

МАШИНОСТРОЕНИЕ

Научная статья

УДК 621.7.08

EDN: VKAJSF

DOI: 10.21285/1814-3520-2025-4-453-465



Исследование влияния режимов сканирования на точность результатов и производительность процесса при контроле деталей сложной формы

М.А. Корж¹✉, А.Ю. Перелыгина², А.В. Савилов³¹⁻³Иркутский национальный исследовательский технический университет, Иркутск, Россия

Резюме. Цель – исследование влияния разрешения сетки сканирования на точность и время измерений деталей двойной кривизны. В качестве объекта исследования была выбрана типовая авиационная деталь «База люка», имеющая двойную кривизну и повторяющую внешние обводы самолета. Исследования проводились с применением портативного сканера Scantech KSCAN Magicl, позволяющего получать информацию о геометрии изделия без привязки к жесткой базе за счет использования позиционных меток. Сканер имеет линейную точность 0,020 мм, повторяемость 0,010 мм, объемную точность 0,015 мм + 0,030 мм/м – отклонение, которое накапливается с увеличением размера сканируемого объекта; разрешение 0,010 мм. Геометрический контроль детали выполнялся посредством измерений как на внешней, так и на внутренней поверхности. Анализ геометрии проводился на основе кривой, построенной вдоль поверхности детали и по заданным типовым элементам – центрам отверстий. Для построения указанных кривых определялись точки пересечения оси каждого отверстия с поверхностью детали как на контрольной модели, так и на полученном при сканировании изображении. Показано, что увеличение разрешения от 0,1 мм до 0,025 мм приводит к значительному увеличению времени сканирования, тем самым снижая производительность процесса контроля геометрии детали почти в 4 раза. При этом точность сканирования не повышается. Для повышения точности измерения на наиболее ответственных участках, таких как отверстия или зоны со сложной геометрией, рекомендуется применять комбинированный метод контроля – сканирование с локальным повышением разрешения на вогнутых и ответственных поверхностях. Установлено, что сканирование с разрешением сетки 0,1 мм является наиболее рациональным выбором для условий реального производства как обеспечивающее приемлемую точность при минимальных временных затратах. Внедрение подобных технологий позволит сократить продолжительность операций технического контроля, сохранив при этом требуемый уровень качества изготавливаемых деталей.

Ключевые слова: фрезерование, сканирование, поверхность двойной кривизны, разрешение сетки, точность, контроль геометрии

Для цитирования: Корж М.А., Перелыгина А.Ю., Савилов А.В. Исследование влияния режимов сканирования на точность результатов и производительность процесса при контроле деталей сложной формы // iPolytech Journal. 2025. Т. 29. № 4. С. 453–465. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2025-4-453-465>. EDN: VKAJSF.

MECHANICAL ENGINEERING

Original article

Accuracy and process performance in the inspection of complex geometry as a function of scanning parameters

Maksim A. Korzh¹✉, Aleksandra Yu. Perelygina², Andrey V. Savilov³¹⁻³Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia

Abstract. This study examines the effects of scanning mesh resolution on the measurement accuracy and duration for parts with double curvature. The research employed a standard aircraft component, referred to as a hatch base. This component features a double curvature that conforms to the external contours of an airplane. Measurements were carried out using a portable Scantech KSCAN Magic scanner, which captures part geometry without a fixed datum using positional markers. This scanner has a linear accuracy of 0.020 mm, repeatability of 0.010 mm, volumetric accuracy of 0.015 mm + 0.030 mm/m, and resolution of 0.010 mm. Geometric inspection was performed on the external and internal surfaces of the part. The analysis involved a curve constructed along the part surface and specific datum features, namely, hole centers. For both the reference model and scanned data, the intersection points of each hole axis with the part surface were determined to construct these curves. The results demonstrate that an increase in resolution from

0.1 mm to 0.025 mm significantly extends the scanning time, thereby reducing the geometric inspection throughput by nearly a factor of four, without a corresponding improvement in accuracy. To enhance the measurement accuracy of critical features, such as holes or complex geometry zones, it is recommended to apply a combined inspection method involving scanning with locally increased resolution on concave and critical surfaces. The study established that a mesh resolution of 0.1 mm represents the most rational choice for real-world production environments, as it provides acceptable accuracy with minimal time investment. The implementation of such optimized scanning strategies can reduce the duration of quality control operations while maintaining the required quality standards for the manufactured parts.

Keywords: milling, scanning, double-curvature surface, mesh resolution, accuracy, geometry inspection

For citation: Korzh M.A., Perelygina A.Yu., Savilov A.V. Accuracy and process performance in the inspection of complex geometry as a function of scanning parameters. *iPolytech Journal*. 2025;29(4):453-465. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2025-4-453-465>. EDN: VKAJSF.

ВВЕДЕНИЕ

Во многих областях машиностроения, таких как авиастроение, судостроение и автомобильное, применяются детали со сложными криволинейными поверхностями: лопатки турбин, фюзеляжи, крылья и хвостовое оперение самолетов, гребные винты и корпуса кораблей, панели кузовов автомобилей и другие изделия. Основной технологической операцией при их производстве, как правило, является фрезерование. Указанная операция реализуется на пятикоординатных фрезерных обрабатывающих центрах. Несмотря на технологические возможности современного оборудования, достижение заданной точности размеров и формы деталей является непростой задачей. Одним из наиболее эффективных методов решения указанной задачи выступает промежуточный контроль детали. Как правило, операция промежуточного контроля предшествует операциям окончательной обработки. Промежуточный контроль детали позволяет выявить отклонения размеров и формы деталей, обусловленные такими факторами, как отжатие и износ инструмента, перераспределение внутренних напряжений в детали и т. п.

Промежуточный контроль, как правило, включает в себя как измерение контрольных точек на поверхности детали, так и измерение геометрических элементов, например, отверстий. Полученные результаты используются для корректировки управляющей программы окончательной обработки детали. Такой подход обеспечивает заданную точность размеров и формы детали, а также позволяет избежать повышения машинного

времени на операциях предварительной обработки, обусловленного снижением режимов резания при попытке уменьшить искажение формы детали, вызванное перераспределением внутренних напряжений.

Корректировка управляющей программы предполагает, как изменение режимов резания, в первую очередь, глубины и ширины резания, так и изменение диаметра режущего инструмента. Наряду с указанной корректировкой управляющей программы может применяться трансформация осей системы координат детали, позволяющая перераспределить оставшийся припуск заготовки таким образом, чтобы компенсировать искажение формы детали. Данный метод предполагает использование как специального программного обеспечения, так и специальной зажимной оснастки.

При контроле геометрии деталей сложной формы нередко возникают проблемы с определением контрольных точек и их измерением, особенно это касается деталей, имеющих низкую изгибную и крутильную жесткость, например, панель обшивки самолета [1].

Выбор методов промежуточного контроля при обработке деталей на фрезерных обрабатывающих центрах обусловлен тем, что, во-первых, результаты контроля должны поступать в систему числового программного управления (ЧПУ) станка в цифровом виде для последующей корректировки управляющей программы и, во-вторых, в процессе контроля деталь не должна убираться со стола станка, что требуется, например, при ее контроле на координатно-измерительной машине (КИМ)^{4,5} [2–5].

⁴А. с. № 590586, СССР, А1 Г01 В 5/28. Способ сравнения поверхностей двойкой кривизны правого и левого исполнения / В.Х. Подойчин, В.В. Подойчин. Заявка № 2125357, заявл. 11.04.1975; опубл. 30.01.1978. Бюл. № 4. EDN: NYAGDM.

⁵А. с. № 1357688, СССР, А1 Г01 В 5/207. Машина для контроля геометрической формы криволинейных поверхностей / В.С. Савицкий, Ю.А. Самохвалов, В.А. Чудов, Т.И. Тарасова, М.Н. Востриков, Т.И. Казакевич, Б.Ф. Ефимов, Л.Н. Скорнякова; заявитель и патентообладатель Предприятие П/Я А-1132, Предприятие П/Я М-5671. Заявка № 3840622/25-28, заявл. 29.10.1984; опубл. 07.12.1987. Бюл. № 45. EDN: PUDNOB.

Измерение детали на станке возможно с использованием контактной измерительной головки и специальных измерительных циклов системы ЧПУ станка. К основным преимуществам контактной головки относятся высокая точность измерений и независимость результатов измерения от состояния поверхности детали. При выборе конкретного типа контактной головки следует иметь ввиду, что традиционные датчики с контактной системой срабатывания показывают спортивную точность только при контакте щупа вдоль координатных осей. А головки, имеющие систему срабатывания, основанную на тензодатчиках, обеспечивают заданную точность при контакте в произвольном направлении, что и имеет место при измерении криволинейных поверхностей. Основным недостатком контактных головок является более низкая производительность процесса измерения по сравнению с оптическими методами [6, 7].

Также для контроля криволинейных поверхностей используются оптические неконтактные методы. Они делятся на два основных типа: сканирование с проекцией структурированного света и фотограмметрия.

Фотограмметрия – это метод 3D-сканирования, при котором форма объекта восстанавливается по множеству фотографий, сделанных с разных ракурсов, значительно менее распространена в машиностроении из-за специфики применения и меньшей точности (~0,5 мм/м) по сравнению с лазерным сканированием [8].

3D-сканирование с проекцией структурированного света или лазеров в настоящее время является одним из самых быстрых способов контроля геометрии детали. Данный тип сканеров использует деформации от проецируемого света или лазеров для расчета трехмерных координат поверхностей объекта. Сканирующее оборудование бывает нескольких типов: стационарные лазерные радары (лидары), сканирующие головки для оборудования; различные варианты портативных сканеров [9, 10].

Сканирующие лазерные головки применяются на обрабатывающем оборудовании не только для промежуточного контроля, но и для контроля заготовок с оптимизацией управляющей программы. Широкое применение такие головки нашли в оборудо-

вании для зеркального фрезерования. С их помощью выполняется сканирование формообразованных заготовок и последующий реверс-инжиниринг, позволяющий получить 3D-модель заготовки. Полученная электронная 3D-модель используется для генерации управляющей программы станка. При изготовлении детали методом зеркального фрезерования лазерная головка применяется также для промежуточного и окончательного контроля.

Портативные сканеры являются самым универсальным оборудованием и могут применяться как для промежуточного и окончательного контроля деталей, так и для оцифровки производственной оснастки, создания цифровых двойников производственных компонентов, обратного проектирования и прототипирования [11–13]. Также есть примеры портативных ручных КИМ, которые предназначены для анализа геометрии и сравнения с CAD-моделями (от англ. Computer-Aided Design – системы автоматизированного проектирования) в реальном времени с использованием сканирующей головки. Но такие ручные КИМ, как правило, могут быть ограничены в диапазоне работы и степенях подвижности в зависимости от количества сегментов. Из-за этих недостатков зачастую предпочтение отдается ручным сканерам.

Примеры исследований эффективности лазерного сканирования в авиастроении показывают сокращение времени контроля геометрии деталей на 25–30% [14–16]. Несмотря на существование различных методов контроля, остается нерешенной проблема точного и быстрого измерения крупногабаритных криволинейных поверхностей деталей [17–19]. Решение указанной проблемы зависит от выбора параметров сканирования, обеспечивающих достижение заданной точности при максимальной производительности процесса для определенных технологических условий. Ключевым параметром при этом является разрешение сетки или шаг сканирования. Разрешение сетки при сканировании – это минимальное расстояние между двумя точками сканирования (узлами сетки), в которых измеряются и фиксируются данные о геометрии детали. Оно определяет детализацию получаемой цифровой модели или изображения. Важно отметить, что низкое разрешение может по-

влиять на определение границ контролируемого элемента [20].

Теоретически увеличение разрешения сетки должно увеличивать точность сканирования, но указанная зависимость также определяется конструктивными особенностями измеряемой детали. Зависимость точности измерения от разрешения сетки при различных технологических условиях требует дополнительного изучения. С другой стороны, при увеличении разрешения сетки увеличивается время сканирования, что повышает технологическую себестоимость изделия.

Таким образом, целью данной работы является исследование влияния разрешения сетки сканирования на точность и время измерений деталей двойной кривизны. Полученные в ходе работы результаты могут быть применены при разработке операций промежуточного контроля деталей, изготавливаемых на фрезерных обрабатывающих центрах с использованием лазерных портативных сканеров и сканирующих лазерных головок, использующих аналогичный портативным сканерам принцип измерения.

МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ИССЛЕДОВАНИЙ

В качестве объекта исследования была выбрана деталь «База люка» как имеющая типовые конструктивные элементы самолета

и повторяющая его внешние обводы (рис. 1). При проведении исследований 3D-сканирование детали выполнялось ручным портативным сканером Scantech KSCAN Magic I, который позволяет получать данные о геометрии изделия без привязки к жесткой базе за счет использования позиционных меток. Сканер подключается к портативному компьютеру через USB-интерфейс.

Существует два основных режима сканирования: режим в виде перекрещивающихся синих лазеров и режим параллельных синих лазеров (см. рис.1). Режим с параллельными линиями лазеров применяется непосредственно для увеличения разрешения и уменьшения влияния бликов на детали. Для позиционирования сканера необходимо применять позиционные метки (контрастные черно-белые точки, показанные на рис. 1 ближе к середине детали).

Основные метрологические характеристики используемого оборудования:

- точность до 0,020 мм – это максимальное отклонение от реальных размеров объекта, чем меньше значение, тем ближе сканер передает геометрию детали;
- повторяемость до 0,010 мм – это способность сканера выдавать одинаковые результаты при многократном сканировании одного и того же объекта;



Рис. 1. Деталь «База люка» в процессе сканирования

Fig. 1. Hatch Base part scanning

- объемная точность до 0,015 мм + 0,030 мм/м. Это отклонение, которое накапливается с увеличением размера сканируемого объекта;

- разрешение до 0,010 мм – минимальный размер детали, которую сканер может различить, чем выше разрешение, тем мельче элементы (например, царапины или текстура поверхности) будут видны.

Процесс контроля геометрии детали состоит из трех этапов: подготовительный, сканирование и контроль.

Подготовительный этап включает настройку параметров сканирования и размещение позиционных меток на детали. Позиционные метки – круглые контрастные маркеры со светоотражающей поверхностью в центре и темной окружностью по периметру (см. рис. 1, находятся ближе к центру). Размещение меток происходит по следующим правилам:

1) метки не должны находиться на критичных для контроля местах;

2) при сканировании в поле зрения сканера должно постоянно находиться не менее четырех меток;

3) дополнительно размещаются три метки на уровне или выше стола, где расположена оснастка.

Метки, расположенные на столе, определяют плоскость, используемую для программного отсечения фона: все объекты, находящиеся ниже данной плоскости, не сканируются (игнорируются программным обеспечением). Для данной детали размечом 300x190x15 мм потребовалось 36 меток, включая метки для плоскости отсечения фона. Время, затраченное на их нанесение, составило приблизительно 1 мин.

Настройка параметров сканирования заключается в установке времени выдержки и разрешения сетки.

Время выдержки – это интервал времени, в течение которого светочувствительная матрица сканера подвергается воздействию света, отраженного от объекта. Во всех экспериментах время выдержки было установлено на уровне 6 мс. Данное значение было определено опытным путем как оптимальное для обеспечения стабильного захвата геометрии и текстуры поверхностей исследуемой детали при доступном уровне освещения.

В экспериментах устанавливались три значения разрешения сетки:

1) 0,1 мм как граничное значение для режима «быстрого сканирования», обеспечивающее максимальное разрешение при значительно более высокой скорости сканирования;

2) 0,05 мм как среднее значение между 0,1 и минимально возможным 0,01 мм для оборудования в более медленном режиме сканирования с параллельными линиями;

3) 0,025 мм как нижнее пороговое значение, поскольку при ручном сканировании с более низкими значениями существенно возрастает сложность управления оборудованием даже при минимальной скорости перемещения.

Общее время выполнения всех операций подготовительного этапа для детали составило приблизительно 11 мин.

После включения оборудования выполняется калибровка сканера с использованием эталонной калибровочной плиты.

На этапе сканирования происходит измерение точек на поверхности детали.

Этап сканирования начинается с создания облака позиционных меток. Данная операция выполняется для оптимизации процесса и уменьшения ошибки позиционирования сканера относительно детали. Оператор последовательно сканирует все размещенные метки, чтобы система могла их зарегистрировать в системе координат. После создания облака меток выполняется непосредственно сканирование геометрии детали. Стратегия сканирования для значений разрешения, внешней и внутренней сторон (рис. 2), наборов отверстий (рис. 3) была одинаковой.

Для получения цифровой модели цилиндрических отверстий на максимально возможной глубине сканирование каждого отверстия проводилось по квадрантам (четвертям). Проходы осуществлялись вдоль рядов отверстий для каждого квадранта отверстия (направления наборов см. на рис. 3) под углом 30–45° к поверхности детали, что обеспечивало оптимальный захват внутренней поверхности. Такая стратегия обеспечивает не только полное сканирование целевых отверстий, но и одновременный захват данных об отверстиях в соседних рядах за счет перекрытия сканируемых участков детали (не только отверстий), что повышает общую эффективность процесса.

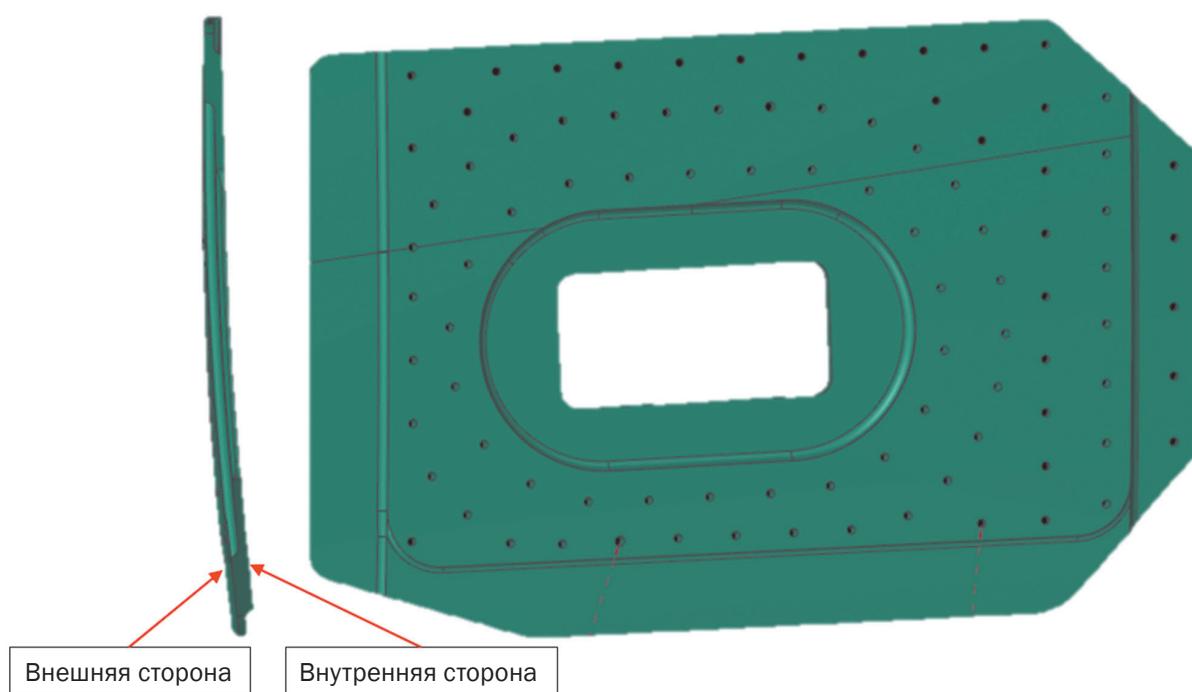


Рис. 2. Деталь «База люка» с указанием сторон детали
Fig. 2. Hatch Base part with indicated sides

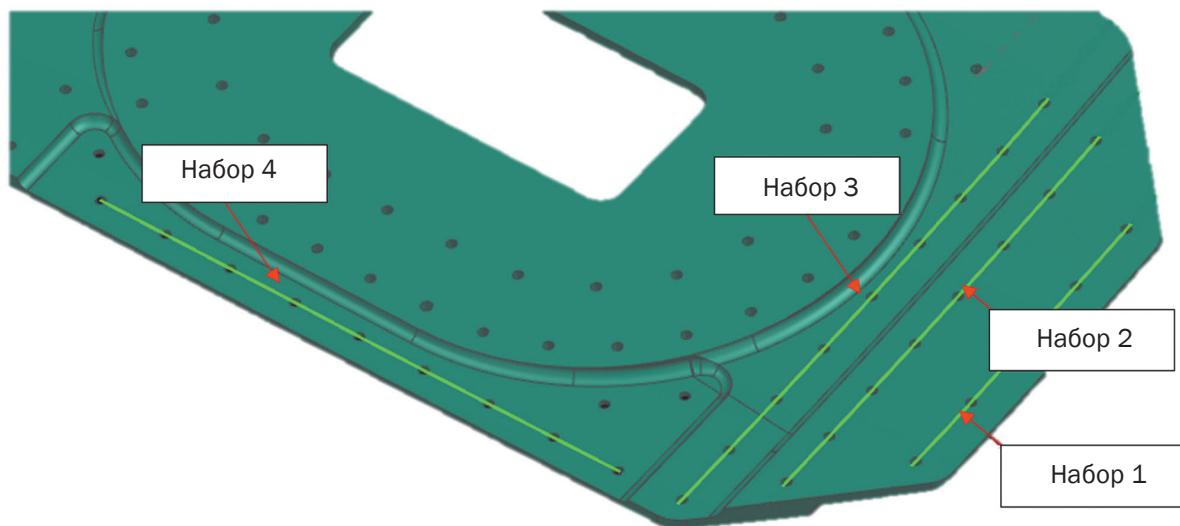


Рис. 3. Наборы отверстий на внутренней поверхности детали «База люка»
Fig. 3. Sets of holes on the internal surface of the Hatch Base part

Дополнительно выполнялся проход по внешнему контуру детали для фиксации ее полных габаритных размеров и положения в пространстве. Конечным результатом этапа сканирования являлось необработанное облако точек – неструктурированное множество точек в трехмерном пространстве, где каждая точка определена своими декартовыми координатами (X, Y, Z).

Хронометраж процесса сканирования проводился с помощью секундомера.

На этапе контроля выполнялись операции обработки облака точек, построения элементов, измерения элементов и анализа полученных результатов.

Обработка облака точек осуществлялась в программном обеспечении сканера и заключалась в удалении точек, которые не от-

носятся к детали, и создании полигональной сетки (триангуляции). Триангуляция происходила в автоматическом режиме без использования фильтров для сглаживания сетки.

Анализ геометрии проводился в программном обеспечении NX SIEMENS на основе кривой, построенной вдоль поверхности детали по заданным типовым элементам – центрам отверстий (наборы обозначены на рис. 3). Для получения данной кривой по сформированной на предыдущем этапе полигональной сетке строится поверхность, на которой расположены отверстия. Для нахождения оси отверстия строится цилиндр по отсканированному фрагменту (рис. 4). При этом глубина сканирования отверстия напрямую влияет на точность определения оси отверстия, необходимую для построения точек кривой: чем глубже отсканировано отверстие, тем точнее можно построить ось отверстия.

Через точки пересечения осей отверстий с поверхностью детали строилась трехмерная кривая (сплайн), принадлежащая этой поверхности. Всего было построено по четыре кривых на каждой стороне детали. При построении использовались следующие параметры SIEMENS NX:

– геометрическая непрерывность уровня G2 на участках между вершинами. Параметр G2 гарантирует непрерывность кривизны, что обеспечивает максимально гладкую форму кривой;

– точность аппроксимации (отклонение сплайна от исходных точек) не более 0,001 мм.

Аналогичным образом были построены сечения на контрольной модели. Для количественной оценки расхождений изменилась длина каждой полученной кривой. Полученные значения сравнивались с длиной соответствующих кривых на эталонной модели. Точность измерения оценивалась по разнице длин эталонной и фактической кривых.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ОБСУЖДЕНИЕ

В ходе экспериментов было проведено шесть сканирований с различными разрешениями сетки с обеих сторон детали. Результаты влияния разрешения на глубину сканирования отверстий и затраченное время приведены в таблице.

При разрешении сканирования 0,1 мм (см. таблицу) наблюдается полное отсутствие фаски на границе отверстия, что обусловлено сглаживанием граней и мелких элементов, в то же время регистрируется значительная глубина отверстия. При разрешении 0,05 мм уменьшается глубина сканирования части отверстия, фаска также получается сглаженной. Четкое проявление фаски наблюдается только при разрешении 0,025 мм, глубина сканированной части отверстия сохраняется, как и при разрешении 0,05 мм. Также было установлено, что увеличение раз-

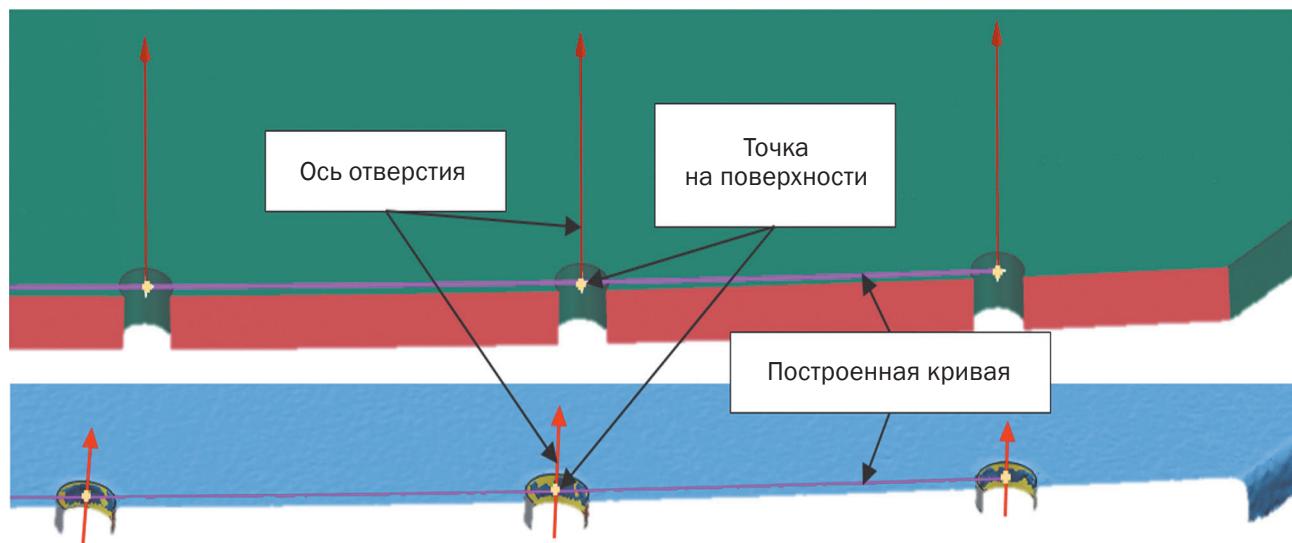


Рис. 4. Построение кривой на внутренней поверхности детали «База люка» (сверху – на контрольной модели, снизу – на 3D-скане)

Fig. 4. Curve plotting on the internal surface of the Hatch Base part (above – reference model, below – 3D scan)

Результаты измерения отверстий
Hole measurement results

Разрешение, мм	0,1	0,05	0,025
Внешний вид построения			
Глубина сканирования отверстий, мм	1,81	0,69	0,69
Время, мин	внешняя	5:42	13:58
	внутренняя	5:50	14:26
			20:26
			20:38

решения сетки приводит к значительному увеличению времени сканирования (рис. 5).

На рис. 6 и 7 представлены графики относительных отклонений длин кривых после сканирования от их эталонных значений на

внешней и внутренней сторонах детали соответственно. При сканировании с внешней стороны детали среднее отклонение находится в диапазоне $\pm 0,05\%$ (рис. 6), при этом для кривой «Набор 4» или в рисунке отклонение

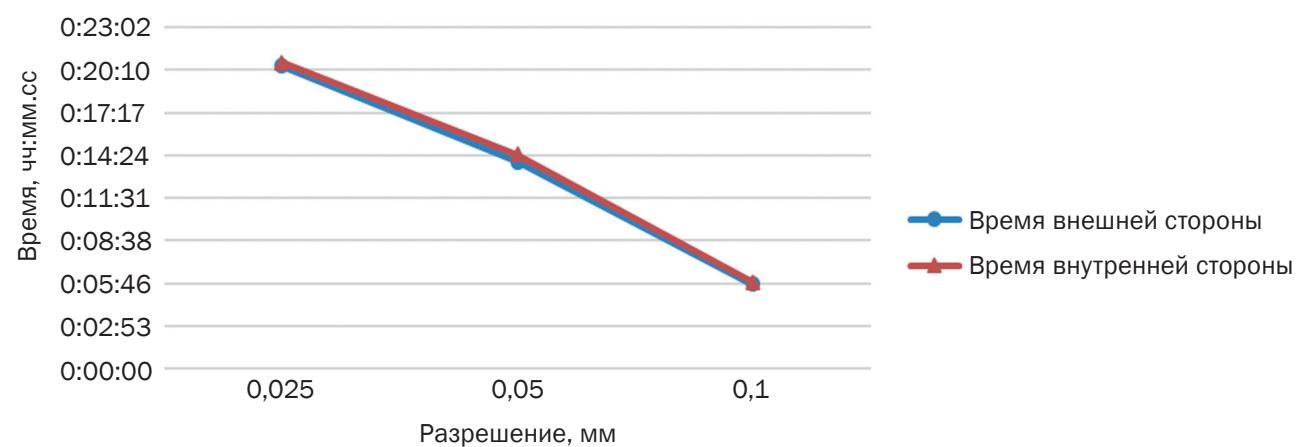


Рис. 5. Зависимость времени сканирования каждой из сторон детали от разрешения сетки
Fig. 5. Scanning time per each part side vs mesh resolution

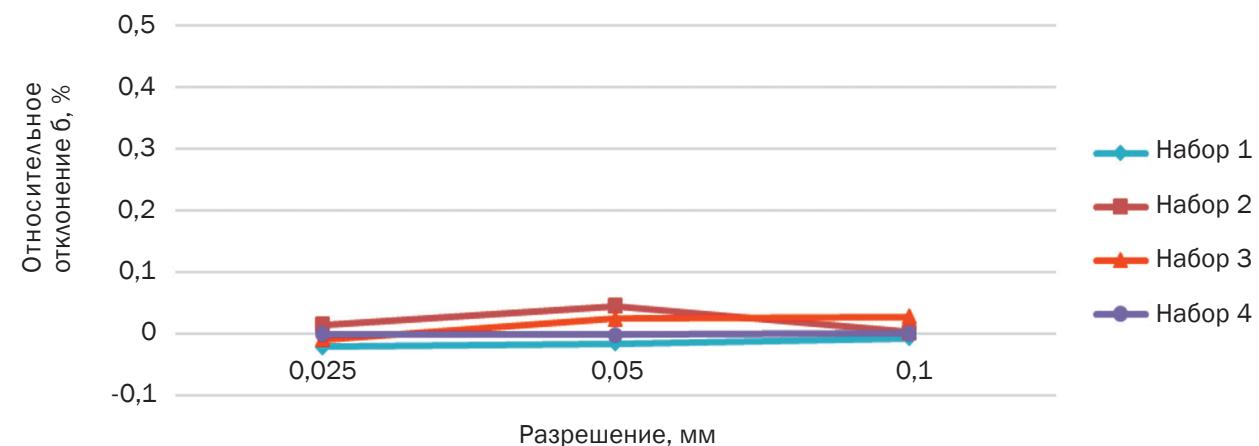


Рис. 6. Относительные отклонения измерений для внешней стороны детали
Fig. 6. Relative measurement deviations for the outer surface of the part

составило менее 0,01%. При сканировании с внутренней стороны детали отклонения для всех кривых, кроме кривой «Набор 3», не превышают 0,12% (рис. 7). В то же время относительные отклонения для кривой «Набор 4» остаются стабильными и показывают хорошую повторяемость измерений с внешней и внутренней сторон. Это связано с тем, что поверхность, на которой расположен данный массив отверстий, имеет наименьшую кривизну.

Кривая «Набор 3» демонстрирует значительные отклонения по точности в диапазоне от 0,42 до 0,47% (рис. 7). Также наблюдают-

ся существенные колебания отклонений для внутренней и внешней поверхностей детали, что может свидетельствовать об особенностях ее геометрии, отличающейся от эталонной модели.

Для подтверждения этой гипотезы было выполнено совмещение 3D-скана детали с контрольной моделью и построена цветовая карта отклонений (рис. 8). На цветовой карте видно, что все отверстия «Набора 3» имеют смещения относительно эталонной модели (желтые области рядом с отверстиями), причем крайние отверстия сдвинуты внутрь набора.

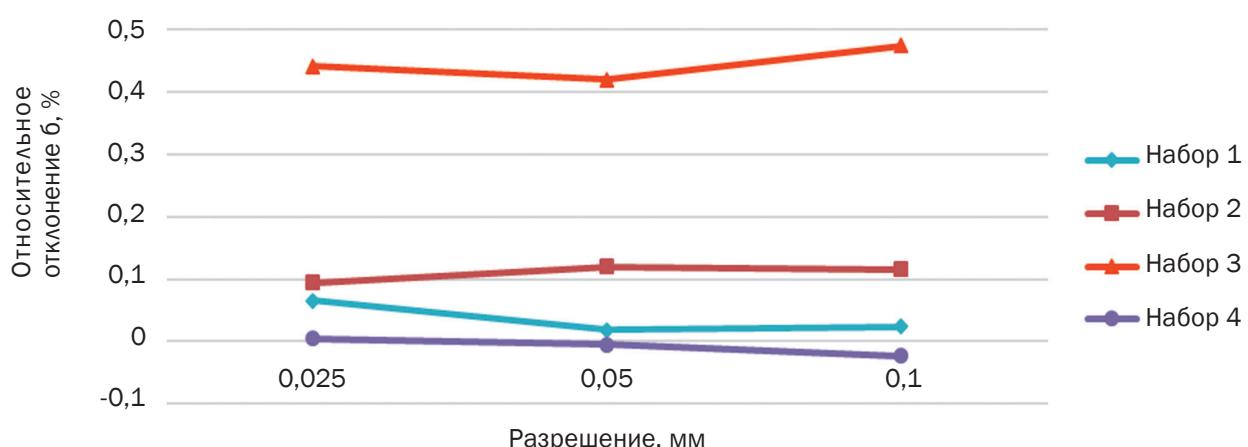


Рис. 7. Относительные отклонения измерений для внутренней стороны детали
 Fig. 7. Relative measurement deviations for the internal surface of the part

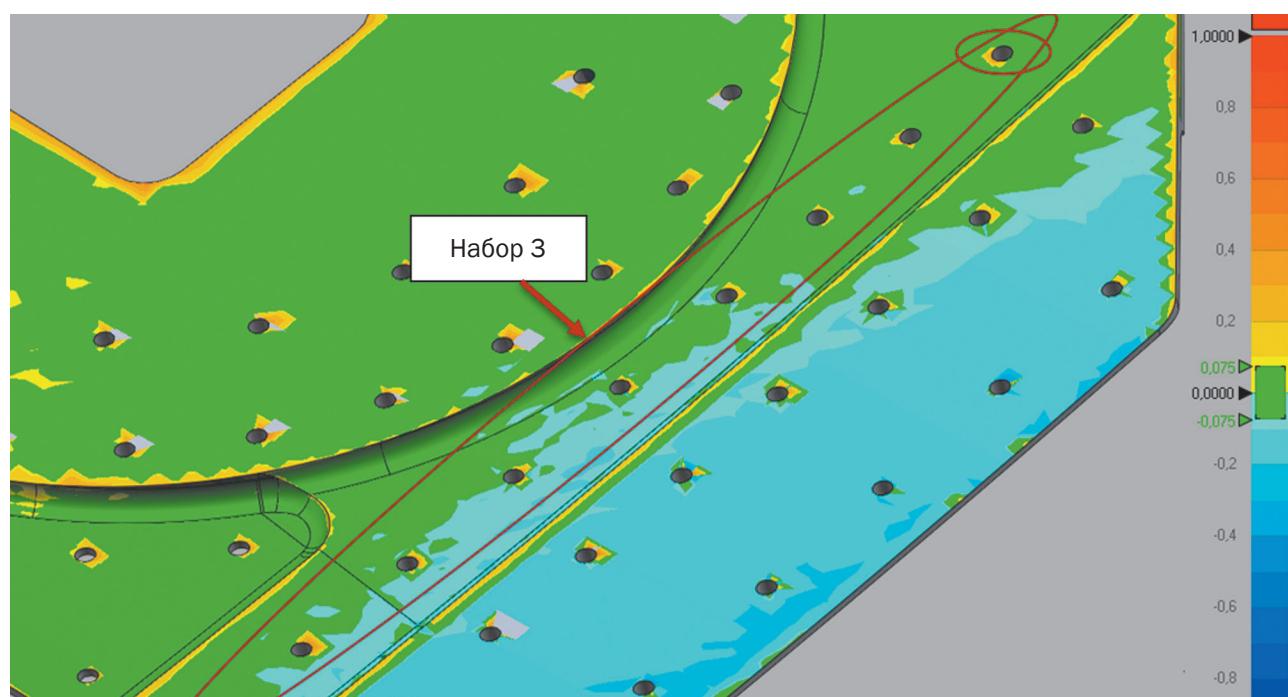


Рис. 8. Цветовая карта сравнения «Набор 3» с моделью
 Fig. 8. Color chart to compare Set 3 with the reference model

Таким образом, было установлено, что причина существенного отклонения длины кривой после сканирования от ее эталонного значения заключается в смещении осей крайних отверстий.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенное исследование позволило оценить эффективность использования сканирующего оборудования для контроля криволинейных деталей двойной кривизны в производстве на примере детали «База люка». Результаты показали, что выбор разрешения сканирования при контроле геометрии детали оказывает значительное влияние на трудоемкость процесса. Было установлено, что увеличение разрешения сетки от 0,1 мм до 0,025 мм приводит к кратному росту времени выполнения операции, не повышая точность сканирования. Для повышения точности рекомендуется применять комбинированные методы контроля, такие как сканирование с локальным повышени-

ем разрешения на вогнутых и ответственных поверхностях.

На основании проведенных исследований можно сделать вывод, что сканирование с разрешением 0,1 мм является наиболее рациональным выбором для производства, как обеспечивающее приемлемую точность при минимальных временных затратах. Для особо ответственных участков, таких как отверстия или зоны со сложной геометрией, рекомендуется применение локального повышения разрешения сканирования. Итоговое время, затрачиваемое на контроль, при возможности использования разрешения равного или большего 0,1 мм, действительно может быть меньше чем на КИМ, и значительно меньше, чем при контроле ручным инструментом. Внедрение подобных технологий позволит сократить продолжительность операций контроля и добавить возможность пересчета базирования детали после обработки, сохранив при этом требуемый уровень качества.

Список источников

1. Wang Xinfeng, Liu Qing, Jia Kun, Zhang Yan, Zhang Haiyin, Zhen Jia. Study of aircraft skin defect detection and characterization methods // IEEE 11th International Conference on Information, Communication and Networks (Xi'an, 17–20 August 2023). Xi'an: IEEE, 2023. P. 743–750. <https://doi.org/10.1109/ICICN59530.2023.10393190>.
2. Mikeš P. Influence of stylus system configuration on the variability of measurement result on CMM // Manufacturing Technology. 2016. Vol. 16. Iss. 1. P. 184–188. <https://doi.org/10.21062/ujep/x.2016/a/1213-2489/MT/16/1/184>.
3. Савицов А.В., Пятых А.С., Тимофеев С.А. Анализ прогрессивных технологий механообработки транспедиционных винтов // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2020. Т. 24. № 6. С. 1190–1198. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2020-6-1190-1198>. EDN: QCGMNJ.
4. Van Brügge L., Çetin K.M., Koeberle S.J., Thiele M., Sturm F., Hornung M. Application of 3D-scanning for structural and geometric assessment of aerospace structures // CEAS Aeronautical Journal. 2023. Vol. 14. P. 455–467. <https://doi.org/10.1007/s13272-023-00654-1>.
5. Кудряшова И.А., Белякова В.А. Координатно-измерительные машины: сравнительный анализ характеристик, рекомендации по применению // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2022. № 4. С. 302–307. <https://doi.org/10.24412/2071-6168-2022-4-302-307>. EDN: UJJYDK.
6. Urban Ja., Beranek L., Koptiš M., Šimota Ja., Košťák O. Influence of CMM scanning speed and inspected feature size on an accuracy of size and form measurement // Manufacturing Technology. 2020. Vol. 20. No. 4. P. 538–544. <https://doi.org/10.21062/mft.2020.074>. EDN: FHCOPM.
7. Melichar M., Kubatova D., Kutlwaser J. Influence of CMM velocity on scanning precision // 28th International DAAAM Symposium on Intelligent Manufacturing and Automation (Vienna, 8–11 November 2017). Vienna: DAAAM International, 2017. P. 0400–0409. <https://doi.org/10.2507/28th.daaam.proceedings.056>.
8. Geng Jason. Structured-light 3D surface imaging: a tutorial // Advances in Optics and Photonics. 2011. Vol. 3. Iss. 2. P. 128–160. <https://doi.org/10.1364/AOP.3.000128>.
9. Гура Д.А., Дьяченко Р.А., Андрющенко А.В., Белоконь И.А., Степаненко В.Е. Устройство и принцип работы наземного лазерного сканера на примере LEICA SCANSTATION C10 // Научные чтения имени профессора Н.Е. Жуковского: сб. науч. статей XIII Междунар. науч.-практ. конф. (г. Краснодар, 21–22 декабря 2022 г.). Краснодар: КВВАУЛ, 2023. С. 357–361. EDN: OKSYFM.
10. Антипов Д.В., Ефремкин О.С., Самохвалов В.Н., Еськина Е.В. Определение систематических ошибок, возникающих при измерениях лазерным трекером // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2021. № 11. С. 531–538. <https://doi.org/10.24412/2071-6168-2021-11-531-538>. EDN: QLPYXF.
11. He Jiajue, Xiong Wei. Surface feature extraction method for cloud data of aircraft wall panel measurement points // Journal of Computational Science. 2024. Vol. 83. P. 102427. <https://doi.org/10.1016/j.jocs.2024.102427>. EDN: XLCWXG.

12. Суворов В.А., Кирилловский М.А., Петров В.В., Изюмова В.А. Лазерное сканирование поверхности прототипов и моделей летательных аппаратов // Дополнение к материалам КИМИЛА-2020. Дополнение к матер. IV Отраслевой конф. по измерительной технике и метрологии КИМИЛА-2020 (г. Жуковский, 10–11 ноября 2021 г.). Жуковский: ЦАГИ, 2021. С. 29–53. EDN: QAQASB.
13. Ru Wang. Research on measuring method of RVSM regional waviness // Journal of Physics: Conference Series. 2020. Vol. 1635. Iss. 1. P. 012006. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1635/1/012006>. EDN: KUKKLF.
14. Kumar A.S., Chandrasekaran C. Analysis of dynamic probing errors in measuring machines // Innovative Design, Analysis and Development Practices in Aerospace and Automotive Engineering / eds. U. Chandrasekhar, L.J. Yang, S. Gowthaman. Singapore: Springer, 2019. P. 473–482. https://doi.org/10.1007/978-981-13-2697-4_51.
15. Ziout A., Qudeiri J.A., Murad M., Khader R., Alwahedi F., Khaleel A., et al. Exploring photogrammetry/3D scanning technology for quality control process in an aerospace manufacturing company // 13th Annual International Conference on Industrial Engineering and Operations Management (Manila, 7–9 March 2023). Manila: IEOM Society International, 2023. P. 2261–2268. <https://doi.org/10.46254/AN13.20230605>.
16. Bu Huahai, Huang Nuodi, Huang Jie, Liu Gang, Wang Yuhua, Zhu Limin. Geometric feature extraction and its profile accuracy evaluation for pockets on curved aircraft skin from scanned point clouds // Measurement Science and Technology. 2025. Vol. 36. No. 1. P. 015021. <https://doi.org/10.1088/1361-6501/ad8cfc>. EDN: WXQMF.
17. Kyle S. Explore3DM – a directory and more for 3D metrology // Standards. 2021. Vol. 1. Iss. 2. P. 67–78. <https://doi.org/10.3390/standards1020007>.
18. Radvar-Esfahlan H., Tahan S.-A. Nonrigid geometric metrology using generalized numerical inspection fixtures // Precision Engineering. 2012. Vol. 36. Iss. 1. P. 1–9. <https://doi.org/10.1016/j.precisioneng.2011.07.002>.
19. Pressley A. Elementary differential geometry, by Andrew Pressley // The Mathematical Gazette. Springer Undergraduate Mathematics Series. 2001. Vol. 85. Iss. 503. P. 372–373. <https://doi.org/10.2307/3622071>.
20. Babanezhad K., Foucault G., Sabri V., Tahan A., Bigeon J. The fixtureless inspection of flexible parts based on semi-geodesic distance // Precision Engineering. 2019. Vol. 59. P. 174–184. <https://doi.org/10.1016/j.precisioneng.2019.07.002>.

References

1. Wang Xinfeng, Liu Qing, Jia Kun, Zhang Yan, Zhang Haiyin, Zhen Jia. Study of aircraft skin defect detection and characterization methods. In: *IEEE 11th International Conference on Information, Communication and Networks*. 17–20 August 2023, Xi'an. Xi'an: IEEE; 2023, p. 743–750. <https://doi.org/10.1109/ICICN59530.2023.10393190>.
2. Mikeš P. Influence of stylus system configuration on the variability of measurement result on CMM. *Manufacturing Technology*. 2016;16(1):184–188. <https://doi.org/10.21062/ujep/x.2016/a/1213-2489/MT/16/1/184>.
3. Savilov A.V., Pyatykh A.S., Timofeev S.A. Analysis of advanced transpedicular screw machining technologies. *Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2020;24(6):1190–1198. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2020-6-1190-1198>. EDN: QCGMNJ.
4. Van Brügge L., Çetin K.M., Koeberle S.J., Thiele M., Sturm F., Hornung M. Application of 3D-scanning for structural and geometric assessment of aerospace structures. *CEAS Aeronautical Journal*. 2023;14:455–467. <https://doi.org/10.1007/s13272-023-00654-1>.
5. Kudryashova I.A., Belyakova V.A. Coordinate-measuring machines: comparative analysis of characteristics, recommendations for application. *Proceedings of the Tula State University. Technical Science*. 2022;4:302–307. (In Russ.). <https://doi.org/10.24412/2071-6168-2022-4-302-307>. EDN: UJJYDK.
6. Urban Ja., Beranek L., Koptiš M., Šimota Ja., Košťák O. Influence of CMM scanning speed and inspected feature size on an accuracy of size and form measurement. *Manufacturing Technology*. 2020;20(4):538–544. <https://doi.org/10.21062/mft.2020.074>. EDN: FHCOPM.
7. Melichar M., Kubatova D., Kutlwaser J. Influence of CMM velocity on scanning precision. In: *28th International DAAAM Symposium on Intelligent Manufacturing and Automation*. 8–11 November 2017, Vienna. Vienna: DAAAM International; 2017, p. 0400–0409. <https://doi.org/10.2507/28th.daaam.proceedings.056>.
8. Geng Jason. Structured-light 3D surface imaging: a tutorial. *Advances in Optics and Photonics*. 2011;3(2):128–160. <https://doi.org/10.1364/AOP.3.000128>.
9. Gura D.A., Dyachenko R.A., Andryushchenko A.V., Belokon I.A., Stepanenko V.E. The device and the principle of operation of a ground-based laser scanner on the example of the LEICA SCANSTATION C10. In: *Nauchnye chteniya imeni professora N.E. Zhukovskogo. Sbornik nauchnyh statej XIII Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii = Scientific readings named after the Professor N.E. Zhukovsky: collected scientific articles of the 13th International scientific and practical conference*. 21–22 December 2022, Krasnodar. Krasnodar: Krasnodar higher military aviation school named after the Hero of the Soviet Union A. K. Serov; 2023, p. 357–361. Krasnodar, 2023, p. 357–361. (In Russ.). EDN: OKSYFM.
10. Antipov D.V., Efremkin O.S., Samokhvalov V.N., Eskina E.V. Determination of systematic errors that appear during the measurements by laser tracker. *Proceedings of the Tula State University. Technical Science*. 2021;11:531–538. (In Russ.). <https://doi.org/10.24412/2071-6168-2021-11-531-538>. EDN: QLPYXF.
11. He Jiajue, Xiong Wei. Surface feature extraction method for cloud data of aircraft wall panel measurement points. *Journal of Computational Science*. 2024;83:102427. <https://doi.org/10.1016/j.jocs.2024.102427>. EDN: XLCWXG.

12. Suvorov V.A., Kirillovskii M.A., Petrov V.V., Izumova V.A. Laser scanning of aircraft prototype and model surfaces. *Dopolnenie k materialam KIMILA-2020. Dopolnenie k materialam IV Otraslevoj konferencii po izmeritel'noj tekhnike i metrologii KIMILA-2020 = Supplement to the materials of the 4th Industry Conference on Measuring Technology and Metrology KIMILA-2020. 10–11 November 2021, Zhukovskii. Zhukovskii: Central Aerohydrodynamic Institute; 2021*, p. 29-53. (In Russ.). EDN: QAQASB.
13. Ru Wang. Research on measuring method of RVSM regional waviness. *Journal of Physics: Conference Series*. 2020. Vol. 1635. Iss. 1. P. 012006. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1635/1/012006>. EDN: KUKKLF.
14. Kumar A.S., Chandrasekaran C. Analysis of dynamic probing errors in measuring machines. In: Chandrasekhar U., Yang L.J., Gowthaman S. (eds.). *Innovative Design, Analysis and Development Practices in Aerospace and Automotive Engineering*. Singapore: Springer; 2019, p. 473-482. https://doi.org/10.1007/978-981-13-2697-4_51.
15. Ziout A., Qudeiri J.A., Murad M., Khader R., Alwahedi F., Khaleel A., et al. Exploring photogrammetry/3D scanning technology for quality control process in an aerospace manufacturing company. In: *13th Annual International Conference on Industrial Engineering and Operations Management*. 7–9 March 2023, Manila. Manila: IEOM Society International; 2023, p. 2261-2268. <https://doi.org/10.46254/AN13.20230605>.
16. Bu Huahai, Huang Nuodi, Huang Jie, Liu Gang, Wang Yuhan, Zhu Limin. Geometric feature extraction and its profile accuracy evaluation for pockets on curved aircraft skin from scanned point clouds. *Measurement Science and Technology*. 2025;36(1):015021. <https://doi.org/10.1088/1361-6501/ad8cfc>. EDN: WXQMFG.
17. Kyle S. Explore3DM – a directory and more for 3D metrology. *Standards*. 2021;1(2):67-78. <https://doi.org/10.3390/standards1020007>.
18. Radvar-Esfahan H., Tahan S.-A. Nonrigid geometric metrology using generalized numerical inspection fixtures. *Precision Engineering*. 2012;36(1):1-9. <https://doi.org/10.1016/j.precisioneng.2011.07.002>.
19. Pressley A. Elementary differential geometry, by Andrew Pressley. *The Mathematical Gazette*. Springer Undergraduate Mathematics Series. 2001;85(503):372-373. <https://doi.org/10.2307/3622071>.
20. Babanezhad K., Foucault G., Sabri V., Tahan A., Bigeon J. The fixtureless inspection of flexible parts based on semi-geodesic distance. *Precision Engineering*. 2019;59:174-184. <https://doi.org/10.1016/j.precisioneng.2019.07.002>.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Корж Максим Андреевич,
аспирант,
Иркутский национальный исследовательский
технический университет,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия
✉ korzhma@ex.istu.edu
<https://orcid.org/0000-0001-8068-0023>

Перелыгина Александра Юрьевна,
к.т.н., доцент,
заведующий кафедрой инженерной
и компьютерной графики,
Иркутский национальный исследовательский
технический университет,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия
perelygina@istu.edu
<https://orcid.org/0000-0001-7814-0431>

Савилов Андрей Владиславович,
к.т.н., доцент,
доцент кафедры технологии и оборудования
машиностроительных производств,
Иркутский национальный исследовательский
технический университет,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия
saw@istu.edu
<https://orcid.org/0000-0003-2028-4162>

Заявленный вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Maksim A. Korzh,
Postgraduate Student,
Irkutsk National Research Technical University,
83 Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia
✉ korzhma@ex.istu.edu
<https://orcid.org/0000-0001-8068-0023>

Aleksandra Yu. Perelygina,
Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor,
Head of the Department of Engineering
and Computer Graphics,
Irkutsk National Research Technical University,
83 Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia
perelygina@istu.edu
<https://orcid.org/0000-0001-7814-0431>

Andrey V. Savilov,
Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor,
Associate Professor of the Department
of Mechanical Engineering Production
Technologies and Equipment,
Irkutsk National Research Technical University,
83 Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia
saw@istu.edu
<https://orcid.org/0000-0003-2028-4162>

Authors' contribution

The authors contributed equally to this article.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Conflict of interests

The authors declare no conflict of interests.

The final manuscript has been read and approved by all the co-authors.

Информация о статье

Статья поступила в редакцию 07.07.2025 г.; одобрена после рецензирования 31.08.2025 г.; принята к публикации 10.09.2025 г.

Information about the article

The article was submitted 07.07.2025; approved after reviewing 31.08.2025; accepted for publication 10.09.2025.