

УДК 539.1;531

ПРОЦЕССЫ ДЕФОРМИРОВАНИЯ И РАЗРУШЕНИЯ В ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ ПРЕДЕЛЬНЫХ СОСТОЯНИЯХ

© 2011 г.

Н.А. Махутов, М.М. Гаденин

Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, Москва

imash-ras@mail.ru

Поступила в редакцию 15.06.2011

Рассматривается построение пространственных поверхностей предельных и допускаемых состояний в эксплуатационных и экстремальных условиях с использованием параметров нагруженности, температурно-временных и циклических параметров, а также параметров состояния дефектности. В качестве основы обеспечения прочности, ресурса и живучести принимается условие непересечения вектором эксплуатационной нагруженности поверхности допустимых состояний, построенной на основе этих представлений и введения соответствующих коэффициентов запасов.

Ключевые слова: деформирование, разрушение, предельные состояния, прочность, ресурс, живучесть, механика разрушения, эксплуатационная нагруженность, напряжения, деформации, коэффициенты интенсивности напряжений и деформаций.

Актуальность проблемы обеспечения безопасной эксплуатации высокорисковых и экстремально нагруженных машин и конструкций, повышения уровня их защищенности требует углубленного исследования условий и закономерностей протекания процессов деформирования и разрушения в экстремальных предельных состояниях. При постановке и проведении таких фундаментальных и прикладных исследований ставится и решается основополагающая задача формирования критериальной базы условий достижения допускаемых и предельных состояний по параметрам прочности, ресурса и живучести [1–3].

За основные параметры эксплуатационных воздействий P^3 при формировании уравнений состояния и критериев разрушения в рассматриваемых условиях принимаются эквивалентные эксплуатационные напряжения σ^3 , деформации e^3 , числа циклов N^3 , время τ^3 , температура t^3 , внешняя среда Φ^3 (радиация, коррозия и т.п.), коэффициенты интенсивности напряжений K_I^3 и деформаций K_{Ie}^3 :

$$P^3 = \{\sigma^3, e^3, N^3, \tau^3, t^3, \Phi^3, K_I^3, K_{Ie}^3\}. \quad (1)$$

В качестве базовых характеристик механических свойств материала используются пределы текучести σ_T , прочности σ_B , выносливости σ_{-1} , длительной прочности $\sigma_{дп}$, сопротивление отрыву S_K , предельная пластичность Ψ_K , критические коэффициенты интенсивности напряжений K_{Ic} и деформаций K_{Iec} :

$$R_\sigma = F\{\sigma_T, \sigma_B, \sigma_{-1}, \sigma_{дп}, S_K, \Psi_K, K_{Ic}, K_{Iec}\}. \quad (2)$$

Производными параметрами от базовых характеристик механических свойств, конструктивных форм и условий нагружения являются такие характеристики материала, как длительная пластичность $\Psi_{кт}$, эффективные коэффициенты концентрации напряжений K_σ , чувствительность к абсолютным размерам ϵ_σ , асимметрии цикла Ψ_σ , коэффициент вариации v_σ , скорости роста трещин по числу циклов dl/dN и по времени $dN/d\tau$, чувствительность к внешней среде β_c . С учетом этого условие прочности для эксплуатационных условий нагруженности в общем случае может быть записано в виде

$$P^3 \leq R_\sigma \{\Psi_{кт}, K_\sigma, \epsilon_\sigma, \Psi_\sigma, v_\sigma, dl/dN, dN/d\tau, \beta_c\}. \quad (3)$$

Для обеспечения требуемого ресурса (в цикловом или во временном исчислении, а также с учетом радиационной или другой внешней агрессивной среды) необходимо выполнение условия

$$R_{N,\tau,p} \leq R_{N,\tau}^c = \{N^3/N_c, \tau^3/\tau_c, \Phi^3/\Phi_c\}, \quad (4)$$

где $R_{N,\tau}^c$ – критическое (предельное) значение ресурса, выражаемое через критические (разрушающие) величины – число циклов N_c , время τ_c или уровень воздействия среды Φ_c .

Параметры надежности $R_{N,\tau,p}$ в вероятностной постановке $P_{P,R}$ по критериям прочности P и ресурса N или τ определяются на основе выражений (1)–(4) с введением в них вероятностных характеристик прочности, пластичности и нагруженности с учетом коэффициентов их вариации v :

$$P_{P,R} = F\{P^3, R_{\sigma}, R_{N,\tau,\Phi}, \nu\}. \quad (5)$$

При оценках живучести основное внимание уделяется определению уровня накопленных повреждений d , определяемого относительными параметрами N^3/N_c , τ^3/τ_c , Φ^3/Φ_c или ростом трещин (дефектов) от начальных размеров l_0 до текущих l^3 и критических l_c . Этот рост трещин характеризуется их скоростями dl/dN , $dl/d\tau$, которые, в свою очередь, зависят от размахов коэффициентов интенсивности напряжений ΔK_I или деформаций ΔK_{Ie} . При достижении предельного состояния выполняются условия разрушения по критериям линейной (K_{Ic}) или нелинейной (K_{Iec}) механики разрушения. В этом случае живучесть $L_{d,l}$ объектов с учетом уровня повреждения d и роста трещин l может быть оценена по условию

$$L_{d,l} = F\{P^3, R_{\sigma}, R_{N,\tau,\Phi}\} = F\{d, dl/d\tau, dl/dN\} \leq F\{N^3/N_c, \tau^3/\tau_c, \Phi^3/\Phi_c, K_I^3/K_{Ic}, K_{Ie}^3/K_{Iec}\}. \quad (6)$$

Если в выражение (6) вводятся статистические характеристики, то параметр живучести $L_{d,l}$ приобретает вероятностный характер. Такая постановка задачи требует испытаний серий образцов на контрольных режимах нагружения при определении, в первую очередь, параметров dl/dN , $dl/d\tau$, K_{Iec} , K_{Iec} .

В общем случае на основе системы выражений (1)–(6) могут быть построены пространственные поверхности предельных и допускаемых состояний (рис. 1). Координатными осями для этих поверхностей являются: ось параметров эксплуатационной нагруженности (усилий P , номинальных напряжений σ_n , коэффициентов интенсивности напряжений K_I , приведенных локальных максимальных напряжений $(\sigma_{pr})_{\max k}$ в зонах концентрации); ось температурно-временных и циклических параметров эксплуатации (температура t , время τ , число циклов нагружения N); ось состояния дефектности (размеры дефектов l с учетом их формы и пространственного расположения) [1–3].

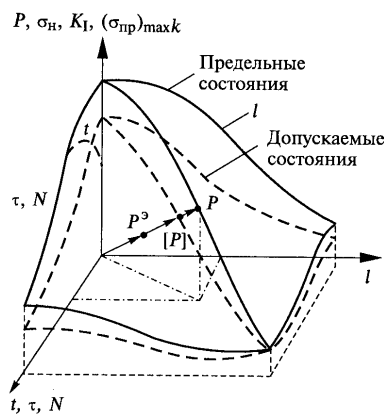


Рис. 1

Согласно изложенным представлениям, образование разрушения, недопустимых пластических деформаций или трещин соответствует достижению рассматриваемым объектом предельного состояния (поверхности предельных состояний). Предельная нагрузка P в этом случае является вектором, проходящим через начало координат с углами, соответствующими данному состоянию объекта (по параметрам $l, t, \tau, N, \sigma_n, K_I, (\sigma_{pr})_{\max k}$). Если при этом ввести соответствующие запасы n на основе выражений (1)–(6), то от поверхности предельных состояний можно перейти к обозначенной на рис. 1 штриховыми линиями поверхности допускаемых состояний и допускаемой нагрузке $[P]$. На основе этого прочность, ресурс и живучесть можно считать обеспеченными, если вектор эксплуатационной нагрузки для конкретных условий P^3 будет меньше или равен вектору допускаемой для этих условий нагрузки $[P]$, т.е. $P^3 \leq [P]$. Классические (традиционные) методы расчета прочности и ресурса развивались в предположении бездефектного конструкционного материала ($l = 0$). В этом случае предельные и допускаемые поверхности преобразуются в предельные и допускаемые кривые (в плоскости « $P, \sigma_n, K_I, (\sigma_{pr})_{\max k} - t, \tau, N$ ») – статической (при заданной температуре t), длительной статической (по заданному времени τ) и циклической (по заданному числу циклов N) прочности.

Прочность и живучесть на начальном этапе определялись по критериям линейной механики разрушения (статическая трещиностойкость) для плоскости « $P, \sigma_n, K_I, (\sigma_{pr})_{\max k} - l$ ». Для современных расчетов прочности, ресурса и живучести с использованием предельных и допускаемых состояний (рис. 1) становится важным принятие единых уравнений состояния, единых критериев разрушения и единых комплексов расчетных характеристик в выражениях (1)–(6) независимо от типа конструкции, свойств конструкционных материалов и условий эксплуатационного нагружения. При этом наиболее перспективным является поэтапный переход от расчетов в напряжениях к расчетам в деформациях [1, 2].

Список литературы

1. Махутов Н.А. Прочность и безопасность: фундаментальные и прикладные исследования. Новосибирск: Наука, 2008. 528 с.
2. Махутов Н.А. Конструкционная прочность, ресурс и техногенная безопасность. В 2 ч. Новосибирск: Наука, 2005. Ч. 1. Критерии прочности и ресурса. 494 с. Ч. 2. Обоснование ресурса и безопасности. 610 с.
3. Махутов Н.А. и др. Прочность и ресурс ЖРД. М.: Наука, 2011. 585 с. (Исследования напряжений и прочности ракетных двигателей).

PROCESSES OF DEFORMATION AND FRACTURE IN EXTREME LIMITING STATES

N.A.Makhutov, M.M.Gadenin

Construction of 3D surfaces of the limiting and admitted states in the service and extreme conditions using the parameters of stress-loading, temperature-time and cyclic parameters and also parameters of defectiveness state is considered. As a basis for providing strength, resource and survivability, the requirement of non-intersection by a vector of service stress loading of a surface of the admissible states, constructed on the basis of these representations and introduction of corresponding resource factors, is assumed.

Keywords: deformation, fracture, limiting states, strength, resource, survivability, fracture mechanics, service loading, stress, strain, stresses and strains intensity factors.