

**ЛАЗЕРНО-ВИБРОДИАГНОСТИЧЕСКИЙ СПОСОБ ВЫЯВЛЕНИЯ ДЕФЕКТОВ КЛЕЕННЫХ ОБОЛОЧЕК**© 2009 В. И. Мордасов<sup>1</sup>, А. Д. Сторож<sup>2</sup>, Н. Е. Гребнев<sup>2</sup>, О. В. Шулепова<sup>1</sup>, Е. Г. Иванова<sup>1</sup><sup>1</sup>Самарский государственный аэрокосмический университет<sup>2</sup>Государственный научно-производственный ракетно-космический центр «ЦСКБ-Прогресс»

В работе показано, что для выявления дефектов многослойных сотовых крупногабаритных оболочек эффективно использовать способы лазерной вибродиагностики. Наличие дефекта в виде непрокля отражается распределением интенсивности излучения вытянутой формы. Погрешность способа существенно увеличивается с уменьшением длины пробега лазерного луча, величины амплитуды колебания внешнего слоя оболочки и величины разрешения телекамеры.

*Многослойные сотовые конструкции, дефекты, лазерная вибродиагностика*

Предъявление жестких требований к качеству и надежности конструкций изделий машиностроения вызывает необходимость создания новых способов и испытательного оборудования для обнаружения дефектов поверхностного слоя изделий. В последнее время широкое применение получили многослойные сотовые крупногабаритные оболочки. Установлено, что большинство аварийных ситуаций обусловлено скрытыми дефектами. Поиск и выявление скрытых дефектов усложняются ограниченными возможностями традиционных механических и оптических методов (невозможность проведения исследований в условиях эксплуатации без остановки и разборки изделий, низкая чувствительность, сложность определения вида повреждения и др.).

При отыскании дефектов внутренней структуры материалов изделий используются различные методы – исследование тепловых потоков, распространяющихся в образце при нагреве лазерным источником излучения, исследование акустической эмиссии дефектов на «просвет» и так далее. Но при выявлении дефектов конструкции, имеющих большие габаритные размеры, все эти методы трудно реализуются. Поэтому используют методы лазерной вибродиагностики, которая позволяет не только обнаружить дефекты, но и более детально их исследовать [3,4].

Основной отличительной особенностью лазерной вибродиагностики является использование в качестве источника инфор-

мации не статических параметров, характеризующих состояние изделия (температура, давления и т.п.), а динамических, вызывающих появление и распространение акустических волн как в самом изделии, так и в окружающей его среде. Форма диагностической информации, 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.

При построении систем контроля непрокля многослойных сотовых оболочек крупногабаритных изделий сложной геометрической формы эффективно применять лазерный способ с одновременной вибрацией конструкции. Под воздействием вибрации в оболочке возникает колебательный процесс, несущий в себе информацию о состоянии конструкции.

Для выявления дефектов многослойных сотовых крупногабаритных оболочек эффективно использовать способы лазерной вибродиагностики. Наличие дефекта в виде непрокля отражается распределением интенсивности излучения вытянутой формы. Погрешность способа существенно увеличивается с уменьшением длины пробега лазерного луча, величины амплитуды колебания внешнего слоя оболочки и величины разрешения телекамеры.

Использование лазерных измерительных систем для выявления поверхностных дефектов в виде трещин, забоин, отслоения покрытий, возникающих в процессе эксплуатации объектов, позволяет повысить показатели надежности их элементов, увеличить гарантируемый срок работы с регламентируемой безопасностью эксплуатируемых изделий, а также значительно снизить себестоимость диагностики [1,2]. Их преимущества – бесконтактность, высокая информативность, быстрое действие, возможность работы в реальном масштабе времени. Подобные средства позволяют контролировать в процессе изготовления и эксплуатации изделий геометрические параметры их элементов конструкции, размеры, форму, расположение и др. Сканирование лазерного излучения и визуализация изображений имеют превосходства перед другими способами контроля. В связи с этим данное направление исследования по совершенствованию подобных лазерных измерительных систем является своевременным и актуальным.

Выявлено, что основной характеристикой дефекта в виде трещин является параметр, который численно равен числу переотражений. Определены его характерные значения. Выявлена периодическая зависимость величины отраженного сигнала в центре трещины от угла раскрытия трещины и числа переотражений  $n$ . Доказана необходимость сканирования поверхности при двух различных углах падения лазерного излучения, при этом величины  $n_1$  и  $n_2$  однозначно определяют геометрию повреждения.

Система выявления поверхностных повреждений многослойных клееных конструкций в виде непроклея состоит из источника лазерного излучения и приемника излучения, телекамеры, оптоволоконного кабеля, которое изолирует лазерное излучение от обслуживающего персонала и дает возможность передачи излучения от стационарного источника на большие расстояния без фокусировки. В данной схеме используются вибраторы колебаний: один с наружной стороны исследуемой поверхности в зоне установки отражающего зеркала, второй с внутренней стороны, обеспечивающий колебания всех участков конструкции.

При построении систем контроля непроклея многослойных сотовых оболочек крупногабаритных изделий сложной формы применяется лазерно-виброакустический способ дефектоскопии. В процессе диагностики регистрируется интерференционное изображение отраженного сигнала с кольцевой структурой, имеющее максимум интенсивности излучения в центре. При отсутствии дефекта характерно изображение в виде концентрических окружностей с кольцами равной толщины. При наличии дефекта в виде непроклея интерференционная картина отраженного сигнала принимает вытянутую форму или имеются смещения и разрывы интерференционных полос, а также смещение максимума интенсивности.

Используемый метод диагностики характеризуется рядом преимуществ по сравнению с традиционными методиками: является бесконтактным методом диагностики; в установке используется оптоволокно, позволяющее передавать лазерное излучение на расстояние до сотен метров и защищающее персонал от лазерного излучения; возможность получения обобщенного сигнала, аналогичного сигналам от нескольких независимых датчиков; автоматизированная регистрация и обработка изображения осуществляется с помощью персонального компьютера; возможность проведения диагностики в реальном масштабе времени (в течение 1...2 с).

Ранее разработанный стенд [1] для обнаружения поверхностных дефектов по результатам измерения интенсивности отраженного лазерного излучения при сканировании по поверхности детали включает в свой состав гелий-неоновый лазер (ЛГИ-224-1,  $\lambda=0,63$  мкм), стеклянную пластину для формирования опорного сигнала, два оптических ваттметра поглощаемой мощности ОМЗ-65 для регистрации сигналов опорного и измерительного каналов, плоские зеркала и собирающие линзы для направления излучения. Как показали данные исследования, резкое снижение интенсивности отраженного излучения на величину до 50...98% свидетельствует о наличии царапин, трещин и повреждения покрытий. Размеры дефекта определяются разностью координат, соответствующих резкому снижению сигнала и его возрастанию до прежнего уровня. Вероятность распознавания дефек-

тов зависит от соотношения размеров пятна излучения на поверхности и дефекта, а также шага сканирования и размера дефекта. Распознавание дефекта невозможно, если его площадь значительно меньше площади сканирующей аппаратуры излучения и шаг сканирования превышает размеры дефекта.

В результате обработки параметров снятого сигнала получаем световое пятно эллиптической формы с наклоненными оптическими осями с распределением интенсивности, в центре – максимум интенсивности. При отсутствии дефекта структура представляет собой равномерное распределение интенсивности в сечении пучка лазерного излучения правильной кольцевой формы. При наличии дефекта в виде непрочлея распределение интенсивности принимает вытянутую форму, с нарушенной структурой со смещенным максимумом интенсивности.

На рис.1 приводится схема испытательного стенда. Используется лазер ЛГН 224-1 мощностью излучения 8 мВт, расходимостью светового потока 0,05 рад, длиной волны излучения 0,56 мкм. Для передачи излучения в рабочую зону применяется оптоволоконно. Обработка информации осуществляется телекамерой Watec с объективом MC SONNAR3.5/135 CARL ZEISS JENA DDR, вычислительным блоком ПК с использованием программы для обработки данных AverTV. Вибратор имеет частоту генерации 50 Гц с амплитудой колебаний 0,01 ... 0,5 мм.

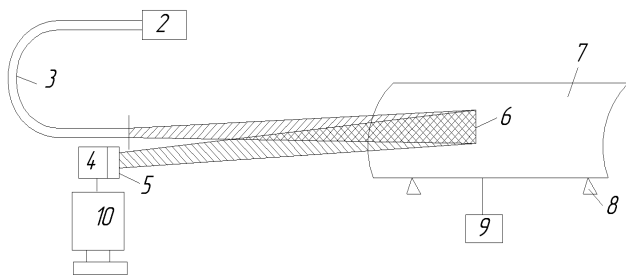


Рис.1. Схема испытательного стенда для выявления внутренних дефектов многослойных сотовых конструкций: 1 – лазерное излучение; 2 – источник излучения; 3 – оптоволоконно, 4 – телекамера, 5 – объектив телекамеры, 6 – зеркало, 7 – образец крупногабаритной оболочки, 8, 9 – вибраторы, 10 – вычислительный блок

Работа стенда осуществляется следующим образом. Поток лазерного излучения 1 от стационарного источника 2 с помощью оптоволоконна 3 передается на оптическую го-

ловку 6, закрепленную на исследуемой поверхности клееной многослойной сотовой крупногабаритной оболочки 7. Оболочка устанавливается на неподвижные опоры 8. Отраженное излучение принимается объективом с экраном 5 телекамеры 4 и обрабатывается в вычислительном блоке 10. Вибратор колебаний 9, расположенный с внутренней стороны, обеспечивает колебания исследуемой оболочки. Оптическая головка имеет основание, рычажную систему, приводимую в колебание бойком. На рычажной системе установлено плоское зеркало. Перед началом диагностики оболочка делится на несколько квадратов определенных размеров, в пределах которых располагается оптическая головка, перемещаемая в процессе измерений по ее поверхности.

Система выявления дефектов многослойной клееной конструкции, состоящая из источника и приемника излучения в виде телекамеры, отличается тем, что введено оптоволоконно, которое изолирует лазерное излучение от обслуживающего персонала и дает возможность, с использованием оптической линзы, передачи излучения от стационарного источника на большие расстояния без фокусировки, так как торец волокна обработан в виде сферической поверхности.

В результате проведенных исследований получены распределения интенсивности в виде пятен с кольцевой структурой в случае бездефектной поверхности (рис. 2а) и с кольцевой структурой при наличии дефекта в виде непрочлея (рис. 2б).

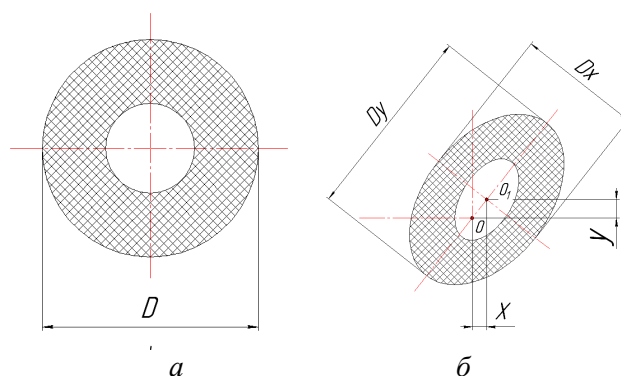


Рис. 2. Расположение светового пятна на экране при колебательном воздействии на многослойную клееную оболочку без наличия дефекта (а) и при колебательном воздействии на многослойную клееную оболочку в случае наличия дефекта (б);  $x$ ,  $y$  – величины смещения центральной области

Как видно из рис.2, при наличии дефекта в виде непроклея несущего слоя многослойной сотовой крупногабаритной оболочки распределение интенсивности излучения имеет смещение максимума, а пятно эллиптическую форму.

Схема определения погрешности лазерного вибрационного способа выявления дефектов многослойной сотовой крупногабаритной оболочки и схема для определения перемещения зеркала показаны на рис. 3.

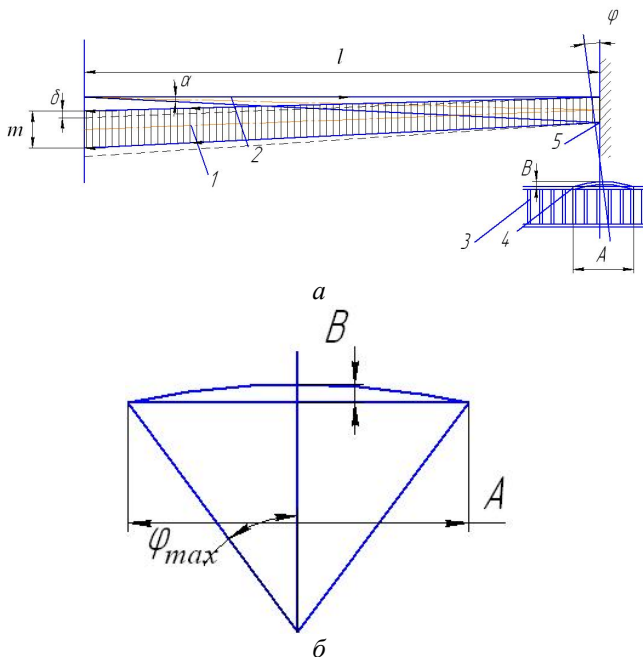


Рис. 3. Схема определения погрешности лазерного способа выявления поверхностных повреждений многослойных клееных конструкций (а) и схема для определения перемещения зеркала (б):

- 1 – отраженный лазерный луч;
- 2 – падающий лазерный луч;
- 3 – многослойная клееная оболочка;
- 4 – участок непроклея внешней тонкостенной пластины; 5 – плоское отражающее зеркало

Здесь введены обозначения:  $l$  – длина пробега лазерного луча;  $\varphi$  – угол поворота зеркала;  $\alpha$  – расходимость лазерного потока;  $A$  – длина участка непроклея;  $B$  – величина амплитуды колебания внешней тонкостенной пластины;  $m$  – диаметр лазерного пятна на внешней линзе объектива телевизионной камеры;  $\delta$  – величина смещения лазерного пятна;  $\beta$  – величина разрешения телекамеры. Величина смещения лазерного пятна определяется следующей зависимостью:

$$\delta = \frac{4(l + \Delta l)(A + \Delta A)(B + \Delta B)}{(A + \Delta A)^2 - 4(B + \Delta B)^2} \quad (1)$$

Для случая изменения величин основных параметров изменяются в пределах:  $l = 2000 \dots 3000$  мм,  $\Delta l = 5$  мм;  $A = 20 \dots 50$  мм,  $\Delta A = 5$  мм;  $B = 0,01 \dots 0,5$  мм,  $\Delta B = 0,01$  мм;  $\beta = 0,01$  мм;  $\delta = 0,01$  мм. Зависимости изменения величины смещения лазерного пятна при выявлении дефектов многослойных крупногабаритных оболочек представлены на рис. 4. Погрешность способа выявления дефектов многослойной сотовой крупногабаритной оболочки  $\Delta$  существенно увеличивается с возрастанием длины участка непроклея  $A$  и величины разрешения телекамеры  $\beta$ , с уменьшением длины пробега лазерного луча  $l$ , величины амплитуды колебания внешней пластины клееной конструкции  $B$ .

Выявление дефектов многослойных сотовых крупногабаритных оболочек проводилось на предложенном испытательном стенде (рис.1). В качестве образцов использовались цилиндрические оболочки размером 1500, 1200 мм с радиусом кривизны 2000 мм. Материал оболочки: трехслойный композиционный материал толщиной 25 мм с несущим слоями из углепластика на связующей их эпоксидной смоле. Заполнителем являются алюминиевые сотопанели с величиной грани 2,5 мм. Направление потоков лазерного излучения совпадало с волновым вектором вибрации. Оптическая головка устанавливалась на внешней поверхности оболочки в центре участков непроклея размерами  $A = 35 \times 35$  мм и  $A = 50 \times 50$  мм. Длина хода лучей составляла величину  $L = 2250 \pm 10$  мм и  $L = 2750 \pm 10$  мм.

Величина смещения светового пятна при наличии дефекта составляла диапазон  $\Delta = 2 \dots 75$  мм (рис.4). В других областях оболочки без наличия дефекта изменение формы светового пятна и его перемещение не происходило. Имеется незначительное отличие экспериментальных величин  $\Delta$  от расчетных значений с погрешностью менее 5%.

Таким образом, лазерная вибродиагностика непроклея позволяет в процессе изготовления изделий контролировать наличие дефектов, их размеры, форму, расположение и др. Сканирование лазерного излучения и визуализация изображения имеют превосходство перед другими способами контроля.

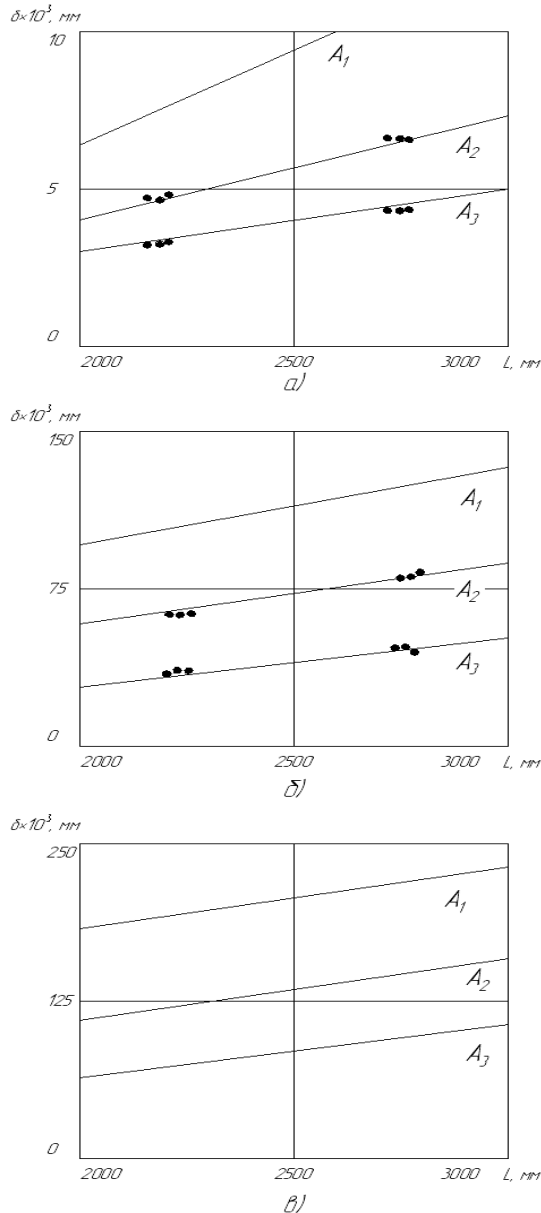


Рис. 4. Зависимости изменения величины смещения лазерного пятна при выявлении поверхностных повреждений многослойных клееных конструкций от основных параметров установки:  $B = 0,01$  мм (а);  $0,25$  мм (б);  $0,5$  мм (в),  $\beta = 0,01$  мм;  $\Delta A = 5$  мм;  $\Delta B = 0,01$  мм;  $\Delta l = 5$  мм;  $A_1 = 20$  мм;  $A_2 = 35$  мм;  $A_3 = 50$  мм

При отсутствии дефекта в оболочке наблюдается в сечении пучка лазерного излучения равномерное распределение интенсивности правильной кольцевой формы. Дефекты в виде непроклея приводят к распределению интенсивности вытянутой формы с нарушенной структурой и смещенным максимумом интенсивности.

### Библиографический список

1. Мордасов, В.И. Обнаружение повреждений при нанесении покрытий на металлическую поверхность [Текст] / В.И. Мордасов, Н.А. Сазонникова // Изд-во Акад. наук «Металлы». – 2000. – №4. – С.105-109.

2. Мордасов, В.И. Выявление поверхностных повреждений покрытий оптическим методом [Текст] / В.И. Мордасов, Н.А. Сазонникова // М.: Перспективные материалы. – 2000. – №3. – С.95-99.

3. Тварадзе, С.В. Вопросы оперативного выявления дефектов силовых установок транспортных средств [Текст] / С.В. Тварадзе, А.П. Ушаков // Межвуз. темат. сборн. научн. трудов «Проблемы эксплуатации и совершенствования транспортных систем»: С.-Петербург: Изд-во Акад. гражд. авиации. – 2005. – Т.10. – С.174-206.

4. Гаспаров, М.С. Акустическая и вибрационная диагностика пневмо- и гидросистем [Текст] / М.С. Гаспаров, А.И. Кох, С.А. Петренко: учеб. Пособие // Самара: Изд-во Сам. гос. аэрокосм. ун-та, 2006. – 84 с.

### References

1. Mordasov, V.I. Damage detecting at the cavities applying on the metal surface [Text]/ V.I. Mordasov, N.A.Sazonnikova // Issue of Russian Academia of Sciences, «Metals». – 2000. – №4. – P.105-109.

2. Mordasov, V.I. Surface damages detecting by optical method [Text]/Moscow: “Advantage materials”. – 2000. – №3. – P.95-99.

3. Tvaradze, S.V. The questions of the routine defects detecting in power installation of transport means [Text]/ S.V. Tvaradze, A.P.Ushakov// Thematical Collected volume of scientific works «The problems of exploitation and improvement of transport systems» S-Petersburg: Issue of Civil aviation Academy. – 2005. – V.10. – P.174-206.

4. Gasparov, M.S. Acoustics and vibrating diagnostics of pneumatic and hydraulic systems [Text]/ M.S. Gasparov, A.I. Koh: Educational book// Samara: Samara State Aerospace University. – 2006.-84 p.

## LASER VIBRATING METHOD OF GLUING SHELLS DEFECTS DETECTING

© 2009 V. I. Mordasov<sup>1</sup>, A. D. Storozh<sup>2</sup>, N. E. Grebnev<sup>2</sup>, O. V. Shulepova<sup>1</sup>, E. G. Ivanova<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Samara State aerospace university

<sup>2</sup>Samara space centre "TsKB-Progress"

This paper shows the advantages of Laser vibrating diagnostic method for ungluing joints detecting in sandwich large-sized shells. The defects presents is detected by extended reflected laser spot form. The error of the method is increased significantly with reducing of laser beam distance, shall external layer vibrating amplitude and CCD resolution.

*Sandwich large-sized shells, defects, laser vibrating diagnostics*

### Информация об авторах

**Мордасов Василий Иванович**, доктор технических наук, профессор кафедры Автоматических систем энергетических установок Самарского государственного аэрокосмического университета. Тел.: (846) 267-46-65. Область научных интересов: создание лазерных информационно-измерительных систем и исследование взаимодействия высокоэнергетических потоков излучения с твердыми веществами.

**Сторож Александр Дмитриевич**, первый заместитель генерального конструктора – первый заместитель начальника Научно-производственного ракетно-космического центра «ЦСКБ-Прогресс». E-mail: [storogh.ad@gmail.com](mailto:storogh.ad@gmail.com). Область научных интересов: создание, контроль и испытания космических летательных аппаратов.

**Гребнев Николай Егорович**, начальник отделения Научно-производственного ракетно-космического центра «ЦСКБ-Прогресс». Область научных интересов: создание конструкции головного обтекателя ракеты-носителя и методы его дефектоскопии.

**Шулепова Ольга Викторовна**, аспирант кафедры Автоматических систем энергетических установок Самарского государственного аэрокосмического университета. Тел.: (846) 267-46-65. Область научных интересов: лазерно-вибрационные методы диагностики оболочек.

**Иванова Елена Георгиевна**, аспирант кафедры Автоматических систем энергетических установок Самарского государственного аэрокосмического университета. Тел.: (846) 267-46-65. Область научных интересов: лазерные измерительные системы.

**Mordasov Vasily Ivanovich**, The doctor of technical sciences, professor of Automatic systems of energy devices cathedra of Samara State aerospace 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: [storogh.ad@gmail.com](mailto:storogh.ad@gmail.com). Area of research: spacecraft construction, control and testing.

**Grebnev Nikolay Egorovich**, The head of department of Samara space centre "TsKB-Progress". Area of research: rocket fairing construction and defectoscopy.

**Shulepova Olga Viktorovna**, The postgraduate of Samara state aerospace university. Phone: (846) 267-46-65. Area of research: laser vibrating diagnostics systems.

**Ivanova Elena Georgievna**, The postgraduate of Samara state aerospace university. Phone: (846) 267-46-65. Area of research: laser measurement systems.