(\tau, N)$. При этом нужно учитывать, что при использовании различных методов полученные оценки могут быть консервативными или неконсервативными в зависимости от используемых законов суммирования повреждений, которые влияют на точность оцен-

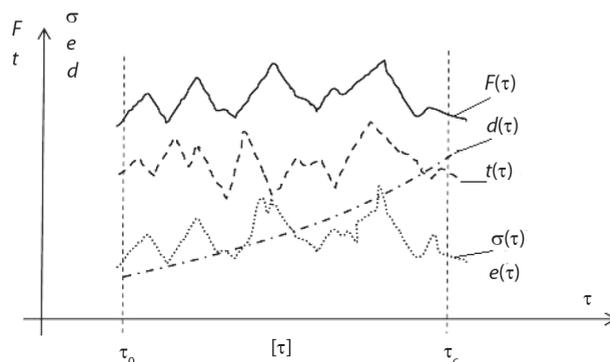


Рис. 1. Временные процессы эксплуатационного нагружения и накопления повреждений

ки уровня поврежденности элементов конструкции и, как следствие, на оценку вероятности и риска отказа, аварии или катастрофы (рис. 1).

В механике повреждений под поврежденностью понимается сокращение упругого отклика тела вследствие сокращения эффективной площади, передающей внутренние усилия от одной части элемента конструкции к другой части, обусловленного появлением и развитием рассеянного поля микродефектов (микротрещины, дислокации, микропоры, поверхностные микротрещины) [5]. В механике повреждений $d = d(\tau, N)$ распространен геометрический подход, который естественно возникает при попытке обобщения первых классических представлений о поврежденности, восходящих к Ф. Одквисту, Л.М. Качанову и Ю.Н. Работнову. Одно из главных преимуществ этого подхода — возможность достаточно просто и естественно представить эффект возрастания истинных напряжений в деформируемой среде с повреждениями. Тогда при оценке поврежденности элементов конструкции можно использовать концепцию эффективных напряжений $\sigma = \sigma(\tau, N) = \sigma^s(\tau)$ или эффективного модуля упругости $E(\tau) = E^s(\tau)$.

3. Механика поврежденных состояний

В простейшем случае напряжение σ без учета повреждений d от действия продольных сил F определяется следующим выражением

$$\sigma = F \cdot A^{-1}. \quad (5)$$

где A — площадь сечения.

Используя данное выражение, запишем соотношение для эффективного напряжения

$$\sigma^s = F \cdot (A - A_d)^{-1} = \sigma \cdot (1 - d)^{-1}, \quad (6)$$

где A_d — площадь всех микротрещин (микродефектов), которые лежат в расчетном опасном сечении A .

Тогда величина повреждений d определяется следующим образом

$$d = A_d \cdot A^{-1}. \quad (7)$$

Величина повреждения d лежит в диапазоне $0 \leq d \leq 1$, где значение 0 соответствует неповрежденному материалу, 1 — полностью разрушенному материалу ($A = A_d$). Благодаря развитию технологий дефектоскопического контроля, существует множество способов охарактеризовать деградацию материала и величины A_d и A экспериментально. Метод вариации модуля упругости наиболее предпочтителен, поскольку это простой принцип и определяется с большой точностью. Эффективное напряжение в случае одноосного растяжения определяется выражением:

$$\sigma^s = \sigma \cdot (1-d)^{-1} = E_d^s e, \quad (8)$$

где: E_d — модуль условной продольной упругости (модуль Юнга) поврежденного материала; e — относительная деформация [1].

Диаграммы деформирования поврежденного и неповрежденного материала показаны на рис. 2.

Оценить повреждения d позволяет метод, основанный на анализе изменений матрицы жесткости K , используемой при модельных исследованиях. Тогда проблема собственных частот в случае отсутствия повреждений и демпфирования определяется из следующего выражения

$$(\lambda_i [M] + [K^s]) \{\varphi_i\} = 0, \quad (9)$$

где λ_i — квадрат i -й собственной частоты; φ_i — нормализованная собственная форма колебаний сведением матрицы инерции M к единичной. Учитывая изменения в матрицах жесткости и инерции при накоплении повреждений d , проблема собственных частот и

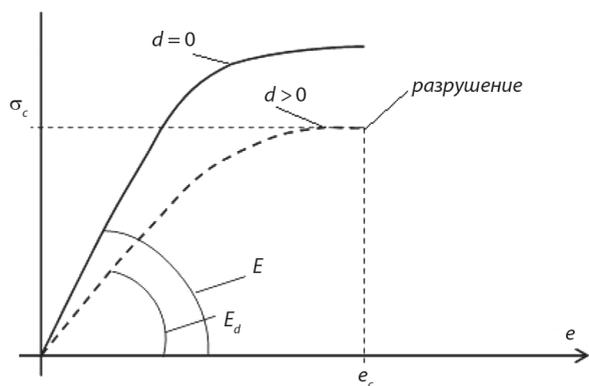


Рис. 2. Диаграммы деформирования для оценки состояния неповрежденного ($d = 0$) и поврежденного материала

форм колебаний будет определяться из следующего выражения

$$(\lambda_{id} [M - \Delta M_d] + [K - \Delta K_d]) \{\varphi_{id}\} = 0. \quad (10)$$

Учитывая (10), можно получить следующее выражение для вектора повреждений

$$\begin{aligned} \{d\}_i &= (\lambda_{id} [M] + [K]) \{\varphi_{id}\} = \\ &= (\lambda_{id} [\Delta M_d] + [\Delta K_d]) \{\varphi_{id}\}. \end{aligned} \quad (11)$$

Если принять, что повреждения не меняют матрицу инерции, то получим следующее выражение для вектора повреждений

$$\{d\}_i = [\Delta K_d] \{\varphi_{id}\}. \quad (12)$$

Представленные выражения (6)–(12) являются теоретической базой для составления номенклатур и временных зависимостей оценки текущих состояний несущего элемента с учетом накопления повреждений d [6]. В данную методологию оценки технических состояний поврежденных $d = d(\tau, N)$ конструкций входят:

- уровень микро- и макродефектности;
- параметры напряженно-деформированных состояний;
- частоты и формы собственных колебаний;
- частоты и амплитуды вынужденных колебаний.

На основе изменения во времени τ этих характеристик строятся методы тензометрии, виброметрии и комплексной диагностики технических систем.

4. Достижение предельных состояний на мезомасштабном уровне

В соответствии с (1)–(12) накопление повреждений и разрушение при $d_c = d(\tau_c, N_c)$ объекта, рассматриваемого как сложная техническая система, представляет собой иерархически организованный процесс, который развивается по всей иерархии масштабов, начиная от наномасштабов, соизмеримых с межатомными расстояниями, вплоть до макроскопического масштаба, определяемого характерным размером исследуемого объекта. В настоящее время ключевое место занимает многоуровневый анализ, объединяющий группу микро-, мезо- и макромасштабов, отражающих наиболее значимые структурные элементы, ответственные за доминирующие механизмы реализации деградационных процессов в материалах [7]. На основании моделей и подходов, разработанных в рамках физической механики, было показано, что для обеспечения адекватных качественных результатов моделирования процессов накопления повреждений и разрушения, а в ряде случаев и получения

достаточно точных количественных оценок, явный одновременный учет всего множества масштабов избыточен и для описания указанных процессов вполне достаточно трех масштабных уровней [2, 7]:

- макроуровня, описывающего конструктивные элементы и условия их сопряжения с учетом макротрещин;
- мезоуровня, на котором вводятся в рассмотрение наиболее значимые структурные элементы материала. Снизу мезоуровень задается минимальным объемом структурно-неоднородного материала, который можно наделить осредненными свойствами макрообъема. Для тела с трещиной мезоуровень определяется зернистостью материала в окрестности трещины;
- микроуровня, который интегрально учитывает более мелкие масштабы. Для структурно неоднородных материалов микроуровень характеризуется размерами микрообъема (для поликристаллов — размерами зерна). В частности для тел с трещинами на микроуровне описываются конкретное строение и дефектность атомной решетки в окрестности микротрещины.

В более простой постановке при современных методах технической диагностики (металлография, дефектоскопия, дефектометрия) можно ограничиться рассмотрением процессов разрушения на двух масштабных уровнях (макро- и мезомасштабных явлений), при этом процессы, протекающие на микроуровне, учитываются через механические характеристики конструкционных материалов. Кроме того, необходимо отметить, что ввиду высокой неопределенности относительно интенсивности режимов эксплуатационного нагружения и структуры и механических свойств конструкционных материалов, а также геометрических параметров конструктивных

элементов рассматриваемого объекта процесс накопления повреждений и разрушения должен анализироваться в вероятностной постановке [7, 8, 9].

Структурные элементы технических объектов в процессе эксплуатации подвергаются комбинированным воздействиям повреждающих факторов φ_k , указанных в п. 1–3: силовых по (1)–(2), температурных, радиационных, химических воздействий агрессивных сред, которые по (1)–(3) составляют режимы нагружения $H_i (i = 1, 2, \dots, n)$. Вследствие их действия в наиболее нагруженных зонах могут быть реализованы различные механизмы формирования напряженно-деформированных состояний по (2) и достижения предельных состояний по (3) на мезоуровне $МП_j (j = 1, 2, \dots, m)$ при переходе из начальных (НС) в конечные (КС) состояния. Эти предельные состояния в подпространстве состояний элементов $\psi^k (\psi^k \subset \Psi^l, \text{рис. 3})$ образуют поверхность предельных состояний на мезомасштабе [7, 9]. В зависимости от свойств конструкционных материалов, размеров конструктивных элементов и характера режима нагружения катастрофический отклик с ущербом U системы на комбинированные воздействия силовых факторов и среды может иметь характер хрупкого, квазихрупкого и вязкого разрушения.

По времени t , температурам t , числу циклов N и размеру дефектов l могут рассматриваться различные механизмы достижения предельных состояний (рис. 4).

Механизмы разрушения при перегрузках (механизмы типа 1) в начальной стадии деформации ($\tau = \tau_0 = 0$) обусловлены экстремальными воздействиями, которые способны вызывать разрушение при малой исходной степени поврежденности материала. При рассмотрении механизмов достижения предельных состояний, обусловленных перегрузками, исходят из того, что в максимально нагруженном объеме достигается предельное состояние

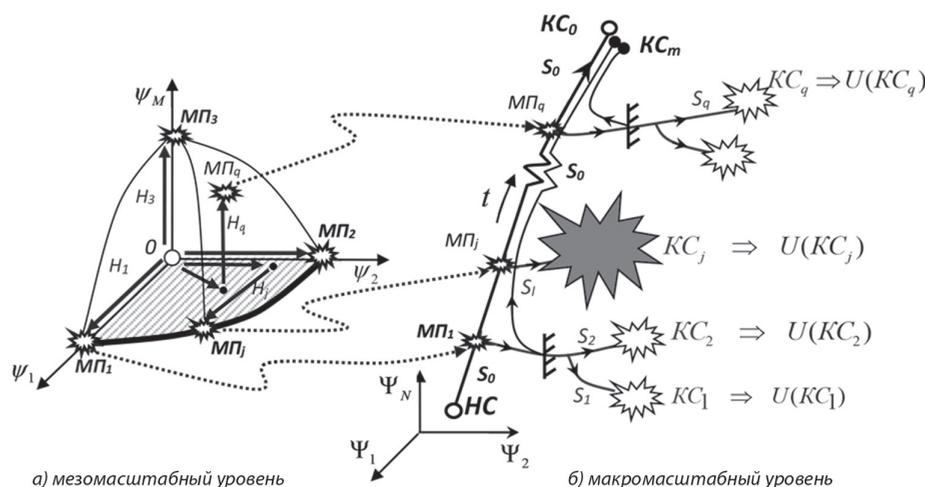


Рис. 3. Дерево сценариев, иллюстрирующее процесс разрушения системы на макроуровне

($\sigma_{\max} = \sigma_c, e_{\max} = e_c$) в момент, когда нагрузка F окажется выше предельной несущей способности $F_c: F \geq F_c$. В такой постановке считается, что нагрузки, интенсивность которых ниже предельного уровня $F < F_c$, не оказывают необратимого влияния на систему (ее несущую способность). В этом случае разрушение трактуется как первый предельный выброс из области защищенных (допускаемых) состояний, а история эксплуатационного нагружения при $\tau < \tau_0$ при этом не учитывается.

Кумулятивные деградационные механизмы разрушения (усталость, износ, ползучесть, коррозия, эрозия) обусловлены непостоянством F и постепенным накоплением повреждений $d(\tau, N)$ материала в мезо-макрообъеме. В процессе эксплуатации системы происходит снижение предельной несущей способности F_c и достижение предельных состояний на мезо-макроуровне (механизмы типа 2), при которых разрушение наступает при проектных (ординарных) воздействиях на систему при $N = N_c$ ($\tau = \tau_c$ или $l = l_c$). В этом случае допускаемый циклический ресурс будет $[N]$. Накопление повреждений $d(\tau, N)$ по (4) и (7) может ускорить переход к предельному состоянию по линии 3 на рис. 4. При эксплуатации объектов на форсированных режимах с экстремальными перегрузками F_ϕ и деформациями $[e_\phi]$ возможна реализация сценария по линии 4.

Разрушение системы в процессе эксплуатации может происходить с форсированием нагружения, а также может сочетаться со снижением несущей способности вследствие накопления повреждений d_ϕ .

Комбинированные механизмы разрушения реализуются при сложных режимах нагружения — сочетании последовательных и/или параллельных нагружений (рис. 5).

В таких случаях траектория достижения поверхности предельных состояний в трехмерном пространстве « $e - N - t$ » может быть представлена в виде

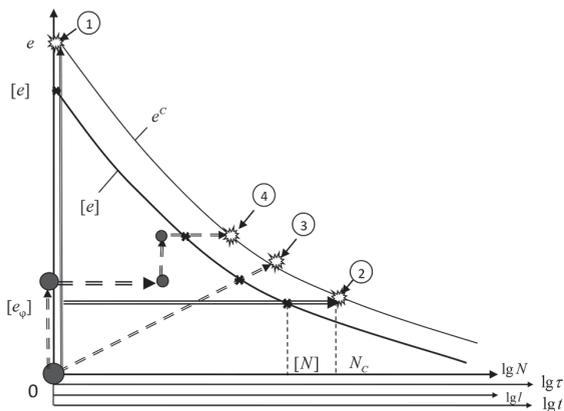


Рис. 4. Механизмы достижения предельных и допустимых состояний по деформационным критериям при однократном воздействии и N циклах нагружения

ломаной линии, состоящей из участков, соответствующих различным механизмам накопления повреждений $d(\tau, N)$ (воздействие нагрузок F , температур t и агрессивных сред). Эти повреждения в общем случае нелинейных процессов определяются локальными деформациями $e(\tau, N)$. Часть этих участков реализуется естественным образом в процессе эксплуатации системы, а другая часть обусловлена внешними экстремальными воздействиями, причем отдельные нагрузки подобного комбинированного режима нагружения проектные, а другие — запроектные (не учитываются при проведении традиционных расчетов несущей способности, прочности, ресурса и безопасности, и приводят к запроектным авариям СТС).

Достижение предельного состояния в разномасштабных объемах не означает обязательного и мгновенного разрушения (отказа) системы на макроуровне (см. рис. 3). Ввиду наличия альтернативных путей передачи нагрузки, нагрузка, которая воспринималась разрушенным микро- и мезообъемом, может быть перераспределена на оставшиеся мезообъемы и локальные макрообъемы, что в свою очередь может инициировать последовательность их разрушений и переход к магистральному макроразрушению. При этом достижение предельного состояния $МП_j$ мезообъема будет инициирующим событием, при котором происходит отклонение траектории системы от заданного сценария успеха S_0 , и «запуск» сценария отказа S_p , приводящего систему в поврежденное состояние KC_l ($l = 0, 1, 2, \dots, q$) с ущербом U и изменением параметров повреждаемости $d(\tau, N)$, сопротивления квазиупругому деформированию $E^3(\tau, N)$ и вибродинамики по (1)–(12).

В такой постановке сложное вероятностное событие $\langle KC_l \rangle$ «достижение системой поврежденного конечного состояния KC_l » можно рассматривать как

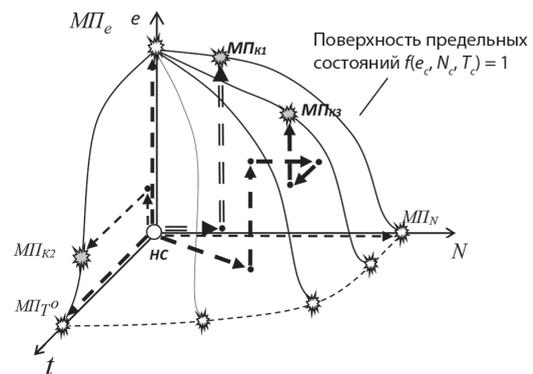


Рис. 5. Механизмы достижения предельных состояний (случай трехфакторного нагружения): НС — исходное состояние, $МП_N, МП_T, МП_e$ — предельные состояния при однофакторном однократном статическом, циклическом и температурном нагружении, $МП_{k1}, МП_{k2}, МП_{k3}$ — предельные состояния при комплексных (многофакторных) режимах нагружения

последовательность связанных между собой вероятностных событий:

- $\langle H_i \rangle$ — реализация режима многофакторного нагружения H_i ;
- $\langle MP_j | H_i \rangle$ — достижение мезообъемом локального предельного состояния MP_j при условии реализации режима многофакторного нагружения H_i ;
- $\langle KC_l | MP_j, H_i \rangle$ — достижение системой конечного состояния KC_l при условии достижения локального повреждения мезообъема MP_j и реализации режима нагружения H_i .

Тогда при проведении сценарного анализа могут использоваться матричные уравнения вида:

$$\begin{Bmatrix} P(KC_0) \\ P(KC_1) \\ \dots \\ P(KC_q) \end{Bmatrix} = \underbrace{\begin{bmatrix} P(KC_0 | MP_1) & P(KC_0 | MP_2) & \dots & P(KC_0 | MP_m) \\ P(KC_1 | MP_1) & P(KC_1 | MP_2) & \dots & P(KC_1 | MP_m) \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ P(KC_q | MP_1) & P(KC_q | MP_2) & \dots & P(KC_q | MP_m) \end{bmatrix}}_{[V_s]} \times \left(\underbrace{\begin{matrix} \{MP\} \\ \begin{bmatrix} P[MP_1 | H_1] & P[MP_1 | H_2] & \dots & P[MP_1 | H_n] \\ P[MP_2 | H_1] & P[MP_2 | H_2] & \dots & P[MP_2 | H_n] \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ P[MP_m | H_1] & P[MP_m | H_2] & \dots & P[MP_m | H_n] \end{bmatrix} \\ \{H\} \end{matrix} \right) \times \begin{Bmatrix} P(H_1) \\ P(H_2) \\ \dots \\ P(H_n) \end{Bmatrix} \quad (13)$$

где: $\{V_s\}$ — матрица макроуязвимости, компонентами которой являются условные вероятности достижения системой различных конечных состояний KC_l в случае достижения предельных состояний на мезоуровне MP_j ; $P[KC_l | MP_j]$; $\{V_e\}$ — матрица мезоуязвимости, компонентами которой являются условные вероятности достижения предельных состояний на мезоуровне MP_j при различных режимах нагру-

жения H_i ; $P(MP_j | H_i)$; $\{H\}$ — вектор угроз, компонентами которого являются вероятности осуществления различных режимов нагружения системы $P(H_i)$ (экстремальные однократные воздействия, циклические нагрузки, температурные воздействия, воздействия агрессивных сред и т.д.).

Матрица мезоуязвимости будет описывать сценарии развития процессов повреждения и разрушения на мезоуровне, а матрица макроуязвимости будет представлять собой свертку сценариев развития разрушений на макроуровне с учетом указанных особенностей повреждений $d(\tau, N)$.

5. Заключение

По мере усложнения несущих конструкций опасных объектов, условий их эксплуатации и применения новых материалов и технологий следует учитывать сложные механизмы износа, механического, коррозионного, эрозийного, радиационного повреждения материалов в кинетической временной и циклической постановке. Накопление повреждений и разрушение технического объекта представляют собой иерархически организованный процесс, протекающий на различных масштабных уровнях. В простейшей постановке можно ограничиться рассмотрением мезомасштабного и макромасштабного уровней. Ввиду высокой неопределенности относительно интенсивности режимов нагружения и структуры и механических свойств конструктивных материалов, а также геометрических параметров конструктивных элементов рассматриваемого объекта процесс накопления повреждений и разрушения должен анализироваться в вероятностной постановке.

Работа выполнена при поддержке Российского и Белорусского фондов фундаментальных исследований (гранты №14-08-90003 Бел а (РФ) и №Т14Р-033)

ЛИТЕРАТУРА

1. Махутов Н.А. Прочность и безопасность. Фундаментальные и прикладные исследования. Новосибирск: Наука, 2008.
2. Безопасность России. Правовые, социально-экономические и научно-технические аспекты. М.: МГОФ «Знание», 1998–2015.
3. Девисилов В.А. Об уникальности российских техногенных катастроф // Безопасность в техносфере. 2009. № 5. С. 3–6.
4. Махутов Н.А. Критериальная база прочности, ресурса, надежности, живучести и безопасности машин и человеко-машинных комплексов // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2013. № 5. С. 25–36.
5. Сосновский Л.А. Механика износоустойчивого повреждения. Гомель: БелГУТ, 2007.
6. Махутов Н.А., Ахметханов Р.С., Дворецкая Т.Н., Юдина О.Н. Накопление повреждений при многофакторном нагружении и оценка вероятности возникновения аварии // Проблемы безопасности и чрезвычайных ситуаций. 2011. №5. С. 52–63.
7. Макаров П.В., Еремин М.О. Модель разрушения хрупких и квазихрупких материалов и геосред // Физическая мезомеханика. 2013. Т. 16, №1. С. 5–26.
8. Махутов Н.А., Резников Д.О., Зацаринный В.В. Два типа сценариев аварий в сложных технических системах // Проблемы безопасности и чрезвычайных ситуаций. 2014. № 2. С. 28–41.
9. Махутов Н.А., Резников Д.О. Использование сценарного анализа для оценки прочностной надежности сложных технических систем // Проблемы машиностроения и автоматизации. 2015. №1. С. 5–13.

REFERENCES

1. Makhutov N.A. *Prochnost' i bezopasnost'. Fundamental'nye i prikladnye issledovaniya* [Strength and safety. Basic and applied research]. Novosibirsk, Nauka Publ., 2008.
2. *Bezopasnost' Rossii. Pravovye, sotsial'no-ekonomicheskie i nauchno-tekhnicheskie aspekty* [The safety of Russia. Legal, socio-economic and scientific-technical aspects]. Moscow, MGOF «Znanie» Publ., 1998–2015.
3. Devisilov V.A. Ob unikal'nosti rossiyskikh tekhnogennykh katastrof [On the uniqueness of the Russian technogenic disasters]. *Bezopasnost' v tekhnosfere* [Safety in technosphere]. 2009, I. 5, pp. 3–6.
4. Makhutov N.A. Kriterial'naya baza prochnosti, resursa, nadezhnosti, zhivuchesti i bezopasnosti mashin i cheloveko-mashinnykh kompleksov [Criterion base of strength, resource, reliability, survivability and safety of machines and human-machine systems]. *Problemy mashinostroeniya i nadezhnosti mashin* [Journal of Machinery Manufacture and Reliability]. 2013, I. 5.
5. Sosnovskiy L.A. *Mekhanika iznosoustoychivogo povrezhdeniya* [Mechanics wear-resistant damage]. Gomel, BelGUT Publ., 2007.
6. Makhutov N.A., Akhmetkhanov R.S., Dvoretzkaya T.N., Yudina O.N. Nakoplenie povrezhdeniy pri mnogofaktor-
nom nagruzhении i otsenka veroyatnosti vozniknoveniya avarii [Accumulation of damage during multivariate loading and evaluation of the probability of an accident]. *Problemy bezopasnosti i chrezvychaynykh situatsiy* [Safety and emergencies problems]. 2011, I. 5, pp. 52–63.
7. Makarov P.V., Eremin M.O. Model' razrusheniya khrupkikh i kvazikhрупkikh materialov i geosred [Model fracture of brittle and quasi-brittle materials and geomedial]. *Fizicheskaya mezomekhanika* [Physical Mesomechanics]. 2013, V. 16, I. 1, pp. 5–26.
8. Makhutov N.A., Reznikov D.O., Zatsarinnyy V.V. Dva tipa stsensariy avariy v slozhnykh tekhnicheskikh sistemakh [Two types of accident scenarios in complex technical systems]. *Problemy bezopasnosti i chrezvychaynykh situatsiy* [Safety and emergencies problems]. 2014, I. 2, pp. 28–41.
9. Makhutov N.A., Reznikov D.O. Ispol'zovanie stsensarnogo analiza dlya otsenki prochnostnoy nadezhnosti slozhnykh tekhnicheskikh sistem [Use scenario analysis to evaluate the strength reliability of complex technical systems]. *Problemy mashinostroeniya i avtomatizatsii* [Engineering and Automation Problems]. 2015, I. 1, pp. 5–13.

Methodical Features Analysis of Damage Accumulation and Achievement of the Ultimate State of Objects Under Combined Impacts of Multiparameter Force Factors and Environment

N.A. Makhutov, Chief Researcher, Corresponding Member of RAS, Doctor in Engineering, Institute of Machine Science n.a. Blagonravov (Russian Academy of Sciences)

R.S. Ahmetkhanov, Laboratory Chief, Doctor in Engineering, Institute of Machine Science n.a. Blagonravov (Russian Academy of Sciences)

A.V. Bogdanovich, Associate Professor, Doctor in engineering, Belorussian State University

V.V. Zatsarinnyi, Leading Researcher, Ph.D. in Engineering, Institute of Machine Science n.a. Blagonravov (Russian Academy of Sciences)

D.A. Reznikov, Leading Researcher, Ph.D. in Engineering, Institute of Machine Science n.a. Blagonravov (Russian Academy of Sciences)

L.A. Sosnowskiy, Professor Doctor in Engineering, Belorussian State Transport University

S.S. Shcherbakov, Associate Professor, Candidate of Physico-mathematical Sciences, Belorussian State University

O.N. Yudina, Researcher, Institute of Machine Science n.a. Blagonravov (Russian Academy of Sciences)

The paper proposes a new methodological approach, coupled with complex analysis of reaching damages and limit states of materials and structural elements under multi-parameter actions of various kinds of loads and the environment, taking into account changes in the stress-strain state, material properties and the kinetics of components damageability as well as time factor. We propose to consider damageaccumulation as a multi-level analysis, uniting a group of micro, mesoand macroscales and analyze it in probabilistic setup.

During the damageextentestimation we invite to use the method of modulus of rupture variationand a method based on the analysis of changes in stiffness matrix in model studies. Also in this regard, are considered the probability matrix methods of scripting to achieve the ultimate states, which provide construction of macro- vulnerability matrix, mezo- vulnerability matrix and vector of threats.

Keywords: limit state, damage accumulation, multiparameter loading, vulnerability, fracture.