

УДК 621.454.3.017

Канд. техн. наук Н. П. Ушкин

МЕТОДОЛОГИЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ РЕСУРСА РАБОТОСПОСОБНОСТИ РДТТ С УЧЕТОМ ЗАПАСОВ ПРОЧНОСТИ МАТЕРИАЛОВ И ЭЛЕМЕНТОВ

Срок эксплуатации (ресурс работоспособности) устройства (системы, конструкции, материала) является одним из важнейших показателей, определяющих надежное выполнение задачи либо необходимость замены устройства. Целью настоящей работы является разработка инженерной методологии проектной оценки ресурса работоспособности устройства для обеспечения обоснованного принятия проектно-конструкторских решений. Методология оценки ресурса материала и конструкции разработана на основе обобщения большого объема экспериментальных данных ГП «КБ «Южное» и теоретических исследований влияния различных факторов (свойств материалов, нагрузок, условий хранения и эксплуатации) на запас их работоспособности на основе прочностного расчета. При этом определение ресурса базируется на результатах расчетов напряжений и деформаций и их сравнении с прочностными характеристиками применяемого материала (прочностью на разрыв и деформативностью). Прочностные свойства материала должны приводиться к условиям испытания по температуре, давлению, скорости нагружения, степени старения материала и др. Методология предусматривает оценку запасов прочности на всех стадиях хранения и эксплуатации устройства, учет влияния действующих факторов (массовых, температурных, нагрузочных, процесса старения материала), проведение расчетов для выбранных специфических зон устройства. Показано, что оценка ресурса в общем случае является вероятностной величиной из-за случайного сочетания влияющих факторов (прочностных характеристик, условий хранения и эксплуатации, нагрузок). Анализ экспериментальных и расчетных данных применительно к РДТТ показывает, что наиболее опасными зонами, определяющими ресурс работоспособности, являются канал заряда (деформации при запуске), зона скрепления топлива с корпусом (отрывные напряжения) и зона «замка» раскрепляющей манжеты (концентрация сдвиговых и отрывных напряжений и деформаций). Разработанные методологические основы инженерной оценки ресурса работоспособности могут использоваться для расчетного обоснования срока эксплуатации материала и конструкции на этапе проектирования системы и внесения необходимых корректировок в принятые проектно-конструкторские решения.

Ключевые слова: напряжение, деформация, срок эксплуатации, старение, нагрузка.

Строк експлуатації (ресурс працездатності) пристрою (системи, конструкції, матеріалу) є одним з найважливіших показників, що визначають надійне виконання завдання або необхідність заміни пристрою. Метою цієї роботи є розроблення інженерної методології проектного оцінювання ресурсу працездатності пристрою для забезпечення обґрунтованого прийняття проектно-конструкторських рішень. Методологію оцінювання ресурсу матеріалу і конструкції розроблено на основі узагальнення великого обсягу експериментальних даних ДП «КБ «Південне» і теоретичних досліджень впливу різних факторів (властивостей матеріалів, навантажень, умов зберігання й експлуатації) на запас їх працездатності на основі міцнісного розрахунку. При цьому визначення ресурсу базується на результатах розрахунків напружень і деформацій і їх порівнянні з міцнісними характеристиками застосовуваного матеріалу (міцністю на розрив і деформативністю). Міцнісні властивості матеріалу повинні бути зведені до умов випробування за температурою, тиском, швидкістю навантаження, ступенем старіння матеріалу та ін. Методологія передбачає оцінювання запасів міцності на всіх стадіях зберігання й експлуатації пристрою, врахування впливу діючих факторів (масових, температурних, навантажувальних, процесу старіння матеріалу), проведення розрахунків для вибраних специфічних зон пристрою. Показано, що оцінка ресурсу в загальному випадку є ймовірнісною величиною через випадкове поєднання впливних факторів (міцнісних характеристик, умов зберігання й експлуатації, навантажень). Аналіз експериментальних і розрахункових даних щодо РДТТ показує, що найнебезпечнішими зонами, які визначають ресурс працездатності, є канал заряду (деформації під час запуску), зона скріплення палива з корпусом (відривні напруження) і зона «замка» розкріплювальної манжети (концентрація зсувних і відривних напружень і деформацій). Розроблені методологічні основи інженерного оцінювання ресурсу працездатності може бути використано для розрахункового обґрунтування строку експлуатації матеріалу й конструкції на етапі проектування системи і внесення необхідних коригувань у прийнятті проектно-конструкторські рішення.

Ключові слова: напруження, деформація, строк експлуатації, старіння, навантаження.

Service life (resource) of the device (system, structure, material) is one of the major factors, which defines the reliable performance of the device or necessity of its replacement. The purpose of this paper is to develop the engineering methodology to estimate the service life of the device to support the well-founded design decision-making. The methodology of estimation of the service life of material or structure is based on the generalization of great amount of Yuzhnoye SDO experimental data and theoretical research on the impact of various factors (properties of materials, loads, storage and operation conditions) on their service life on the ground of strength analysis. At the same time, service life definition is based on the results of stress and deformation analyses and their comparison with strength properties of the applied material (tensile strength and deformation properties). Strength properties of the material should be reduced to test conditions in terms of temperature, pressure, rate of loading, degrees of material aging etc. Methodology provides the estimation of safety margins in all phases of storage and operation of the device, consideration of the impact of the active factors (mass, temperature, loading, process of material aging), performance of calculations for the chosen specific zones of the device. It is shown that the service life estimation is in general case a probabilistic observation because of the random combination of the influencing factors (strength properties, storage and operation conditions, loads). Analysis of experimental and computation data as applied to solid-propellant rocket engine shows that the most dangerous zones, which define the service life, are the fuel charge channel (deformations at launch), a fuel-body coupling zone (breakaway coupling stress) and a "lock" zone of the release collar (concentration of shear and breakaway stresses and deformations). Developed methodological guidelines of the engineering estimate of the service life can be used as the computational basis for the service life of materials and structures in the phase of system design and updating of the assumed design solutions.

Keywords: stress, deformation, service life, aging, load.

Введение

Срок эксплуатации (ресурс работоспособности) устройства (системы, конструкции, материала) является одним из важнейших показателей, определяющих надежное выполнение задачи либо необходимость замены устройства. В связи с этим исследованию зависимости ресурса от различных факторов с целью надежного его обеспечения уделяется большое внимание, в том числе применительно к твердотопливной ракетной технике.

В ряде стран (США, Россия, Германия, Индия и др.) проводятся исследования физико-химических процессов в материалах (полимерах, резинах, твердых топливах) и влияния внешних факторов на работоспособность устройств [1-7].

Прогнозирование ресурса работоспособности устройства является сложной научно-технической задачей в связи с совместным влиянием ряда внутренних и внешних факторов (характеристик материалов и их изменений во времени, различных нагрузок, конструктивных особенностей).

Срок эксплуатации двигателя (конструкции, материала) определяется, в первую очередь, уровнем физико-механических характеристик материала (прочности, деформативности, модулей упругости и пластичности и др.), действующими нагрузками и условиями эксплуатации.

Уровень характеристик материалов может изменяться со временем, как правило – ухудшаться под действием различных факторов: температуры, влажности, газовой выделений, нагрузок [8, 9]. Уровень воздействия этих факторов обычно определен техническим заданием и, следовательно, может быть учтен при определении степени изменения физико-механических характеристик материала. Это, в свою очередь, позволяет оценить изменение напряженно-деформированного состояния (НДС) конструкции (системы, установки).

С учетом полученной информации появляется возможность прогнозирования периода, за который будут достигнуты минимально допустимые значения характеристик материала и конструкции, обеспечивающие требуемую работоспособность системы [10].

С учетом конструкции двигателя и его основных элементов, действующих нагрузок и свойств материалов выполняется расчет на прочность с целью оценки ее расчетных запасов по напряжениям и деформациям. Результаты расчета на прочность являются основой для аналитической оценки ресурса (запаса работоспособности) устройства (двигателя и его элементов). Целью настоящей работы является разработка инженерной методологии аналитической проектной оценки ресурса работоспособности устройства для обеспечения обоснованного принятия проектно-конструкторских решений.

Исходные положения

1. Термины и определения

В соответствии с требованиями нормативной документации (стандартов и т.п.) применяются следующие термины:

– срок эксплуатации (срок сохраняемости; срок службы; ресурс работоспособности объекта) – календарная продолжительность хранения или эксплуатации, в течение которой характеристики сохраняются в заданных пределах, обеспечивающих требуемую работоспособность объекта (до перехода в предельное состояние);

– предельное состояние объекта – состояние, при котором дальнейшая эксплуатация недопустима или нецелесообразна;

– вероятный срок эксплуатации – срок эксплуатации с заданной вероятностью;

– гарантийный срок эксплуатации – договорная оценка срока, принятого заказчиком и разработчиком;

– старение материала – процесс изменения физико-химических и физико-механических свойств (характеристик) во времени под действием влияющих факторов (температуры, влажности, нагрузок и т.п.).

2. Результаты расчета на прочность

Расчет прочности двигателя и его элементов выполняется для принятой конструкции с учетом свойств применяемых материалов, действующих нагрузок и условий хранения и эксплуатации. При этом учитывается возможное изменение физико-механических свойств материалов в процессе эксплуатации. Расчет проводится с учетом стандартных коэффициентов безопасности на нагрузки. В результате прочностного расчета НДС определяются прогнозируемые запасы прочности по напряжениям и деформациям в элементах двигателя.

Результаты прочностного расчета являются основой для разработки методологии оценки ресурса.

Приближенная физическая модель процессов при оценке ресурса

Двигатель состоит из элементов, изготовленных из различных материалов. Известно, что надежность системы (двигателя) определяется «слабым звеном», т. е. элементом с наименьшей надежностью.

Установлено, что в РДТТ такими «слабыми звеньями» являются конструкции и элементы из полимерных материалов – твердые топлива, теплозащитные покрытия, уплотнения из резин.

Ресурс конструкции из полимерного материала определяется в общем случае его НДС в сравнении с предельно допустимым состоянием. В свою очередь, уровень НДС конструкции определяется физико-механическими характеристиками (ФМХ) материалов, условиями эксплуатации и действующими нагрузками.

Установлено [8, 9], что ФМХ полимерного материала изменяются во времени вследствие воздействия внутренних и внешних факторов.

К внутренним факторам относятся:

– химические реакции между компонентами материала с образованием или разрушением внутренних связей;

– миграция компонентов, например жидко-вязких, в материалах;

– газообразование внутри материала вследствие химических реакций между компонентами.

К внешним факторам можно отнести:

– влияние температуры при хранении, что приводит к изменению скоростей химических реакций в материале;

– воздействие нагрузок при хранении и эксплуатации, что приводит к нарушению внутренних связей в материале;

– увлажнение материала при хранении, что приводит к химическим реакциям и растворению компонентов.

Упрощенная математическая модель процессов при оценке ресурса

Основными факторами, влияющими на изменение ФМХ материала при хранении и эксплуатации, являются температура (тепловое старение) и нагрузки (механическое старение).

Изменение прочностной характеристики X во времени (деформация, прочность, модуль упругости) в общем случае можно представить в виде

$$X(t) = X(t_0) \cdot K_X(T, t) \cdot K_X(N, t), \quad (1)$$

где $X(t)$ – значение характеристики X в момент времени t ; $X(t_0)$ – значение характеристики X в момент времени t_0 ; $K_X(T, t)$ – коэффициент учета степени изменения X под действием температуры T ко времени t ; $K_X(N, t)$ – коэффициент изменения X под действием нагрузок N ко времени t .

Величины K_X можно записать в виде

$$K_X(T, t) = \frac{X(T, t)}{X(T_0, t_0)};$$

$$K_X(N, t) = \frac{X(N, t)}{X(N_0, t_0)}.$$

При этом величины $X(T_0, t_0)$, $X(N_0, t_0)$ соответствуют начальному моменту времени t_0 и являются исходными данными.

1) Характеристика $X(T, t)$ с учетом теплового старения может быть представлена в виде уравнения Аррениуса [8]

$$X(T, t) = \int K_X(T) \exp\left(-\frac{U_T}{RT}\right) dt,$$

где $K_X(T)$ – коэффициент скорости реакции теплового старения конкретного материала по характеристике X , может быть определен по результатам лабораторных исследований; U_T – энергия активации процесса теплового старения; R – универсальная газовая постоянная.

После преобразований получим важное соотношение для имитации одинакового состояния материала (степени старения) при разных температурах (принцип температурно-временной эквивалентности)

$$\frac{t}{t_0} = \exp\left[\frac{U}{R}\left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0}\right)\right].$$

Данное соотношение используется при имитации ускоренного хранения в течение времени t при температуре T вместо t_0 и T_0 соответственно.

2) Величина изменения во времени прочностной характеристики $X(N, t)$ может быть представлена в виде

$$X(N, t) = \int K_X(N) \exp\left(-\frac{U_N}{RT}\right) dt,$$

где $K_X(N)$ – коэффициент скорости изменения характеристики X под действием нагрузки N , может быть определен по результатам лабораторных исследований; U_N – энергия активации процесса механического старения.

После преобразований может быть получено соотношение

$$\ln \frac{X(N, t)}{X(N_0, t_0)} = -\left[K_X(N) \exp\left(-\frac{U_N}{RT}\right)\right] t.$$

Тогда изменение начальной прочности во времени можно записать в виде

$$\ln X(N, t) = \ln X(N_0, t_0) - K_X(N) \exp\left(-\frac{U_N}{RT}\right) t.$$

В практике работ используется также следующее инженерное соотношение для ресурса долговечности и прочности материала во времени (долговременной прочности) [7]:

$$t = B\sigma(t)^{-m}$$

или
$$t = B\left(\frac{\sigma(t)}{\sigma_0}\right)^{-m},$$

где B и m – коэффициенты в законе изменения долговечности в зависимости от долговременной прочности.

Суммарное изменение прочностной характеристики может быть определено с помощью зависимости (1). Коэффициенты, входящие в вышеприведенные соотношения, определяются по результатам лабораторных исследований.

Оценка расчетных запасов прочности двигателя

Целью расчета на прочность является оценка НДС выбранной конструкции, т. е. напряжений и деформаций. Расчет проводится для выбранных зон (сечений) конструкции с учетом ФМХ материала, температурно-влажностных условий эксплуатации и действующих нагрузок.

При расчете на прочность используются коэффициенты безопасности (согласно нормативно-технической документации), учитывающие разбросы характеристик и влияющих факторов, а также неполное знание о процессах в материале и конструкции. Расчет проводится для всех этапов хранения и эксплуатации. В результате расчета на прочность определяются суммарные (эквивалентные) напряжения и деформации к заданному моменту времени (сроку эксплуатации).

Сравнение ФМХ материала с эквивалентными параметрами НДС позволяет сделать предварительный вывод о работоспособности выбранной конструкции элемента из полимерного материала.

Инженерная методология аналитической проектной оценки ресурса двигателя

Аналитическая проектная оценка ресурса проводится с использованием сравнения параметров НДС конструкции с ФМХ материала (способ максимальных напряжений и деформаций). Разрушение материала произойдет при достижении равенства

$$N_X(t) = X(t), \quad (2)$$

где $N_X(t)$ – напряжение (деформация) в материале в момент времени t под действием нагрузки N ; $X(t)$ – прочность (деформативность) материала к моменту времени t .

Задачами оценки ресурса являются:

- определение (оценка) максимальных и суммарных (эквивалентных) напряжений и деформаций $N_X(t)$;

- определение (оценка) прочностных характеристик материала во времени $X(t)$.

Напряженно-деформированное состояние материала, т. е. напряжения и деформации $N_X(t)$, определяется по результатам расчета на прочность.

Прочностные характеристики материала, т. е. $X(t)$, в свою очередь, определяются по результатам лабораторных испытаний с учетом их изменения под действием влияющих факторов (температуры, нагрузок). Тогда коэффициент запаса прочности определится с учетом равенства (2) соотношением

$$\eta_X = \frac{X(t)}{N_X(t)}.$$

Работоспособность материала и конструкции обеспечивается при условии

$$\eta_X \geq 1.$$

При этом характеристики НДС – напряжения σ_x и деформации ε_x определяются в расчете на прочность для разных этапов хранения и эксплуатации и принимаются при расчете ресурса их максимальные значения (для отдельного этапа) или эквивалентные значения (суммарно).

Под эквивалентным значением понимается суммарное значение характеристики реального НДС, полученное суммированием значений одновременно действующих величин, с учетом соотношения нормальных и сдвиговых напряжений на разных этапах эксплуатации (с учетом коэффициентов безопасности).

Например, эквивалентное значение характеристики НДС может быть представлено в виде зависимости:

- по напряжениям

$$N_X^\sigma(t) = \sum_i f_i^\sigma \sigma_i(t);$$

- по деформациям

$$N_X^\varepsilon(t) = \sum_i f_i^\varepsilon \varepsilon_i(t),$$

где f_i^σ и f_i^ε – коэффициенты безопасности на нагрузки (в соответствии с нормами прочности); $\sigma_i(t)$ и $\varepsilon_i(t)$ – составляющие компоненты напряжений и деформаций для выбранных моментов времени.

В качестве действующих нагрузок могут рассматриваться:

- массовые силы;
- температурные перепады;
- транспортные нагрузки и перегрузки;
- внутреннее давление.

В качестве характерных стадий нагружений могут рассматриваться:

- длительное хранение;
- транспортировка;
- погрузочно-разгрузочные работы;
- старт;
- внутреннее давление.

При этом наибольшее внимание необходимо уделить следующим зонам двигателя [7]:

- зона скрепления заряда с ТЗП корпуса (отрывные напряжения);
- канал заряда (деформации при запуске);
- зона «замка» манжеты (сдвиговые напряжения и деформации).

Следовательно, при расчете прочности необходимо учитывать для характерных времен сочетание различных нагрузок для разных стадий эксплуатации.

Для обеспечения сравнения НДС материала с его прочностными характеристиками в одинаковых условиях начальные зна-

чения $X(t)$ необходимо привести, например, с помощью коэффициентов приведения к условиям расчета по нагрузкам:

$$\sigma_i^{np}(t) = \sigma_i^0 \sum K_i^\sigma(t);$$

$$\varepsilon_i^{np}(t) = \varepsilon_i^0 \sum K_i^\varepsilon(t),$$

где $\sigma_i^{np}(t)$ и $\varepsilon_i^{np}(t)$ – значения характеристик прочности и деформативности, приведенные к условиям расчета (испытания); $K_i^\sigma(t)$ и $K_i^\varepsilon(t)$ – коэффициенты приведения к условиям расчета (испытания); σ_i^0 и ε_i^0 – начальные значения характеристик.

Коэффициенты приведения начальных значений ФМХ σ_0 , ε_0 , определенных при стандартных условиях, к условиям НДС при испытании обычно учитывают влияние следующих факторов:

- температуры заряда;
- давления;
- реального НДС (отличие от одноосного растяжения образцов);
- старения;
- скорости деформирования и др.

Момент времени τ , при котором достигается равенство (2), определяет ресурс работоспособности материала (конструкции). При проведении расчета (испытания) для заданного момента времени τ^* можно записать

$$\frac{X(\tau^*)}{N_X(\tau^*)} = \eta(\tau^*).$$

Тогда проектный ресурс работоспособности τ материала (конструкции) может быть оценен по зависимости

$$\tau^\sigma = \tau^* \cdot \eta^\sigma(\tau^*);$$

$$\tau^\varepsilon = \tau^* \cdot \eta^\varepsilon(\tau^*).$$

Из этих значений τ^σ и τ^ε следует выбрать τ_{\min} .

Таким образом, проектная оценка ресурса требует определения следующих характеристик:

- максимальных и суммарных значений напряжений и деформаций на всех этапах эксплуатации на основе расчета НДС материала (конструкции);
- изменения прочностных характеристик (прочности, деформативности) во времени под действием разных факторов (температур, нагрузок и др.).

Проектное значение ресурса оценивается по коэффициенту запаса прочности и деформативности по отношению к заданному ресурсу.

Приведенная оценка ресурса справедлива для средних значений (математических ожиданий) характеристик $X(\sigma', \varepsilon)$, N_X .

Однако данные характеристики могут иметь отклонения (разбросы) от средних значений

$$X(W) = X \pm \delta X = X \pm K_W \sqrt{S_X};$$

$$N_X(W) = N_X \pm \delta N_X = N_X \pm K_W \sqrt{S_N},$$

где K_W – вероятностный множитель; W – вероятность; S_X и S_N – дисперсии характеристик.

Тогда для заданной вероятности W можно записать

$$\eta(\tau, W) = \frac{X(\tau) \pm K_W \sqrt{S_X(\tau)}}{N(\tau) \pm K_W \sqrt{S_N(\tau)}}.$$

Наименьший коэффициент запаса будет иметь место при минимальной прочности и максимальном НДС:

$$\eta_{\min} = \frac{X_{\min}}{N_{\max}} = \frac{X(\tau) - K_W \sqrt{S_X(\tau)}}{N(\tau) + K_W \sqrt{S_N(\tau)}}.$$

В результате может быть построена зависимость ресурса (коэффициента запаса прочности) от соотношения X и N с заданной вероятностью W .

Опыт работ ГП «КБ «Южное» по созданию ряда крупногабаритных РДТТ показал, что достигнутый уровень ресурса работоспособности современных РДТТ на основе стабильных смесевых твердых топлив составляет от 15 до 20 лет и более. Уровень ресурса конкретного типа РДТТ зависит от ряда факторов: химического состава топлива, конструкции заряда и условий эксплуатации (диапазона температур, значений и продолжительности действия нагрузок, увлажнения и др.) [10].

Топлива, содержащие активные компоненты (окислитель, связующее, металлическое горючее), могут иметь несколько меньший ресурс работоспособности вследствие возможной нестабильности компонентов и соответствующих химических реакций. Однако ресурс таких топлив может быть повышен до 12-15 лет за счет введения стабилизаторов химических процессов [10].

Разработанные методологические основы инженерной оценки ресурса работоспособности могут использоваться для расчетного обоснования срока эксплуатации материала и конструкции на этапе проектирования системы и внесения необходимых корректировок в принятые проектно-конструкторские решения.

Заключение

1. Предлагаемая инженерная методология оценки ресурса основывается на сравнении прочностных свойств материала с действующими напряжениями и деформациями в условиях испытаний.

2. Наибольшее внимание рекомендуется уделить отрывным напряжениям на границе материалов и деформациям в канале зрада РДТТ.

3. Оценка ресурса является вероятностной, так как зависит от сочетания случайных значений прочности материала и нагрузки.

Список использованной литературы

1. Ляшевский А. В., Миронов Е. А., Ведерников М. В. Прогнозирование сроков пригодности твердых ракетных топлив методом рентген-компьютерной томографии // *Авиационная и ракетно-космическая техника*. – №2. – 2015. – С. 118-123.

2. Schubert H., Menke K. Service Life Determination of Rocket Motors by Comprehensive Property Analysis of Propellant Grain // Athens, Greece, May, 1996, Symposium. – №41 – С. 1-10.

3. Hufferd W. L. Service Life Assessment for Space Launch Vehicles // Athens, Greece, May, 1996, Symposium. – №46 – С. 1-9.

4. Faulkner G. S., Tod D. Service Life Prediction Methodologies Aspects of the TTCP KTA-14 UK Programme // Athens, Greece, May, 1996, Symposium. – №24 – С. 1-13.

5. Francis E. C. (England), Buswell H. J. Improvements in Rocket Motor Service Life Prediction // Athens, Greece, May, 1996, Symposium. – №27 – С. 1-13.

6. Collingwood G. A., Dixon M. D., Clark L. M., Becker E. B. Solid Rocket Motor Service Life Prediction Using Nonlinear Viscoelastic Analysis and Probabilistic Approach // Athens, Greece, May, 1996, Symposium. – №29 – С. 1-8.

7. Жарков А. С., Анисимов И. И., Марьяш В. И. Физко-химические процессы в изделиях из высокоэнергетических конденсированных материалов при длительной эксплуатации // *Физическая мезомеханика*. – №9/4. – 2006. – С. 93-106.

8. Гуль В. Е. Структура и прочность полимеров // М.: Химия, 1971. – С. 10-23, 189-209.

9. Павлов П. А. Основы инженерных расчетов элементов машин на усталостную и длительную прочность // Л.: Машиностроение, 1988. – С. 65-70.

10. Ушкин Н. П. Способы проектной оценки ресурса РДТТ и обеспечения его длительной эксплуатации // *Космическая техника. Ракетное вооружение: Сб. науч.-техн. ст.* – 2016. – Вып. 1. – Днепропетровск: ГП «КБ «Южное». – С. 110-116.

Статья поступила 29.10.2018