

УДК 621.865.8

Солнцева Дарья Сергеевна, ассистент кафедры «Приборостроение и транспорт»,
Севастопольский государственный университет, г. Севастополь, Россия

e-mail: dssolntseva@mail.sevsu.ru

Репинский Богдан Александрович, ассистент кафедры «Цифровое
проектирование», Севастопольский государственный университет, г. Севастополь,
Россия

e-mail: barepinskiy@mail.sevsu.ru

Мишин Иван Александрович, старший преподаватель кафедры
«Приборостроение и транспорт», Севастопольский государственный университет, г.
Севастополь, Россия

e-mail: iamishin@mail.sevsu.ru

Соустова Лада Игоревна, старший преподаватель кафедры «Приборостроение и
транспорт», Севастопольский государственный университет, г. Севастополь, Россия

e-mail: listoustova@mail.sevsu.ru

ИССЛЕДОВАНИЕ ТОЧНОСТИ 3D-СКАНИРОВАНИЯ И ВЫХОДНОГО КАЧЕСТВА ПОВЕРХНОСТИ ИДЕНТИЧНЫХ ДЕТАЛЕЙ ИЗ РАЗЛИЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ПРИМЕРЕ HEXAGON ABSOLUTE ARM 85

Аннотация. В статье представлены результаты экспериментального исследования влияния физических свойств материалов на точность и качество фасетной поверхности, получаемой при лазерном триангуляционном 3D-сканировании. В качестве объектов исследования использованы пять геометрически идентичных деталей, изготовленных из титанового сплава Ti-6Al-4V, стеклопластика (GRP), а также полимеров PLA и PETG различных цветов.

Сканирование выполнено с помощью портативной измерительной руки Hexagon Absolute Arm 85.

Ключевые слова: 3D-сканирование, лазерная триангуляция, оптические свойства материалов, контроль качества, обратный инжиниринг, полигональная сетка, титан, стекловолокно, PLA, PETG.

Solntseva Darya Sergeevna, Assistant, Department of Instrument Engineering and Transport, Sevastopol State University, Sevastopol, Russia

e-mail: dssolntseva@mail.sevsu.ru

Repinsky Bogdan Aleksandrovich, Assistant, Department of Instrument Digital Design, Sevastopol State University, Sevastopol, Russia

e-mail: barepinskiy@mail.sevsu.ru

Mishin Ivan Aleksandrovich, Senior Lecturer, Department of Instrument Engineering and Transport, Sevastopol State University, Sevastopol, Russia

e-mail: iamishin@mail.sevsu.ru

Soustova Lada Igorevna, Senior Lecturer, Department of Instrument Engineering and Transport, Sevastopol State University, Sevastopol, Russia

e-mail: listoustova@mail.sevsu.ru

INVESTIGATION OF THE ACCURACY OF 3D SCANNING AND THE OUTPUT SURFACE QUALITY OF IDENTICAL PARTS MADE OF DIFFERENT MATERIALS USING THE EXAMPLE OF HEXAGON ABSOLUTE ARM 85

Annotation. The article presents the results of an experimental study of the effect of physical properties of materials on the accuracy and quality of a faceted surface obtained by 3D laser triangulation scanning. Five geometrically identical parts made of Ti-6Al-4V titanium alloy, fiberglass (GRP), as well as PLA and PETG polymers of various colors

were used as objects of research. The scan was performed using the Hexagon Absolute Arm 85 portable measuring arm.

Keywords: 3D scanning, laser triangulation, optical properties of materials, quality control, reverse engineering, polygonal mesh, titanium, fiberglass, PLA, PETG.

1. Введение. Трёхмерное сканирование стало неотъемлемым инструментом современного производства, метрологии и обратного инжиниринга. Однако точность и полнота получаемых цифровых двойников напрямую зависят от физико-оптических характеристик сканируемой поверхности. Различные материалы по-разному взаимодействуют с лазерным излучением, что приводит к вариациям в качестве формируемой полигональной сетки: от эталонной реконструкции до фрагментарных данных с высоким уровнем шума [1]. Актуальность исследования обусловлена возрастающими требованиями к точности цифровизации физических объектов в рамках концепции Индустрии 4.0 [2]. Несмотря на постоянное совершенствование аппаратного обеспечения 3D-сканеров, проблема получения достоверных данных со сложных поверхностей остаётся открытой [3]. Особенно остро это проявляется при работе с полупрозрачными полимерами, композитными материалами и металлами с различной степенью обработки поверхности. Существующие исследования преимущественно фокусируются на метрологических характеристиках самих сканирующих систем [4], тогда как систематический анализ влияния оптических свойств конкретных материалов на процесс триангуляционного сканирования представлен недостаточно.

Проблема усугубляется тем, что производители аддитивных технологий и традиционных методов обработки используют широкий спектр материалов с различными оптическими характеристиками. Отсутствие количественных критериев оценки пригодности материалов для бесконтактного контроля затрудняет выбор оптимальной методики оцифровки и приводит к дополнительным временным и материальным затратам.

2. Теоретическая часть. Работа лазерного сканера базируется на триангуляционном методе измерения, при котором точные пространственные координаты определяются за счёт анализа геометрии лазерного луча и характера его отражения от объекта [5]. При взаимодействии излучения с поверхностью ключевую роль играют физические процессы отражения, рассеивания и поглощения света, интенсивность которых напрямую зависит от оптических свойств материала и его микрорельефа. Итоговое качество и детализация получаемой модели формируются под влиянием совокупности факторов: естественного или искусственного освещения, текстурных особенностей сканируемой поверхности и корректности выбранных настроек сканера, что позволяет минимизировать шумы и обеспечить стабильную точность даже при работе со сложными или неоднородными материалами. Триангуляционный метод измерения основывается на точном определении геометрических параметров треугольника, который образуется лазерным излучателем, точкой на объекте и приемником излучения. Расстояние между излучателем и приемником остается фиксированным, что позволяет точно измерить углы между ними и лучами, отраженными от объекта.

Точность измерений обратно пропорциональна квадрату расстояния до объекта. Для определения положения оптических элементов применяются высокоточные угловые энкодеры, что обеспечивает высокую точность измерений. Для компенсации оптических искажений требуется калибровка системы. Для повышения точности возможно использование нескольких приемников.

Ключевым фактором, определяющим качество сигнала, является характер отражения лазерного излучения от поверхности:

- Зеркальное: угол падения равен углу отражения, что создает четкую и яркую картину.
- Диффузное: характеризуется рассеянием во всех направлениях, что снижает интенсивность сигнала.

○ Смешанное: сочетает зеркальное и диффузное отражения, что усложняет анализ.

Рассеивание света происходит как в полупрозрачных, так и в прозрачных материалах. Объемное рассеяние происходит внутри материала, а поверхностное определяется микрорельефом [6]. Многократное рассеяние усложняет анализ сигнала и зависит от размера неоднородностей структуры. Это, в свою очередь, влияет на пространственное разрешение. Поглощение излучения происходит благодаря фотонным и фононным взаимодействиям. Глубина проникновения зависит от коэффициента поглощения, что позволяет точно определить свойства материала. Нелинейные эффекты при высокой интенсивности излучения могут создавать дополнительные сложности, а фотохимические процессы могут влиять на качество измерений.

Качество лазерных измерений зависит от множества факторов, которые необходимо учитывать при анализе. Что прозрачность определяет глубину проникновения излучения, а отражательная способность влияет на интенсивность сигнала. Показатель преломления важен для полупрозрачных материалов, а анизотропия проявляется в кристаллических материалах. Спектральные характеристики определяют выбор длины волны для лазерного сканирования. Дисперсия показателя преломления может создавать дополнительные сложности.

3. Реализация сканирования. Исследования выполнены с использованием портативной измерительной системы Hexagon Absolute Arm 85 [7].

Изготовлены пять геометрически идентичных деталей конической формы с центральным отверстием на рис.1 :

1. PETG-пластик, белый
2. PLA-пластик, фиолетовый (цветной)
3. PLA-пластик, белый
4. Титановый сплав Ti-6Al-4V (механически обработанная поверхность)
5. Стеклопластик (GRP)

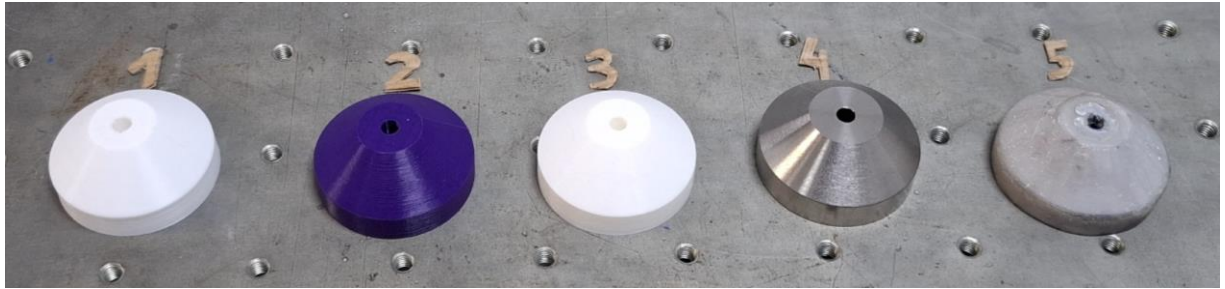


Рисунок 1 – образцы материалов

Перед сканированием проведена стандартная процедура калибровки системы [8]. Сканирование выполнялось в контролируемых условиях освещения с фиксированным рабочим расстоянием и стандартными настройками экспозиции лазера. Обработка данных производилась в специализированном ПО предоставленным производителем сканера рис.2.

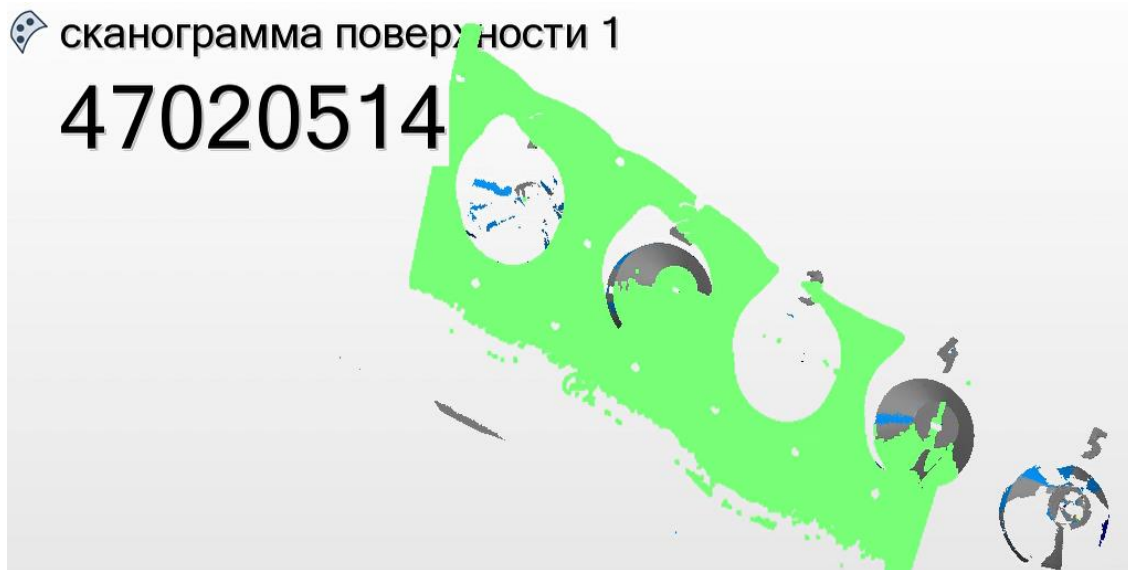


Рисунок 2 – сканограмма поверхностей образцов

На рисунке 2 видна зона захвата, выделенная зеленым полем, в которой размещены пять сканируемых образцов, что наглядно иллюстрирует прямую зависимость качества оцифровки от оптических характеристик поверхности

материала. Белая деталь из PLA (образец 3) практически полностью отсутствует в сканограмме, так как экстремально высокий коэффициент отражения и равномерное поверхностное рассеивание стерли контраст лазерной линии, сделав её невидимой для алгоритмов выделения краев. Деталь из белого PETG (образец 1), хоть и дала больше данных, чем PLA, демонстрирует выраженный эффект субповерхностного рассеивания: луч проникает вглубь полупрозрачного полимера и размывается внутри объема, создавая шумные, рваные контуры вместо сплошной поверхности. Таким образом, сканограмма подтверждает, что нахождение объекта в зоне захвата сканера не гарантирует его точную регистрацию: без контроля над поглощением и рассеиванием излучения даже геометрически правильная деталь превращается в набор артефактов.

Для оценки качества полученных моделей применены такие категории как:

1. Плотность полигональной сетки (количество элементов на единицу площади)
2. Равномерность распределения полигонов
3. Целостность mesh-модели (отсутствие разрывов, артефактов, шума)
4. Чёткость воспроизведения кромок и геометрических переходов
5. Результаты сканирования. Полученные скан-поверхности продемонстрированы на рисунке 2, результаты приведены в таблице.



Рисунок 2 – скан-поверхности образцов

Об- ц	Материал	Визуальный результат сканирования	Оценка качества mesh-модели
№1	PETG, Белый	Критически фрагментное сканирование, геометрия восстановлена частично	Низкая плотность, неравномерное распределение, выраженные разрывы
№2	PLA, Фиолетовый	Эталонная реконструкция, полная геометрия, чёткие границы	Высокая плотность, равномерная сетка, полная целостность, отсутствие артефактов
№3	PLA, Белый	Данные практически не получены, модель отсутствует	Алгоритмы выделения линии не сработали
№4	Ti-6Al-4V	Качественная реконструкция с незначительными краевыми шумами	Высокая плотность, равномерное распределение, локальные артефакты у основания и по краю
№5	GRP	Фрагментарное сканирование, нестабильная геометрия, разрывы	Средняя плотность, неравномерная сетка, артефакты у основания и по краю

На основании сравнения физических образцов и полученных 3D-моделей наблюдается существенная зависимость качества сканирования от материала и оптических свойств поверхности:

Образец №1 (PETG, белый). PETG является аморфным полимером, сохраняющим естественную полупрозрачность даже после пигментации. При взаимодействии с лазером возникает гибридный оптический отклик: часть излучения отражается от поверхности, часть проникает вглубь и рассеивается в объёме. На участках с оптимальным углом падения или минимальной толщиной стенки сканер фиксирует отдельные сегменты лазерной линии. Однако субповерхностное

рассеивание и нестабильный коэффициент отражения приводят к очаговому сбору данных, высокому шуму и потере чёткости кромок.

Образец №2 (PLA, фиолетовый). Тёмная матовая поверхность демонстрирует оптимальное поведение для триангуляции. Высокий коэффициент поглощения предотвращает пересвет сенсора, а микрорельеф обеспечивает равномерное обратное рассеивание строго в направлении объектива. Результат – эталонная полигональная сетка с максимальной целостностью и точностью воспроизведения геометрии.

Образец №3 (PLA, белый). PLA полукристаллический полимер с высокой непрозрачностью и экстремально высоким альбедо за счёт концентрации диоксида титана. Луч не проникает в материал, а полностью рассеивается по поверхности во всех направлениях. Камера не может выделить контрастный лазерный профиль на фоне равномерно засвеченной плоскости: сигнал теряется в шуме или вызывает локальное насыщение матрицы. Алгоритмы line extraction не находят опорных точек с достаточным градиентом яркости, поэтому триангуляционный расчёт не инициируется.

Образец №4 (Ti-6Al-4V). Металлы относятся к материалам с риском зеркальных отражений, однако механическая обработка сформировала микронеровности, переведшие отражение в диффузный режим. Сплав обладает стабильными оптическими характеристиками и не склонен к объёмному рассеиванию.

Образец №5 (GRP). Композит на основе стекловолокна характеризуется оптической неоднородностью. Полимерная матрица обладает слабой полупрозрачностью, а стеклянные нити создают локальные зоны с разным коэффициентом преломления. Это вызывает неравномерное рассеивание луча и пространственное «дрожание» лазерной линии, что не позволяет алгоритму корректно сопоставить проекции и сшить сегменты в единую сетку.

Образец №2 продемонстрировал идеальные условия работы системы, тогда как образцы №1, №3 и №5 выявили типичные ограничения метода, связанные с

недостаточным оптическим контрастом и нестабильным откликом поверхности. При этом степень деградации данных различается: PETG сохраняет минимальный градиент яркости, позволяющий получить фрагментарные, но структурированные участки, тогда как белый PLA создаёт оптически однородное поле, полностью блокирующее работу алгоритмов выделения линии.

5. Выводы. Проведённое тестирование наглядно подтверждает, что успешность лазерного триангуляционного сканирования определяется не столько типом материала, сколько его оптическим поведением в зоне взаимодействия с лазерным лучом. Контроль над отражением, рассеиванием и поглощением света позволяет гарантировать высокую точность цифровых двойников.

Дальнейшие исследования целесообразно направить на количественную оценку влияния толщины матирующего покрытия на метрологическую погрешность, а также на сравнительный анализ эффективности лазерных сканеров с различной длиной волны излучения при работе с полупрозрачными и композитными материалами.

Список литературы

1. Eulopa-Hernandez, JF., Bibiano-Valente, ES., Padilla-Pérez, DA. *et al.* Dimensional validation of CubeSat structures using 3D optical scanning technology. *Sci Rep* **15**, 45536 (2025). <https://doi.org/10.1038/s41598-025-29954-8>
2. Рубанова К.А. Стратегии применения обратного инжиниринга в условиях цифровой трансформации экономики // Human Progress. 2022. Том 9, Вып. 1. С. 13. URL: http://progresshuman.com/images/2023/Том9_1/Rubanova.pdf.
3. Галдин Д. Н. Перепроектирование сложнопрофильных корпусных деталей с применением современных систем геометрического моделирования // А.В. Иванов, О.Б. Тверье // Труды НПО Энергомаш имени академика В.П. Глушко. - 2019. - №35. - С. 173-187.

4. Муклецов А. Метод метрологического контроля деталей, изготовленных по аддитивной технологии, с использованием 3D-сканирования // А. М. Золотов, Л. О. Федосова // Мир компьютерных технологий. - 2021. - С. 22-25.
5. Syam, W. (2015) “On Performance Verification of Simultaneous 4- axis 3D geometric Optical Instrument.”
6. ISO 10360-12:2016
7. <https://andexgeo.ru/product/hexagon-absolute-arm-7-axis/>
8. Рощупкин, С. И. Применение технологии реверс-инжиниринга при проектировании и производстве морских беспилотных аппаратов / С. И. Рощупкин, Д. С. Солнцева // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – 2023. – № 5(361). – С. 190-196. – DOI 10.33979/2073-7408-2023-361-5-190-196. – EDN QMDAKW.