

ИЗМЕРЕНИЕ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ ОБОЛОЧЕК КРУПНОГАБАРИТНЫХ ИЗДЕЛИЙ ПРИ СТАТИЧЕСКОМ НАГРУЖЕНИИ С ПРИМЕНЕНИЕМ ЛАЗЕРНЫХ ТРЕКЕРОВ

**Н.А. Сазонникова;
Р.В. Уклеин**

Самарский национальный
исследовательский университет
имени академика С. П. Королёва

Московское шоссе, 34,
г. Самара, Российская Федерация,
443086

nasazonnikova@yandex.ru
romanfonuklein@yandex.ru

Традиционно в аэрокосмической промышленности точность геометрических форм и аэродинамического контура изделия обеспечивается плазово-шаблонным методом. Контроль точности сборки изделий осуществляется с использованием оптических средств измерения, таких как нивелир и теодолит, в сочетании с нивелировочными линейками, пришедшими в авиастроение из геодезии. Измерения проводятся по реперным точкам, заранее заложенным в изделие на этапе конструирования.

Перспективное и активно развивающееся направление по улучшению качества контроля изготавливаемых летательных аппаратов (ЛА) — это внедрение современных высокоточных координатно-измерительных машин (КИМ) в цикл производства. При проведении контроля геометрии деталей и узлов стационарные КИМ портального типа и мобильные КИМ типа «рука» заменяют традиционные штанген-инструменты и шаблоны, а в операциях сборки и контроля изделия традиционные оптические приборы заменяются на лазерный трекер (laser tracker).

В данной работе рассматривается применение лазерных трекеров для бесконтактного измерения в реальном масштабе времени перемещений оболочек крупногабаритных изделий при статическом нагружении, что позволяет снизить трудоемкость и длительность испытаний, обеспечить высокую точность измерений.

Ключевые слова: контроль геометрических параметров; лазерный трекер; многопозиционный контроль; система опорных точек; оптимальная конфигурация

1 Введение

Проблема создания конструкций РКТ высокого совершенства в прочностном отношении решается на основе системного, комплексного подхода, основу которого составляют математическое и физическое моделирование всех факторов, влияющих на прочность конструкции. При этом решающее значение отводится вопросам нормирования, научного планирования и координации экспериментально-теоретического подтверждения прочности. Нормы прочности, разрабатываемые головными научно-исследовательскими институтами отрасли, определяют общую стратегию выдачи заключения о прочности конструкции, ее весовой оптимизации, унифицируют способы обеспечения запасов

прочности, облегчают взаимную увязку ракетных комплексов и регламентируют методологию задания режимов и способов испытаний. Положение совокупности всех видов прочностных экспериментальных исследований четко определено в общей системе классификации испытаний ракетно-космической техники. В силу разнообразия и широкого круга задач, решаемых ракетами-носителями и космическими аппаратами, сложившейся в течение многих лет специфики предприятий - разработчиков ракетно-космической техники, до последнего времени не утвердилась единая классификационная схема испытаний с однозначной терминологией.

Одной из наиболее важных составляющих статических испытаний крупногабаритных изделий является контроль геометрических параметров.

Трудоемкость и уровень автоматизации измерений перемещений в значительной степени зависят от используемого метода контроля [1–4, 6]. Одной из задач статических испытаний является подтверждение жёсткости изделия. Для решения поставленной задачи как правило используются линейные датчики перемещений. Однако, данный подход не позволяет в полном объеме получить поле перемещений элементов конструкции изделия.

Одним из наиболее ответственных этапов создания любой крупногабаритных изделий аэрокосмической техники являются статические испытания. Как правило, статические испытания проводятся методом поэтапного нагружения испытуемого изделия. При этом в источниках выделяют две основные категории геометрических параметров, подвергаемых контролю:

1) деформации: изменение взаимоположения частей тела, связанное с перемещением друг относительно друга за счёт приложения усилия при котором тело изменяет свои формы;

2) перемещения: изменение положения сечения или всего элемента конструкции в пространстве точки.

Определение деформаций твердого тела осуществляется при помощи тензометрирования. Исходя из определения термина «деформация», её величины могут составлять порядка нескольких микрометров. Если учесть что погрешность измерений лазерного трекера вычисляется по формуле $15+5*x(m)$ мкм, то отсюда можно сделать вывод, что измерение деформаций при помощи ЛТ не представляются возможным, ввиду того что погрешность проводимых измерений выше ем получаемый результат

Для контроля перемещений при статическом нагружении наиболее широкое применение нашли датчики линейного и углового перемещения, которые входят в состав автоматизированных систем контроля.

К преимуществам датчиков перемещений относятся: простота конструкции; возможность получения линейной статической характеристики с высокой точностью; стабильность характеристик; возможность работы на постоянном или переменном токах; малые переходные сопротивления; низкий температурный коэффициент сопротивления.

К недостаткам – возможность отказов из-за наличия скользящего подвижного контакта (окисление, стирание контактной дорожки); сравнительно небольшой коэффициент преобразования и высокий порог чувствительности $\Delta X_{пор} > D_{прв}$; наличие шумов; подверженность электроэрозии под действием импульсных разрядов; ограниченное использование при переменном токе повышенной частоты (до 1 кГц); ограниченность скорости перемещения; низкая износоустойчивость.

К преимуществам лазерных трекеров стоит отнести следующие факторы: высокая чувствительность срабатывания; высокая точность выходных данных; универсальность применения; оперативность получаемых данных; технологичность применения, и как следствие снижение времени подготовки и количества.

К недостаткам относятся: чувствительность к условиям окружающей среды; ограниченная возможность использования ЛТ в динамическом режиме (трекер может отслеживать не более одного отражателя одновременно); высокая себестоимость отражателей.

Схема проведения статических испытаний на прочность крупногабаритного бака, изготовленного из сплава АМг-6, и предназначенного для одного из компонентов топлива вновь проектируемого ракетносителя, изначально предполагала установку изделия в массивный стапель и закрепление на нем большого количества датчиковой аппаратуры с целью определения перемещений элементов конструкции. В данной работе было предложено выполнять измерения в текущем процессе нагружения бесконтактным методом с применением

лазерных трекеров, одновременно фиксируя перемещения большого количества точек на контрольных поверхностях объекта. При этом появилась возможность проведения испытаний бакана территории производственного подразделения без отправки в Испытательный Центр, расположив данный объект непосредственно на технологических ложементов и смонтировав по месту силовую схему нагружения.

В представленном случае рабочие габариты испытываемого изделия не позволяли провести измерения с одной стойки лазерного трекера. Для решения задачи измерения было предложено применение схемы двухпозиционного контроля. Необходимо отметить, что при составлении данной схемы, взаимное расположение отражателей опорной системы точек было выбрано таким образом, чтобы каждая точка обозревалась с любой предполагаемой стойки трекера. Также было учтено, что при многопозиционном контроле, на точность определения дальности и угловых координат, как в режиме интерферометра, так и в режиме абсолютного дальномера, существенное влияние оказывают расстояние от измерительной головки лазерного трекера до отражателя и их взаимное расположение относительно объекта испытаний [5, 7].

2 Лазерный трекер

Лазерный трекер представляет собой совокупность различных механических и оптических компонентов. Схема одной из конструкций трекера приведена на рисунке 1. Прибор имеет две оси вращения вертикальную и горизонтальную оси. В идеальной геометрической конфигурации две оси ортогональны друг другу и пересекаются в точке, служащей началом для сферической системы координат, определенной трекером. Путь лазерного луча от прибора к цели идеально пересекает

начало координат и перпендикулярен транзитной оси. Один кодер угла установлен соосно со стоящей осью для считывания горизонтального угла, в то время как второй кодер установлен соосно с транзитной осью для считывания вертикального угла.

Часть пучка, выходящего из источника (лазерная головка), удерживается в системе в качестве опорного пучка для интерферометрического подсчета границ. Измерительная часть луча отражается от рулевого (следящего) зеркала, попадает в светоотражатель и возвращается на трекер. Часть обратного луча отклоняется на позиционно-чувствительный детектор (PSD), в то время как оставшаяся часть направляется на счетчик границ для оценки дальности. Любое радиальное перемещение SMR фиксируется дальномером. Боковое перемещение SMR приводит к смещению пятна на PSD. Система управления затем использует две оси вращения инструмента, чтобы повторно центрировать пятно на PSD, тем самым постоянно отслеживая цель и, следовательно, обеспечивая угловые координаты цели в реальном времени.

3 Схема измерительной системы

Изначально схема измерения перемещений на баке предполагала установку сети датчиков линейного перемещения, но в целях упрощения методики проведения эксперимента было предложено применение лазерного трекера. На объекте измерений было установлено 20 сферических отражателей диаметром 0,5', по десять отражателей в каждой опоре. Исходя из габаритов изделия становится очевидно, что провести измерения объекта представляется возможным не менее чем с двух позиций. Для определения положения ЛТ в пространстве была спроектирована и применена опорная сеть состоящая из 6 отражателей размером 1,5'. На рисунке 1 показана схема трекера.

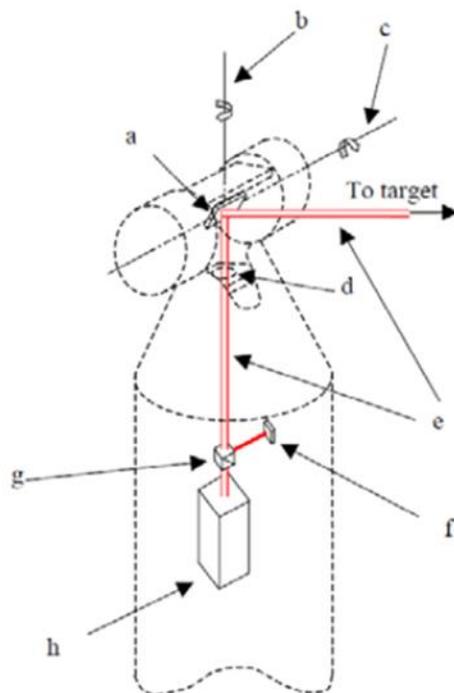


Рисунок 1. Принципиальная схема лазерного трекера
 А – Поворотное зеркало для направления луча; В – Вертикальная (постоянная) ось;
 С – Горизонтальная (поворотная) ось; D – Защитная крышка;
 Е – Лазерный луч; F – Устройство определения положения (УОП) (PSD);
 G – Светоотделитель; H – Интерферометр и источник излучения

На рисунках 2-3 представлена предложенная измерительная система двухпозиционного контроля и система координат, объединяющая все измеренные параметры в рамках данного испытания. Данная схема включает в себя декартовую систему координат, а также определяет

расстояния между стоянками трекера, контролируемые точками объекта измерений и точками опорной сети. При этом значение функции ошибок, представляющее собой разницу ошибок определения координат опорных и контролируемых точек объекта измерений, должно быть минимальным [7].

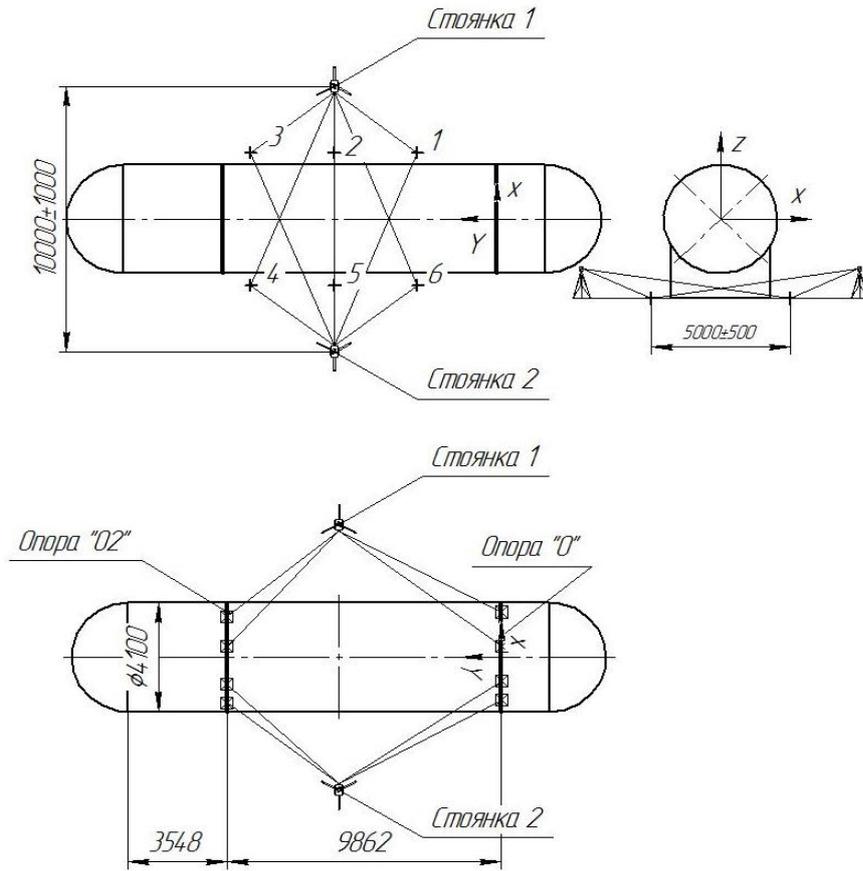


Рисунок 2. Двухпозиционная схема измерений бака

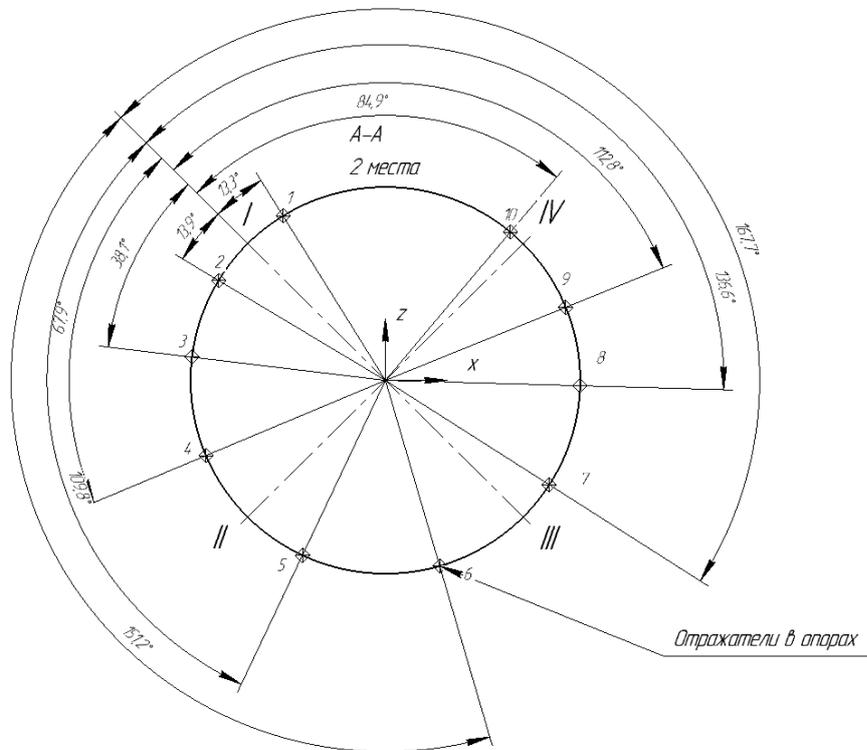


Рисунок 3. Схема расположения отражателей в опорах бака

4 Методика измерений

Краткая методика измерений по предложенной схеме выглядит следующим образом:

1. бак устанавливается на ложементы, и производится монтаж гидравлических стяжек в районе опор «О» и «О2»;
2. после монтажа стяжек, производится установка Опорной сети;
3. установка отражателей опорах «О» и «О2»;
4. установка и прогрев Трекеров;
5. измерение опорной сети для создания единого пространства измерений в среде ПО;
6. обмер корпуса бака, для создания цифровой модели системы измерений;
7. установка и обмер контрольных точек на опорах объекта измерений;

8. проведение первого этапа измерений: измерения производятся после каждого 10%-го увеличения нагрузки, до тех пор, пока данный показатель не достигнет уровня 70% от максимальной;

9. проведение второго этапа измерений: в интервале от 70% до 90% от максимума показания снимаются спустя каждые 5% нагружения. В ходе снятия показаний каждая точка в опоре измеряется 5 раз после чего производится усреднение результата);

10. проведение визуального контроля объекта;

11. объединение полученных данных в одну систему координат;

12. получение числовых данных отклонений по осям, и построение векторных диаграмм полученных перемещений.

Пример результатов измерений одного из режимов нагружения бака, представлен в виде графика на рисунке 4.

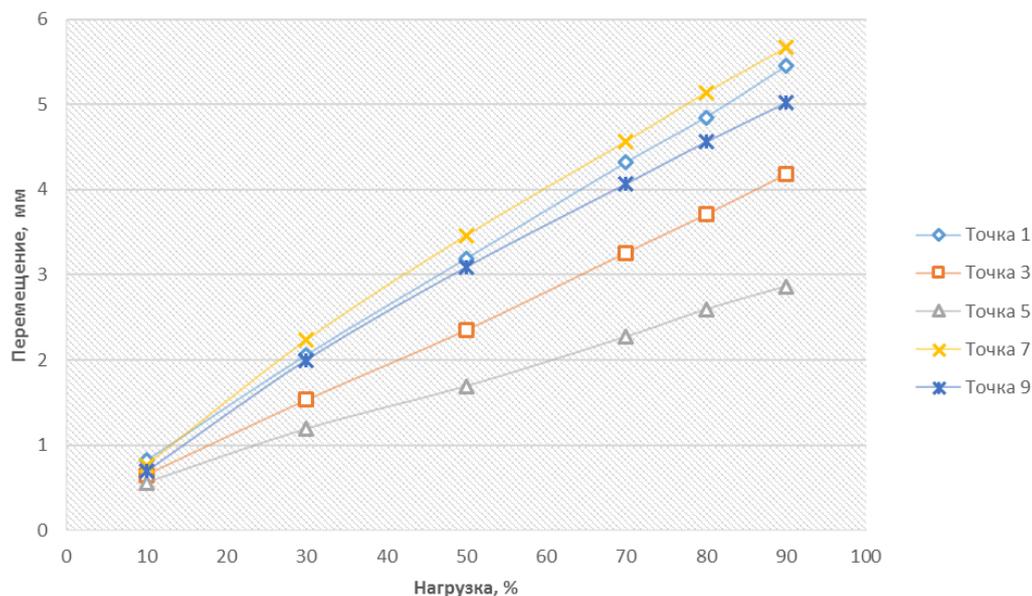


Рисунок 4. Зависимости перемещений от нагружения

5 Заключение

Предложенный метод измерения перемещений при статических испытаниях крупногабаритных изделий позволяет оперативно получать необходимую информацию практически в «полевых

условиях» т.е. без проведения большого объема подготовительных операций по монтажу схемы испытаний в специальном стапеле. При этом снижается длительность и трудоемкость работ, а так же значительно уменьшается объем изготавливаемой испытательной оснастки и количество

используемых линейных датчиков перемещений.

Список использованных источников

- [1] Чепчуров М. С., Карновский Г. Г., Минасова В. Е. Лазерный проекционный контроль формы крупногабаритных изделий //научные технологии и инновации. – 2016. – С. 73-78.
- [2] Токтарбаев А. А. Лазерные системы для измерения геометрических параметров //Academy. – 2019. – №. 1 (40). – С. 28-30.
- [3] Гришанов В. Н., Ойнонен А. А. Современные лазерные измерительные системы в производственном цикле космической техники //Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета им. академика С.П. Королёва (национального исследовательского университета). – 2012. – №. 1 (32). – С. 24-35.
- [4] Людоговский П. Л., Комкова М. А. Методы измерений геометрических параметров изделий с помощью лазерных координатно-измерительных систем в современных машиностроительных производствах //Известия высших учебных заведений. Авиационная техника. – 2016. – №. 4. – С. 165-168.
- [5] Середович А. В., Иванов А. В. Разработка методики определения геометрических параметров РВС по данным лазерного сканирования //Интерэкспо Гео-Сибирь. – 2006. – Т. 1. – №. 2. – С. 160-164.
- [6] Косаревский С. В. Способ контроля геометрических параметров деталей на координатно-измерительной машине с применением перебазирования. – 2010.
- [7] Корж Р. С. Автоматизация построения 3D моделей по результатам лазерного сканирования //Режим доступа: <https://nauchkor.ru/uploads/documents/587d36385f1be77c40d589ba.pdf>.–Дата доступа. – 2021. – Т. 2.

LARGE SIZED PRODUCT SHELLS DISPLACEMENT MEASUREMENT UNDER STATIC LOADING USING LASER TRACKERS

Nadezhda A. Sazonnikova
Roman V. Uklein

Samara National Research University

34, MOSKOVSKOESHOSSE,
SAMARA,
443086, RUSSIAN FEDERATION

nasazonnikova@yandex.ru
romanfonuklein@yandex.ru

In the aerospace industry the accuracy of product geometry and the aerodynamic contour provided traditionally, by the mould loft template method. The assembly accuracy control is carried out using optical measuring instruments, such as a level and a theodolite in combination with leveling rulers came to the aircraft industry from geodesy. Measurements are carried out according to reference points pre-embedded in the product at the design stage.

The introduction of modern high precision coordinate measuring machines (CMM) into the production cycle is promising and actively developing direction to improve the quality of manufactured aircraft. To control the geometry of parts and assemblies, stationary portal-type CMMs and mobile CMMs of the "hand" type replace traditional rod tools and templates, and in the assembly and control operations of the product, traditional optical devices are replaced by a laser tracker.

The aim of this paper is the use of laser trackers for non-contact real-time large-sized product shell displacement measurement under static loading, which makes it possible to reduce the complexity and duration of tests, and ensure high measurement accuracy.

Keywords: *geometric parameters control; laser tracker; multi-position control; reference point system; optimal configuration*

References

- [1] Chepchurov M. S., Karnovsky G. G., Minasova V. E. [Laser projection control of the shape of large-sized products]. In Russian //high-tech technologies and innovations. - 2016. – pp. 73-78.
- [2] Toktarbayev A. A. [Laser systems for measuring geometric parameters]. In Russian //Academy. – 2019. – №. 1 (40). – Pp. 28-30.
- [3] Grishanov V. N., Oynonen A. A. [Modern laser measuring systems in the production cycle of space technology]. In Russian //Bulletin of Samara State Aerospace University named after Academician S.P. Korolev (National Research University). – 2012. – №. 1 (32). – Pp. 24-35.
- [4] Ludogovsky P. L., Komkova M. A. [Methods of measuring geometric parameters of products using laser coordinate-measuring systems in modern machine-building industries]. In Russian //Izvestiya higher educational institutions. Aviation equipment. – 2016. – No. 4. – pp. 165-168.
- [5] Seredovich A.V., Ivanov A.V. [Development of a methodology for determining the geometric parameters of RVS according to laser scanning data]. In Russian //Interexpo Geo-Siberia. - 2006. – Vol. 1. – No. 2. – pp. 160-164.
- [6] Kosarevskiy S. V. [A method for controlling the geometric parameters of parts on a coordinate measuring machine using rebasing.] In Russian – 2010.
- [7] Korzh R. S. [Automation of 3D model construction based on laser scanning results] In Russian //Access mode: <https://nauchkor.ru/uploads/documents/587d36385f1be77c40d589ba.pdf>. –Access date. – 2021. – Vol. 2.