

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ РАССТОЯНИЯ МЕЖДУ ТОЧКАМИ НА ГЕОМЕТРИЧЕСКУЮ ПОГРЕШНОСТЬ ПОЛИГОНАЛЬНЫХ 3D-МОДЕЛЕЙ В ЗАДАЧАХ ОБРАТНОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ

Герцовский Г.А.¹, Осипов С.К.¹, Костюк А.И.¹

¹ФБГОУ ВО «НИУ «МЭИ», г. Москва, gertsovskyga@mpei.ru

Ключевые слова: обратное проектирование, 3D-сканирование, оценка точности измерений, полигональная модель, контактные измерения.

В авиадвигателестроении методы бесконтактного 3D-сканирования находят широкое применение в задачах обратного проектирования и производственного контроля. Высокая точность воспроизведения геометрии, и детальная проработка внешних конструктивных элементов позволяют использовать полученные 3D-модели при решении задач, связанных с ремонтом и изготовлением комплектующих газотурбинных двигателей (ГТД). Практическая эффективность данных подходов подтверждается результатами отечественных исследований [1, 2].

Современные публикации по данной теме уделяют основное внимание обеспечению точности сбора геометрических данных при создании 3D-моделей узлов ГТД [3]. 3D-сканирование демонстрирует существенные преимущества перед традиционными контактными измерительными системами при контроле геометрии лопаточного аппарата со сложным аэродинамическим профилем и малой толщиной стенок [4].

На каждом этапе обратного проектирования формируется погрешность геометрических параметров, которая влияет на геометрические параметры изделия. По данным исследования [2] погрешность геометрических параметров полигональной 3D-модели деталей с применением технологии 3D-сканирования может составлять от 0,04 до 0,09 мм/м.

Добиться минимизации размерных отклонений и увеличить детализацию при использовании технологии 3D-сканирования возможно за счет определения оптимальных настроек 3D-сканера. Для лазерного 3D-сканера основными параметрами являются: экспозиция и заданное расстояние между точек полигональной сетки.

На предварительном этапе исследований определено, что параметр расстояния между точек (r , мм) имеет наибольшее влияние на детализацию и временные затраты оператора при получении полигональных 3D-моделей в процессе лазерного 3D-сканирования.

В связи с этим, цель настоящего исследования связана с получением методических рекомендаций и подбором параметра расстояния между точек лазерного 3D-сканирования для минимизации размерных отклонений.

В качестве объектов исследования выбраны узлы газотурбинного оборудования: импеллер (рабочее колесо) микро-ГТУ Capstone (габариты 150×150×400 мм), корпус камеры сгорания (250×250×250 мм), а также лопатка газовой турбины Siemens SGT 600 (120×120×120 мм).

Данные узлы функционируют в условиях высоких температур и значительных термомеханических напряжений, обладают сложным пространственным профилем и тонкостенной структурой, что делает их конструктивно подобными с рабочими колесами, камерами сгорания и лопаточными аппаратами малоразмерных турбореактивных двигателей (ТРД) и вспомогательных силовых установок (ВСУ). Выбор указанных компонентов обусловлен необходимостью отработки методики 3D-сканирования на деталях с различной кривизной поверхностей, наличием острых кромок, технологических отверстий и внутренних полостей.

На первом этапе осуществлялась подготовка поверхностей объектов и проведение контактных измерений. В связи со сложной пространственной геометрией и конструк-

тивными особенностями узлов, исключаящими их полный разбор, фиксировались только характерные линейные и диаметральные размеры. В качестве эталонных средств измерения применялись поверенные штангенциркули, штангенрейсмасы и микрометры. Определенные контактным способом размеры являлись базой для определения погрешности определения размера детали с помощью 3D сканирования.

Каждый узел сканировался с использованием лазерного сканера Shining 3D FreeScan UE Pro (заявленная точность ≤ 20 мкм). Процесс получения полигональных 3D-моделей осуществлялся при варьировании расстояния между точек полигональной сетки (разрешения, r , мм), определяющего детализацию полигональных 3D-моделей.

Для определения размера детали на по полигональной 3D-модели использовалось ПО Geomagic Design X. Оценка погрешности относительно расстояния между точек для корпуса камеры сгорания приведена на рисунке 1.

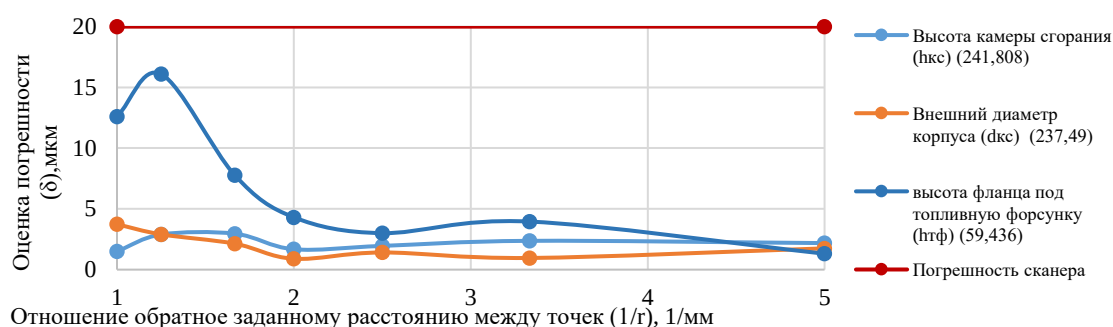


Рис. 1 – Оценка погрешности геометрических параметров корпуса камеры сгорания

При оценке отклонений для корпуса камеры сгорания определен оптимум параметра обратного расстояния между точек ($1/r$), $1/\text{мм}$ равный 2,5, что составляет 0,4 мм от r . Аналогично для других узлов и каждого характерного диаметра определены точки наименьшего отклонения относительно размеров, полученных контактным способом.

Таким образом, на основе геометрических параметров узлов корпуса камеры сгорания, импеллера и лопатки построена зависимость рекомендуемого разрешения сканирования от характерного диаметра детали (рис. 2), позволяющая прогнозировать величину размерной погрешности на этапе подготовки при 3D-сканировании деталей.



Рис. 2 – Оценка соответствия заданного расстояния между точек характерному диаметру детали

По результатам исследования установлена зависимость между характерным размером детали и расстоянием между точками полигональной сетки, которое требуется задавать чтобы получить минимальное отклонение геометрических параметров относительно номинального размера прототипа. Выявлено, что с увеличением габаритного размера объекта требуемое расстояние между точками уменьшается по степенному закону: $y = 0,1078x^{-0,668}$, ($R^2 = 0,8834$). Полученная зависимость может быть использована

при 3D-сканировании деталей энергетического оборудования различной формы и габаритами от 120 до 350 мм по трем измерениям.

Работа выполнена в рамках проекта «Разработка методов автоматизации процесса обратного проектирования деталей и рекомендаций для их последующего изготовления» при поддержке гранта «НИУ «МЭИ» на реализацию программы научных исследований «Приоритет 2030: Технологии будущего» в 2024–2026 гг.

Список литературы

1. Скрынников С. В. [и др.]. Освоение производства и ремонта запасных частей, необходимых для обеспечения плановых ремонтов ГТУ SGT-600 ГПа» Балтика-25», в условиях российских предприятий //Газовая промышленность. – 2018. – №. S3 (773). – С. 12-18.
2. Сарманаева А. Ф. [и др.]. Проблемные вопросы и пути их решения при проведении реверс-инжиниринга узлов компрессорных машин //Омский научный вестник. Серия «Авиационно-ракетное и энергетическое машиностроение». – 2024. – Т. 8. – №. 3. – С. 53-60.
3. Ghorbani H., Khameneifar F. Construction of damage-free digital twin of damaged aero-engine blades for repair volume generation in remanufacturing //Robotics and Computer-Integrated Manufacturing. – 2022. – Т. 77. – С. 102335.
4. Котляр Д.И., Ломанов А.Н. Метод сканирования тонких поверхностей при выполнении ремонта лопаток газотурбинных двигателей //VESTNIK of Samara University. Aerospace and Mechanical Engineering. – 2023. – Т. 22. – №. 4. – С. 112-124.

Сведения об авторах

Герцовский Георгий Александрович – аспирант кафедры инновационных технологий наукоемких отраслей «НИУ «МЭИ». Область научных интересов: газотурбинные двигатели, обратное проектирование деталей наукоемкого оборудования, производство наукоемкого оборудования.

Осипов Сергей Константинович – к.т.н., доцент кафедры инновационных технологий наукоемких отраслей «НИУ «МЭИ». Область научных интересов: энергетические газотурбинные установки и авиационные двигатели, численное моделирование физических процессов, обратное проектирование.

Костюк Антон Иванович – студент кафедры инновационных технологий наукоемких отраслей «НИУ «МЭИ». Область научных интересов: газотурбинные двигатели, обратное проектирование деталей наукоемкого оборудования, производство наукоемкого оборудования.

ASSESSMENT OF THE INFLUENCE OF 3D SCANNING EQUIPMENT SETTINGS ON THE GEOMETRIC DIGITIZATION ERROR OF AERO-ENGINE COMPONENTS

Gertsovsky G.A.¹, Osipov S.K.¹, Kostiuk A.I.¹

¹National Research University “MPEI”, Moscow, Russia, gertsovskyga@mpei.ru

Keywords: reverse engineering, 3D-scanning, point cloud, measurement accuracy assessment, polygonal model, contact measurements.

It is empirically found that point spacing (r , mm) most affects detail and operator time. A power-law relationship between part size (120–350 mm) and required resolution is obtained: $y = 0.1078x^{-0.668}$ ($R^2 = 0.8834$). The proposed resolution selection enhances polygonal model detail. The results are validated on impeller, combustor housing, and turbine blade.