

УДК 621.376; 681.5; 528.5

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЗАИМОСВЯЗИ ДЕФЕКТОВ КЛЕЕННЫХ КОНСТРУКЦИЙ ИЗ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

©2011 В. И. Мордасов¹, А. Д. Сторож², Н. Е. Гребнев², Д. Н. Гребнев², О. В. Шулепова²

¹Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет)

²Ракетно-космический центр «ЦСКБ-Прогресс», г. Самара

Дефект рассматривается как совокупность зависимостей от других дефектов. На деградационные процессы наслаиваются субъективные причины (нарушения условий эксплуатации, недопустимые нагрузки, использование недопустимых эксплуатационных материалов и др.). Сложной составляющей является комплексная причина в виде эксплуатационного дефекта: конструктивный, технологический и эксплуатационный фактор.

Объект диагностирования, дефект, нагрузки, условия эксплуатации, диагностическая модель, область дефектов, прямые показатели.

Анализ научно-технических и нормативно-технических разработок по дефектоскопии крупногабаритных оболочек из многослойных полимерных композиционных материалов (ПКМ) производится следующим образом. Объект диагностирования (ОД) в технической диагностике - это такой технический объект, относительно которого решается определенная диагностическая задача (ДЗ). В общем случае диагностическая задача - это задача по установлению степени соответствия технического объекта предъявляемым к нему требованиям (табл. 1).

Принято различать две основные диагностические задачи: прямая диагностическая задача (контроль технического состояния) и обратная диагностическая задача (поиск дефектов). Исходя из этого, общее определение диагностической модели сформулируем в следующем виде. Диагностическая модель (ДМ) - это любое знание, используемое в процессе решения диагностической задачи и представленное в определенной форме. [1,2,3 и др.] Спектр форм ДМ широк - от образов дефектов и их признаков в сознании отдельного специалиста, практика по обслуживанию и ремонту ОД до математических конструкций, реализованных в формальных диагностических программах.

Полные и частичные диагностические модели дефектоскопии крупногабаритных оболочек из многослойных ПКМ включают прямые и обратные задачи, являются по существу выражением в технической диагностике двух фундаментальных подходов общей теории систем.

Таблица 1. Виды дефектов, выявляемых в полимерных композиционных материалах (ПКМ)

Дефект	Схематичное изображение
Расслоения в монолитных деталях из ПКМ	
Неприклеи в слоистых, сотовых и других конструкциях с заполнителем	
Расслоения в обшивках и деталях клеенных конструкций из ПКМ	
Инородные включения (полимерные плёнки, бумага и пр.)	
Подмятие сотового заполнителя (потеря устойчивости)	

Задача контроля есть выражение функционального подхода, задача поиска дефектов - выражение структурного подхода. Традиционно, используя готовый математический аппарат, для решения первой задачи применяют абстрактные модели (дифферен-

циальное уравнение заданного порядка, аналитическое выражение логической функции, абстрактный конечный автомат). Для решения второй структурной модели выявляются структурные, комбинационные, последовательностные схемы [2,3,4 и др.]. Каждая диагностическая модель имеет свои особенности. В дальнейшем будет сделан акцент на *УДМ*, используемые для поиска дефектов. Многообразие знаний, используемых субъектом диагностической деятельности при решении обратной задачи, велико. Для его систематизации необходимо выделить три вида знаний.

- Знания о возможных дефектах, об их причинах и об их прямых и косвенных показателях. Как правило, отдельный дефект не является изолированным явлением. На множестве возможных дефектов объективно существуют разнообразные отношения. В данной работе исследуются временные отношения, причинно-следственные отношения и отношения эквивалентности.

- Знание о структурной организации *ОД*. Для объектов "с процессом" данный вид знаний дополняется знанием о многовариантном функциональном процессе. Различают объективную (физическую), функциональную и диагностическую структуры объекта. Две последние обобщает термин логическая "структура". Первая определяется сборочно-разборочными, крепежными, монтажными и т.п. отношениями между неделимыми частями объекта. Вторая может иметь несколько разновидностей в зависимости от степени детализации функциональных элементов и определяется динамическими или прагматическими отношениями на множестве этих элементов.

- Знания о возможных диагностических экспериментах позволяют оценить диагностические показатели при заранее определенных условиях с целью локализации дефектов. Перечислим основные способы оценки диагностических показателей (*ДПП*): измерение, контроль, замена в *ОД* подозреваемых элементов на заведомо исправные, проверка подозреваемых элементов на заведомо исправном объекте, наблюдение за реакцией *ОД* при подаче стимулирующего воздействия и др.

Диагностический эксперимент крупногабаритной оболочки из многослойных ПКМ (табл. 1) состоит из отдельных испытаний, которые принято называть элементарными проверками (*ЭП*). Элементарная проверка есть акт однократной оценки определенного *УДП*. Оценка *УДП* производится в заранее фиксированных местах *ОД*. Их принято называть контрольными точками. Часто *ЭП* называют парой, первая компонента которой – это определенное воздействие на *ОД*, вторая – реакция *ОД* на это воздействие. *ОД*, находящийся в разных технических системах, может выдавать разные реакции в одной и той же *ЭП*. При таком узком понимании *ЭП* можно различать три их вида. Первый вид: фиксируется значение входного воздействия и наблюдается реакция в нескольких контрастных телах (*КТ*). Второй вид: подается определенная последовательность входных воздействий и наблюдается последовательность реакций в одном *КТ*. Третий вид – это общий случай: подается последовательность входных воздействий и наблюдение за множеством *КТ*. Исход диагностического эксперимента всегда случаен.

Термин «диагностическая модель» крупногабаритной оболочки из многослойного ПКМ можно понимать в широком и узком смыслах [1,2,3 и др.]. В первом случае достаточно представлен объём всех трёх видов перечисленных выше знаний. Назовем такую *УДМ* полной. Неизвестны научные работы, в которых бы формально описывалась полная *УДМ* с использованием вибраций (рис. 1). Хотя в практике диагностирования использование полных неформальных *УДМ* – это норма. Пример этому дают разнообразные инструкции по техническому обслуживанию и ремонту сложных технических систем. В них обязательно есть раздел "возможные неисправности, методы их устранения" и приводится таблица с перечнем дефектов, их диагностических показателей и методов их устранения. В этой таблице должны быть сконцентрированы все три вида диагностических знаний. Кроме того, в инструкциях отмечено начало осмотра, дополнительные наблюдения или измерения, а также описываются алгоритмы диагностирования и ремонта.

Задачи оптимизации надежности работы и эффективности использования макрообъектов клееных конструкций из ПКМ могут быть положительно решены только при условии принятия и внедрения стратегии эксплуатации объектов техники по

техническому состоянию. Это, в свою очередь, предполагает использование средств и методов технической диагностики, в том числе и вибрационной. Таким образом, системы диагностики должны разрабатываться не только с учетом возможности



Рис. 1. Общая архитектура адаптивной автоматизированной системы вибрационной диагностики (ИПДК – исходные параметры диагностики конструкции)

получения собственно оценок технического состояния наблюдаемых объектов, но и с учетом использования результатов диагностики в управлении макрообъектами [1,2,3, и др.].

Оценка технического состояния клееных конструкций из ПКМ на уровне узлов объектов техники используется в следующих целях: для обеспечения безопасности эксплуатации; управления ремонтными работами (объект ремонта и очередность его

проведения); оптимизации состава, длительности и стоимости для каждого вида ремонтных работ.

Оценки технического состояния по цепочке от объекта, техники до макрообъекта в целом определяют поле возможных вариантов загрузки всех элементов макрообъекта при соблюдении требований по надежности. В общем случае системы технической диагностики должны создаваться на базе адаптивных методов. При этом первоочередной

задачей становится создание методологии построения таких систем.

Если дефект крупногабаритной оболочки из многослойного ПКМ (табл. 1) принадлежит определенному иерархическому уровню организации области дефектов (например, фиксированному блоку) и в силу объективных (например, неразборный блок) или субъективных причин (например, высокая "стоимость" поиска данного дефекта по его прямым показателям) отсутствует возможность фиксировать его прямыми показателями, то сделать это можно показателями более высокого уровня. Количественные или качественные показатели интенсивностей свойств, проявляемые на более высоких уровнях иерархии области дефектов по сравнению с данным дефектом, выражаемые переменными величинами, чувствительными к этому дефекту, будем называть косвенными показателями данного дефекта. Косвенный показатель, как правило, чувствителен к нескольким дефектам клееных конструкций из ПКМ (табл. 1) [1,2,3 и др.] и, наоборот, данный дефект может фиксироваться несколькими косвенными показателями (отношение - между дефектами и косвенными). В период эксплуатации причиной дефекта служит комплексное явление, элементы которого могут быть взаимозависимыми. Необходимым элементом комплекса являются деградационные процессы. Эти процессы условно разделяются на две части. Первая - процессы, источником которых являются внешние воздействия эксплуатационной среды (например, коррозия, изменения изоляционных свойств материалов и др.). Вторая - процессы, источник которых обусловлен внутренним взаимодействием составных элементов объекта при его функционировании (износ, усталостные явления, разнообразные отложения и др.). Эти процессы есть объективные внешние и внутренние причины непрерывных постепенных изменений состояний клееных конструкций из ПКМ (табл. 1).

Относительность сущности дефекта клееных конструкций из ПКМ следует понимать в двух разновидностях. Первая разновидность - это отношения данного дефекта к другим возможным дефектам. Фиксируется множество возможных дефектов и учи-

тываются возможные отношения на этом множестве. Если такого учета нет, то дефекты называют независимыми, в противном случае - зависимыми. Зависимый дефект клееных конструкций из ПКМ - это дефект, возникший из-за комплекса причин, в том числе из-за других дефектов. Возможна вторая разновидность - это отношения с другими сущностями. Например, по отношению к структуре основного дефекта будем различать дефект элемента и дефект связи элементов; по отношению к времени — устойчивый и неустойчивый дефект; параллельные и последовательные дефекты. Дефект клееных конструкций из ПКМ (табл. 1), фиксируемый по отношению к норме исправности, следует называть неисправностью, а по отношению к норме работоспособности - отказом [1,2,3 и др.].

Имеет смысл рассматривать и комплексную относительность на возможном множестве дефектов. Например, понятия одиночных и кратных дефектов включают относительность к множеству дефектов и ко времени. Абсолютность явления рассмотренных выше относительных дефектов понимается в смысле фиксации их посредством прямых показателей. Возможная последняя ситуация характеризуется относительностью явления и относительностью сущности дефекта. Она имеет место, когда относительные дефекты фиксируются косвенными показателями. Элементами множеств дефектов в самом общем случае является содержательное описание, фиксирующее причины, характер и следствия возможного недопустимого изменения существенных свойств. Оно позволяет отличить данный дефект клееных конструкций из ПКМ (табл. 1) от всех других. Любая технология поиска дефектов предполагает оценку текущих значений диагностических параметров. Важное место среди способов оценки занимают контроль и измерительные процедуры. Последние реализуются технологическими системами дефектов, которые включают своими элементами разнообразные датчики [1,2,3 и др.].

Задачи организации технического обеспечения и поддержки непрерывного производства или эксплуатации крупногабаритных оболочек из многослойных ПКМ

предприятиями при транспортных перевозках в общем случае решаются в следующих условиях: многообразие типов технических средств в общем составе функционально необходимого парка техники; многообразие возможных способов конфигурации отдельных производственных или транспортных предприятий в общей системе непрерывного производства или транспортного обслуживания для решения конкретных практических задач с использованием вибрации (рис. 1). Любые системы непрерывного производства или транспортного обслуживания называются *макрообъектами* [1,2,3 и др.]. Тогда, с учетом отмеченных условий, основными требованиями к таким макрообъектам являются их надежность и эффективность. При этом эффективность макрообъектов должна достигаться за счет: оптимизации управления в задачах распределения мощностей по цепочке: технический объект - группа 1 объектов (цех) - группа 2 объектов (предприятие) и т.д.; оптимизации управления по задачам эксплуатации и ремонта.

Задачи оптимизации надежности работы и эффективности использования макрообъектов крупногабаритной оболочки из многослойных ПКМ (табл. 1) указанного выше вида могут быть положительно решены только при условии принятия и внедрения стратегии эксплуатации объектов техники по техническому состоянию. Это, в свою очередь, предполагает использование средств и методов технической диагностики, в том числе и вибрационной. [1,2,3 и др.] Таким образом, системы диагностики с использованием вибрации (рис. 1) должны разрабатываться с учетом возможности получения собственных оценок технического состояния.

Соотношения мощностей, n , m и q , характеризующих формальный дефект, позволяют разработчику диагностического обеспечения получить дополнительные обобщенные знания о текущей диагностической ситуации крупногабаритной оболочки из многослойных ПКМ (табл. 1). Число вариантов упорядочения для k величин определяется как $k!$. Поэтому число формальных вариантов соотношений для мощностей m , n , q равно 6 ($n \leq m \leq q$, $n \leq q \leq m$, $m \leq n \leq q$,

$m \leq q \leq n$, $q \leq n \leq m$, $q \leq m \leq n$). Очевидно, объективно существуют разнообразные отношения на множествах D , E и V , а также между элементами этих множеств. Возможно принять гипотезу о конечности множеств M возможных отношений. Множества M формальной зависимости от области определения разбиты на 7 классов. Определение состава каждого класса требует отдельного исследования. В табл. 2 перечислены известные отношения для каждого класса.

Большинство отношений из табл. 2 существуют объективно. Они отражают процессы функционирования $ОД$ и закономерности изменения его ТС. Некоторое подмножество отношений задается разработчиком диагностического обеспечения в результате формализации процедур поиска дефектов. Например, для одной части множества D задается отношение принадлежности к множеству $ДЭ$ (R_8 для M_{DE} описывает дефекты блоков), а другая часть дефектов может быть связана с нарушением сборочно-разборочных отношений (объективные изменения отношений R_{16} описывают дефекты связей). В $ОД$ с функциональным процессом для крупногабаритных оболочек из многослойных ПКМ (табл. 1) можно, очевидно, выделить тракты рождения вещества, энергии или информации [1,2,3 и др.].

Эти тракты естественным образом отражаются в логической $ДМ$. В зависимости от положения дефекта в определенном тракте можно на множестве D задать отношение следования. Оно существует объективно, относится к типу пространственных отношений (R_7 на D) и обладает свойствами алгебраического отношения нестрогого порядка. В логической $ДМ$ для каждого тракта с использованием вибрации (рис. 1) на множестве E также существует отношение следования. Оно задается субъективно (R_7 на E) и имеет свойства алгебраического отношения строгого порядка. Ясно, что должно существовать гомоморфное отображение $\varphi: D \rightarrow E$ отношения $\langle R_7, D \rangle$ в отношение $\langle R_7, E \rangle$ и только в таком случае логическая модель тракта будет конструктивной.

Таблица 2. Изменение класса отношений конечных множеств M в зависимости от типа отношений составляющих параметров внешних влияний

Тип отношения	Наименование отношения	Класс отношений	Обозначение
Идентифицирующие	Иметь имя	M_D, M_V, M_E	ρ
Временные	Быть одновременно	M_D, M_V, M_{DV}	R_1
	Быть раньше	M_D, M_V, M_{DV}	R_2
Причинно-следственные	Быть причиной	M_D, M_V, M_{DE}	R_3
	Быть целью	M_{DV}	R_4
	Действие-объект	M_{EV}, M_{DEV}	R_5
Пространственные	Быть в окрестности	M_D, M_E	R_6
	Находиться сзади	M_E	R_7
	Принадлежать	M_E, M_{DE}, M_{EV}	R_8
Динамические	Двигаться к	M_E	R_9
Прагматические	Служить для	M_{DE}, M_{DV}, M_{EV}	R_{10}
	Быть препятствием для	M_N, M_{DX}	R_{11}
	Обладать состоянием	M_D, M_V, M_E	R_{12}
	Участвовать в процессе	M_E, M_V, M_{DV}, M_{EV}	R_{13}
Классификационные	Быть элементом класса	Все классы	R_{14}
	Быть эквивалентными	M_V, M_{DV}, M_{EV}	R_{15}
Сборочно-разборочные	Крепиться к, связан с	M_E	R_{16}

Учет всех перечисленных отношений возможен в рамках такой конструкции крупногабаритной оболочки из многослойных ПКМ (табл. 1), которая сочетает достоинства формальных и неформальных методов [1,2,3 и др.]. Один из перспективных вариантов такой конструкции - это диагностические эксплуатационные системы с использованием вибрации (рис. 1).

Анализ перечисленных выше условий решения задач технической диагностики крупногабаритных оболочек из многослойных ПКМ (табл. 1) позволяет сделать вывод о том, что методологическая часть удовлетворительного решения задач такого класса может быть получена только при использовании адаптивных методов. Другими словами, системы технической диагностики с использованием вибрации (рис. 1) должны быть адаптивными. При этом адаптивность рассматривается как средство снятия неопределенностей различного вида, которые имеют место в сформулированных выше условиях [1,2,3 и др.]. Последовательно рассматриваются ключевые моменты методологии построения именно адаптивных систем

технической, в частности вибрационной, диагностики.

Библиографический список

1. Лазерно-вибродиагностический способ выявления дефектов клееных оболочек [Текст] / В.И. Мордасов, А.Д. Сторож, Н.Е. Гребнев [и др.] // Проблемы и перспективы развития двигателестроения: материалы междунар. научн. – техн. конф. – Самара, 2009. – С. 43-48.
2. Толстов, А.Г. Вибрационная диагностика. Системы базового машиностроения [Текст] / А.Г. Толстов. – М.: ИРЦ Газпром, 2003. – 66 с.
3. Воронин, В.В. Диагностирование технических объектов [Текст] / В.В. Воронин. – Хабаровск: ХГТУ, 2002. – 188 с.
4. Розенбаум, А.Н. Прогнозирование эволюции технических систем в условиях неопределённости исходных данных. Вероятностно-статистические методы исследования надёжности машин и аппаратуры [Текст] / А.Н. Розенбаум, И.И. Кислова – Киев: Знание, 1990. – 20 с.

INVESTIGATION OF INTERRELATION OF GLUING DESIGNS DEFECTS FROM POLYMERIC COMPOSITE MATERIALS

© 2011 V. I. Mordasov¹, A. D. Storozh², N. E. Grebnev², D. N. Grebnev², O. V. Shulepova²

¹ Samara State Aerospace University named after academician S.P. Korolyov
(National Research University)

²Samara space centre "TsKB-Progress"

Defect is considered as set of dependences on other defects. On degradation processes accumulate the subjective reasons (infringements of service conditions, inadmissible loadings, use of inadmissible operational materials, etc.). A difficult component is the complex reason in the form of operational defect: the constructive, technological and operational factor.

Object of diagnosis, defect, load, operating conditions, the diagnostic model, area of defects, direct measures.

Информация об авторах

Мордасов Василий Иванович, доктор технических наук, профессор кафедры «Автоматические системы энергетических установок», Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет). Тел.: (846) 267-46-65. Область научных интересов: лазерные информационно-измерительные системы и исследование взаимодействия высокоэнергетических потоков излучения с твердыми веществами.

Сторож Александр Дмитриевич, первый заместитель генерального конструктора – первый заместитель начальника Ракетно-космического центра «ЦСКБ-Прогресс». E-mail: storogh.ad@gmail.com. Область научных интересов: создание, контроль и испытания космических летательных аппаратов.

Гребнев Николай Егорович, начальник отделения Ракетно-космического центра «ЦСКБ-Прогресс». Тел.: (846) 228-93-26. Область научных интересов: создание конструкции головного обтекателя ракеты-носителя и методы его дефектоскопии.

Гребнев Дмитрий Николаевич, заместитель начальника отделения Ракетно-космического центра «ЦСКБ-Прогресс». Тел.: (846) 992-64-82. Область научных интересов: создание конструкции головного обтекателя ракеты-носителя и методы его дефектоскопии.

Шулепова Ольга Викторовна, аспирант кафедры «Автоматические системы энергетических установок», Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет). Тел.: (846) 267-46-65. Область научных интересов: лазерно-вибрационные методы диагностики оболочек.

Mordasov Vasily Ivanovich, doctor of technical sciences, professor of Automatic systems of energy devices Department, Samara State Aerospace University named after academician S.P. Korolyov (National Research University). Phone: (846) 267-46-65. Area of research: laser information and measurement systems, creation and investigation of high-energy flows and hard materials interaction.

Storozh Alexander Dmitrievich, First Deputy General Designer – First Deputy Head of TsSKB with Samara space centre "TsKB-Progress". E-mail: storogh.ad@gmail.com. Area of research: spacecraft construction, control and testing.

Grebnev Nikolay Egorovich, The head of department of TsKB is with Samara space centre "TsKB-Progress". Phone: (846) 228-93-26. Area of research: rocket fairing construction and defectoscopy.

Grebnev Dmitriy Nikolaevich, The deputy head of department of TsKB is with Samara space centre "TsKB-Progress". Phone: (846) 992-64-82. Area of research: rocket fairing construction and defectoscopy.

Shulepova Olga Viktorovna, The postgraduate, Samara State Aerospace University named after academician S.P. Korolyov (National Research University). Phone: (846) 267-46-65. Area of research: rocket fairing construction and defectoscopy.