

УДК 621.376; 681.5; 528.5

ЛАЗЕРНО-ВИБРАЦИОННЫЙ СПОСОБ КОНТРОЛЯ 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)

²Государственный научно-производственный ракетно-космический центр «ЦСКБ-Прогресс», г. Самара

Рассматривается лазерно-вибрационный способ выявления дефектов крупноразмерных оболочек из композиционных материалов. Предельная чувствительность способа ограничена базой лазерного преобразователя. Проводится распознавание расслоения монолитных деталей, непрочлея в слоистых сотовых и других конструкциях, подмятия сотового заполнителя.

Объект диагностирования, крупноразмерные оболочки, дефекты, распознавание, диагностическая модель, упругое соударение, сотовый наполнитель.

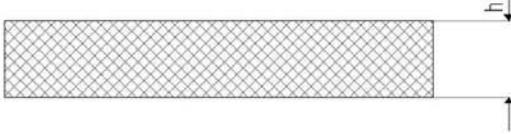
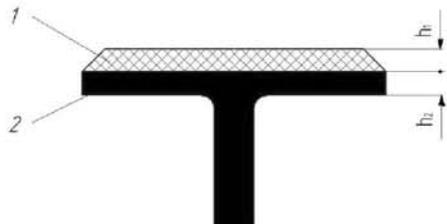
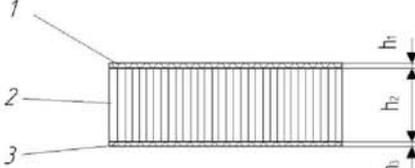
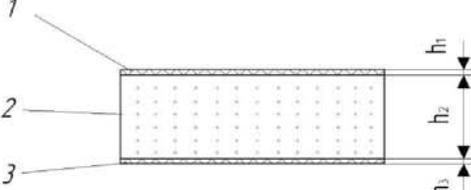
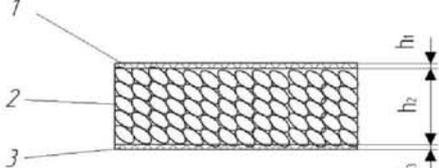
Построение формальной динамической модели (ДМ) - процесс неоднозначный. Несмотря на объективный характер модели, в деятельности исследователя при дефектоскопии крупногабаритных оболочек из полимерных композиционных материалов (ПКМ) очень много субъективного. Это, прежде всего, уровень детализации области дефектов (ОД) (табл. 1). Диапазон "степеней свободы" при построении динамической модели ДМ в основном ограничивается перечнем типовых динамических звеньев, а при построении логической модели - принципом функциональной близости, заключающимся в том, что на любом уровне деление ОД на части каждый диагностический элемент (ДЭ) должен иметь только один выход [1,2,3 и др.]. Диапазон варьирования диагностической структурой всегда имеет два предельных случая. В первом случае, когда установлен уровень деления ОД в виде непрочлея, поверхностной трещины, смятия сотового заполнителя и растрескивания обшивки на простейшие неделимые части, ДЭ модели должны отражать эти неделимые части (детали). Во втором, противоположном случае, когда ОД в виде непрочлея, поверхностной трещины, смятия сотового заполнителя и растрескивания обшивки физически или директивно вообще не делится на части, в качестве единственного ДЭ модели рассматривается сам объект. Внутри этого диапазона ДЭ всегда отражают делимые части объекта.

При других крайних случаях, если фиксированный ДЭ соответствует нескольким не связанным между собой частям, то

для дефектоскопии крупногабаритных оболочек из многослойных ПКМ требуется проверить все эти части. Это означает, что число элементных показателей (ЭП) должно быть, по крайней мере, равно числу частей, описываемых данным ДЭ и не имеющих между собой функциональных связей. Число необходимых ЭП данного ДЭ может быть сокращено при наличии таких связей. Когда все части внутри ДЭ связаны между собой и их функции генерируют один внешний выход по схеме конъюнкции, тогда состояние данного ДЭ может быть оценено одним ЭП сигнала на этом выходе. Именно эти крайности достаточно полно характеризуют принцип функциональной близости: при определении внутреннего содержания

ДЭ следует собирать в нем части, работающие на формирование общего сигнала на его единственном выходе. Использование данного принципа в логической ДМ (рис. 1) всегда позволяет найти такую условную или безусловную последовательность эксплуатационных дефектов (ЭД), которая гарантирует фиксацию всех логически неисправных ДЭ. Кроме того, логическая ДМ - это идеальный аппарат для построения систем функционального диагностирования распределенных ОД в виде непрочлея, поверхностной трещины, смятия сотового заполнителя и растрескивания обшивки. Здесь каждый ДЭ взаимно однозначно моделирует пространственно обособленную часть ОД и тем самым обеспечивается изоморфизм ОД и его ДМ [1,2,3 и др.].

Таблица 1. Типы контролируемых конструкций крупногабаритных оболочек из многослойных полимерных композиционных материалов

Схематическое изображение контролируемой конструкции	Вид соединения, материал элементов конструкций
	<p>Монолитная конструкция из ПКМ (угле-, боро-, органо-, стеклопластик, текстолит и т.п.)</p>
	<p>Клеевое: 1 – неметаллический слой (ПКМ, теплозащитный материал и др.); 2 – ПКМ</p>
	<p>Клеевое: 1 – ПКМ; 2 – металл</p>
	<p>Клеевое: 1, 2, 3 – армированный или неармированный пластик</p>
	<p>Клеевое: 1, 3 – обшивка из ПКМ; 2 – соты из полиамидной бумаги, стеклопластика или металлические с компаундом</p>
	<p>Клеевое: 1 – ПКМ; 2 – пенопласт; 3 – металл</p>
	<p>Клеевое: 1, 3 – стеклопластик; 2 – трикотаж (органотрикотаж)</p>

Несоблюдение принципа функциональной близости (ДЭ имеют более одного выхода) может быть связано с так называемым "поперечным нарезанием" функциональных схем, когда в ДЭ объединяются участки нескольких параллельно изображенных на схемах трактов. В результате этого возникает проблема тестового диагностиро-

вания и дефектоскопии крупногабаритных оболочек из многослойных ПКМ. Для каждого внутреннего ДЭ (элемент, у которого входы соединены хотя бы с одним выходом других ДЭ) и каждого недопустимого входного набора этого ДЭ должны быть поставлены в соответствие минимум два его выходных набора: один - для исправного со-

стояния и один или несколько - для неисправных состояний. При этом уровень сложности решения задачи поиска существенно возрастает [1,2,3 и др.]. Логическая ДМ (рис. 1) не только отражает определенную диагностическую структуру ОД в виде непрочлея, поверхностной трещины, смятия сотового заполнителя и растрескивания обшивки, но может дополнительно включать следующие сведения: перечень точек подачи рабочих и тестовых воздействий; перечень точек про-

верки диагностических показателей (ДП) с описанием способов их оценки и приближенными данными о затратах времени на оценку (контрольные точки); перечень допустимых значений ДП; описание возможностей пробных замещений ДЭ и возможностей появления различных дефектов одного и того же ДЭ (обрыв, перегрузка, расстройка и др.). Таким образом, она в достаточной мере описывает знания второго и третьего видов.

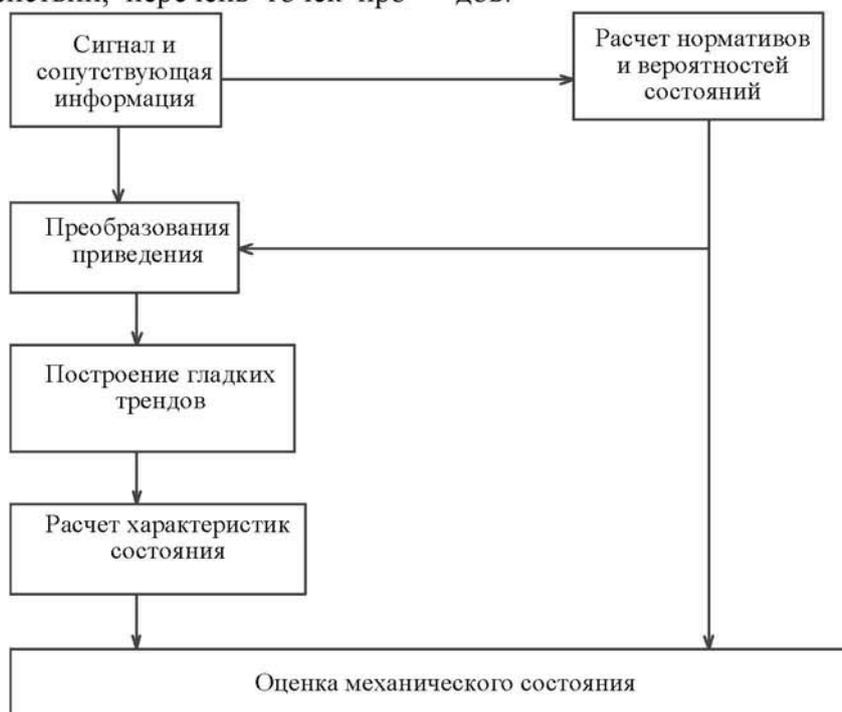


Рис. 1. Общая диагностическая модель с использованием дефектоскопии крупногабаритных оболочек из многослойных ПКМ

Логическая ДМ (рис. 1) участвует в диагностическом эксперименте - она служит средством для разработки оптимального алгоритма поиска дефектов. Поэтому для нее должно быть определено понятие "модели дефекта" [1,2,3 и др.]. Моделью дефекта называют формализованное представление факта проявления физического дефекта в виде неправильных значений сигналов на входах или выходах ДЭ. Обе разновидности структурных ДМ дефектоскопии крупногабаритных оболочек из многослойных ПКМ имеют существенный недостаток - объем знаний первого вида в них существенно ограничен: логическая модель описывает только дефекты, нарушающие логику функционального процесса (их называют правильные неисправности), а динамическая - динамику этого процесса. Интересный опыт в данном

отношении имеет теория надежности [2,3,4], ее структурные модели, для расчета количественных показателей надежности включают только такие элементы, возможность отказа которых по каким-либо причинам и для любых последствий в заданном временном интервале не вызывает сомнений. Иными словами, уровень детализации элементов структурной модели объекта назначается исходя из статических данных по интенсивности отказов его физических элементов. Это означает, что учитываются возможные дефекты этапа эксплуатации.

Комбинационные и последовательные схемы дефектоскопии крупногабаритных оболочек из многослойных ПКМ, являясь специфической, структурной диагностической моделью цифровых устройств [1,2,3 и др.], также требуют задания модели дефек-

тов. Их специфика в классе логических моделей определяется главным образом многообразием входных наборов в виде непрочлея, поверхностной трещины, смятия сотового заполнителя и растрескивания обшивки. Часть этих наборов используют в качестве контрольных или диагностических тестов. Эти модели всегда конструктивны при решении задач синтеза схем функционального контура и определения контрольных тестов. Задача же поиска дефектов в виде непрочлея, поверхностной трещины, смятия сотового заполнителя и растрескивания обшивки (определение диагностических тестов) ставит проблему изоморфизма физической структуры *ОД* в виде непрочлея, поверхностной трещины, смятия сотового заполнителя и растрескивания обшивки и диагностические фигуры его модели.

Для выявления дефектов многослойных сотовых крупногабаритных оболочек из ПКМ эффективно использовать способы лазерной вибродиагностики.

Форма диагностической информации в виде непрочлея, поверхностной трещины, смятия сотового заполнителя и растрескивания обшивки, заключенной в колебательном процессе, независимо от природы его возникновения и способа регистрации чрезвычайно многообразна. Широкий частотный и динамический диапазоны, малая инерционность, большая скорость распространения колебаний обуславливают быструю реакцию вибрационного сигнала на изменение состояния объекта. Основной отличительной особенностью лазерной вибродиагностики клееных конструкций из ПКМ является использование в качестве источника информации не статических параметров, характеризующих состояние изделия, а динамических, вызывающих появление и распространение акустических волн как в самом изделии, так и в окружающей его среде [1,2,3 и др.].

При построении систем контроля дефектов в виде непрочлея, поверхностной трещины, смятия сотового заполнителя и растрескивания обшивки многослойных сотовых оболочек крупногабаритных изделий сложной геометрической формы эффективно применять лазерный способ с одновременной вибрацией конструкции. Под воздействием вибрации в оболочке возникает колебательный процесс *ДМ*, несущий в себе ин-

формацию о состоянии клееных конструкций из полимерных композиционных материалов.

При построении систем контроля *ОД* многослойных сотовых оболочек крупногабаритных изделий сложной формы применяется лазерно-виброакустический способ дефектоскопии клееных конструкций из ПКМ. В процессе диагностики регистрируется *ЭП* (интерференционное изображение отраженного сигнала с кольцевой структурой, имеющее максимум интенсивности излучения в центре). При отсутствии дефекта клееных конструкций из ПКМ характерно изображение в виде концентрических окружностей с кольцами равной толщины. При наличии дефекта *ЭП* имеет вид интерференционной картины отраженного сигнала вытянутой формы или имеются смещения и разрывы интерференционных полос, а также смещение максимума интенсивности.

Для моделирования процесса лазерной вибрационной диагностики дефектов в виде непрочлея, поверхностной трещины, смятия сотового заполнителя и растрескивания обшивки рассматривается контактная задача упругого соударения. Твердое тело, имеющее в точке контакта главные радиусы кривизны R_{1m} и R_{1M} , соударяется с силой P в образец, имеющий главные радиусы кривизны R_{2m} и R_{2M} , и при взаимодействии возникает эллиптическая площадка с большой и малой полуосями [5].

$$a = m \left[\frac{3\pi}{2} P(k_1 + k_2) C_R \right]^{1/3}, \quad (1)$$

$$b = r \left[\frac{3\pi}{2} P(k_1 + k_2) C_R \right]^{1/3}, \quad (2)$$

где C_R - величина, учитывающая влияние кривизны,

$$C_R = \frac{1}{R_{1m}} + \frac{1}{R_{2m}} + \frac{1}{R_{1M}} + \frac{1}{R_{2M}}, \quad (3)$$

k_1, k_2 - подлежащие определению параметры, учитывающие упругие свойства ударника и мишени; m, r, s - параметры, зависящие от $R_{1m}, R_{2m}, R_{1M}, R_{2M}$.

Типичные результаты расчетов, иллюстрирующие влияние толщины пластины-мишени h , скорости удара v и граничных условий для пластины на динамическую силу P , показаны на рис. 2.

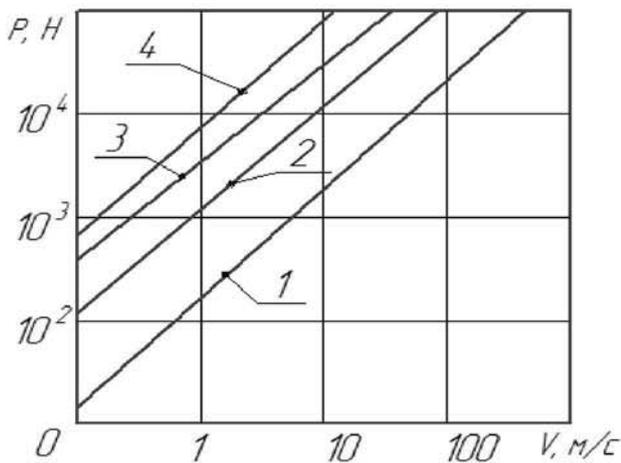


Рис. 2. Величина динамической силы (P) в зависимости от скорости удара (V) и толщины (h) композитной мишени со свободно опертой границей:

1- $h=1,59$ мм; 2- $h=3,18$ мм;
3- $h=6,35$ мм; 4- $h=12,7$ мм

Для оценки расчетных и экспериментальных значений продолжительности удара выполнены измерения продолжительности удара t_0 при соударении стальных сфер с алюминиевыми и композитными пластинами. При измерении продолжительности t_0 электрическая цепь замыкается ударником на время первого контакта между ударником и мишенью до момента его отскока. Продолжительность этого интервала измерялась осциллографом. На рис. 3 измеренные значения продолжительности удара сравниваются с рассчитанными.

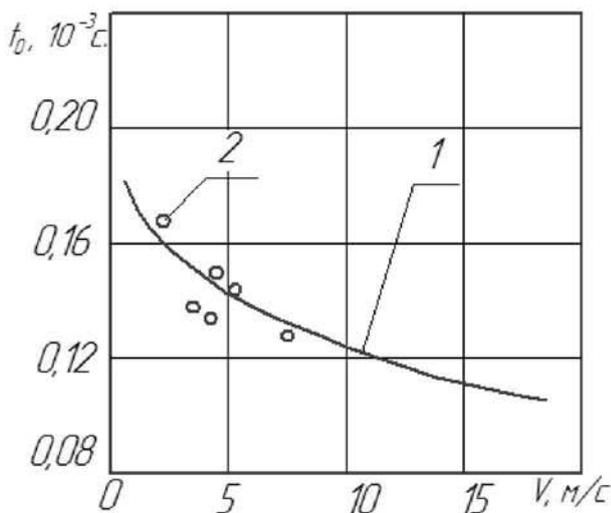


Рис. 3. Сравнение расчетной и экспериментальной зависимостей продолжительности контакта от скорости удара при соударении алюминиевой мишени со стальной сферой:

1- решение уравнения (18); 2- экспериментальные данные

К основным общим требованиям к системам технической диагностики клееных конструкций из ПКМ следует отнести:

- простоту в управлении при практической эксплуатации в условиях сложности обработки диагностической информации ЭП, иерархическую организацию накопления ЭД, хранения и обработки диагностической информации разных физических представлений в разных информационных окнах;

- способность к накоплению и хранению сведений ОД, а также измерительной информации о режимных параметрах ДМ, возможность ретроспективного анализа значений измеряемых величин ЭДД, а также расчетных их параметров, определяющих оценку технического состояния и надежность.

Максимальная глубина поиска дефектов в виде непроклея, поверхностной трещины, смятия сотового заполнителя и растрескивания обшивки соответствует поиску до элемента возможного множества дефектов (ВМД), при этом максимальное число классов разбиения с учетом кратности дефектов определяется как $m=2^n$, где n - число возможных одиночных дефектов. Все промежуточные значения числа классов разбиения находятся внутри отмеченного диапазона (рис. 4). Каждое разбиение фактически определяет отношение эквивалентности на ВМД. Элементы классов эквивалентности дефектоскопии крупногабаритных оболочек из многослойных ПКМ либо нет смысла различать, либо они неразличимы в рамках существующего диагностического обеспечения [2,3,4].

Задание глубины поиска дефектов в виде непроклея, поверхностной трещины, смятия сотового заполнителя и растрескивания обшивки через разбиение ВМД не предполагает наличия соответствия между классами эквивалентности и конструктивными составными частями ОД. Поэтому такой подход, имея высокую степень универсальности, неудобен в практических приложениях. В рамках структурного подхода глубину поиска при дефектоскопии крупногабаритных оболочек из многослойных ПКМ можно задавать через разбиение множества конструктивных частей ОД на непересекающиеся подмножества (рис. 4). При этом, как правило, в каждое подмножество включают такие

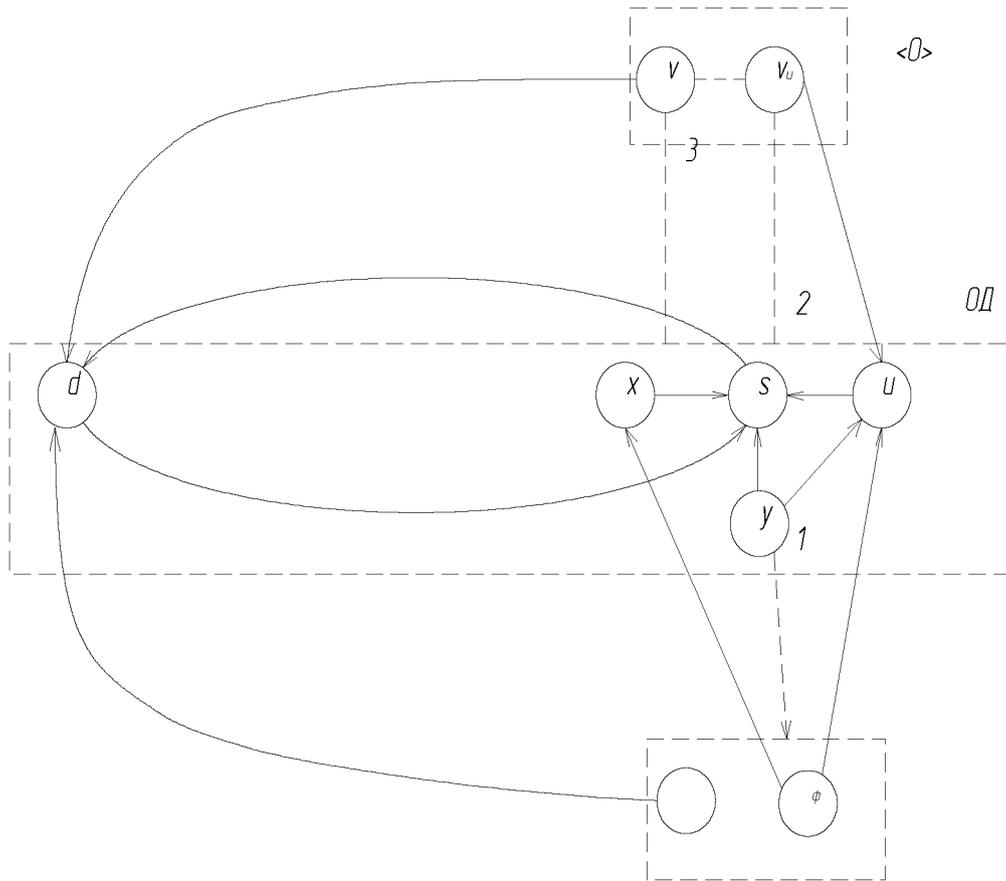


Рис. 4. Граф причинно-следственных связей между переменными ОД:

1 – область проведения проверок для обеспечения безопасности эксплуатации изделия; 2 – область управления ремонтными работами; 3 – область оптимизации состава; длительности и стоимости для каждого вида ремонтных работ; V_0 – множество возможных проверок; d – множество возможных дефектов; x, S, u, y – текущие производственные проверки; ω_0 – множество проводимых проверок качества изделия

части в виде непроклея, поверхностной трещины, смятия сотового заполнителя и растрескивания обшивки, которые в совокупности образуют конструктивно законченные блоки ОД. Их называют сменными блоками. Если каждому сменному блоку ОД взаимно однозначно соответствуют ДЭ его структурной ДМ, то структуры объекта и его модели будут изоморфны. Следовательно, исследование возможностей по назначению глубины поиска дефектов в виде непроклея, поверхностной трещины, смятия сотового заполнителя и растрескивания обшивки можно вести и в рамках ДМ [2,3,4]. Целесообразно обобщить оба подхода. Для этого, во-первых, конструктивный принцип деления ОД логично дополнить данными об особенностях дефектоскопии крупногабаритных оболочек из многослойных ПКМ. Другими словами, следует учесть сложившуюся технологию их ремонта. Во-вторых, сама технология ремонта для конкретных производственных условий имеет свои особенности, а именно: она объективно отражает ВМД. Поэтому нет

смысла выделять в отдельные ДЭ "абсолютно" надежные части ОД крупногабаритных оболочек из многослойных ПКМ.

Библиографический список

1. Дефектоскопия клееных оболочек лазерно-вибродиагностическим методом [Текст] / В.И. Мордасов, А.Д. Сторож, Н.Е. Гребнев [и др.] // Изв. Самар. науч. центра. – Самара, 2009. – С. 46-53.
2. Абрамов, О.В. Прогнозирование состояния технических систем [Текст]/ О.В. Абрамов, А.Н. Розенбаум. – М.: Наука, 1990. – 125 с.
3. Воронин, В.В. Диагностирование технических объектов [Текст] / В.В. Воронин. – Хабаровск: ХГТУ, 2002. – 188 с.
4. Толстов, А.Г. Информатика систем вибрационной диагностики. Ч. 1. Газовая промышленность [Текст] / А.Г. Толстов. – М.: ИРЦ Газпром, 1997. – 67 с.
5. Безухов, Н.И. Основы теории упругости, пластичности и ползучести [Текст]/ Н.И. Безухов. – М.: Высшая школа, 1968. – 572 с.

LASER-VIBRATING METHOD FOR TESTING OF GLUING DESIGNS FROM POLY-MERIC COMPOSITE MATERIALS

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

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

²Samara space centre "TsKB-Progress"

The laser-vibrating method of defects detecting in large sized shells from composite materials is considered. The ultimate sensitivity of a method was limited by base of the laser transducer. Recognition of monolithic details stratification, non-gluing in layered cellular and other designs, and cellular filler crushing was carried out.

Diagnosing object, large size shell, defects, recognition, diagnostic model, elastic collision, honeycomb.

Информация об авторах

Мордасов Василий Иванович, доктор технических наук, профессор кафедры автоматических систем 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: storozh.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 автоматических систем 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, The 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 Samara space centre "TsKB-Progress". E-mail: storozh.ad@gmail.com. Area of research: spacecraft construction, control and testing.

Grebnev Nikolay Egorovich, The head of department of 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 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.