

ПРИМЕНЕНИЕ ЛАЗЕРНЫХ АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ ДЛЯ КОНТРОЛЯ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ИЗДЕЛИЙ КОСМИЧЕСКОЙ ТЕХНИКИ

APPLICATION OF LASER AUTOMATED MEASURING SYSTEMS FOR THE CONTROL OF GEOMETRIC PARAMETERS OF SPACE TECHNOLOGY PRODUCTS

**N. Sazonnikova
R. Uklein
A. Zelenkevich**

Summary. Laser automated measuring systems are widely used for the aerospace product geometric parameter control. This paper considers the use of the MV 224 laser scanner and the API Radian R-20 laser tracker to control the geometric parameters of aerospace construction elements at different production stages. The use of these measuring instruments allows to automate measurements with ensuring the measurement accuracy at the level of 0.1 mm and to assess compliance with the established requirements when the product's CAD model is used as a standard reference.

Keywords: geometric parameters, laser tracker, laser scanner, reflector, deviation of value, digital model of the product.

Сазонникова Надежда Александровна

*Д.т.н., профессор, Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева», г. Самара
Nasazonnikova@yandex.ru*

Уклеин Роман Владимирович

*Аспирант, Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева», г. Самара
romanfonuklein@yandex.ru*

Зеленкевич Александр Дмитриевич

*Аспирант, Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева», г. Самара
zelenkevich009@yandex.ru*

Аннотация. Лазерные автоматизированные измерительные системы находят широкое применение при контроле геометрических параметров изделий аэрокосмической техники. В данной работе рассмотрено применение лазерного сканера Nikon MV 224 и лазерного трекера API Radian R-20 для контроля геометрических параметров изделий на разных стадиях производства. Применение данных измерительных средств позволяет автоматизировать проведение измерений при обеспечении точности измерений на уровне 0,1 мм и оценить соответствие установленным требованиям при использовании в качестве эталона CAD-модели изделия.

Ключевые слова: геометрические параметры, лазерный трекер, лазерный сканер, отражатель, отклонение, цифровая модель изделия.

Введение

Контроль геометрических параметров изделий аэрокосмической техники на разных стадиях изготовления и оценка их соответствия требованиям конструкторской документации является одной из важнейших задач при производстве. Возможности проведения контроля, в значительной степени, зависят от применяемых средств измерений (точность, уровень автоматизации).

Анализ существующих методов измерений показал, что контроль геометрии крупногабаритных изделий осуществляется как с применением специальных шаблонов, так и посредством лазерных измерительных систем [1, 2].

Контроль геометрии крупногабаритных частей деталей и сборок, который проводят с помощью шаблонов, занимает значительную часть в измерениях авиационной и космической отраслях [1]. Данная технология контроля отработана и не требует высокой квалификации рабочих, однако имеет ряд существенных недостатков, так как на каждую группу элементов требуется индивидуальный заготовленный шаблон. Кроме этого, данная технология не позволяет в полной мере оценить величину отклонения от требований, определенных в конструкторской документации. При каких-либо доработках в конструкции необходимо заменять шаблон [1]. Использование лазерных измерительных систем позволяет проводить бесконтактные измерения для крупногабаритных изделий любой формы на различных этапах технологического процесса и оценить

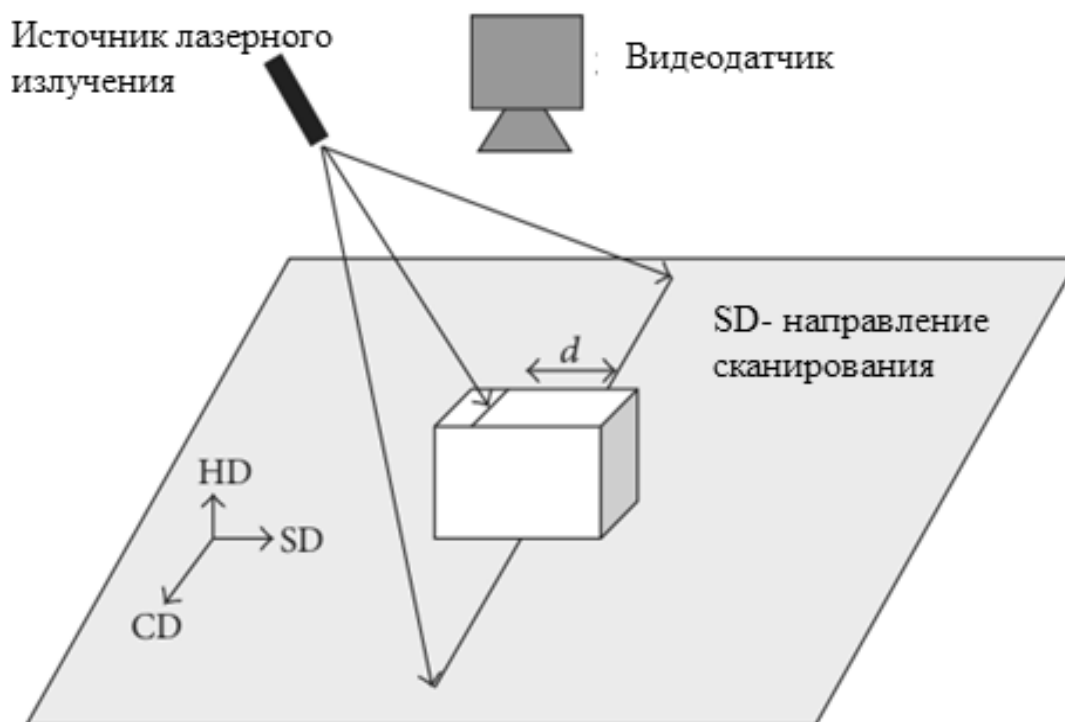


Рис. 1. 3D-сканер

реальные значения геометрических параметров изделий [2].

Наилучшие результаты при решении подобных задач могут быть получены при использовании лазерных автоматизированных измерительных систем, таких как: лазерные сканеры и лазерные трекары [3–6]. Использование данных измерительных средств позволяет повысить скорость проводимых измерений и использовать цифровую модель изделия в качестве эталона.

Постановка задачи

Целью данной работы является выбор средств измерений, методики проведения измерений для изделий ракетно-космической техники и оценка соответствия изделий требованиям конструкторской документации. Рассматривались следующие изделия:

1. крышка люка двигательной установки космического аппарата (ДУ КА). Необходимо провести 4 последовательных измерения для вышеуказанного объекта, соответствующие каждому этапу производства и испытаний экспериментальной модели, до и после механической обработки; до и после проведения испытаний сжатым воздухом; определить отклонения от теоретической сферы, с радиусом скругления, аналогичным радиусу скругления готового изделия;

2. цилиндрическая обечайка диаметром 4100 мм, допустимое отклонение каждой точки относительно номинального цилиндра не более ± 3 мм.

Цель проводимых измерений: проверка соответствия геометрических параметров требованиям конструкторской документации (КД). Измерениям подверглась внутренняя поверхность до проведения механической обработки.

Исходя из поставленных условий, для проведения последовательных измерений на крышке люка ДУ КА, необходимо создать универсальную схему проведения измерений, что потребует выбрать автоматизированную лазерную сканирующую систему типа «Радар». Исходя из предъявляемых требований по точности, наиболее оптимальным вариантом будет применение системы типа Nikon MV224.

Для обечайки данная система не обеспечит необходимой точности. На каждой новой обечайке, ввиду различий конструктивных особенностей, между отдельными обечайками одного бака, требуется проведение измерений в ручном режиме, что для радара представляется затруднительной задачей, поэтому для данной работы, также сравним, точностные характеристики оборудования и объекта измерения, была выбрана система типа «Лазерный трекаер» API Radian R-20. Обе

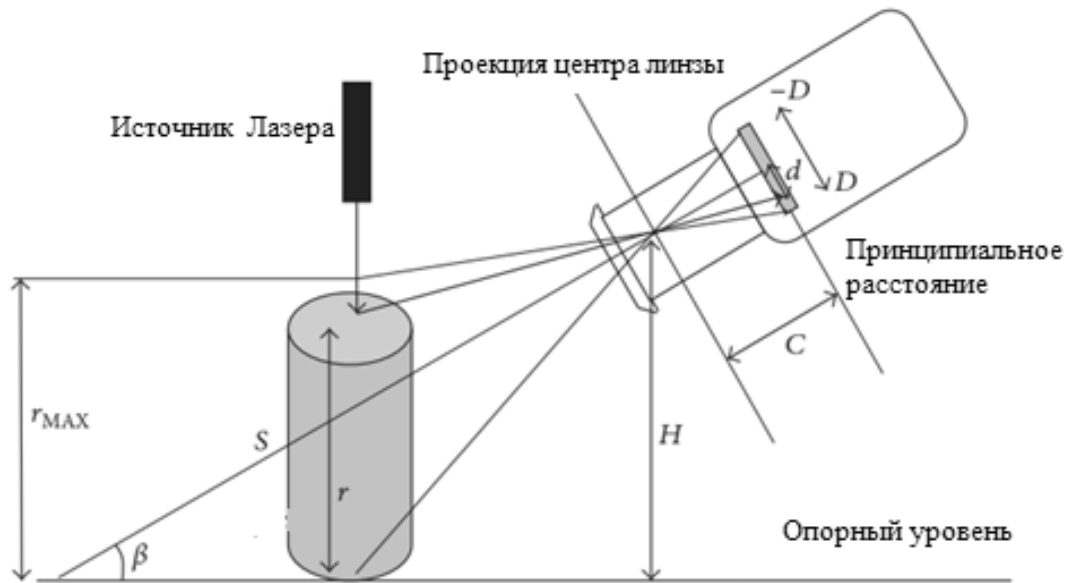


Рис. 2. Геометрия лазерной триангуляционной системы.

упомянутые системы указываются в госреестре средств измерений.

Принцип работы лазерных триангуляционных систем

Основными применяемыми измерительными средствами являются лазерные трекары и лазерные сканеры.

В технике лазерной триангуляции, на поверхность мишени проецируется узкая лазерная линия. Эта лазерная линия выглядит прямой при проецировании на плоскую поверхность, используемую в качестве эталона. На рисунке 1 эта опорная плоскость определяется осями CD (поперечный размер) и SD (сканирующий размер).

Любая точка вдоль линии, проецируемая на объект, имеет высоту выше опорной, что приводит к пространственному отклонению этой точки при наблюдении 2D-камерой. Камера, в свою очередь регистрирует лазерное излучение, отраженное от поверхности объекта, на матрицу фокальной плоскости. При использовании алгоритма обработки образов представляется возможным найти лазерную линию на захваченном образе и вычислить любые существующие изменения положения, связанные с отклонениями высоты вдоль оси HD (измерение высоты). Каждая строка лазерного линейного изображения генерирует индивидуальную точку данных или значение уровня поверхности. Набор сканированных строк поперек лазерной линии на одном изображении создает вектор данных или вектор

значений уровня поверхности. Лазерная проекция итеративно перемещается вдоль оси SD над поверхностью объекта сканирования. Набор образов, сканирующих всю поверхность, называется сканированным образом. Совокупность векторов данных из каждого сканируемого изображения составляет еще один образ, называемый дистанционным образом – трехмерный образ, в котором координаты пикселей проецируются на плоскость сканируемой поверхности CD-SD, а значения пикселей проецируются уровень высоты вдоль оси HD. На рис. 2 представлена геометрия и набор параметров, используемых для триангуляционной модели.

Лазерная линия, проецируемая на объект, отражается на массиве фокальной плоскости в положении d . Математическое соотношение между r и d определяется следующим уравнением:

$$r = H \left(1 - \frac{(C - D \cdot \operatorname{tg}(\beta)) \cdot (C \cdot \operatorname{tg}(\beta) - d)}{(C \cdot \operatorname{tg}(\beta) + D) \cdot (C + d \cdot \operatorname{tg}(\beta))} \right),$$

- где: r — высота объекта;
- H — высота от точки отсчета до центра проекции;
- C — расстояние от центра проекции до плоскости изображения в фокусе;
- D — физический размер детектора изображения;
- β — угол удара относительно опорного уровня;
- d — проекция расстояния от центра линзы до источника излучения.

Лазерный трекары представляет собой совокупность различных механических и оптических компонентов.

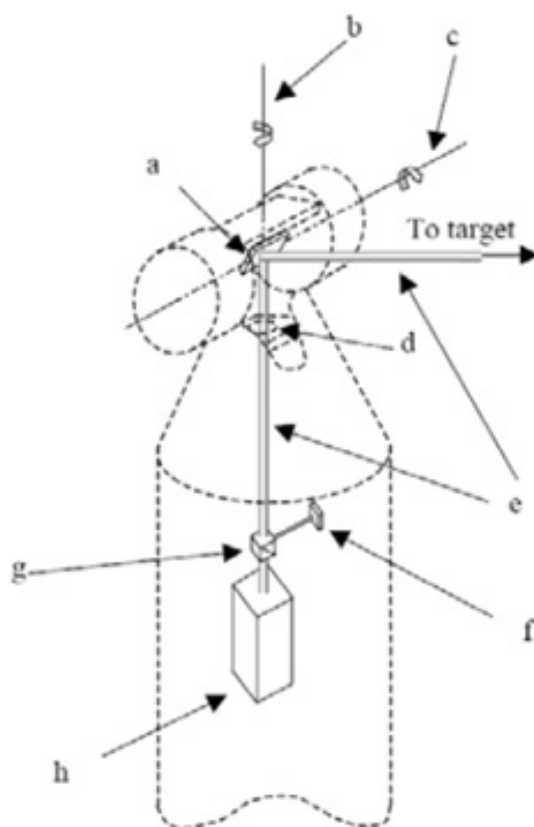


Рис. 3. Конструкция лазерного трекера с лучевым рулевым зеркалом

Схема одной из конструкций трекера приведена на рисунке 3. Прибор имеет две оси вращения: вертикальную и горизонтальную. В идеальной геометрической конфигурации две оси ортогональны друг другу и пересекаются в точке, служащей началом для сферической системы координат, определенной трекером. Лазерный луч идеально пересекает это начало координат и перпендикулярен транзитной оси. Один кодер угла установлен соосно со стоящей осью для считывания горизонтального угла, в то время как второй установлен соосно с транзитной осью для считывания вертикального угла.

Часть пучка, выходящего из источника (лазерная головка), фиксируется в системе в качестве опорного пучка для интерферометрического подсчета границ. Измерительная часть луча отражается от поворотного 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 сферического отражателя (SMR) фиксируется дальнометром. Боковое смещение отражателя приводит к смещению пятна на PSD. Система управления использует две оси вращения инструмента, чтобы повторно цен-

трировать пятно на PSD, тем самым постоянно отслеживая цель и, следовательно, отсчитывать угловые координаты цели в режиме реального времени. На рисунке 3 показана схема трекера, использующего луч поворотного зеркала для направления лазера на цель, где: a — поворотное зеркало для направления луча; b — вертикальная (постоянная) ось; c — горизонтальная (поворотная) ось; d — защитная крышка; e — лазерный луч; f — позиционно-чувствительный детектор (PSD); g — светоотделитель; h — интерферометр и источник излучения.

Ранние версии лазерных трекеров, и даже многие выпускаемые сегодня, оснащены He-Ne лазерным интерферометром (IFM) для измерения радиальных перемещений. Лазерный луч разделен на две части: Первая фиксируется в приборе в качестве эталона. Вторая часть, известная как измерительный луч, направляется к цели и отражается обратно к прибору. Измерительный луч накладывается на опорный, что приводит к оптической интерференции. Эта интерференция состоит из светлых и темных полос, затем фотоприемник преобразует интенсивность в электрический сигнал. Поскольку путь, пройденный измерительным лучом, изменяется на расстояние, соответствующее половине его длины волны ($\lambda/2$), то оптическая интерференция



Рис. 4. Крышка люка двигательной установки

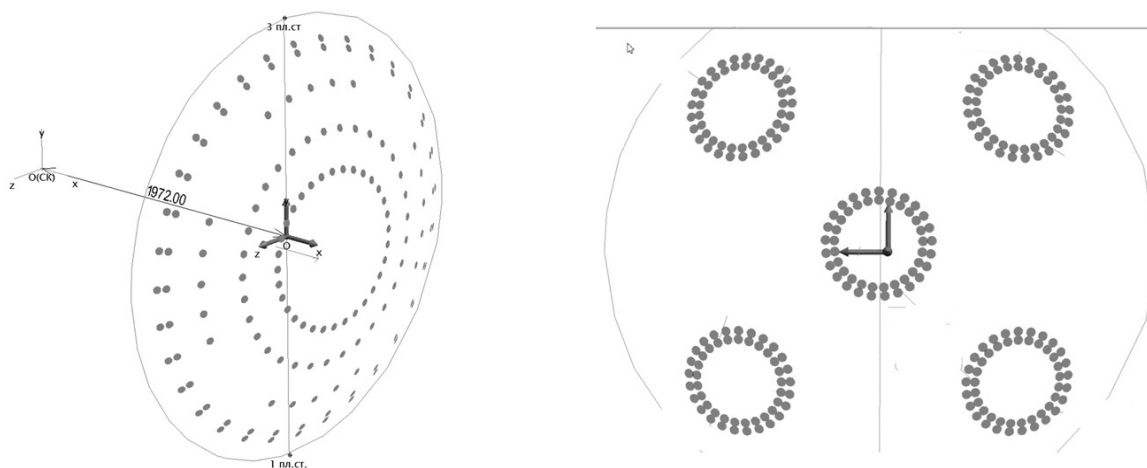


Рис. 5. Модель крышки люка

чередуются между светлыми и темными полосами. Таким образом, подсчитав, сколько раз полосы между собой чередуются и зная длину волны, можно вычислить смещение отражателя. КИМ могут измерять только относительное смещение. Для определения абсолютного расстояния цели от центра вращения прибора (начала координат для сферической системы координат) изготовители устанавливают точку отсчета на корпусе прибора, т.е. она расположена на известном расстоянии от места излучения.

Результаты измерений

Был проведен контроль геометрических параметров обечайки бака РН и крышки люка двигательной установки космического аппарата (ДУ КА), используя

емых в современных ракетносителях. Для каждого элемента был составлен алгоритм проведения автоматизированных измерений и обработки полученных результатов.

Крышка люка двигательной установки (ДУ) космического аппарата (КА) приведена на рисунке 4.

Средства измерений

Измерения для крышки люка двигательной установки проводились с помощью лазерного сканера Nikon MV224. Пределы допускаемой абсолютной погрешности измерений расстояний составили $(2\sigma) \pm (10 \text{ мкм} + 2,5 \text{ мкм} * L)$, где L — расстояние до цели в метрах. Была построена теоретическая сфера, на которой было нане-

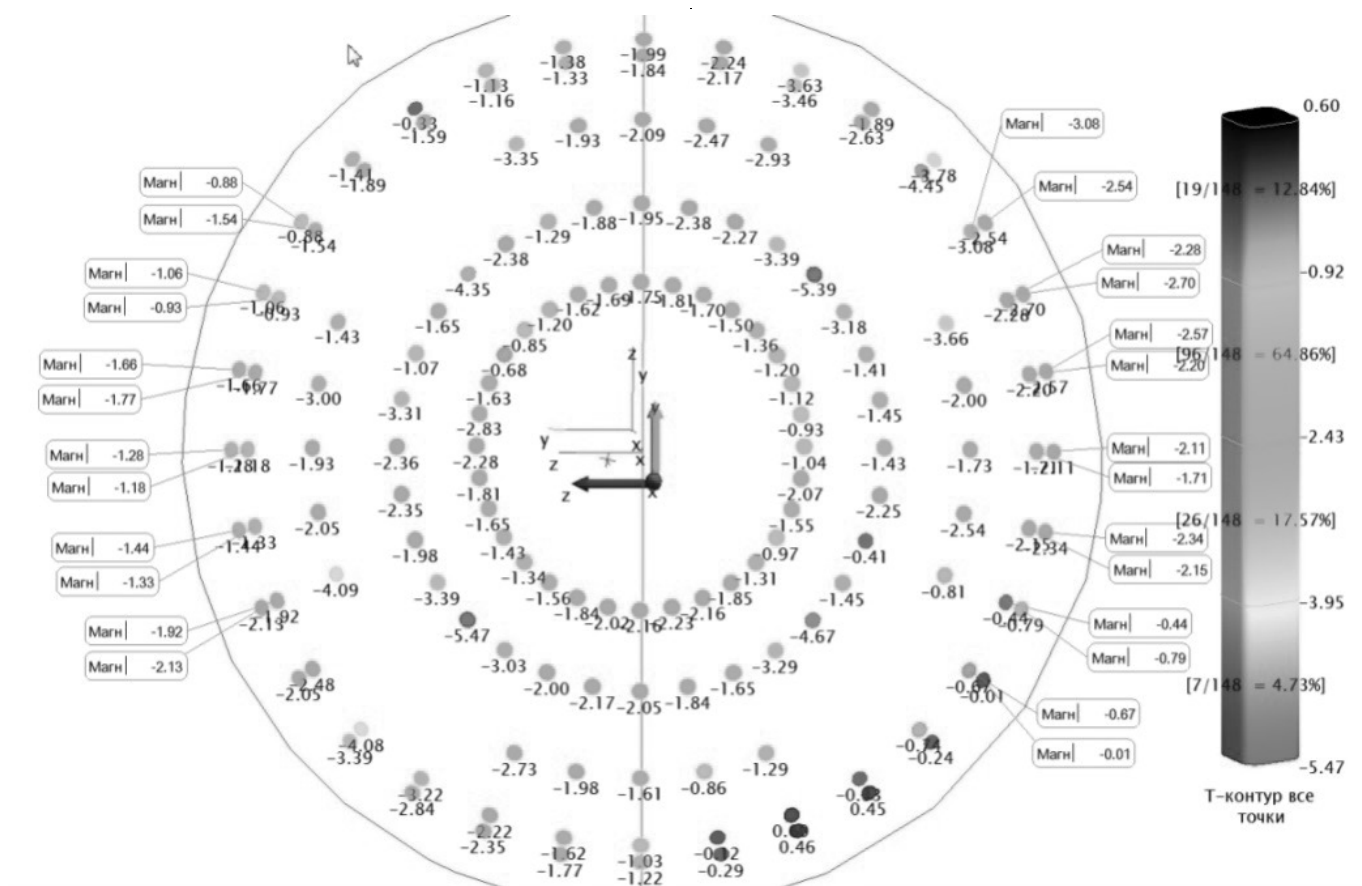


Рис. 6. Отклонения измеренных контрольных точек на крышке

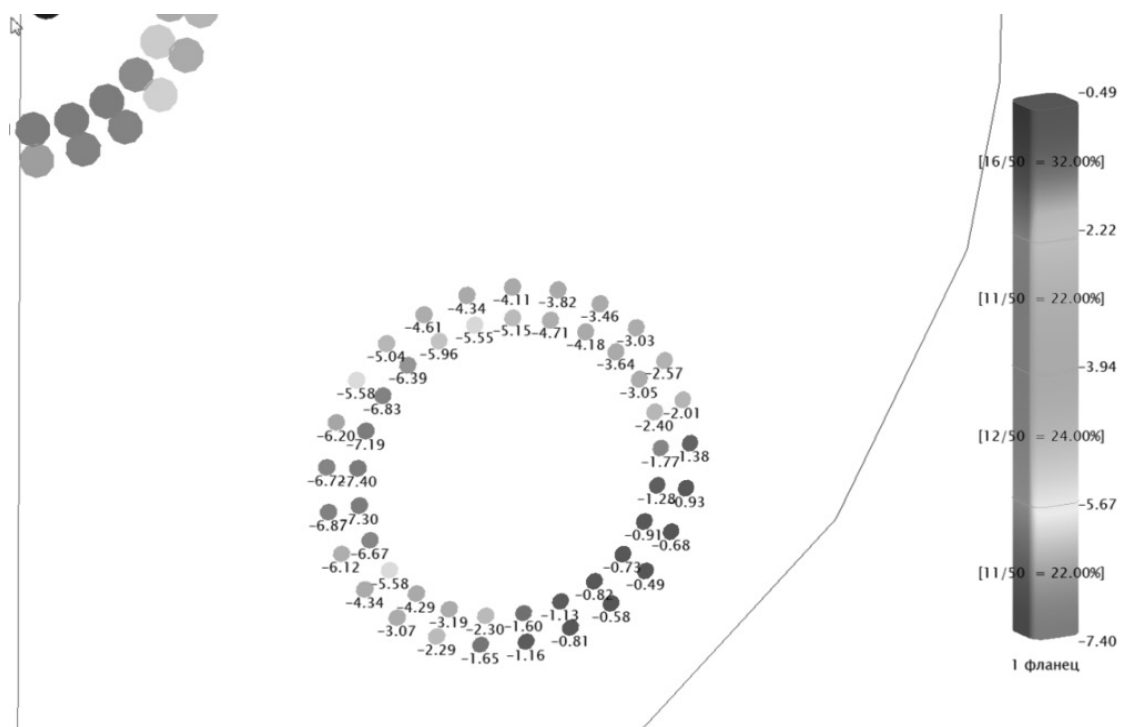


Рис. 7. Отклонения измеренных контрольных точек на гермоплате

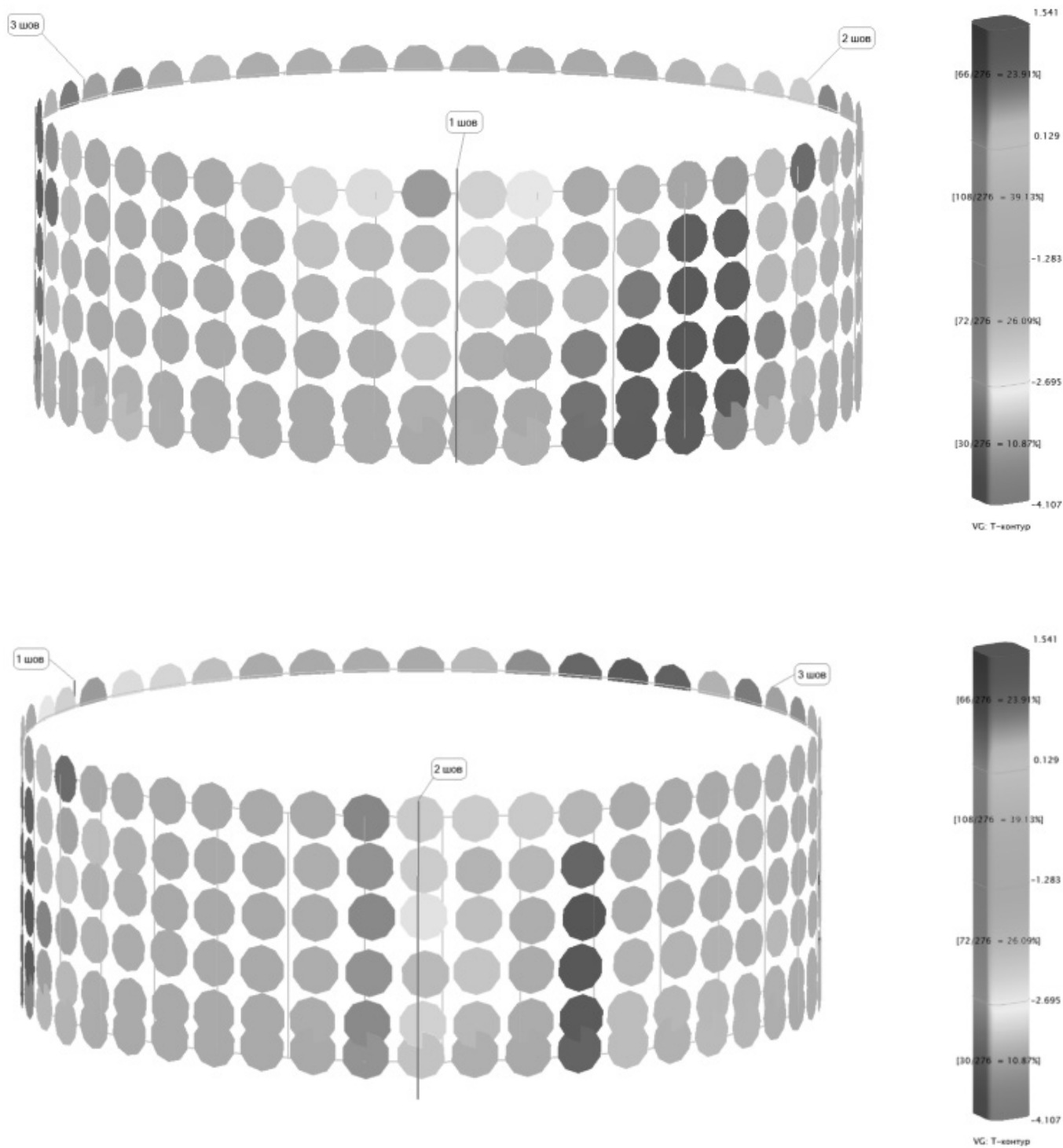


Рис. 8. Векторная схема отклонений контрольных точек от математической модели со стороны первого шва (а) и второго шва (б)

сено предварительное облако точек по которому производилось автоматическое сканирование. Привязка производилась по четырем точкам, соответствующим плоскостям стабилизации. Погрешность измерения каждой точки не превышала 0,1 мм.

Результаты измерений

На поверхности крышки люка были измерены 148 точек. Для определения отклонения измеренных точек от Т-контура в программном обеспечении Spatial Analyzer, была построена математическая модель теоретического контура крышки в виде сферы, радиусом соответствующему радиусу скругления детали и составлено предварительное облако точек, по которому будут производиться измерения на реальном объекте испытаний (Рисунок 5)

За базу была принята верхняя полка шпангоута и два отверстия на плоскостях стабилизации I и III.

На плоскости шпангоута с помощью 2 базовых отверстий, задающих плоскости стабилизации I и III, была построена базовая система координат. Далее, система координат была смещена на расстояние, соответствующее центру предполагаемой сферы и построена теоретическая сфера.

Было произведено сравнение измеренных контрольных точек с поверхностью математической модели сферы. Результаты полученных измерений представлены на рисунках 6 и 7.

Положительные значения отклонений — это отклонения измеренных точек по нормали к поверхности математической модели сферы в наружную сторону.

Отрицательные значения отклонений — это отклонения измеренных точек по нормали к поверхности математической модели сферы во внутреннюю сторону.

Минимальная величина внутреннего отклонения и максимальная величина внутреннего отклонения измеренных контрольных точек от цифровой модели изделия по нормали к поверхности ДУ КА на плате № 1, согласно рисунку 7 составили $-0,49$ мм и $-7,40$ мм соответственно.

Для контроля макета обечайки бака в закрепленном состоянии использовался лазерный трекер API Radian R20. При этом, погрешность измерения каждой точки не превышала 0,1 мм. В процессе измерений проводилась оценка отклонения наружного контура макета обечайки бака от теоретической линии, заданной цифровой моделью. С этой целью в результате измерений

было получено облако точек, в соответствии с разметкой цеха-заказчика, и на основании, полученных замеров с использованием программного пакета Spatial Analyzer был построен цилиндр, отображающий цифровую модель контролируемой обечайки, затем были получены отклонения точек по всей площади относительно данного цилиндра.

Измерено 276 точек на наружной поверхности образующей макет обечайки бака. Для определения отклонения поверхности от теоретического контура в программном обеспечении Spatial Analyzer была построена цифровая модель теоретического контура сборки, затем было произведено сравнение измеренных контрольных точек с поверхностью построенной модели.

На рисунках 8 и 9 показана векторная схема отклонений (на цветовой шкале справа — значения максимальных отрицательных и положительных отклонений).

Знак «-» в значении отклонения означает, что вектор отклонения направлен внутрь обечайки.

Заключение

Таким образом, применение лазерного сканера Nikon MV 224 и лазерного трекера API Radian R20 позволило определить отклонения контура, при использовании комплекта лазерной измерительной системы. Были определены координаты точек на поверхности объекта, построена цифровая модель крышки люка двигательной установки. Минимальная величина внутреннего отклонения составила $-0,49$ мм, максимальная величина внутреннего отклонения $-7,40$ мм. При проведении контроля цилиндрической поверхности было установлено, что максимальное отклонение от точек теоретического контура составляет 4,107 мм. Учитывая направление отклонения, и тот факт, что измерялась внутренняя поверхность обечайки перед механической обработкой, а также расположение данных отклонений в районе шва, после соответствующей доработки обечайку можно допустить в дальнейшее производство. Внутренний диаметр обечайки составил 3898,46 мм, при номинальном размере 3900 ± 3 мм, что соответствует требованиям КД.

Таким образом, применение лазерных автоматизированных измерительных систем позволило на порядок повысить точность измерения геометрических параметров конструкции изделий и скорость обработки результатов измерений. Создан шаблон для автоматизированных измерений, деталей сходной конструкции. Было сокращено время проведения измерений по сравнению с аналоговыми инструментами, была получена наглядная схема отклонений.

ЛИТЕРАТУРА

1. Каракулев, Ю.А. Измерение отклонений от соосности деталей в регулировочных клапанах турбин [Текст] / Ю.А. Каракулев. // Изв. Вузов. Приборостроение. — 2007. — № 4. — С. 27–30.
2. Шилин А.Н., Булатов Ю.П., Бобков П.П., Лукин Г.В. Оптико-электронная информационно-измерительная система управления производством обечаек // Химическое и нефтяное машиностроение. — 1992. — N. 11. — С. 28–30.
3. Muralikrishnan B. Laser Trackers for Large Scale Dimensional Metrology: A Review / Bala Muralikrishnan, Steve Phillips, Daniel Sawyer // National Institute of Standards and Technology, — 2016. — 30 p.
4. Fan Y. Technology and Application of Laser Tracker in Large Space Measurement / Yang Fan, Li Guangyun, Fan Baixing, // Zhengzhou Institute of Surveying and Mapping. — 2014. — 28 p.
5. Y. Gai, J. Zhang, J. Guo, X.i Shi, D. Wu, K. Chen. Construction and uncertainty evaluation of large-scale measurementsystem of laser trackers in aircraft assembly. Measurement, 165(2020), 108144.
6. Ананьев В.В. и др. Измерение прецизионных конструкций КА в термовакуумных условиях / В.В. Ананьев, Н.А. Тестоедов, Г.В. Двирный, В.В. Двирный // Научный журнал НИУ ИТМО. Серия «Холодильная техника и кондиционирование», 2014. — No 1.[Электронный ресурс]: <http://www.refrigeration.ihbt.ifmo.ru>.

© Сазонникова Надежда Александровна (Nasazonnikova@yandex.ru),

Уклеин Роман Владимирович (romanfonuklein@yandex.ru), Зеленкевич Александр Дмитриевич (zelenkevich009@yandex.ru).

Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»



г. Самара