

УПРАВЛЕНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИЕЙ КОНСТРУКЦИЙ АВИАЦИОННО-КОСМИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ С УЧЁТОМ ОЦЕНКИ ИХ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ

Попов А.В., Волошина В.Ю., Евдокимов Е.М.

Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина», Воронеж, Россия
avpnil@rambler.ru

Аннотация. Созданная система оценки технического состояния конструкций позволяет оперативно (в реальном масштабе времени) в аппаратно-программных комплексах обрабатывать многоканальную и многопараметрическую информацию о местоположении дефектов, оценивать степень опасности дефектов и возможность дальнейшей эксплуатации конструкции, обеспечивает оперативность, достоверность и снижение стоимости определения возможности эксплуатации силовых элементов конструкций.

Ключевые слова: Авиационно-космические комплексы, техническое состояние, эксплуатация, акустическая эмиссия.

Введение

Каждый силовой элемент потенциально опасных конструкций авиационно-космических комплексов (АКК), должен подвергаться техническому освидетельствованию до ввода в эксплуатацию, периодически в процессе эксплуатации, и в необходимых случаях - внеочередному техническому освидетельствованию. В связи с этим, оценка эксплуатационной пригодности силовых элементов потенциально опасных конструкций АКК по фактору прочности является важной государственной проблемой, решение которой существенно снизит риск техногенных аварий и катастроф, обеспечит значительный экономический эффект за счёт продления их сроков эксплуатации.

В контексте исследований под оценкой эксплуатационной пригодности понимается оценка возможности эксплуатации конструкции с учётом степени опасности дефектов силовых элементов.

Нормативно, оценка эксплуатационной пригодности силовых элементов потенциально опасных конструкций АКК проводится путём приложения к конструкции эксплуатационной или превышающей эксплуатационную нагрузки и выдержкой при этой нагрузке. При этом выявляются и предотвращаются процессы, приводящие к авариям и катастрофам, т.е. различные виды разрушения, коррозия, старение, ползучесть, релаксация, потеря устойчивости, износ, нарушение герметичности и др. В ходе этих испытаний получается максимально достоверная информация о прочности и эксплуатационной пригодности конструкций АКК. Эти испытания трудоемки и после их проведения сохраняется вероятность преждевременного разрушения конструкций.

Таким образом, существует противоречие в практике эксплуатации. Необходимо для продления сроков эксплуатации АКК оценить эксплуатационную пригодность силовых элементов, с минимизацией потерь конструкций при испытаниях и максимизацией информации о фактическом состоянии каждой конструкции или агрегата.

Увеличить эффективность оценки эксплуатационной пригодности конструкций АКК при сокращении числа разрушаемых конструкций позволит внедрение методов неразрушающего контроля при нагружении, а также рациональный выбор испытательных нагрузок.

При своевременном обнаружении микро, и макротрещин, определении их координат, и скорости роста, возможна оценка степени близости отказа, что позволяет предотвратить его, установить оптимальные сроки профилактических ремонтов, и тем самым, повысить надежность АКК.

Трещина (даже при хрупком разрушении) не возникает мгновенно, ее появлению предшествуют стадии текучести, появления, распространения и слияния микротрещин, фазовые превращения. Все конструктивные элементы машиностроения имеют микро и макродефекты, которые, могут быть как опасными, так и неопасными при эксплуатации. Если конструкция имеет дефект, не влияющий на её эксплуатационную пригодность, она может эксплуатироваться.

Большинство существующих неразрушающих методов оценки эксплуатационной пригодности конструкций АКК основано на сканировании поверхности и подповерхностного слоя материала конструкции. Обнаруженные при этом дефекты затруднительно ранжировать по степени опасности, оценивать по степени влияния на эксплуатационную пригодность и остаточный ресурс.

Исключением является метод акустической эмиссии (АЭ), обеспечивающий регистрацию, обработку и анализ акустических процессов, возникающих при разрушении конструкций.

Акустическая эмиссия – это процесс возникновения упругих акустических волн, вызванных локальной динамической перестройкой внутренней структуры твёрдых тел при деформировании.

1. Теоретико-вероятностный подход к решению проблемы разработки системы оценки эксплуатационной пригодности конструкций АКК

Проведено обобщение результатов исследования связи закономерностей процессов накопления повреждений в силовых элементах конструкций АКК и изменения информативных параметров акустической эмиссии, статистический анализ информативных параметров акустико-эмиссионных процессов.

Установлено, что на ранних стадиях деформирования поток сигналов АЭ от микродефектов, случайным образом распределенных по объему конструкции, имеет пуассоновский характер. С ростом нагрузки объединение микродефектов в трещину и ее последующее развитие нарушает распределение Пуассона. Разработан способ оценки процессов накопления повреждений в силовых элементах конструкций, основанный на оценке изменения распределений числа актов (импульсов) АЭ на фиксированных интервалах времени в процессе деформирования силовых элементов конструкций [1,2].

На основе известного фундаментального соотношения для пуассоновского распределения между математическим ожиданием $M[n]$ и дисперсией числа актов АЭ - $D[n]$ в интервале T имеем $M[n]=D[n]$, и следовательно

$$M[n^2] = \{M[n]\}^2 + D[n] = \{M[n]\}^2 + M[n]. \quad (1)$$

Это соотношение позволяет построить параметрические инварианты, справедливые только для пуассоновского процесса и на этой основе оценивать отклонение анализируемого процесса от пуассоновского.

Разработан способ оценки процессов накопления повреждений в силовых элементах конструкций на основе инвариантов временных интервалов импульсов АЭ. Получен инвариант, характеризующий пуассоновский поток импульсов АЭ

$$I = 1 + \frac{D[\tau]}{M^2[\tau]} = \frac{M[\tau^2]}{M^2[\tau]} = 2. \quad (2)$$

Данное соотношение позволяет построить инварианты, справедливые только для пуассоновского процесса и оценивать отклонение анализируемого процесса от пуассоновского (от числа 2).

Эффективность метода инвариантов определяет актуальность поиска возможностей для его применения в случае произвольных плотностей распределения случайных интервалов T . Для того чтобы распределение выходной случайной величины нелинейного преобразования T^* было экспоненциальным, входную случайную величину T необходимо подвергнуть преобразованию

$$\tau^* = -\frac{1}{\lambda^*} \cdot \ln[1 - F(\tau)], \quad (3)$$

где λ^* - интенсивность АЭ; $F(\tau)$ - исходная функция распределения временных интервалов АЭ. При этом отклонение плотности распределения случайной величины T от исходного распределения $p(\tau)$ вследствие изменения процесса разрушения (начало текучести материала, фазовые превращения, трение и др.) приведёт к отклонению плотности распределения величины T^* от экспоненциального и, следовательно, к нарушению соотношений для инвариантов. Это будет сигнализировать об изменении процессов разрушения, являться предвестником возникновения аварийной ситуации. Таким образом, используя предложенный метод инвариантов АЭ процессов и нелинейные преобразования случайных величин, можно определять отклонение («разладку») распределений информативных параметров АЭ от устойчивых значений для различных законов распределения импульсов АЭ.

В связи с тем, что форма статистических распределений информативных параметров АЭ не зависит от амплитуды и интенсивности сигналов, а определяется только физикой процессов, происходящих в материале конструкции при деформировании, значения разработанных инвариантов не зависят от формы, предыстории эксплуатации и размеров конструкции АКК [1-5].

2. Способ интегральной оценки эксплуатационной пригодности силовых элементов конструкций на основе виброакустического и акустико-эмиссионного методов

В процессе производства и эксплуатации не допускается нагружение тонкостенных АКК избыточной нагрузкой. В связи с этим для контроля тонкостенных АКК разработан метод акустической диагностики, основанный на совместном использовании принципов метода вынужденных колебаний и метода АЭ [4].

Суть метода заключается в возбуждении в конструкции вынужденных колебаний и регистрации распределения амплитуд упругих волн на всей контролируемой поверхности или её большом участке при помощи многоканальной акустико-эмиссионной аппаратуры.

Для локации используется зависимость времени прихода и амплитуды сигнала на разнесённые от координат источника приёмники (метод триангуляции). При проведении локации малые размеры и большое число неоднородностей обуславливают статистический характер процесса рассеяния, дефектная зона отличается характерным изменением информативных параметров колебаний, что позволяет определять её наличие, местоположение, размеры и форму с погрешностью 5-10 % от максимального расстояния между преобразователями.

Предложенный АЭ метод вынужденных колебаний, проводимый без нагружения конструкций избыточной нагрузкой, обладает следующими преимуществами: не вызывает остаточных деформаций; позволяет определять местоположение, размеры и форму дефектов (дефектных областей) на этапах производства и эксплуатации.

3. Многоканальные аппаратно-программные комплексы для оценки эксплуатационной пригодности конструкций на основе инвариантов акустико-эмиссионных процессов

Для подтверждения возможности практического использования полученных теоретических положений и для испытаний силовых элементов конструкций АКК разработаны АЭ аппаратно-программные комплексы на основе инвариантов акустико-эмиссионных процессов (рисунок 1), методика экспериментальных исследований, устройства для моделирования НДС, и проведены экспериментальные исследования по изучению связи статистических закономерностей АЭ процессов с процессами разрушения конструкций [6,7].



Рис. 1. Разработанный АЭ аппаратно-программный комплекс

Для решения задач переноса результатов исследований с образцов на реальные конструкции разработана АЭ модель подобия процессов разрушения [3]. Основываясь на законах механики разрушения, и результатах экспериментальных исследований установлено, что условием подобия для переноса акустико-эмиссионных результатов экспериментальных исследований лабораторных образцов на реальный объект является соответствие типов напряженно-деформированного состояния в исследуемой области конструкции и образца из одного материала, которое описывается инвариантным соотношением

$$E, \mu, \sigma = inv, \quad (4)$$

где μ - коэффициент Пуассона, E - модуль Юнга, σ - вектор полного напряжения в точках исследуемой области.

Критерии подобия заключаются в неизменности инвариантов для модели и реальной конструкции. Если модель и силовой элемент конструкции выполнены из одного материала, то значения μ и E одинаковы, поэтому при механическом подобии (равенстве главных напряжений тензора в соответствующих точках) выполняется инвариант.

$$\frac{N_{\Sigma_i}}{V_i} = \frac{N_{\Sigma_{i+1}}}{V_{i+1}} = inv, \quad (5)$$

где N_{Σ} - суммарное количество актов АЭ до разрушения (или образования дефекта характерного размера); V - характерный размер области деформирования (площадь поперечного сечения, объем деформируемой области, количество структурных элементов и т.д.).

В этом случае значения информативных параметров АЭ процессов, сопровождающих деформирование, можно рассматривать как числовые характеристики одного и того же явления, но происходящего в конструкциях разных масштабов.

Критерием (условием) справедливости гипотезы о применимости данного подхода к моделированию процессов в реальных конструкциях являются диаграммы нагружения образцов и нормативные данные по допускаемым напряжениям в конструкционных расчетах конструкций АКК.

Исследование с помощью подобного рода моделей кинетики накопления повреждений в силовых элементах конструкций АКК является практически единственным возможным способом экспериментального изучения и решения практических задач.

При оценке эксплуатационной пригодности конструкций методом АЭ, актуальным вопросом является комплексный анализ множества информативных параметров. Для решения этой задачи разработана и практически отработана методика оценки многопараметрической информации в акустико-эмиссионных аппаратно-программных комплексах, основанная на объединении («свёртки») информативных параметров АЭ методами теории исследования операций. В соответствии со степенью опасности дефектов на экран монитора ПЭВМ выдается сообщение о порядке дальнейших действий операторов, степени эксплуатационной пригодности конструкции (рисунок 2).

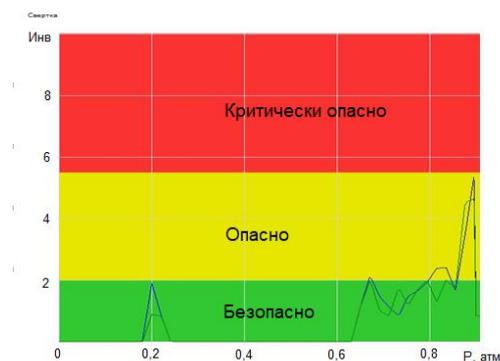


Рис. 2. Оценка степени опасности дефектов на экране монитора ПЭВМ

4. Подход к прогнозированию ресурса силовых элементов конструкций

Для оценки возможной продолжительности эксплуатации конструкций АКК разработан подход к прогнозированию ресурса силовых элементов конструкций методом АЭ. Решение этой задачи возможно путём нахождения инвариантов связи параметров АЭ с функцией ресурса диагностируемой конструкции основываясь на принципах оценки интенсивности накопления повреждений теории надёжности.

Суммарное количество импульсов эмиссии как мера повреждений внутренней структуры твёрдых тел может являться инвариантом функции ресурса $r(t)$ выработанного элементом за время эксплуатации ξ и статистической характеристикой надёжности элемента $N_{\Sigma}(\xi) = r(\xi)$.

Полагаем, что продолжительность эксплуатации выражается в единицах времени ξ и начата в момент времени $\xi = 0$, где ξ - текущее время. Вероятность безотказной работы элемента $p(\xi)$ (которую называют также функцией надёжности) связана с ресурсом следующим образом $r(\xi) = -\ln p(\xi)$. Отсюда

$$\frac{dr(\xi)}{d\xi} = \frac{dN_{\Sigma}(\xi)}{d\xi} = -\frac{p'(\xi)}{p(\xi)} = \dot{N}(\xi), \quad (6)$$

где $\dot{N}(\xi)$ - интенсивность потока импульсов АЭ.

То есть ресурс, израсходованный силовым элементом конструкции в единицу времени, есть интенсивность потока импульсов АЭ (опасность отказа в этом интервале). Установлено, что интенсивность сигналов АЭ зависит от режима нагружения – b

$$b = H/H_0, \quad (7)$$

где H и H_0 - действующая и номинальная нагрузка, или если конечная нагрузка постоянна, от скорости её приложения. В этом случае режим нагружения

$$b = dH/dt. \quad (8)$$

Установление инварианта (6) даёт возможность прогнозировать момент разрушения. Доказано, что техническое состояние элемента конструкции в условиях $b \in B$ зависит от величины выработанного им в прошлом ресурса $r(\xi)$ и не зависит от того, как выработан этот ресурс, т.е.

$$p(T/\dot{N}(\xi)) = p^{(1)}(T/x_1) = p^{(2)}(T/x_2), \quad (9)$$

где x_1 и x_2 - временные интервалы функционирования исследуемого элемента, удовлетворяющие соотношению:

$$r = \int_0^{x_1} \dot{N}(\xi, b_1) dt = \int_0^{x_2} \dot{N}(\xi, b_2) dt. \quad (10)$$

На основе вышеприведённых заключений построена математическая модель оценки ресурса силовых элементов конструкций по сигналам АЭ.

Использование суммарного количества импульсов АЭ в качестве инварианта характеризующего процессы накопления повреждений позволяет применять математический аппарат теории надёжности к расчёту ресурса силовых элементов конструкций АКК [6].

5. Заключение

Экспериментальные данные о связи значений инвариантов АЭ процессов с параметрами нагрузки и деформации конструкционных материалов, обеспечивают: выявление закономерностей связи процессов накопления повреждений в конструкционных материалах с параметрами нагружения; получение данных о характерных для начала трещинообразования значениях информативных параметров сигналов АЭ; о реальных значениях прочностных характеристик конструкций АКК при испытаниях.

Разработаны рекомендации по оценке эксплуатационной пригодности силовых элементов конструкций АКК методом акустической эмиссии, которые включают в себя: рекомендации по определению граничных значений параметров эксплуатационной пригодности силовых элементов конструкций; систему оценки эксплуатационной пригодности методом акустической эмиссии; оценку технико-экономического эффекта от внедрения в системы оценки эксплуатационной пригодности методом акустической эмиссии.

Оценка эксплуатационной пригодности силовых элементов конструкций АКК на основе инвариантов акустико-эмиссионных процессов проводится при нагружении давлением, температурным полем и т. д. Выбор вида нагрузки определяется конструкцией объекта и условиями его эксплуатации, характером испытаний.

Эффективность предлагаемой к использованию разработанной системы оценки эксплуатационной пригодности АКК обусловлена тем, что она:

- может дать возможность организовать 100% контроль АКК и организовать их эксплуатацию по фактическому состоянию, продлить сроки безопасной эксплуатации;
- в систему заложены новые способы оценки степени опасности дефектов на основе метода акустической эмиссии;
- конструкция АКК может не доводиться до разрушения;
- не вызывает загрязнение окружающей среды ядовитыми компонентами, повышается безопасность испытаний;

- может дать возможность снизить количество конструкций АКК используемых для дефектации и испытаний, при испытаниях не доводить конструкции до разрушения, затем передавать их на дефектацию;
- может дать возможность оценить эксплуатационную пригодности АКК для решения вопроса об их дальнейшем хранении, утилизации.

Созданная система оценки эксплуатационной пригодности конструкций АКК позволяет оперативно (в реальном масштабе времени) в акустико-эмиссионных аппаратно-программных комплексах обрабатывать многоканальную и многопараметрическую информацию об изменении информативных параметров акустической эмиссии и местоположении дефектов, оценивать степень опасности дефектов и возможность дальнейшей эксплуатации конструкции, обеспечивает оперативность, достоверность и снижение стоимости определения возможности эксплуатации силовых элементов конструкций.

Литература

1. *Расщепляев Ю.С., Попов А.В.* Метод инвариантов в задаче исследования потоков акустической эмиссии // Дефектоскопия. 2000. N 10. - С. 79-82.
2. *Буйло С.И., Попов А.В.* Акустико-эмиссионный метод оценки параметров процесса накопления повреждений в задаче прогнозирования ресурса изделий ответственного назначения // Дефектоскопия. 2001. N 9. - С.45-54.
3. *Костоглов А.И., Попов А.В.* Акустико-эмиссионный метод моделирования процессов разрушения материалов // Дефектоскопия. 2002. N 10. - С.3-7.
4. *Попов А.В.* Акустико-эмиссионный метод вынужденных колебаний при определении дефектов в тонкостенных сосудах давления // Дефектоскопия. 2005. N 3. - С.27-31.
5. *Попов А.В.* Метод функциональных инвариантов в задачах оценки прочности на основе акустической эмиссии // Дефектоскопия. 2008. N 2. – С.23-27.
6. *Попов А.В.* Акустико-эмиссионный метод оценки ресурса конструкций на основе инвариантов теории надёжности // Проблемы машиностроения и надёжности машин. 2003. N4. - С.118-122.
7. *Попов А.В., Косенков И.В.* Акустико-эмиссионное устройство контроля технического состояния конструкций с использованием метода инвариантов // Известия ЮФУ. Технические науки. 2008. Т. 79. N 2. - С. 116-120.