

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«САМАРСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ АКАДЕМИКА С.П. КОРОЛЕВА»
(САМАРСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)

М.А. БОЛОТОВ, Р.А. ВДОВИН

ПЕРСПЕКТИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ДЕТАЛЕЙ ДВИГАТЕЛЕЙ И ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК

Рекомендовано редакционно-издательским советом федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева» в качестве учебного пособия для обучающихся по основным образовательным программам высшего образования по направлениям подготовки 24.04.05 Двигатели летательных аппаратов, 15.03.05 Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных производств, 13.03.03 Энергетическое машиностроение

САМАРА
Издательство Самарского университета
2020

УДК 621.4(075)

ББК 39.55я7

Б795

Рецензенты: главный металлург ПАО «Металлист-Самара» С. П. Г о л а н о в,
д-р техн. наук, проф. А. И. Д о в г я л л о

Болотов, Михаил Александрович

Б795 Перспективные технологии изготовления деталей двигателей и энергетических установок: учебное пособие / *М.А. Болотов, Р.А. Вдовин.* – Самара: Издательство Самарского университета, 2020. – 108 с.: ил.

ISBN 978-5-7883-1566-9

В данном пособии рассматриваются вопросы повышения точности при изготовлении деталей ГТД на основе анализа поведения инновационной технологической системы. Теоретически рассматриваются первичные погрешности, влияющие на точность геометрических параметров деталей. Выявленные наиболее значимые погрешности изучаются на основе экспериментальных исследований, которые реализуются при выполнении лабораторных работ.

Учебное пособие направлено на формирование у студентов понимания основ инновационных технологических процессов изготовления деталей ГТД (технологии 3D-печати, быстрого прототипирования и координатных измерений).

Разработано в соответствии с программами курсов «Теоретические основы проектирования технологических процессов», «Инновационные технологии производства двигателей», «Автоматизированная разработка заготовительных технологических процессов».

Предназначено для обучающихся по направлениям подготовки 24.04.05 Двигатели летательных аппаратов, 15.03.05 Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных производств, 13.03.03 Энергетическое машиностроение.

Подготовлено на кафедре технологий производства двигателей.

УДК 621.4(075)

ББК 39.55я7

ISBN 978-5-7883-1566-9

© Самарский университет, 2020

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	5
1 Теоретический анализ условий формирования	
геометрических параметров деталей в процессе их изготовления.....	6
1.1 Точность и погрешность.....	6
1.2 Базирование и установка заготовки	8
2 Исследование точности послойного выращивания на	
3D-принтере.....	11
2.1 Цель и задачи работы	11
2.2 Последовательность выполнения работы	11
2.3 Программное обеспечение, оборудование, инструменты	
и средства измерений	12
2.4 Конструкция 3D-принтера Objet Eden 350.....	12
2.5 Описание технологии послойного выращивания Polyjet	15
2.6 Принцип проектирования 3D-моделей для установки	
послойного выращивания Eden 350.....	21
2.7 Выращивание тестовых образцов на 3D-принтере	41
2.8 Содержание отчета.....	49
Контрольные вопросы	49
3 Измерение геометрических параметров деталей и сборочных	
единиц с использованием современных методов и средств	
измерений	51
3.1 Цель и задачи работы	51
3.2 Последовательность выполнения работы	51
3.3 Программное обеспечение, оборудование, инструменты	
и средства измерений	52
3.4 Современные методы и средства измерений	
геометрических параметров деталей машиностроения.....	52

3.4.1 Контактный метод измерений	53
3.4.2 Бесконтактные методы измерений	58
3.4.3 Структурная схема и базовые компоновки контактных КИМ.....	63
3.4.4 Конструкция оптического средства измерений Comet 6.....	74
3.5 Схемы измерения геометрических параметров	79
3.6 Точность измерений	81
3.7 Выполнение измерений на координатно-измерительных машинах	91
3.8 Последовательность выполнения практических заданий.....	95
3.8.1 Проведение конструкторско-метрологического анализа рабочего чертежа детали	95
3.8.2 Разработка схемы выполнения измерений геометрических параметров на координатно- измерительных машинах	99
3.8.3 Проведение сравнительного анализа погрешностей.....	99
Контрольные вопросы	100
Заключение	101
Библиографический список	102

ВВЕДЕНИЕ

На современном этапе развития двигателестроительного производства предприятия отрасли проводят перевооружение, широко внедряют инновационные высокоэффективные и ресурсосберегающие технологии. При этом ставятся задачи повышения производительности и качества деталей. Решения этих задач требуют пересмотра нормативной технологической базы, создания электронной технологической среды, а также совершенствования методики проектирования технологических процессов. В этих условиях возрастают требования к подготовке специалистов-технологов.

В процессе обучения студенты должны понять особенности работы инновационных технологических систем, выявить наиболее значимые первичные погрешности, которые будут определять точность маложестких деталей ДЛА, а также сформировать необходимые компетенции в области современных технологических процессов изготовления деталей газотурбинных двигателей и энергетических установок.

1 ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ УСЛОВИЙ ФОРМИРОВАНИЯ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ДЕТАЛЕЙ В ПРОЦЕССЕ ИХ ИЗГОТОВЛЕНИЯ

Развитие всех отраслей машиностроения характеризуется непрерывным повышением требований к точности изготовления деталей и сборки изделий [1, 6, 7].

Не менее важной является задача повышения точности всех технологических операций. Повышение точности заготовок и повышение точности каждой из операций механической обработки, начиная с черновых, позволяет уменьшить количество ступеней обработки каждой из поверхностей детали (число операций), что дает экономию металла и снижение трудовых затрат. Следует также отметить, что повышение точности механической обработки детали сокращает трудоемкость сборки машин благодаря частичному или полному устранению пригоночных работ [3–5].

Сказанное выше указывает на необходимость уделять серьезное внимание вопросам точности на всех этапах создания изделия – при проектировании, при изготовлении его деталей, в процессе сборки и испытания.

1.1 Точность и погрешность

Под точностью обработки детали понимают степень ее приближения или степень ее соответствия заранее установленному прототипу или образцу. Основной целью механической обработки

является достижение заданных значений геометрических параметров. Поэтому можно сформулировать понятие точности обработки следующим образом. Точность обработки детали (точность обработки) – это степень соответствия действительных геометрических параметров детали заданным [8, 10].

Количественной характеристикой точности служит погрешность обработки – степень или величина несоответствия действительных полученных при обработке детали геометрических параметров заданным. Различают погрешности: формы, размеров поверхностей, координирующих размеров и соотношений [2].

С методической точки зрения целесообразно также различать три категории точности: заданную, действительную и ожидаемую. Заданная или требуемая точность регламентируется с помощью допусков, назначаемых конструктором на отдельные параметры детали или машины; действительная точность характеризуется погрешностью, которая может быть выявлена при измерении отдельных деталей, а ожидаемая или расчетная – погрешностью, которую предположительно или на основании расчетов можно ожидать после обработки.

Следовательно, ожидаемая точность – это точность, которую рассчитывают получить у всех деталей, которые будут изготовлены по данному технологическому процессу, на данном приспособлении, данным инструментом.

Она характеризуется величиной поля рассеяния ω заданного размера у некоторой совокупности деталей (1):

$$\omega = A_{д \max} - A_{д \min}, \quad (1)$$

где $A_{д \max}$ и $A_{д \min}$ – наибольший и наименьший действительные размеры в пределах совокупности детали.

1.2 Базирование и установка заготовки

Для обработки заготовки должны быть установлены в технологической системе с высокой точностью и надежно закреплены. Существуют три вида установки заготовки при обработке:

1. Установка с выверкой. Применяется в единичном и мелкосерийном производстве. При этом требуются большой опыт и квалификация рабочего. Установка занимает много времени.

2. Установка с выверкой по разметочным рискам. Применяется главным образом при изготовлении деталей, имеющих обрабатываемые и необрабатываемые поверхности, но при этом вырастает трудоемкость операции.

3. Установка детали в приспособлении. Это наиболее совершенный способ установки при минимальной затрате времени. Приспособления применяют в серийном и массовом производствах.

Элементы заготовки, определяющие ее положение при установке, называются базами.

Соответственно базированием называют (ГОСТ 21495-76) придание заготовке или изделию требуемого положения относительно выбранной системы координат.

В машиностроении различают три класса баз: конструкторские, технологические и измерительные.

Конструкторская база (ГОСТ 21495-76) – это база, используемая для определения положения детали или сборочной единицы в изделии. То есть эта база ориентирует деталь в собранном механизме относительно других деталей. Это, например, осевые отверстия втулок и шестерен, опорные шейки валов, направляющие станины, суппорты и др. (КБ).

Исходной базой называют поверхности, относительно которых требуется выдержать расположение обрабатываемой поверхности. Часто такая поверхность создается искусственно, только

для установки детали во время обработки, как, например, центровые отверстия валов (ИБ).

Измерительная база – (ГОСТ 21495-76) поверхности, от которых производится контроль размеров детали. С точки зрения технологии механической обработки, измерительная база – это поверхность, образующая поверхности, точка поверхности, относительно которой измерением проверяют положение обработанной поверхности, т.е. проверяют выполненный при обработке размер (ИБ).

Установочная база – это поверхность (линия, точка), при которой достигается заданное положение заготовки относительно станка, приспособления, инструмента (УБ). Установочные базы могут быть опорными и проверочными.

Измерительная и исходная базы во многих случаях совпадают.

Для достижения максимальной точности нужно стремиться к тому, чтобы конструкторская, исходная и измерительная базы совпадали [11].

В процессе обработки заготовка должна занимать определенное положение. Для этого необходимо, чтобы она не имела возможности перемещаться в трех взаимно перпендикулярных плоскостях, а также поворачиваться вокруг трех взаимно перпендикулярных осей, т.е. она должна быть лишена шести степеней свободы (рис. 1).

Плоскость XOY называется установочной. Опоры 1, 2, 3 и сила А лишает деталь трех степеней свободы: перемещения вдоль оси OZ и вращения вокруг осей OX и OY . Плоскость XOZ называется направляющей. Опоры 4, 5 и сила Б лишают деталь еще двух степеней свободы: перемещения вдоль оси OY и вращения вокруг оси OZ . Плоскость ZOY называют опорной. Опора 6 и сила В лишают деталь последней степени свободы: перемещения вдоль оси OX . Таким образом, положение детали в приспособлении определяется

с помощью правила шести точек, согласно которому для устойчивого положения детали необходимо иметь шесть жестких опорных точек: три в установочной плоскости, две в направляющей и одна в опорной. Правило шести точек – основное правило при базировании.

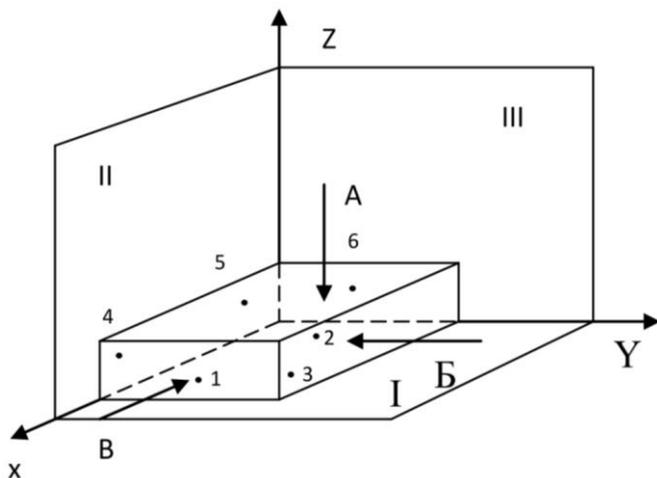


Рис. 1. Схема базирования

2 ИССЛЕДОВАНИЕ ТОЧНОСТИ ПОСЛОЙНОГО ВЫРАЩИВАНИЯ НА 3D-ПРИНТЕРЕ

2.1 Цель и задачи работы

Цель работы – закрепление теоретических знаний и получение практических навыков по определению точности выращиваемых моделей по технологии PolyJet на 3D-принтере Objet Eden 350.

Задачи:

- изучить технологию послойного выращивания моделей PolyJet, определить ее достоинства, недостатки и область использования;
- изучить технические характеристики 3D печатной системы Objet Eden 350;
- вырастить тестовые образцы и произвести измерение их геометрических параметров.

2.2 Последовательность выполнения работы

1. Изучить конструкцию 3D-принтера Objet Eden 350; освоить принцип работы основных блоков, органов управления и модулей.
2. Изучить специфику технологического процесса изготовления деталей методом технологии быстрого прототипирования PolyJet; изучить характеристики используемых материалов.
3. Освоить принцип проектирования 3D-моделей для установки послойного выращивания; проанализировать качество поверхности выращенных образцов, спроектированных в различных программных продуктах САД.

4. Вырастить тестовые образцы на 3D-принтере.
5. Произвести измерение геометрических размеров выращенных моделей. Измеренные значения внести в таблицу.
6. Произвести вычисление отклонений измеренных значений относительно номинальных, заданных конструкторской документации, определить величину объемной усадки.
7. Оформить отчет, сделать выводы по итогам выполнения лабораторной работы.

2.3 Программное обеспечение, оборудование, инструменты и средства измерений

Программное обеспечение:

– Siemens NX 8.5, Solid Works 2011, Adem 8.1, Компас 13, Objet Studio, Job Manager.

Оборудование:

– 3D-принтер Objet Eden 350.

– Установка WaterJet.

Инструменты и средства измерений:

– Штангенциркуль цифровой Stainless Hardened (0–150 мм).

– Штангенциркуль ШЦ-II (0–300 мм).

– Микрометры гладкие МК с диапазоном измерений 0–25, 0–50 и 0–75.

2.4 Конструкция 3D-принтера Objet Eden 350

Для производства прототипов с целью визуальной оценки существуют так называемые «принтеры твердотельных объектов» (Three Dimensional Printer – 3D Printer) – системы, которые строят физические модели движением материала из одной или нескольких струйных головок, подобно обычному принтеру.

Работа некоторых 3D-печатающих систем основана на фотополимеризации – химическом процессе, при котором жидкая смола (полимер) превращается в твердый полимер под воздействием на нее ультрафиолетового излучения или излучения видимой части спектра. Другие 3D-принтеры работают с использованием тепловых процессов для построения физических моделей. Это технологии, при которых термопластический материал выдавливается из инжекторных головок, образуя слои, последовательность которых образует физическое тело; технологии спекания порошковых материалов под воздействием тепловых процессов; «склеивание» листовых материалов.

Установкой печатной системы Objet Eden 350 управляет компьютер со специальным программным обеспечением (Objet Studio и Job Manager), в котором обрабатывается STL-файл цифровой модели, получаемой из CAD системы (рис. 2).

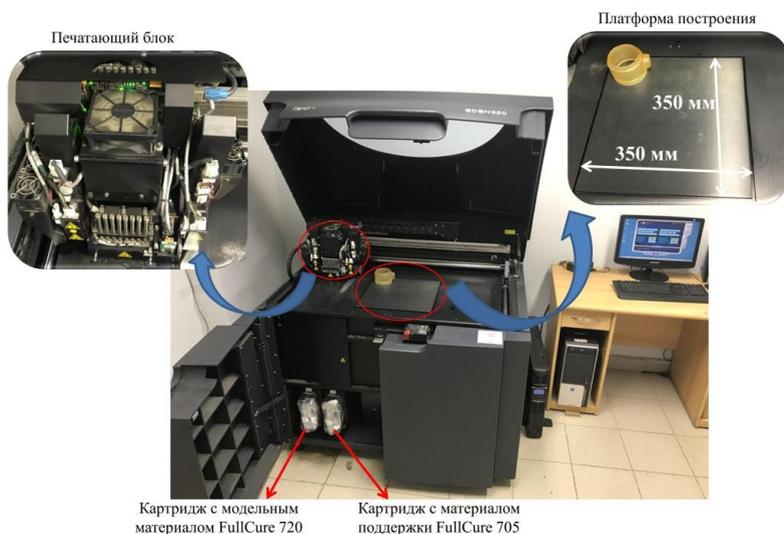


Рис. 2. Модульная структура 3D-принтера Objet Eden 350

В табл. 1 представлены основные характеристики 3D-принтера.

Таблица 1. Основные характеристики 3D-принтера Eden 350

Технология печати	PolyJet
Максимальный размер получаемой модели	Длина 340 мм; ширина 340 мм; высота 200 мм
Размер рабочей камеры	Длина 350 мм; ширина 350 мм; высота 200 мм
Разрешение печати	По оси X 600 dpi (42мкм) По оси Y 600 dpi (42 мкм) По оси Z 1 600 dpi (16 мкм)
Режимы печати	High Speed (высокая скорость) – скорость до 20 мм/ч, толщина слоя 30 мкм, работа с одним материалом. High Quality (высокое качество) – толщина слоя 16 мкм, скорость до 12 мм/ч, работа с одним материалом
Толщина слоя	16 мкм / 30 мкм
Параметры печатающего блока	Количество печатающих головок 8: 4 – для материала поддержки, 4 – для материала модели.
Материал поддержки модели	FullCure705 Support – легко удаляемый с помощью воды в станции промывки Objet WaterJet
Поддерживаемые форматы файлов	STL, SLC

2.5 Описание технологии послойного выращивания PolyJet

В настоящее время существуют и успешно применяются следующие технологии прототипирования из полимерных (неметаллических) материалов:

- ✓ стереолитография (SLA – stereolithography);
- ✓ отверждение на твердом основании (SGC – Solid Ground Curing);
- ✓ нанесение термопластов (FDM – Fused Deposition Modeling);
- ✓ распыление термопластов (BPM – Ballistic Particle Manufacturing);
- ✓ моделирование при помощи склейки (LOM – Laminated Object Modeling);
- ✓ технология PolyJet.

В рамках данной лабораторной работы рассмотрим технологию послойного выращивания материалов PolyJet.

На рис. 3 и 4 представлена запатентованная технология PolyJet, используемая в установке.

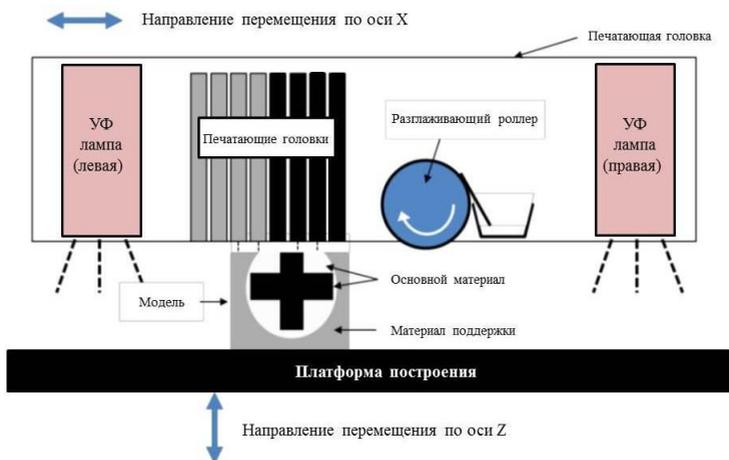


Рис. 3. Условно-графическое изображение технологии PolyJet

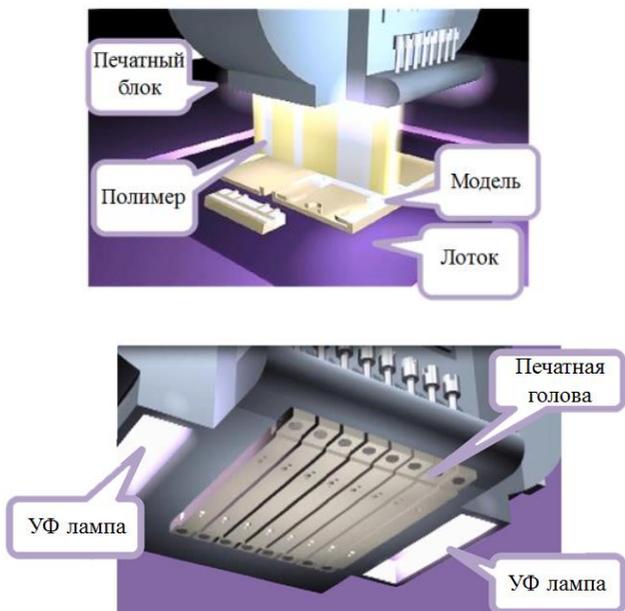


Рис. 4. Реализация технологии PolyJet в 3D принтере Eden 350

Точность изготовления элементов зависит от сложности поверхности модели и ее расположения на платформе построения установки. Опыт работы на установке показал, что модели, габаритные размеры которых по осям X и Y не превышают 50 мм, можно изготовить с точностью 0,02–0,04 мм. Для моделей, размеры которых по осям X и Y более 50 мм, точность снижается и погрешность составляет до 0,05–0,1 мм. Точность изготовления прототипа по оси Z всегда фиксирована, равна 0,016 мм и соответствует толщине слоя изготавливаемого изделия, независимо от его габаритных размеров [12–15].

3D-печать – процесс аддитивный, поэтому для временной поддержки частей модели в процессе выращивания используется светочувствительный материал FullCure705 Support, легко удаляемый обычной водой после процесса выращивания.

Режим работы установки позволяет получать поверхности с высокой детализацией со скоростью до 12 мм/час при толщине слоя в 16 мкм. 8 печатных головок, каждая из которых имеет по 128 отверстий диаметром в несколько микрон, обеспечивают разрешение печати 600 на 600 dpi по осям X и Y соответственно.

Суть технологии заключается в послойном распылении фотополимера с последующей полимеризацией каждого слоя с помощью освещения ультрафиолетовой лампой.

Среди преимуществ технологии PolyJet можно выделить высокую детализацию изготавливаемых образцов, отсутствие границ между слоями, возможность выращивания образцов любой сложности, простоту в настройке технологического процесса, полностью автоматизированный процесс выращивания, отсутствие постпроцессорной обработки.

К недостаткам технологии PolyJet необходимо отнести высокую стоимость расходных материалов и отсутствие отечественных аналогов материала.

Технология PolyJet поддерживает семейство материалов Objet FullCure на базе запатентованного акрилового фотополимера.

Большое разнообразие смол в семействе FullCure, обладающих различными свойствами: прозрачные, цветные, непроводящие, гибкие и негнущиеся позволяют изготавливать модели, удовлетворяющие широким требованиям с точки зрения подгонки, формовки, функциональности и ощущений. Временный материал поддержки FullCure Support, используемый в сочетании с любым модельным материалом FullCure, позволит изготовить образец детали неограниченной геометрической сложности, включая нависающие элементы и внутренние полости.

На данный момент модельные материалы FullCure включают следующие семейства:

Семейство основного назначения

Прозрачный материал основного назначения Transparent – FullCure720 (способный передавать не только внешнюю геометрию, но и внутренний объем) имеет превосходные характеристики, в том числе прочность на разрыв в 60 МПа, прочность на изгиб в 76 МПа и температуру изгиба под нагрузкой (0,45 МПа) 48 °С (табл. 2).

Таблица 2. Характеристики материала основного назначения
Transparent – FullCure720

Прочность на разрыв	60 МПа
Модуль упругости	2 870 МПа
Относительное удлинение при разрыве	20 %
Прочность на изгиб	76 МПа
Модуль упругости при изгибе	1 718 МПа
Ударная вязкость по Изоду (с надрезом)	24 Дж/м
Твердость по Шору	83D
Твердость по Роквеллу	81M
Температура изгиба под нагрузкой (0,45 МПа)	48 °С
Температура изгиба под нагрузкой (1,82 МПа)	44 °С
Температура размягчения	49 °С
Зольность	<0,03 %
Поглощение воды	1,53 %

Семейство Durus

Похожий на полипропилен материал DurusWhite FullCure 430 обладает широким спектром применения в областях, где необходимы свойства полипропилена, такие как внешний вид, гибкость, прочность и жесткость. Может применяться для создания элементов типа защелок, которые будут использоваться многократно. Свойства включают в себя ударную вязкость по Изоду (с надрезом) в 44 Дж/м, относительное удлинение при разрыве в 44 % и модуль упругости при изгибе в 1 026 Мпа (табл. 3).

Таблица 3. Основные характеристики материала DurusWhite FullCure 430

Прочность на разрыв	21 МПа
Модуль упругости	1 136 МПа
Относительное удлинение при разрыве	44 %
Прочность на изгиб	33 МПа
Модуль упругости при изгибе	1 026 МПа
Ударная вязкость по Изоду (с надрезом)	44 Дж/м
Твердость по Шору	76D
Твердость по Роквеллу	97M
Температура изгиба под нагрузкой (0,45 МПа)	36 °С
Температура изгиба под нагрузкой (1,82 МПа)	33 °С
Температура размягчения	36 °С
Зольность	<0,2 %
Поглощение воды	1,7 %

Семейство Vero

Непрозрачные жесткие материалы отличаются жесткостью, стабильностью размеров и высокой степенью детализации (табл. 4).

Семейство Tango

Похожие на резину материалы обладают различной степенью эластичности: относительное удлинение при разрыве 47 % или 218 %, значения твердости по Шору 27 А, 61 А или 75 А (табл. 5).

Таблица 4. Основные характеристики материала Vero White FullCure 830

Прочность на разрыв	50 МПа
Модуль упругости	2 495 МПа
Относительное удлинение при разрыве	20 %
Прочность на изгиб	75 МПа
Модуль упругости при изгибе	2 137 МПа
Ударная вязкость по Изоду (с надрезом)	24 Дж/м
Твердость по Шору	83D
Твердость по Роквеллу	81M
Температура изгиба под нагрузкой (0,45 МПа)	43 °С
Температура изгиба под нагрузкой (1,82 МПа)	40 °С
Температура размягчения	58 °С
Зольность	<0,3 %
Поглощение воды	1,15 %

Таблица 5. Основные характеристики материала Tango

Прочность на разрыв	1,5 МПа
Модуль упругости при 20% деформации	0,1 МПа
Модуль упругости при 30% деформации	0,2 МПа
Модуль упругости при 50% деформации	0,3 МПа
Относительное удлинение при разрыве	218 %
Остаточная деформация при сжатии	4 %
Твердость по Шору	27А
Усталостная выносливость	Более 150 000 циклов
Сопротивление разрыву	3 кг/см
Температура размягчения	-10 °С

Как уже отмечалось, основным достоинством технологии PolyJet является законченная гладкая поверхность, отличные физические механические свойства готовых образцов (включая стабильность геометрических размеров), а также возможность обработки поверхности (склейка, покраска и т.п.).

Ключевые преимущества при использовании материала семейства FullCure:

- ✓ позволяет видеть течение жидкости и внутренние элементы образца;
- ✓ не требует финишной обработки, поскольку материалы полностью отверждены;
- ✓ относительное удлинение при разрыве в 20 % удобно для некоторых функциональных применений;
- ✓ простая процедура удаления гелеобразного материала поддержки, что означает отсутствие грубых краев;
- ✓ образцы готовы к покраске без дополнительной обработки;
- ✓ хорошая ударная вязкость;
- ✓ образцы можно брать руками и трогать сразу после изготовления;
- ✓ модельный материал также можно обрабатывать, сверлить, хромировать или использовать как форму для литья.

2.6 Принцип проектирования 3D-моделей для установки послойного выращивания Eden 350

Прототипы, выращенные из фотополимерного материала, не являются законченным функциональным изделием. В основном данного вида детали используются в качестве мастер-модели в технологическом процессе литья для изготовления силиконовой эластичной формы.

Детали, полученные механической обработкой, отличаются по внешнему виду от деталей, полученных литьем. У них имеются типичные острые наружные и внутренние грани с малыми закруглениями углов, резкие изменения толщин сечений – без переходов простые полости, симметричные вдоль одной оси, большей частью в виде тел вращения.

Для деталей, получаемых литьем, такая форма непригодна и во многих случаях недопустима. При таких формах возникают литейные дефекты – усадочные раковины, наружные и внутренние трещины, которые снижают прочность и плотность деталей.

Отливки должны быть закругленной формы с плавным переходом различных толщин; массивные узлы отливки необходимо облегчать. Необходимость изменения формы детали (частичной или полной) связана с закономерностями технологии литья. При охлаждении жидкого металла изменяется его объем, что следует учитывать при выборе размеров отливки и ее сечений, особенно там, где соединяются между собой стенки различной толщины.

Толщины отдельных стенок отливки следует выбирать так, чтобы сечение увеличивалось по направлению к будущему месту подвода жидкого металла. Питатель для отливок небольших размеров в большинстве случаев является элементом для питания отливки металлом во время его кристаллизации. У больших и сложных отливок сечения стенок могут не отвечать условиям направленного затвердевания. В этом случае следует предусматривать специальную литниковую систему с прибылями.

При недостаточном питании кристаллизующейся отливки металлом в ее утолщенных местах возникают усадочные раковины и рыхлоты, снижающие прочность отливки.

Изготовление совершенно плотных отливок (особенно сложных машиностроительных) без каких-либо внутренних дефектов является не простой задачей, и требуется тесное сотрудничество конструктора с технологом-литейщиком.

Как уже было указано, необходимо стремиться к конструкции детали с постепенным увеличением толщины стенок по направлению к питателю. Применение большого числа прибылей или питателей требует соответственно больших расходов на их отделение от самой отливки и на последующую окончательную зачистку.

Следует отметить, что отливки, которые в эксплуатации подвергаются динамическим нагрузкам, должны быть без внутренних дефектов. Разработать оптимальную форму отливки трудно, особенно при незнании подробностей литейной технологии и принципов направленного затвердевания. В таких случаях неизбежна специальная консультация.

На рис. 5 показаны примеры правильных решений и примеры неудачного сопряжения стенок отливки, приводящего к возникновению усадочных пороков.

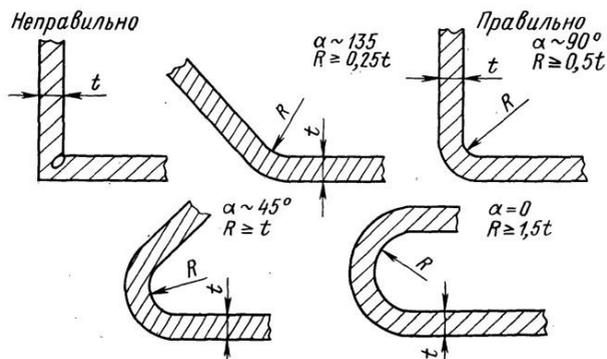


Рис. 5. Неправильное и правильное сопряжения стенок одинаковой толщины

В отливках, подвергаемых при эксплуатации динамическим нагрузкам, необходимы плавные переходы толщин стенок. При сопряжении двух стенок различной толщины следует пользоваться рекомендациями, приведенными на рис. 6.

На рис. 7 показан пример соединения под углом около 90° двух стенок различной толщины, на рис. 8 – тавровое соединение, а на рис. 9 – соединение перекрещивающихся стенок в отливке.

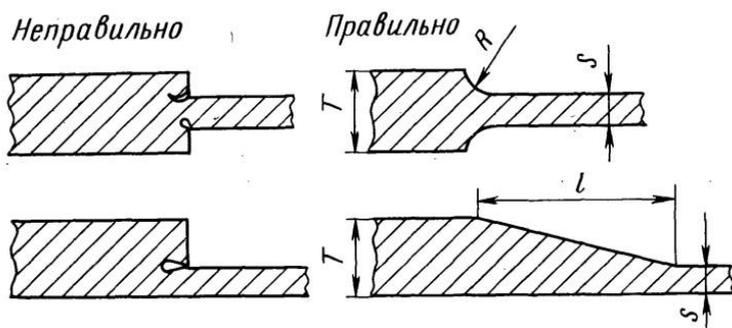


Рис. 6. Неправильное и правильное сопряжения стенок разной толщины

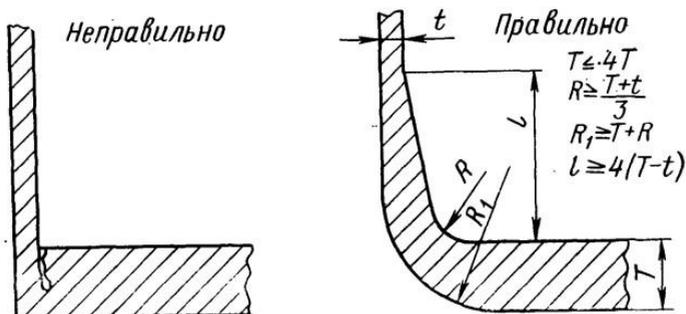


Рис. 7. Неправильное и правильное сопряжения стенок разной толщины, расположенных под углом 90°

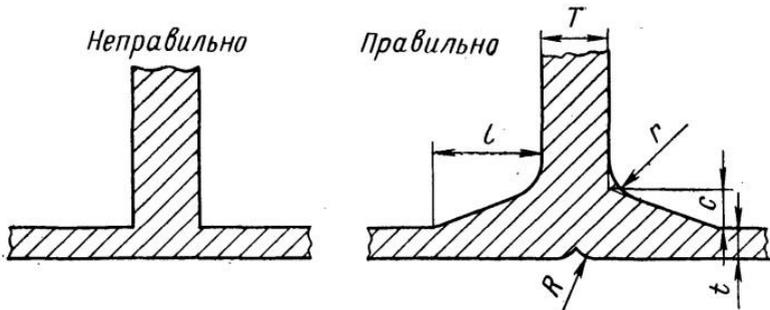


Рис. 8. Сопряжение стенок, перпендикулярных друг другу

$$t \leq 4r; \quad l \geq 4(T-t); \quad c = T-t; \quad r = \frac{T+t}{3}; \quad R = T-r$$

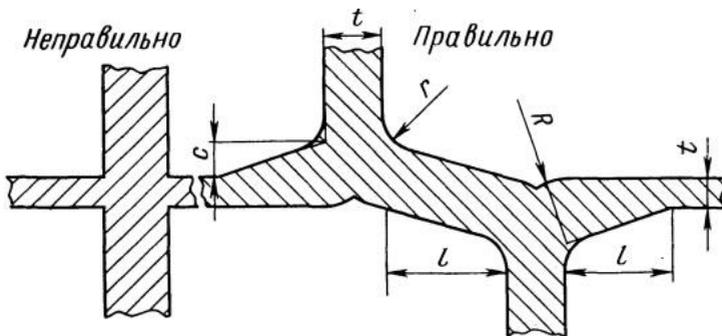


Рис. 9. Неправильное и правильное выполнение узла пересечения стенок

В узле крестообразного соединения (рис. 9) образуются раковина или рыхлота, а в самой отливке возникают напряжения. Следует избегать такой конструкции и заменять ее двумя тавровыми соединениями.

Из всех приведенных схем следует, что в конструкциях не должно быть местных узлов – скоплений металла и острых углов. Используя правильные приемы при конструировании отливки,

устраняют резкие перепады температур при охлаждении и затвердевании металла и предупреждают образование литейных дефектов.

У динамически нагруженных деталей каждое резкое изменение сечения является концентратором напряжений, приводящим к превышению предела текучести используемого материала, т.е. к полному разрушению отливки. Концентрация напряжений возникает также при термообработке отливок. Чувствительность к надрезам значительно повышается с увеличением механической прочности металла после термообработки.

Резкие переходы толщин стенок и массивные узлы отливок можно устранить, применяя ребра жесткости (рис. 10). Конструктивно и технологически труднее изготовить отливки с различными толщинами стенок. В этом случае рекомендуется выполнять переходы с большими радиусами скругления. Выполнение таких наиболее трудных конструкций обязательно решается при тесном сотрудничестве конструктора и технолога-литейщика. В самых трудных случаях после экспериментов с первыми опытными отливками следует выполнить корректировку конструкции.

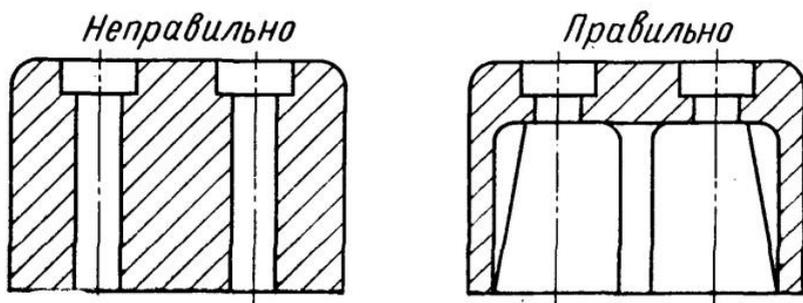


Рис. 10. Пример выполнения коробчатой конструкции

При проектировании отливок конструктор должен решать не только проблемы, связанные с их качеством, но и вопросы экономики производства. Так, конструкция отливки определяет сложность и стоимость пресс-формы для выплавляемой модели, трудоемкость сборки модельного блока, отделения отливки от литниковой системы, финишной обработки и т. д.

Одними из наиболее частых конструктивных элементов детали являются утолщения под отверстия – бобышки. Их необходимо проектировать так, чтобы они не мешали извлечению модели из пресс-формы (рис. 11).

Стоимость пресс-формы высока, особенно для сложных отливок, например, турбинных колес. Для извлечения модели из пресс-формы должен быть предусмотрен уклон, который при обработке полостей формы иногда вызывает затруднения. Величину этого уклона необходимо согласовывать с будущим изготовителем, так как она может изменяться в зависимости от принятого технологического процесса.

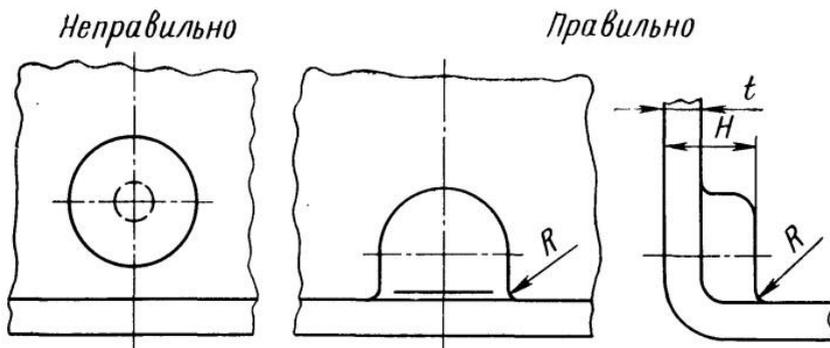


Рис. 11. Неправильное и правильное выполнение бобышки под отверстие

При отливке длинных плоских деталей на ровных поверхностях образуются трещины или коробления. Поэтому такие поверхности желательно изготавливать с припусками на обработку. Иногда

бывает достаточным при согласии конструкторов разделить такую поверхность канавками или ребрами, которые уменьшают напряжение в литейной форме и препятствуют появлению указанных дефектов.

Получить литьем острые кромки, например, на лопатках турбин, насосов, вентиляторов, трудно, так как металл при заливке охлаждается в полости литейной формы и не заполняет тонкие сечения. Поэтому рекомендуется предусматривать отводное питание граней и по возможности назначать на наиболее тонкие части припуски на механическую обработку, особенно в тех случаях, когда грань должна быть острой и ровной.

Из приведенного ясно, что основные принципы конструирования точных отливок в своей основе такие же, как и отливок, получаемых в песчано-глинистых формах. Однако при литье по выплавляемым моделям конструктор может проектировать отливку со сложной конфигурацией, повышенной точностью и чистотой поверхности. Для этого в некоторых случаях следует максимально облегчать отливку с сохранением ее прочности путем введения ребер жесткости.

Преимущество литья по выплавляемым моделям заключается в том, что можно получать отливки из различных сплавов, высокой прочности при малой массе [9].

В зависимости от конфигурации отливки ее некоторые размеры приходится доводить как изготовителю, так и заказчику. Отливки типа вилок, например, из-за термических напряжений при охлаждении, сопротивления оболочковой формы, а также часто и во время транспортировки настолько деформируются, что их необходимо дополнительно рихтовать по шаблону для получения заданной формы. В этих случаях рекомендуется уже при проектировании отливки усилить ее ребрами или соединять ее части технологическими связками (рис. 12).

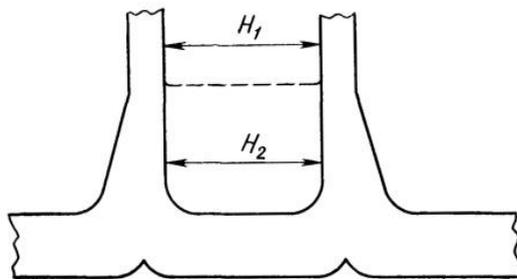


Рис. 12. Рекомендуемое усиление жесткости детали, предупреждающее изменение размера H при литье

В других случаях деформацию можно предупредить за счет дополнительных литейных припусков, с учетом дополнительных расходов, связанных с их удалением и последующей отделкой отливок. Часто для получения определенного размера между двумя параллельными поверхностями отливок применяют механическую правку.

Цилиндрические или конические поверхности нельзя получить литьем с совершенно идеальной формой окружности из-за неравномерной усадки металла и напряжений, которые зависят от размеров отливки, толщины стенки и стенок, связанных с окружностями. Обычно удается получать отклонения окружности диаметром 10 мм в пределах $\pm 0,05$ мм.

Если отливка имеет форму кольца, то внутренний и внешний контуры окружностей эксцентричны. Это зависит от величины диаметра и от толщины стенки. Чем больше диаметр, тем меньше разница в симметрии обеих окружностей.

Технологическое усиление хотя и дает положительный результат, но повышает производственные расходы на отделку отливки и не гарантирует жесткость детали при ее эксплуатации.

Острые грани на стальных отливках выполняют с минимальной величиной радиуса скругления (на небольших участках до

0,15 мм). Для получения острых протяженных граней следует применять большие радиусы скруглений. Минимальный угол граней лезвия должен быть меньше 15° , иначе рекомендуемые радиусы скругления трудно выдержать.

Литые сквозные отверстия в отливках из черных сплавов рекомендуется выполнять при отношении диаметра к длине отверстия не более 1:4. Глухие отверстия и углубления можно легко выполнить в отливках при их глубине, приблизительно равной диаметру для отливок из черных сплавов. Внутренние стенки отверстия или углубления в местах сопряжения с дном должны быть обязательно скруглены.

Замечательное преимущество литья по выплавляемым моделям – возможность получения в отливке каналов с искривленной осью при благоприятном отношении диаметра канала к его длине. При этом полость или литой канал могут иметь произвольную форму; этот профиль может изменяться еще и по длине (рис. 13). Такой сложный профиль канала нельзя отлить с большой точностью. Получить же такую полость в большинстве случаев методами механической обработки вообще нельзя. Это преимущество литья особенно важно при получении отливок из труднообрабатываемых сплавов.

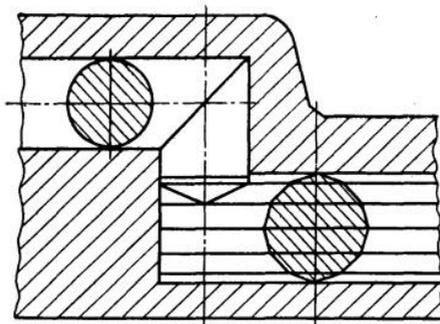


Рис. 13. Пример отливки с отверстиями, расположенными на разных осях

Конструктору важно знать наименьшую толщину стенки, выполняемую литьем. Назвать эту величину однозначно очень трудно, так как она связана с размерами всей отливки, расположением меньшей стенки по отношению к другим частям отливки и от размера ее площади. Наименьшую толщину стенки можно получить, если она прилегает к более массивным частям отливки. В этом случае при литье черных сплавов можно получать толщины от 0,5 мм.

Если вся отливка имеет одинаковую толщину стенки, при небольших габаритных размерах для черных сплавов наименьшая толщина составит 1,2 мм.

Получение точных отливок максимальной массы и габаритных размеров зависит от уровня технологии в литейном цехе и от его оснащения, в частности в отделении изготовления оболочек и плавильном отделении. По литературным данным, максимальная масса отливок – до 200 кг. Обычно масса точных отливок не превышает 40 кг.

Необходимо отметить, что крупные и тяжелые отливки получаются с невысокой точностью. Целесообразно такие отливки, особенно симметричные, изготавливать из отдельных частей с последующей сваркой в приспособлениях. Сварочная техника в настоящее время развита до такого уровня, что сложная деталь, изготовленная из большинства литейных сплавов, будет иметь постоянные свойства, т.е. как будто она изготовлена в виде единой отливки.

На основании указанных выше рекомендаций в среде 3D-моделирования проектируется твердотельная модель детали.

В настоящее время существует большое множество программных продуктов САД, способных проектировать цифровые модели любой сложности. Однако каждая из программ обладает теми или иными недостатками в виде погрешностей проектирования, которые напрямую влияют на качество изделий (образцов),

получаемых при последующем выращивании на установках 3D-прототипирования (3D-принтерах).

Установка Objet Eden 350 выращивает модель послойно согласно созданному перед началом построения «сечением». После завершения выращенная модель имеет ступенчатую поверхность, высота ступеньки которой соответствует шагу построения – толщине слоя 16 мкм (рис. 14).



Рис. 14. Послойный принцип построения модели на 3D-принтере Objet Eden 350

Качество поверхности и достижимая геометрическая точность прототипа напрямую зависит от ориентации модели на рабочей платформе. При построении плоской детали, расположив ее горизонтально, можно получить низкую шероховатость горизонтальной поверхности; для получения лучшего качества на боковых поверхностях модель необходимо сориентировать под углом к плоскости платформы.

Поэтому предметом исследования была выбрана полусфера.

Методика проведения исследования заключается в следующем:

1. В каждом из 4 программных продуктов была спроектирована одна и та же цифровая модель полусферы с радиусом 15 мм

(рис. 15). Для последующей идентификации выращенных образцов на каждой из моделей были сделаны подписи тех программных систем, в которых были спроектированы модели: NX – Siemens NX 8.5; SW - Solid Works 2011; Adem – Adem 8.1; Компас – Компас 13.



Рис. 15. Цифровые модели полусферы, спроектированные в разных программных продуктах CAD

2. Стандартными средствами, используемыми программными продуктами CAD, все 4 цифровые модели были импортированы в формат .stl (рис. 16). Данный формат является основным для технологического процесса выращивания на 3D-принтерах. Особенностью формата .stl является разбиение исходной геометрии цифровой модели на конечно-элементную модель, состоящую из набора равносторонних треугольников.

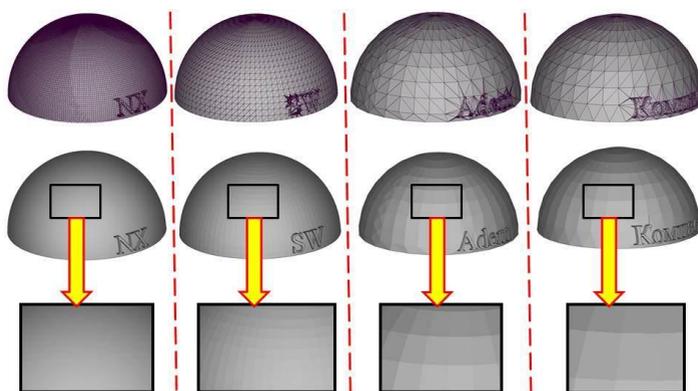


Рис. 16. Представление цифровых моделей сферы в формате .stl

Анализ рис. 16 показал, что препроцессинг у используемых программных продуктов разный. У системы Siemens NX 8.5 удалось получить довольно мелкую сетку треугольников, соответственно и качество отрисовки поверхности на высоком уровне. У программы «Компас 13» конечно-элементная модель получилась довольно грубая, что напрямую отразилось на качестве поверхности спроектированной цифровой модели.

Необходимо помнить, что 3D-принтер полностью и без искажения передает полученную цифровую модель в производство, т.е. какое качество поверхности отображается на экране монитора, такое же качество получится и после процесса выращивания.

3. С использованием 3D-принтера Objet Eden 350 выращиваем подготовлены цифровые модели 4 полусфер (рис. 17). На данный технологический процесс необходимо потратить 147 г основного материала FullCure 720 и 52 г материала поддержки FullCure 705. Общее время изготовления – 1 ч.

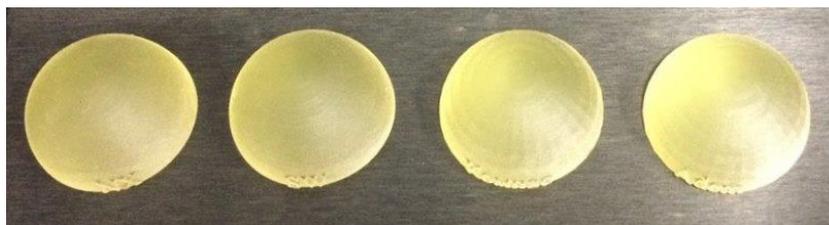


Рис. 17. Выращенные образцы

Процесс изготовления образцов методом послойного выращивания заканчивается удалением материала поддержки.

На рис. 18 представлены образцы с укрупненным изображением полученных криволинейных поверхностей. Видно, что на образце, спроектированном в программе NX, качество поверхности наилучшее, а на образце, спроектированном в программе

«Компас», имеется своего рода огранка, такая же, как и на формате .stl (см. рис. 16, с. 32).

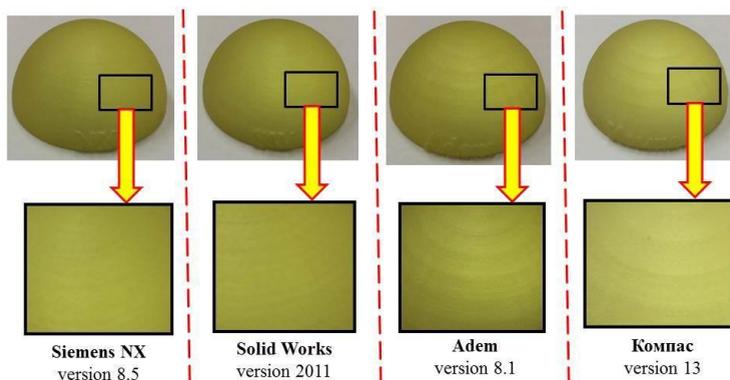


Рис. 18. Качество поверхностей на выращенных образцах

4. Анализ качества поверхностей выращенных деталей проводился на основе сравнения измеренных значений шероховатостей поверхностей. Измерение шероховатости проводилось с помощью профилометра Hommel Wave (рис. 19), использующего контактный щуповой метод измерения. Прибор представляет собой датчик, оснащенный тонкой остро заточенной алмазной иглой с ощупывающей головкой.



Рис. 19. Внешний вид профилометра Hommel Wave

Игла перемещается по нормали к исследуемой поверхности. Естественно, в местах микронеровностей (впадин и выступов) возникают механические колебания относительно головки. Эти колебания передаются на датчик, который преобразует механическую энергию в электрическую. Сигнал, генерируемый преобразователем, усиливается и измеряется: его параметры точно характеризуют неровности поверхности детали или изделия (рис. 20).

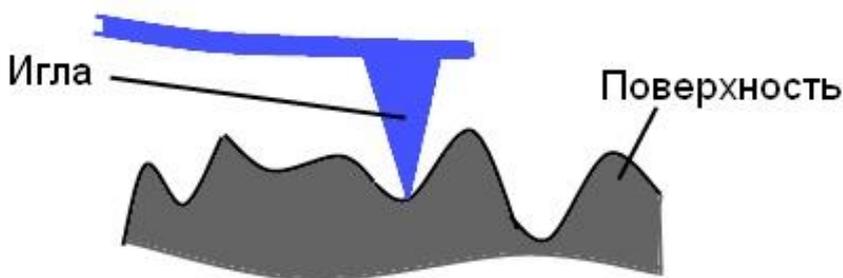


Рис. 20. Схема измерения шероховатости щуповым методом

В зависимости от типа преобразователя полезных сигналов профилометры подразделяются на индуктивные, электронные, индукционные и пьезоэлектрические, причем наибольшее распространение получили устройства первого вида. Кроме этого, существует еще одна разновидность приборов – профилографы, позволяющие не только измерить, но и записать параметры профиля в заранее подобранном горизонтальном и вертикальном масштабах.

Исследование неровности проводится в несколько этапов: профиль «ощупывается» определенное количество раз (рис. 21), и лишь на основе серии измерений вычисляется окончательное – усредненное – значение параметра: количественная характеристика неровности относительно длины участка.



Рис. 21. Процесс измерения шероховатости поверхности

Критерием сравнения будет выступать параметр R_a – среднее арифметическое значение отклонения профиля в пределах заданной длины (рис. 22), так как данный параметр является наиболее предпочтительным при задании шероховатости.

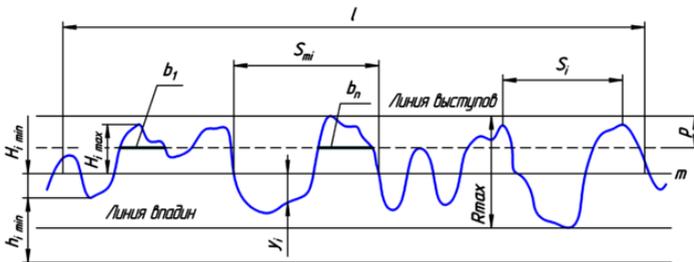


Рис. 22. Параметры шероховатости:

L – базовая длина; m – средняя линия профиля; S_{mi} – средний шаг неровностей профиля; S_i – средний шаг местных выступов профиля; $H_{i\max}$ – отклонение пяти наибольших максимумов профиля; $H_{i\min}$ – отклонение пяти наибольших минимумов профиля; $h_{i\max}$ – расстояние от высших точек пяти наибольших максимумов до линии, параллельной средней и не пересекающей профиль; $h_{i\min}$ – расстояние от низших точек пяти наибольших минимумов до линии параллельной средней и не пересекающей профиль; R_{\max} – наибольшая высота профиля; y_i – отклонение профиля от линии m ; p – уровень сечения профиля; b_n – длина отрезков, отсекаемых на уровне p .

На рис. 23–26 представлены результаты экспериментальных исследований по определению параметров шероховатости поверхностей выращенных образцов.

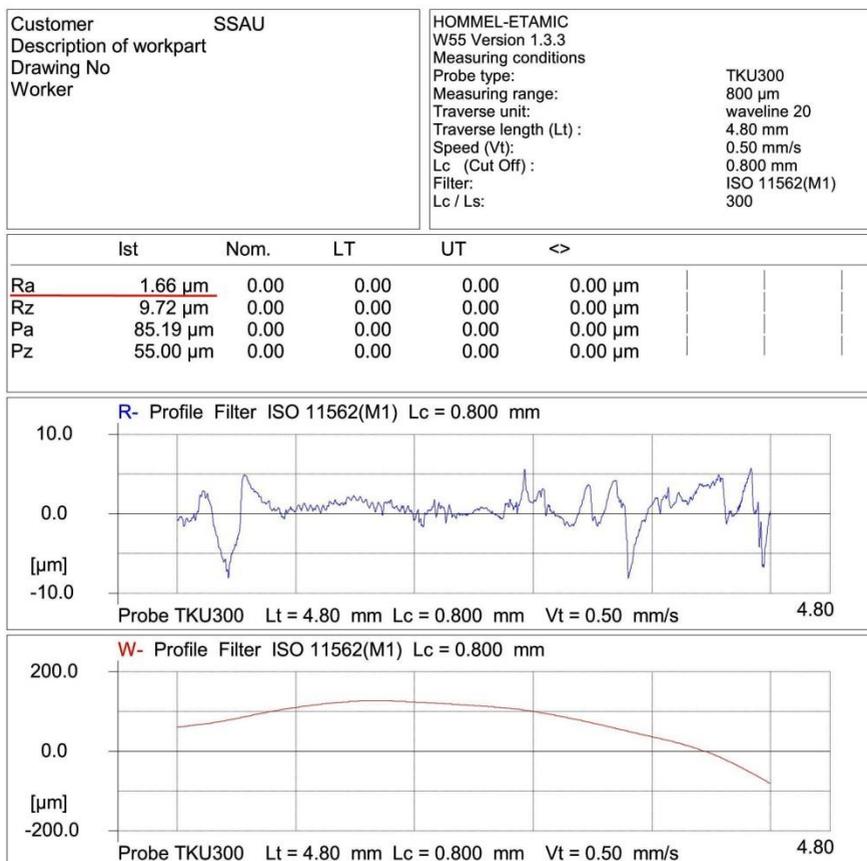


Рис. 23. Результаты определения шероховатости образца, спроектированного в программном продукте Siemen NX 8.5

Customer Description of workpart Drawing No Worker	SSAU	HOMMEL-ETAMIC W55 Version 1.3.3 Measuring conditions Probe type: TKU300 Measuring range: 800 µm Traverse unit: waveline 20 Traverse length (Lt): 4.80 mm Speed (Vt): 0.50 mm/s Lc (Cut Off): 0.800 mm Filter: ISO 11562(M1) Lc / Ls: 300
---	------	--

	Ist	Nom.	LT	UT	<>			
Ra	1.89 µm	0.00	0.00	0.00	0.00 µm			
Rz	9.31 µm	0.00	0.00	0.00	0.00 µm			
Pa	218.91 µm	0.00	0.00	0.00	0.00 µm			
Pz	49.69 µm	0.00	0.00	0.00	0.00 µm			

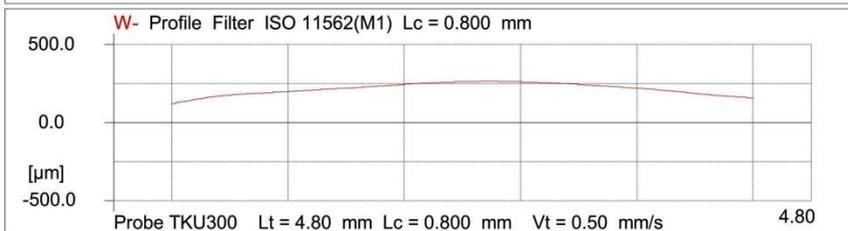
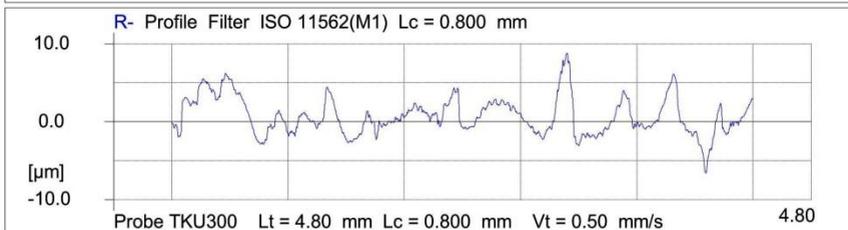


Рис. 24. Результаты определения шероховатости образца, спроектированного в программном продукте Solid Works 2011

Customer	SSAU	HOMMEL-ETAMIC
Description of workpart		W55 Version 1.3.3
Drawing No		Measuring conditions
Worker		Probe type: TKU300
		Measuring range: 800 μm
		Traverse unit: waveline 20
		Traverse length (Lt) : 4.80 mm
		Speed (Vt): 0.50 mm/s
		Lc (Cut Off) : 0.800 mm
		Filter: ISO 11562(M1)
		Lc / Ls: 300

	Ist	Nom.	LT	UT	<>			
Ra	2.20 μm	0.00	0.00	0.00	0.00 μm			
Rz	9.62 μm	0.00	0.00	0.00	0.00 μm			
Pa	213.58 μm	0.00	0.00	0.00	0.00 μm			
Pz	67.87 μm	0.00	0.00	0.00	0.00 μm			

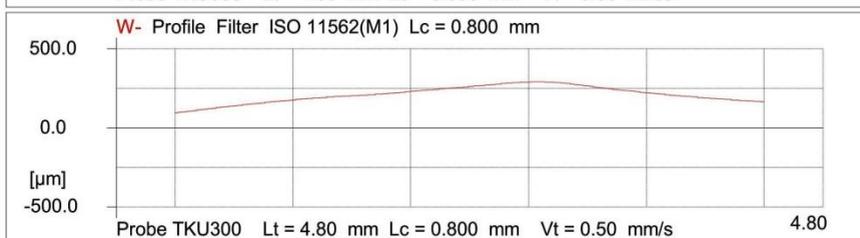
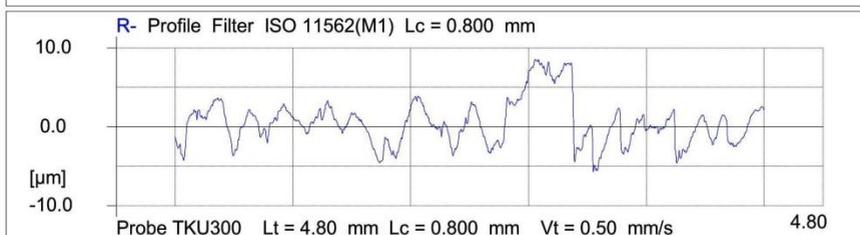


Рис. 25. Результаты определения шероховатости образца, спроектированного в программном продукте Adem 8.1

Customer	SSAU	HOMMEL-ETAMIC
Description of workpart		W55 Version 1.3.3
Drawing No		Measuring conditions
Worker		Probe type: TKU300
		Measuring range: 800 μm
		Traverse unit: waveline 20
		Traverse length (Lt) : 4.80 mm
		Speed (Vt): 0.50 mm/s
		Lc (Cut Off) : 0.800 mm
		Filter: ISO 11562(M1)
		Lc / Ls: 300

	Ist	Nom.	LT	UT	<>
Ra	2.42 μm	0.00	0.00	0.00	0.00 μm
Rz	11.27 μm	0.00	0.00	0.00	0.00 μm
Pa	189.79 μm	0.00	0.00	0.00	0.00 μm
Pz	68.63 μm	0.00	0.00	0.00	0.00 μm

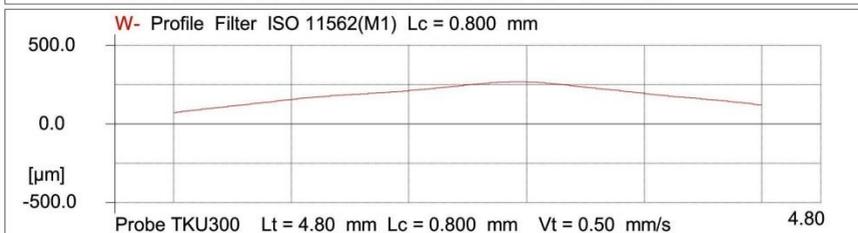
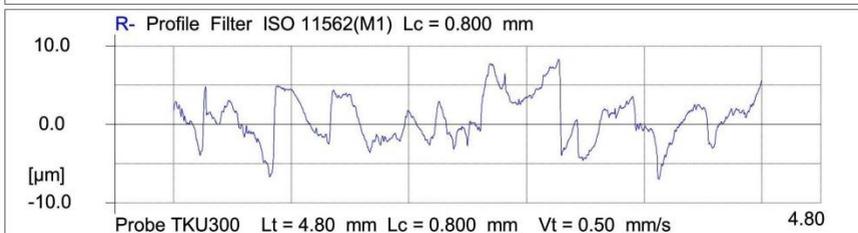


Рис. 26. Результаты определения шероховатости образца, спроектированного в программном продукте «Компас 13»

Таким образом, результаты измерения шероховатости показывают, что наиболее качественная поверхность получилась у образца, спроектированном в программном продукте Siemen NX 8.5 ($R_a = 1,66$ мкм). Немного грубее получилась поверхность у образца, спроектированного в программном продукте Solid Works 2011 ($R_a = 1,89$ мкм). Удовлетворительное качество поверхности было выявлено у образца сферы, который был спроектирован в про-

грамме Adem 8.1 ($R_a = 2,2$ мкм). Неудовлетворительное качество поверхности получилось у образца, спроектированного в программном продукте «Компас 13» ($R_a = 2,42$ мкм). Необходимо помнить, что результаты проведенных экспериментальных исследований актуальны только для рассмотренных версий программных продуктов.

Качество поверхности образцов (шероховатость), получаемых методом послойного выращивания, напрямую зависит от используемого программного обеспечения, его функциональных возможностей, корректности работы софта и компьютерной грамотности проектирования 3D-цифровых моделей, что в конечном итоге влияет на геометрическую точность размеров выращиваемых моделей.

2.7 Выращивание тестовых образцов на 3D-принтере

В соответствии с ГОСТом в САД-модуле программного продукта NX необходимо спроектировать объемные модели тестовых образцов и пронумеровать их (рис. 27).

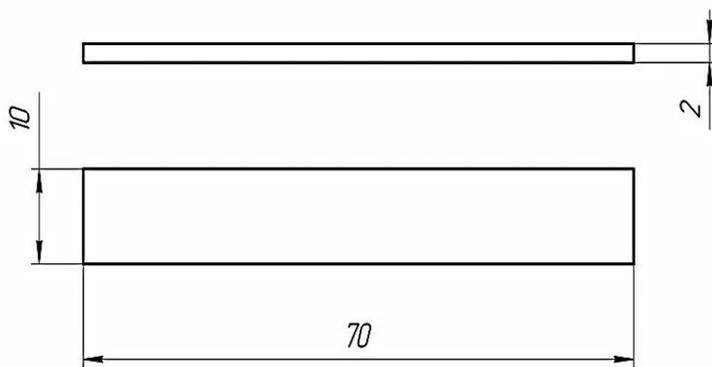


Рис. 27. Размеры образцов, используемых в эксперименте

Системой Eden принимаются:

- ✓ Файлы STL;
- ✓ Файлы SLC.

Возможности системы Eden таковы, что она может принимать оба типа файлов одновременно.

STL является сокращением от Standard Triangulation Language. Этот язык рассматривает любой объект как набор поверхностей и описывает каждую поверхность объекта как набор треугольников. Например, квадрат может быть описан как два треугольника; куб (шесть квадратов) как 12 треугольников. Искривленные поверхности нуждаются в большем количестве треугольников для их описания. Чем выше отклонение (для гладких поверхностей), тем большее количество треугольников необходимо. В результате описание высококачественных объектов требует достаточно большого размера файла.

Большинство САПР могут экспортировать файлы STL. Система Eden использует эти файлы для выращивания образцов (быстрое прототипирование), а также для прямого изготовления форм для серийного производства.

Файлы STL являются ASCII (text) файлами. Содержимое каждого файла начинается с "solid" и заканчивается "end-solid" (прописными буквами). Между этими двумя ключевыми словами находится список треугольников, который описывает стороны модели. Каждый треугольник обозначает одиночный нормальный вектор, направленный от поверхности модели, затем следуют его X-Y-Z координаты. Они являются расширенными Cartesian координатами и значениями с плавающей точкой. Координаты всех треугольников должны быть положительными и находиться в объеме модели.

SLC является сокращением от Stereo-Lithography Contour. Файлы SLC описывают двумерные контуры трехмерных моделей. Линии этих контуров являются полилиниями.

Файлы SLC являются ASCII (text) файлами, которые описывают модель как серию сечений. Это означает, что модели, описанные файлом SLC, не могут быть ориентированы; только их масштаб (размер) и положение на лотке могут быть изменены. По этой причине ориентация модели в пространстве должна быть определена перед сохранением файла SLC. Из-за данных свойств файлов SLC отображение моделей в Objet Studio может отличаться от отображения файлов STL.

Таким образом, система Eden 350 может работать только с двумя видами файлов: .stl и .slc.

Для преобразования файла в формат STL (в CAD-программе NX):

1. В меню *Файл* необходимо выбрать *Экспорт – STL*.
2. В диалоговом окне *Экспорт – STL* необходимо задать допуск на триангуляцию и допуск на смежность (рис. 28).

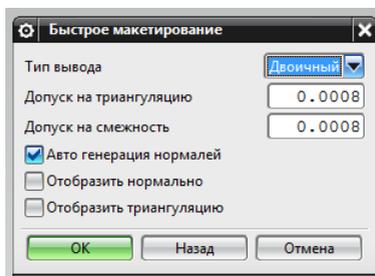


Рис. 28. Экспорт модели в формат STL

3. Нажимаем *OK* и выбираем директорию, в которую необходимо сохранить модель.
4. Далее необходимо выбрать модель для экспорта.
5. Нажимаем кнопку *OK*.

Программное обеспечение Objet для 3D-печатной системы Eden состоит из двух приложений:

- Objet Studio;
- Job Manager.

С помощью Objet Studio подготавливаются входные файлы для выращивания на 3D-принтере Eden. Objet Studio предоставляет широкий спектр возможностей по подготовке файлов к выращиванию, но всегда использует следующие базовые процедуры:

1. Размещение одного или более объектов на лотке вывода.
2. Позиционирование объекта(ов) на лотке.
3. Конфигурирование параметров объектов и лотка.
4. Сохранение конфигурации лотка как .otf (Objet Tray Format) файла.

5. Передачу .otf файла на 3D-принтер Eden для выращивания.

Приложение Job Manager отображает очередь и статус работ, отправленных только с данного компьютера, и позволяет редактировать только эти работы.

Необходимо запустить приложение Objet Studio, дважды кликнув по этой иконке на рабочем столе. Запустится Objet Studio, отобразив пустой лоток вывода (рис. 29).

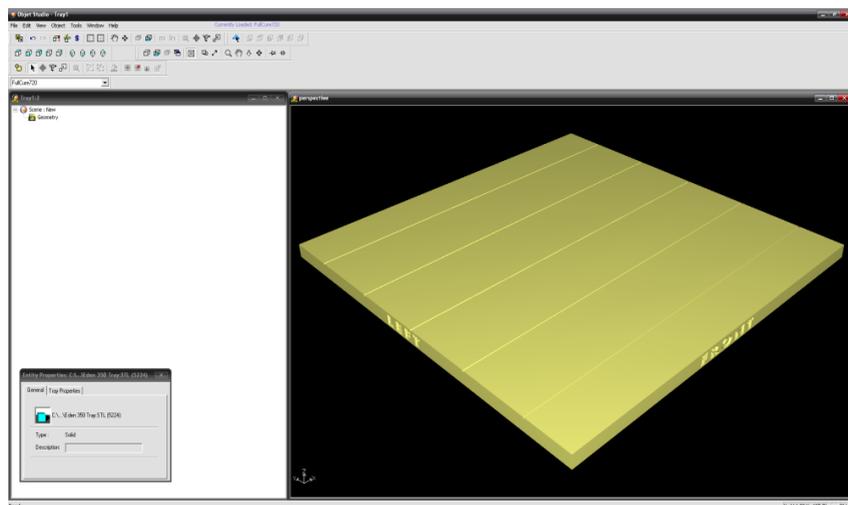


Рис. 29. Платформа построения в приложении Objet Studio

Для выращивания тестовых образцов в количестве 10 штук, необходимо открыть файл с моделью в формате .stl в Objet Studio и расположить объект на лотке вывода.

В панели инструментов необходимо выбрать тип основного материала – FullCure 720.

Для размещения объекта на лотке вывода необходимо открыть диалоговое окно Insert. Из меню Object, выбрать Insert, или на панели инструментов, кликнуть значок Insert Model, или кликнуть правой кнопкой мышки на лотке вывода и выбрать Insert. Появится диалоговое окно Insert (рис. 30).

В поле *Имя файла* указываем необходимую папку.

В поле *Тип файла* необходимо выбрать файл формата .stl.

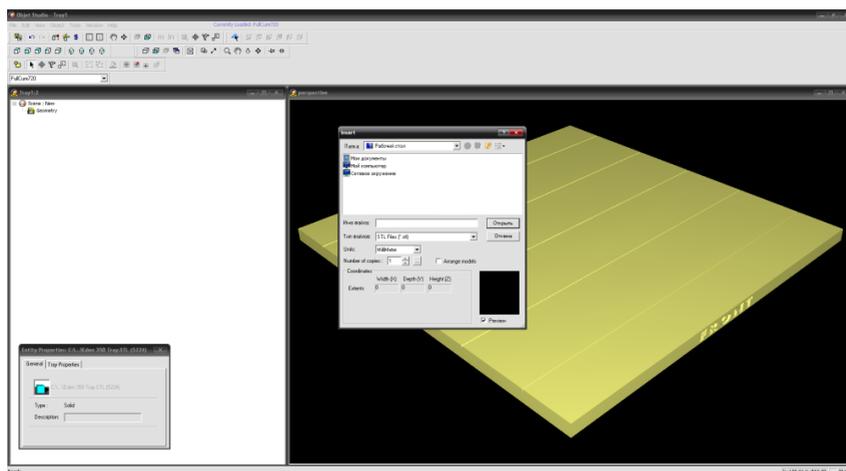


Рис. 30. Диалоговое окно Insert

По необходимости можно выбрать следующие опции:

- Units – выбор миллиметров или дюймов для единиц измерения объекта.
- Number of copies – выбор необходимого числа копий выбранной модели для размещения на лотке вывода.

- *Arrange models* – для автоматического размещения моделей на лотке вывода для повышения эффективности производства моделей.

Нажимаем *Открыть*.

Диалоговое окно закроется, и *Objet Studio* разместит тестовые образцы на лотке вывода (рис. 31).

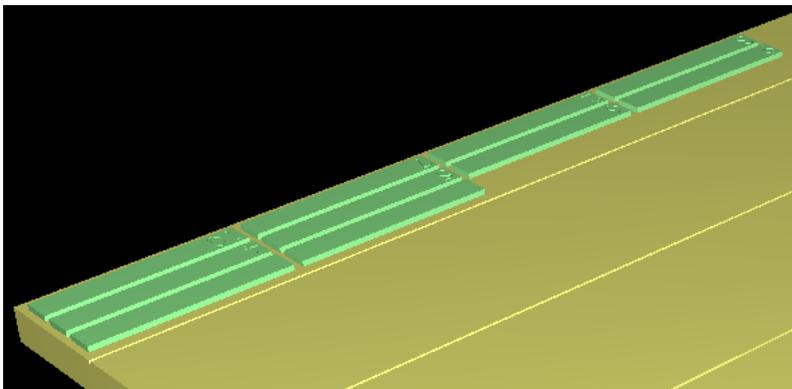


Рис. 31. Размещение тестовых образцов на платформе построения

Для качественного выращивания образцов с требуемой точностью важно грамотно расположить объекты на лотке вывода. *Objet Studio* обладает функцией автоматического расположения объектов. Тем не менее необходимо проверить, что объекты ориентированы логически.

Существует два способа расположения объектов в *Objet Studio* на лотке вывода.

Каждый раз, когда объект помещается на лоток вывода, необходимо выбрать *Arrange models* в диалоговом окне *Insert*.

После размещения нескольких объектов на лотке вывода необходимо выбрать *select Tools > Automatic Placement*.

Присутствует возможность ручного расположения объектов на лотке вывода – даже если они были автоматически упорядо-

чены (используя опцию *Arrange models* в диалоговом окне *Вставка*).

Ориентация цифровых моделей на лотке вывода влияет на скорость и эффективность их производства на 3D-принтере, определяет, где и сколько будет использовано материала модели и будет или нет поверхность модели глянцевая. На рис. 32 представлены выращенные тестовые образцы.

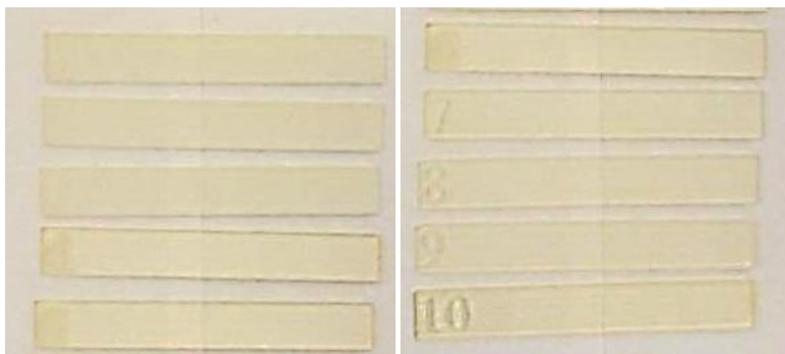


Рис. 32. Выращенные тестовые образцы на 3D-принтере

После выращивания необходимо удалить материал поддержки с помощью установки *WaterJet*. Температура хранения образцов должна составлять 15...25 °С. Наружные измерения линейных размеров образцов необходимо производить с помощью гладких микрометров МК с диапазоном измерений 0–25, 0–50 и 0–75, имеющих цену деления 0,01 мм и допустимую погрешность $\pm 0,004$ мм.

На рис. 33 показана типовая конструкция гладкого микрометра. К его основным деталям и узлам относятся скоба 1, пятка 2, микровинт 4, стопор винта 5, стебель 6, барабан 7 и трещотка 8 микрометрической головки, преобразующей вращательное движение барабана в поступательное движение микровинта [16–17].

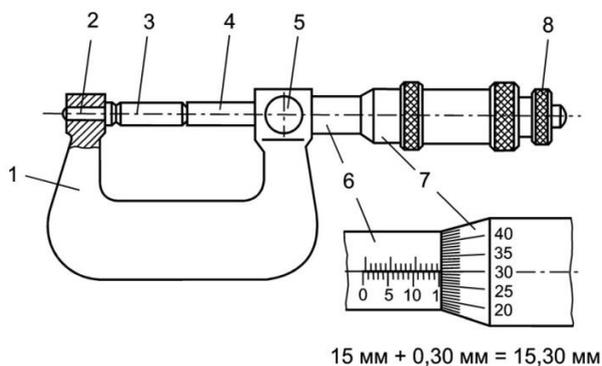


Рис. 33. Микрометр гладкий МК

Необходимо произвести на тестовых образцах измерение трех линейных размеров a , b и c , соответствующих 10, 70 и 2 мм на 3D-модели (рис. 34).

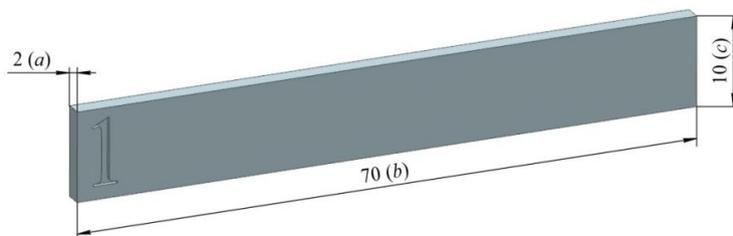


Рис. 34. Измеряемые параметры у образцов

Измеренные значения необходимо записать в соответствующие графы таблицы. Величины свободной линейной усадки необходимо рассчитать по формуле (2):

$$\alpha l = (l_0 - l) / l_0, \quad (2)$$

где l_0 – соответствующий размер на 3D-модели, мм; l – соответствующий размер на образце после усадки, мм.

Отклонение линейных размеров относительно номинальных значений рассчитываются по формуле (3):

$$\Delta = \Delta_{\text{НОМ}} - \Delta_{\text{ИЗМЕР}}, \quad (3)$$

где $\Delta_{\text{НОМ}}$ – номинальный линейный размер на 3D-модели, мм;
 $\Delta_{\text{ИЗМЕР}}$ – измеренный линейный размер на тестовом образце, мм.

Рассчитанные значения линейной усадки необходимо записать в соответствующие графы таблицы.

2.8 Содержание отчета

В процессе выполнения работы оформляется отчет в соответствии с предложенным алгоритмом, заполняются цели и задачи лабораторной работы, приводится эскиз тестовых образцов для выращивания. Проводится измерение линейных размеров тестовых образцов, вычисляются отклонения от номинала (сравниваются с 3D-моделью), и вычисляются величины линейных усадок. В конце отчета формируются выводы по проделанной работе.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Специфика изготовления моделей с помощью 3D-принтеров.
2. В чем ключевая особенность технологии послойного выращивания PolyJet?
3. Из каких основных блоков состоит 3D-принтер Objet Eden 350?
4. Опишите принцип проектирования 3D-моделей для послойного выращивания.

5. В чем заключается принципиальное отличие качества выращенных образцов, спроектированных в различных программных продуктах CAD?

6. Для чего на 3D-модели предназначены технологические уклоны и литейные радиусы?

7. Какова последовательность действий оператора при технологическом процессе послойного выращивания моделей?

8. Каковы основные характеристики материалов семейства FullCure?

9. Каким образом производится постобработка выращенных моделей?

10. Каким образом происходит расчет линейной усадки материала?

11. Каким образом происходит расчет отклонения линейных размеров относительно номинальных?

3 ИЗМЕРЕНИЕ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ДЕТАЛЕЙ И СБОРОЧНЫХ ЕДИНИЦ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СОВРЕМЕННЫХ МЕТОДОВ И СРЕДСТВ ИЗМЕРЕНИЙ

3.1 Цель и задачи работы

Цель работы – закрепление теоретических знаний и получение практических навыков по подготовке управляющих программ и выполнению измерений геометрических параметров деталей с использованием координатных средств измерений.

Задачи:

- изучить современные методы и средства измерений геометрических параметров деталей и сборочных единиц;
- изучить конструкцию и технические характеристики координатных средств измерений;
- проанализировать измерительную задачу и деталь, разработать управляющую программу для измерения геометрических параметров.

3.2 Последовательность выполнения работы

1. Изучить особенности методов и средств координатных измерений, в том числе реализующих контактный метод измерения.
2. Изучить специфику и особенности погрешностей координатных средств измерений.
3. Освоить последовательность и основные этапы разработки управляющих программ для координатных средств измерений на

примере использования контактной координатно-измерительной машины.

4. Разработать управляющую программу для измерения геометрических параметров детали.

5. Произвести измерение геометрических параметров деталей либо выполнить верификацию управляющей программы.

6. Оформить отчет, сделать выводы по итогам выполнения практического задания.

3.3 Программное обеспечение, оборудование, инструменты и средства измерений

Программное обеспечение:

- PC-DMIS CAD++ 4.3.

Оборудование:

- Координатно-измерительная машина DEA Global Performance 07.10.07.

3.4 Современные методы и средства измерений геометрических параметров деталей машиностроения

В основе большинства современных средств измерений, применяемых в машиностроении для контроля геометрических параметров, заложен координатный метод измерения.

Координатные измерения – это измерения геометрических параметров объекта путем измерения координат отдельных точек поверхности объекта в принятой системе координат (прямоугольной, цилиндрической, сферической) и последующая математическая обработка измеренных координат для определения линейных и угловых размеров, отклонений формы и расположения поверхностей [18].

В промышленности наиболее важными универсальными измерительными приборами для контроля деталей произвольной формы являются координатно-измерительные машины (КИМ), которые могут быть оснащены как контактными, так и бесконтактными измерительными системами.

КИМ получили хорошее распространение в промышленности, поскольку являются очень гибкими и позволяют производить измерения точек в пространстве с высокой точностью. В настоящее время они снабжены числовым программным управлением и сканирующими измерительными головками, как контактными, так и бесконтактными; автоматические измерения тысяч точек легко выполняются, даже на сложных поверхностях. В случаях, когда геометрическая точность поверхностей произвольной формы имеет решающее значение для эксплуатационных качеств или для внешнего вида изделия, процесс контроля, как правило, проводится на КИМ. Координатные измерения осуществляются при помощи контактного и бесконтактного методов. Рассмотрим подробнее эти методы.

3.4.1 Контактный метод измерений

Метод основан на измерении отдельных точек поверхностей деталей посредством касания этих поверхностей измерительным наконечником, зачастую сферической формы. В отличие от традиционных средств измерений, КИМ позволяет измерять элементы геометрии свободной формы, поскольку измерения не выполняются напрямую. Размеры геометрических элементов вычисляются на основании координат точек или поверхности, причем этих точек должно быть достаточно для однозначного определения измеряемой геометрии (плоскость, отверстие, конус). Также КИМ используют для определения параметров поверхности, величин отклонений формы и расположения поверхностей.

Важнейшим преимуществом контактных измерительных систем является высокая точность получаемых фактических значений координат точек поверхности. Заявленная производителями КИМ точность измерения составляет порядка 0,5–2 мкм.

Широко распространен порталный тип КИМ (рис. 35). Преимущество порталных КИМ очевидно при измерении точных деталей в стационарных условиях специальных термостатированных помещений.



Рис. 35. Процесс измерения детали на КИМ «DEA Global Performance 07.10.07»

Но в ряде случаев их использование невозможно или неоправданно, например при измерении крупногабаритных деталей или когда нет возможности доставить деталь в специальное помещение. В этих случаях используются измерительные машины портативного типа. КИМ портативного типа представляет собой

многоосевую измерительную «руку» с шестью степенями свободы, имеющую три подвижных сочленения (в «плече», «локте» и «запястье») со сферическим рабочим пространством. Каждое сочленение снабжено датчиком поворотов по осям. При касании измерительного наконечника об измеряемую поверхность с высокой точностью определяются его координаты центра. Координаты точки касания определяются координатами вектора компенсации, отложенного из центра измерительного наконечника. Модуль вектора компенсации равен радиусу измерительного наконечника. Для определения направления вектора компенсации существуют различные способы, называемые методами компенсации. Приведем наиболее распространенные:

1. Направление вектора компенсации определяется по вектору-нормали в точке измеряемой поверхности на САД-модели детали. Движение измерительного наконечника к измеряемой точке поверхности производится так же по направлению вектора-нормали (рис. 36).

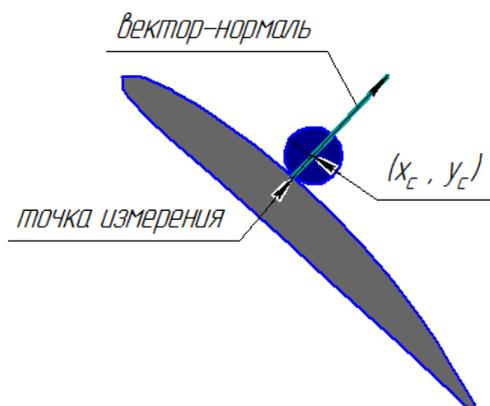


Рис. 36. Измерение лопатки ГТД методом соответствия с 3D-моделью

2. Направление вектора компенсации определяется следующим образом:

– в случае измерения профилей (кривых) – вектором-нормалью к прямой, проведенной через две ближайшие точки (рис. 37);

– если объект измерения – поверхность: вектором-нормалью является вектор нормали к плоскости, определенной измерением трех точек.

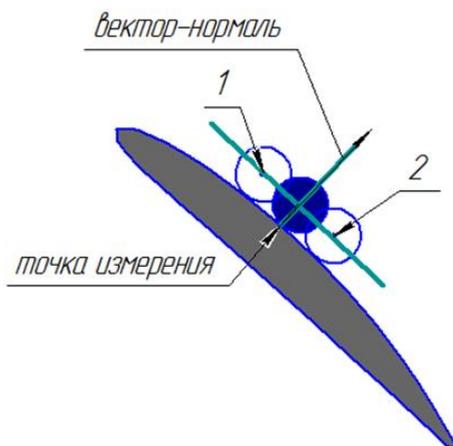


Рис. 37. Определение вектор-нормали движения щупа по прямой, проведенной через центры щупа при измерении соседних точек

Недостатком данного способа является необходимость выполнения дополнительных измерений вспомогательных, что повышает трудоемкость контроля.

3. Вектор компенсации определяется по вектору нормали к поверхности, заданной по координатам центров измерительного наконечника, полученных касанием в множестве точек измеряемой поверхности. При измерении профиля (кривой) через центры измерительного наконечника задается кривая, отстоящая от измеряемого профиля на величину радиуса наконечника (рис. 38).

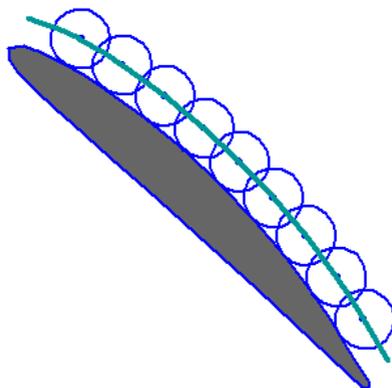


Рис. 38. Измерение деталей сложных поверхностей методом «сканирования»

Наиболее широкое применение в практике измерений находят первый и третий способы. Первый из вышеперечисленных способов измерения сложных поверхностей обладает относительно невысокой точностью для поверхностей сложной формы, имеющих высокую кривизну. Например, при измерении формы пера лопатки ГТД, поверхности спинки или корыта достаточно точно можно измерить точки сложной поверхности по первому способу компенсации радиуса измерительного наконечника. Однако для измерения входных и выходных кромок пера с требуемой точностью необходимо использовать третий способ.

Среди основных недостатков контактных методов измерения относят:

- высокий риск столкновения щупа с деталью в процессе измерения и, как следствие, необходимость верификации траектории перемещения рабочего щупа в процессе измерений нескольких смежных плоскостей;
- низкая скорость измерения;
- трудности с пересчетом фактических данных от смещения щупа [19];

- необходимость достаточно сложных креплений для измеряемой детали;
- невозможность оцифровки участков поверхности детали, содержащих мелкие элементы, размер которых сопоставим с размерами контактного щупа.

Все эти недостатки не позволяют использовать широко распространенные КИМ в качестве единственного универсального решения для оцифровки широкой номенклатуры деталей, например в авиационном двигателе, несмотря на актуальность их использования, оправданную высокой точностью и большой степенью автоматизации при измерениях однотипных деталей серийного производства.

3.4.2 Бесконтактные методы измерений

К бесконтактным методам измерений относятся оптические методы, основанные на оптических принципах, таких как автофокусировка, триангуляция и голография, а также лазерный метод. Преимуществами бесконтактных методов измерений являются: отсутствие силового воздействия, быстрый сбор данных о большом количестве точек, высокая степень гибкости в измерительных настройках [20].

Оптические системы статического действия не требуют перемещения рабочих органов. В основе таких систем заложены два метода: 1) проекция интерференционных полос и 2) отражение интерференционных полос / дефлектометрия.

Проекция интерференционных полос – метод, в котором положение измеряемых точек рассчитывается с помощью оптической триангуляции. В рассматриваемом методе измерение отдельных координат точек поверхности осуществляется без использования физических маркеров. Физические маркеры ис-

пользуются для совмещения отдельных измерений габаритных объектов с разных позиций.

В данном методе различают два подхода [21]: первый основан на проекции образца на поверхность и как минимум двух различных полей зрения камеры. В данном случае образец предназначен исключительно для формирования гомологических (соответственных) точек для триангуляции в пределах оптических изображений, выдаваемых камерой. Второй подход находит численное значение искажения формы измеряемой детали. В этом случае проекционный прибор образца исполняет роль одной камеры. Метод проекции интерференционных полос также реализовывался различными исследовательскими группами в сочетании с другими, более точными датчиками. Более того, в настоящее время исследуется адаптивный метод проекции интерференционных полос с тем, чтобы расширить диапазон измеряемых поверхностей по их шероховатости и углам наклона поверхностей [22].

Стандартный объем измерения системы проекций интерференционных полос находится в диапазоне значений между 0,1 м и 1 м, с относительной точностью до 10^{-4} . Пример системы проекций интерференционных полос представлен на рис. 39.

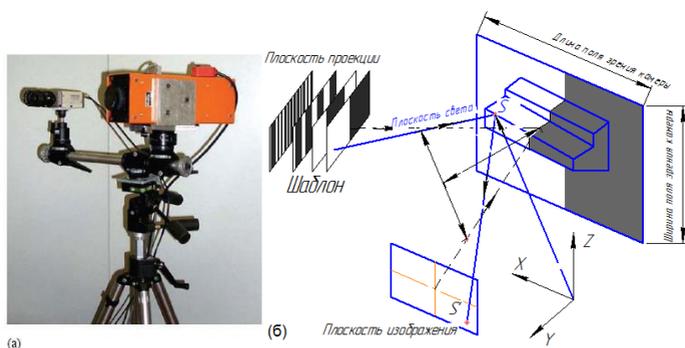


Рис. 39. Пример средства измерения, основанного на проекции интерференционных полос: а – фотография; б – оптическая схема, где представлена измеренная точка поверхности S

Рассмотрим принцип работы проекции интерференционных полос, схема которого представлена на рис. 39 б. Проектор проецирует интерференционный рисунок полос, закодированный с помощью специального процесса, на измеряемый объект. Топография объекта приводит к деформации и отклонениям на интерференционном рисунке полос. Благодаря этому поверхность объекта становится видимой в 3D для систем с одной или несколькими камерами, которые образуют вторую ключевую часть сканера интерференционных полос белого света. Для определения отдельных точечных координат 3D триангуляционный расчет (отношения в прямоугольном треугольнике) производится из каждого пикселя камеры на основе пересечения лучей (проектор-камера) и кодирования.

В зависимости от разрешающей способности камеры и используемого объема измерений, грубый или мелкий 3D точечный рисунок (разрешение) помещается на объект. Чем мельче рисунок, тем лучше можно представить сложные элементы (радиусы, кромки и т.д.).

Отражение интерференционных полос / дефлектометрия.

Общим недостатком систем проекций интерференционных полос является их неспособность измерить отражающие поверхности, например зеркальные поверхности. В методе отражения интерференционных полос, также называемом дефлектометрией, экран проецирует черные и белые полосы на отражающую поверхность. Отраженная интерференционная картина просматривается с помощью видеокамеры и подвергается анализу посредством программного обеспечения. Таким образом, углы отражения могут быть определены для каждого пикселя, а локальные градиенты могут быть рассчитаны с высоким поперечным разрешением. Данные о поверхности получаются путем интеграции, с большим вертикальным разрешением, чем при проекции интерференционных полос. На рис. 40 приведен пример горизонтальной настройки при измерении зеркальной поверхности произвольной формы.

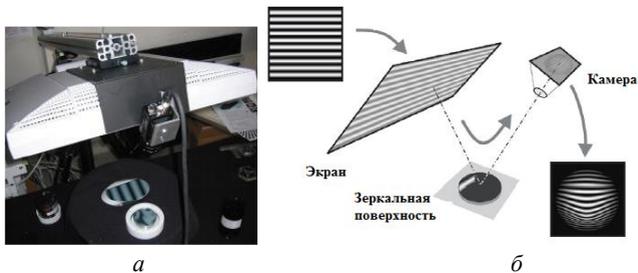


Рис. 40. Пример системы отражения интерференционных полос:
 а – изображение горизонтальной настройки малогабаритных объектов (б)

Сильно отражающие поверхности могут быть измерены на КИМ с помощью, например, специального триангуляционного оптического датчика [23], который использует три падающих луча света, проходящих через поляризационные пластины таким образом, что отраженный свет в значительной степени устраняется и только рассеянный свет может достигать ПЗС-камеру. Оптические измерительные системы представляют собой дистанционные датчики, которые в зависимости от количества и положения измеряемых точек можно разделить на три основных типа: точечные датчики, линейные (полосковые) датчики и барьерные датчики. Пример представлен на рис. 41.



Рис. 41. Пример оптической измерительной системы, установленной на КИМ:
 мульти полосковый лазерный датчик

В табл. 6 приведены качественные характеристики применимости методов средств измерений с учетом классов размера детали, сложности формы, чистоты поверхности и свойств материала, таких как твердость и светопрозрачность [24]. Характерные погрешности измерения указаны на рис. 42.

Таблица 6. Оценка некоторых методов измерения

	Лазерный трекер	Неподрезанное сплечение	Тактильная КИМ	Оптическая КИМ	Рентгеновская томография	Проекция интерференц. полос	Отражение интер. полос/Дефлектометрия	Фотограмметрия	Интерферометрия	Гластная микрогеометрия лав-ти и профилометрия	Оптическая микрогеометрия лав-ти и профилометрия	Конфокальная микроскопия	Стандартная опловая микроскопия
Размер детали													
Крупногабаритная	●	●	●	●				●	●				
Среднегабаритная	●	●	●	●				●	●				
Малогабаритная					●	●	●	●	●	●	●	●	●
Микро			●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
Сложность формы													
Низкая	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
Средняя	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
Высокая	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
Материал и поверхность													
твердый, неточная	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
нетвердый	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
зеркальная	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
светопрозрачный	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
светонепрозрачный	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
Единство измерений													
	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●

Легенда: ● — полная совместимость, ● — частичная совместимость

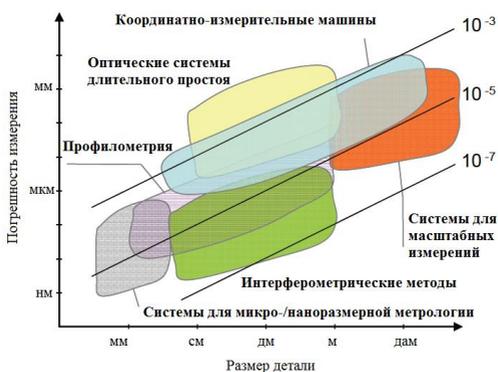


Рис. 42. Характерный диапазон погрешности измерения в зависимости от размера детали для различных классов измерительных систем

Точность измерительных средств определяется во многом их конструкцией. Рассмотрим конструктивные особенности современных контактных и бесконтактных КИМ. Начнем с конструкции контактных КИМ.

3.4.3 Структурная схема и базовые компоновки контактных КИМ

Компоновка в значительной степени определяет характеристики КИМ и требования к конструкции и параметрам основных узлов. В свою очередь компоновка зависит от габаритных размеров и массы измеряемых деталей; расположения измеряемых поверхностей; необходимого числа координатных перемещений для реализации оптимального в отношении точности и производительности процесса измерения.

Компоновка КИМ, предназначенная для решения определенных задач, должна оптимально удовлетворять следующим, отчасти противоречивым, требованиям:

- минимальное отклонение от принципа Аббе;
- обеспечение оптимальных динамических свойств;
- минимизация деформаций узлов в КИМ, возникающих из-за действия переменной массы измеряемых деталей, ИГ, перемещения подвижных узлов;
- возможность, удобство и точность компенсации деформаций;
- наличие открытого измерительного пространства, обеспечивающего удобство установки детали и хорошую ее обзорность в процессе измерения.

Принцип Аббе состоит в том, что минимальные ошибки измерения возникают, если контролируемый геометрический элемент и элемент сравнения находятся на одной линии – линии измерения. Этот принцип справедлив для поступательно перемещающихся

звеньев. Последовательное расположение контролируемого и образцового элемента по одной линии приводит к увеличению габаритных размеров средств измерений, поэтому в ряде случаев применяют параллельное расположение сравнительных элементов, но и тогда нужно соблюдать условия, при которых ошибки измерения минимальны.

Портальные компоновки наиболее распространены и представлены рядом различных вариантов. Характерной особенностью этих компоновок является П-образный портал (рис. 43).

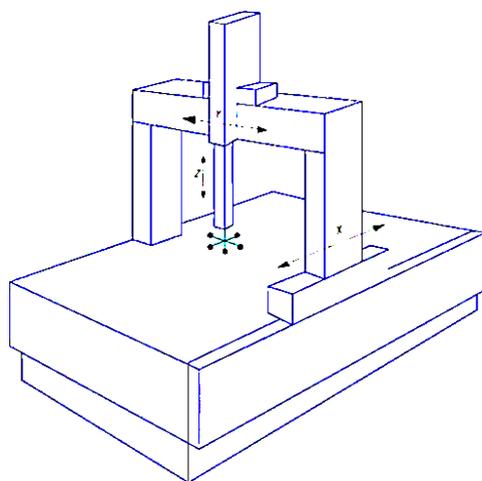


Рис. 43. Портальная компоновка КИМ

Портал с колоннами перемещается по основной оси. По горизонтальной оси перемещается каретка, несущая подвижную вдоль вертикальной оси пиноль, на которой крепится ИГ. Портальные компоновки обладают высокой жесткостью основных узлов, точностью, хорошими динамическими свойствами, достаточно открытым пространством для установки детали и ее обзорностью в процессе измерения, удобством для развития отдельных КИМ в конструктивно унифицированные типоразмер-

ные ряды, обеспечивающие широкий диапазон габаритов измеряемых деталей.

При повышенных требованиях к точности и увеличению диапазона измерений механические направляющие заменяются системами на воздушных подшипниках. Высокоточные направляющие производятся в основном из природного твердого камня (например, гранита). Подвижные компоненты перемещаются по каменным поверхностям на воздушной подушке толщиной всего несколько микрометров, предназначенной для минимизации трения. Усилие, необходимое для передвигания кареток, является относительно небольшим, а отсутствие какого-либо запаздывания в системе позиционирования приводит к снижению погрешности измерения.

Портальные компоновки с подвижным порталом рекомендуются для прецизионных среднегабаритных КИМ с перемещением каретки вдоль портала до 1 000 мм, пиноли – до 800 мм и для средне- и крупногабаритных производственных КИМ с перемещением вдоль портала до 1 600 мм, пиноли – до 1 400 мм. Перемещение портала вдоль основания определяется размерами последнего в пределах до нескольких метров.

Портальная компоновка с неподвижным порталом, как правило, используется для прецизионных среднегабаритных КИМ с координатными перемещениями до 1 200 мм.

Повышенной жесткостью и стабильностью несущего подвижного звена при сравнительно небольшой его массе обладают КИМ с подвижным Г-образным полупорталом (рис. 44), образованным из жесткой горизонтальной поперечины и легкой опоры. Полупортал одним концом поперечины базируется на поднятой и жестко прикрепленной относительно основания балке с направляющими, а свободным концом посредством подшипников опирается на направляющие основания. Привод и ИП полупортала прикреплены к балке. Имеются свободный доступ с двух сторон для установки

детали и достаточная обзорность при измерении. Такая компоновка рекомендуется для прецизионных КИМ средних габаритов с увеличенным перемещением по вертикальной оси, для которых измерительное пространство близко к кубу.

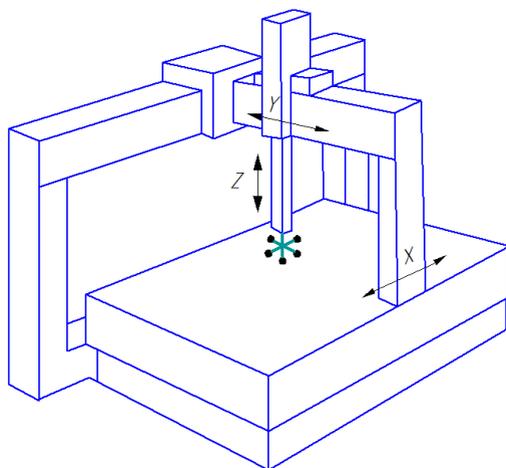


Рис. 44. Портальные компоновки с полупорталами

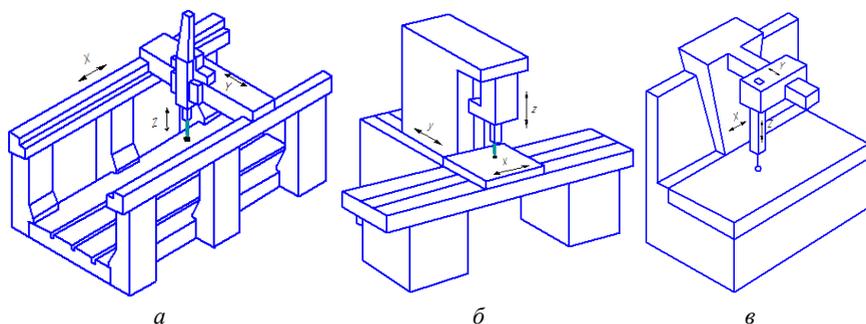


Рис. 45. Компоновки КИМ:

а – мостовая компоновка; б – стоечная компоновка; в – консольная компоновка

Мостовая компоновка позволяет получить меньшую, по сравнению с другими компоновками, массу подвижных узлов при их высокой жесткости и устойчивости. Она используется в крупногабаритных КИМ разных классов точности (рис. 45 а) и является для них основной компоновкой. У мостовой компоновки каретка с пинолью перемещается по подвижной траверсе, обеими своими концами базирующейся на горизонтальных неподвижных балках, которые на колоннах подняты над столом для установки детали. Привод и ИП измерительной системы траверсы крепятся к одной из балок. КИМ такой компоновки имеет ограниченный с трех сторон доступ для загрузки деталей и наблюдения за измерением.

Стоечные компоновки характеризуются наличием подвижной или неподвижной относительно основания стойки, по которой, как правило, в вертикальном направлении перемещается пиноль или суппорт. Наиболее характерный вариант исполнения данных компоновок представлен на рис. 45 б. Имея высокую универсальность, стоечная компоновка уступает ранее рассмотренным компоновкам по возможности достижения высокой точности измерения средне- и крупногабаритных деталей. Ей присущи недостатки, свойственные компоновкам с подвижной деталью.

Консольные компоновки (рис. 45 в) отличаются наличием подвижной по одной или двум горизонтальным осям горизонтальной консоли. Когда консоль подвижна по одной оси относительно основания, по консоли перемещается каретка, несущая вертикально подвижную пиноль с ИГ. Если консоль перемещается в каретке, подвижной относительно основания, то пиноль движется по вертикальной оси относительно консоли.

КИМ консольной компоновки обладают лучшими, по сравнению с порталной компоновкой, доступом для установки детали и обзорностью, а также лучшим соблюдением принципа Аббе. Од-

нако этой компоновке присущи значительные деформации консоли, подшипников и узлов их базирования, снижающие точность КИМ. Машины этих компоновок очень чувствительны к изменению массы узлов, подвижных относительно консоли.

Помимо вышеперечисленных компоновок, координатно-измерительные машины подразделяются на:

- машины с ручным управлением;
- машины с автоматическим перемещением по осям и джойстиками ручного управления,
- машины с автоматическим перемещением по осям и числовым программным управлением (CNC).

Кроме того, существуют различные комбинированные схемы, применяемые для машин, которые объединяют все вышеуказанные принципы.

Высокая точность измерения на КИМ обеспечивается:

- Прецизионными направляющими, выполненными из твердых пород, например из гранита (основание, балка портала, ползун).

- Конструкцией портала, выполненного в виде жесткой замкнутой рамы.

- Предметным столом, исключаящим деформации основания и направляющих портала, возникающих под действием массы измеряемых тяжелых деталей.

- Жесткими, виброустойчивыми, прецизионными аэроэластичными опорами с малым воздушным зазором и минимальным расходом воздуха.

- Виброизолирующими опорами, автоматически поддерживающими горизонтальное положение основания КИМ.

- Прецизионными фотоэлектрическими системами измерения перемещений узлов КИМ по всем координатам. Высокую производительность обеспечивают современные электроприводы на базе высокомоментных двигателей с плавным регулированием ско-

ростей перемещения узлов КИМ в широком диапазоне; автоматическое управление процессом измерения производят при помощи персонального компьютера, обеспечивающего обработку результатов измерений и их выдачу в удобной для потребителя форме. Универсальность КИМ достигается развитым программно-математическим обеспечением с большим набором модульных программ для измерения деталей с различными простыми и сложными поверхностями; системой измерительных головок касания с большим набором щупов различной конфигурации. Измерительные головки оснащаются наборами измерительных наконечников, обеспечивающих возможность контроля максимально большого числа геометрических параметров при одном установе детали, а также контроля диаметров отверстий, concentричности, межосевых расстояний и т.п.

Измерительные системы предназначены для отсчета перемещения подвижных узлов КИМ при измерении координат точек. Рассмотрим отображающий метод считывания, часто применяемого в измерительных датчиках линейных перемещений.

В упрощенном виде отображающий метод – это генерация сигнала на основе значений свет/тень: две шкалы со штрихами одинакового или похожего периода (шкала и шаблон) двигаются друг относительно друга. Носитель штрихов шаблона выполняется из прозрачного материала, носитель самой шкалы тоже может быть прозрачным или иметь металлическую рефлектирующую поверхность.

После прохождения параллельных лучей света через шаблон образуется определенная светотеневая последовательность. Далее прошедшее излучение попадает на шкалу. При движении шаблона вдоль шкалы штрихи на шаблоне могут совпадать со штрихами на шкале, образуя в местах просветов на выходе «свет», либо штрихи накладываются на просветы и на выходе получается «тень». Ряд фотоэлементов преобразует этот световой сигнал в электрический.

Штрихи на шаблоне, структурированные специальным образом, фильтруют световой поток так, чтобы он приближался к синусоидальной форме.

Чем меньше расстояние между штрихами, тем меньше и точнее должно быть расстояние между шкалой и считывающим элементом. Описанная схема представлена на рис. 46.

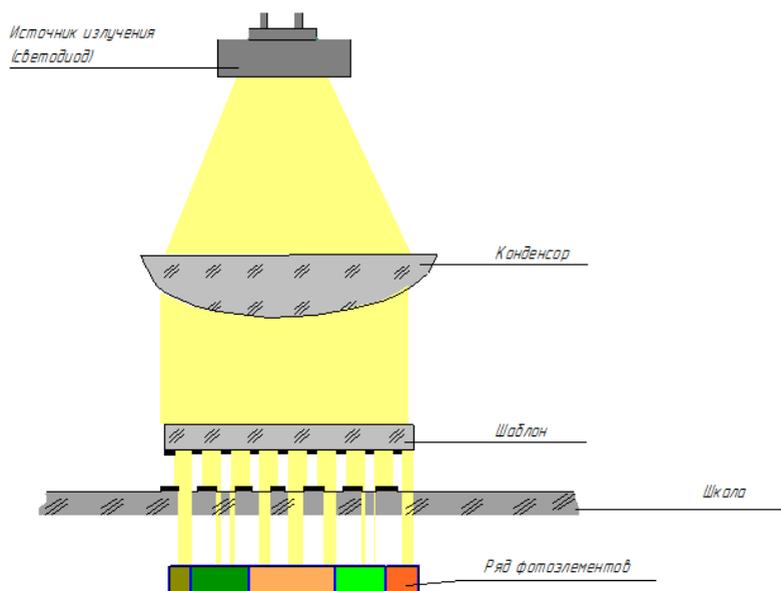


Рис. 46. Отображающий метод считывания

Измерительные головки касания (ИГ) являются одним из основных узлов КИМ, взаимодействующих с измеряемой деталью. Они в равной степени с ИП и узлами координатных перемещений участвуют в измерении координат точек и определяют точность, универсальность и производительность КИМ.

Тип и функциональные параметры головок определяют реализуемые на КИМ способы измерения, требования к системе

управления, номенклатуру решаемых метрологических задач. На рис. 47 представлена схема измерительной головки касания с основными составляющими ее узлами и системами, которые для головок различного назначения имеют разное конструктивное исполнение и осуществляют различие функции. Такими характерными для измерительной головки элементами являются: корпус 1, в котором монтируются все остальные узлы; узел 2 установки (базирования, подсветки), измерительного наконечника; простой или сложный измерительный наконечник 3, состоящий из отдельных соединенных между собой стержней 4, к концам которых крепятся контактные элементы 5, в процессе измерения контактирующие с измеряемой поверхностью; предохранитель 6 от поломки в случае большого смещения наконечника (например, при аварийном столкновении с деталью); чувствительные элементы или ИП 7, реагирующие на перемещения измерительного наконечника; узел создания измерительного усилия и ориентации 8; электронная схема 9 питания и обработки сигналов. Узел установки измерительного наконечника позволяет ему перемещаться по определенному закону при соприкосновении наконечника с деталью и передает данное перемещение на чувствительный элемент.

При отклонении наконечника 3 в любом из показанных стрелками направлений опорный диск узла 2 поворачивается относительно оси, перпендикулярной оси головки, или смещается вдоль ее оси и смещает связанный с ним якорь индуктивного датчика 7. Это вызывает изменения электрического сигнала, что и используется для определения момента соприкосновения измерительного наконечника с деталью. При значительном смещении наконечника связанный с ним диск предохранителя 6 от поломки перемещается относительно втулки, соединенной с диском узла 2, имеющего значительно меньший предел перемещения, чем диск предохранителя 6.

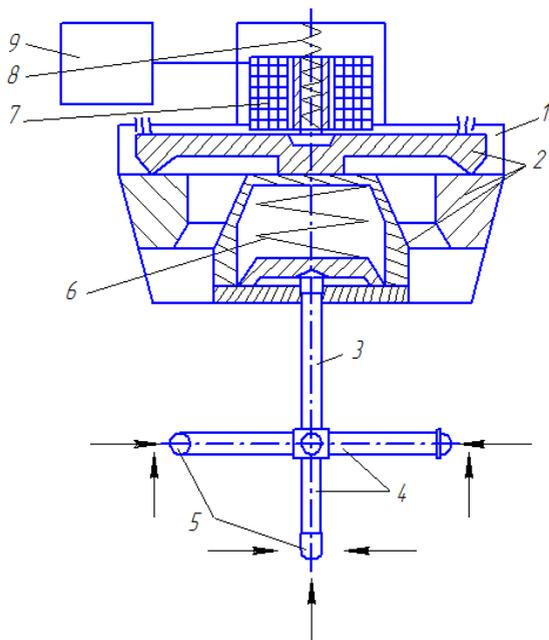


Рис. 47. Схема измерительной головки

Стоит отметить, что измерительные головки, подобные применяемым на КИМ, находят широкое распространение в станках с ЧПУ для промежуточного измерения деталей, контроля настройки и изнашивания режущего инструмента на станках. Они могут применяться в различных измерительных приборах, машинах для измерения длины и т.п.

По функциональному назначению измерительные головки подразделяются на две большие группы: измерительные головки касания (ИГК, также иногда называемые триггерными) и сканирующие измерительные головки. Для измерения деталей, имеющих сложные поверхности, важно измерять большое количество точек, расположенных на контролируемой поверхности. В настоящее время триггерным измерительным головкам касания предпо-

читают сканирующие контактные головки. Они могут измерять до 200 точек/с на скорости до 150 мм/с [25].

В измерительных головках касания измерительное усилие, возникающее при контакте наконечника с поверхностью, или небольшое перемещение наконечника, вызывает измерение состояния чувствительного элемента и дискретное измерение электрического сигнала, формирующего командный сигнал на считывание координат и управление движением подвижных узлов КИМ.

Зона калибровки – часть рабочей зоны КИМ, предназначенная для калибровки измерительных наконечников измерительных головок. Ее размеры определяются размерами калибратора и измерительной головки. В качестве калибратора, как правило, используются прецизионные сферы, точность размеров и формы которых составляет доли микрометров.

При измерении детали с размерами, которые являются предельно большими для определенной КИМ и образуют составные измерительные головки, следует не только учитывать возможность доступа к измеряемым поверхностям, но и оптимально устанавливать головки для обеспечения минимальной потери измерительного пространства. Возможно совмещение зон аттестации и измерения: выполнив калибровку наконечника до начала измерения, калибратор удаляют. Но это возможно только в том случае, если в процессе измерения не потребуется новая калибровка положения центров измерительных наконечников в системе координат КИМ.

Более рационально измерительное пространство используется при установке измерительных головок на поворотных узлах (рис. 48). Для этого могут быть использованы только работающие с различной ориентацией в пространстве измерительные головки или построенные на их основе составные головки. Поворот производится относительно одной и двух взаимно перпендикулярных осей от привода автоматически. Если поворотное устрой-

ство содержит прецизионные угловые измерительные системы, обеспечивающие поворот головки с необходимой для измерения точностью, то не требуется калибровка положения головки после каждого поворота. В противном случае необходимая после каждого поворота головки калибровка снижает производительность и точность измерений.

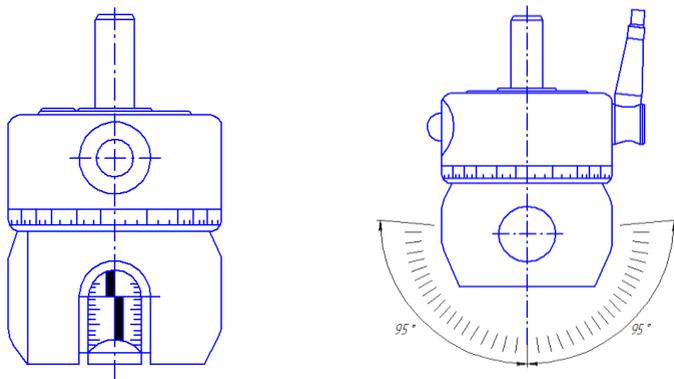


Рис. 48. Поворотная относительно двух осей головка КИМ

3.4.4 Конструкция оптического средства измерений СОМЕТ 6

В данном разделе будет рассмотрено устройство прибора для оптических координатных измерений СОМЕТ 6. Перечислим основные компоненты прибора.

1. Датчик СОМЕТ 6 состоит из модуля камеры, модуля проектора и крепежных модулей с крючковым гаечным ключом. Размеры крепежных модулей:

- Крепежный модуль 70 мм для полей обзора 150 и 250.
- Крепежный модуль 170 мм для полей обзора 400 и 700.
- Крепежный модуль 400 мм для поля обзора 1 200.

2. Объективы: по одному объективу камеры для каждого поля обзора и использование объективов проектора для нескольких полей обзора при помощи распорных колец.

3. Блок питания Powerpack 300.

4. Комплект кабелей.

5. ПК СОМЕТ 6, включая программное обеспечение colin3D или СОМЕТ*plus*, а также аппаратный ключ CodeMeter.

6. Калибровочная пластина с соответствующим калибровочным шаблоном и калибровочным файлом.

Датчик СОМЕТ 6 представляет собой датчик проецированных интерференционных полос, состоящий из модуля камеры и модуля проектора. Эти два компонента привинчены к крепежному модулю, который соответствует определенному полю обзора (рис. 49).



Рис. 49. Датчик СОМЕТ 6

Выбрав подходящее место для установки датчика (столешницы, стол и т.д.), необходимо обеспечить надежную опору для системы и, как частное, для луча.

Для установки модуля проектора к модулю «луч» прикрепите крепежной гайкой сторону «луч» к фланцу модуля без накладной гайки. На рис. 50 изображены главные модули системы.

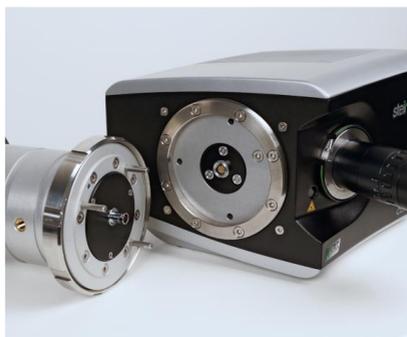


Рис. 50. Проектор и «луч» (фланцевая часть)

Трехкоординатная головка крепится к руке штатива через пластиковую переходную втулку. Трехкоординатная головка вставляется в руку штатива до упора, насколько это позволяет втулка. При достижении упора трехкоординатная головка выравнивается таким образом, что три регулировочных рычага находятся в верхнем положении. Детально трехкоординатная головка представлена на рис. 51.



Рис. 51. Трехкоординатная головка

Трекоординатная головка закрепляется на штативе с помощью шестигранного торцевого ключа, с моментом затяжки, равным 5 Нм. Наклоняя ослабленный рычаг блокировки в сторону рычага вращения, осуществляют разблокировку датчика. Держатель датчика теперь можно открыть. Стопорный рычаг возвращается в вертикальное положение с помощью возвратной пружины. Датчик СОМЕТ 6 устанавливается в трехкоординатную головку. Модуль «луч» размещен в опоре датчика таким образом, что две линзы привинчены к модулям в направлении от рычагов трехкоординатной головки (рис. 52).



Рис. 52. Установка датчика СОМЕТА 6 в трехкоординатную головку

Стопорный рычаг захватывает верхнюю часть опоры датчика около места закрепления.

Выполнение измерений при помощи прибора СОМЕТ 6.

Осуществляется выбор крепежного модуля и выбранных объективов исходя из размера поля обзора. Для каждого поля обзора существует комбинация объектива камеры и объектива проектора. При изменении поля обзора вы должны заменить объективы или использовать распорные кольца на стороне проектора. Расстояние между датчиком СОМЕТ 6 и центром поля обзора следующее:

- 600 мм для полей обзора 150 и 250;
- 785 мм для полей обзора 400 и 700;
- 1 400 мм для поля обзора 1 200 [26].

Во время измерения камера датчика СОМЕТ 6 должна быть расположена вертикально по отношению к поверхности объекта (рис. 53). Эта ориентация обеспечивает наилучший захват камеры и позволяет измерить интерференционную картину проектора.

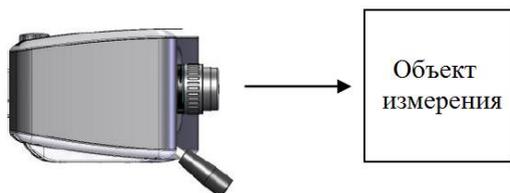


Рис. 53. Расположение камеры во время измерения

Лазеры камеры и проектора пересекаются в центре измеряемой области. Это гарантирует расположение объекта в центре измерительной области (рис. 54).

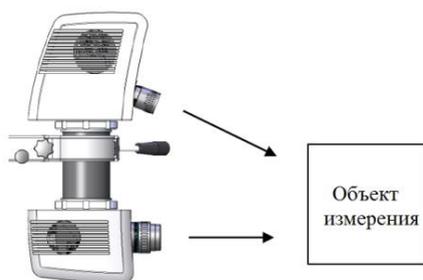


Рис. 54. Лазеры камеры и проектора при измерении

Затемненные зоны не обеспечивают заданных характеристик измерений. Термин «затемнение» относится к области, на которой не может быть создана сетка или в которой камера не может захва-

тить сетку. Для проведения измерений в этих областях, с той точностью, что вам необходима, измените положение датчика СОМ-ЕТ 6 или объекта измерения.

На рис. 55 показано неправильное расположение камеры / объекта измерения, которое привело к появлению области затемнения.

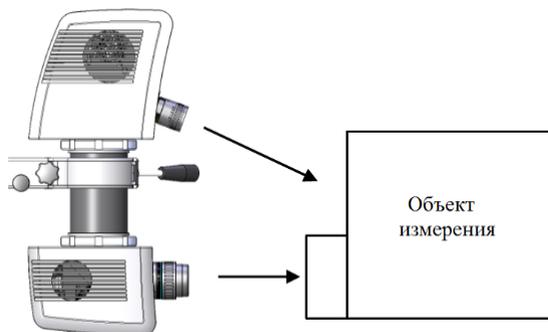


Рис. 55. Образование области затемнения

Приведенное краткое описание оборудования предназначено для формирования представлений о современном оборудовании. Такие сведения будут необходимы для разработки операций измерений геометрических параметров деталей машиностроения.

3.5 Схемы измерения геометрических параметров

Рассмотрим некоторые типовые схемы измерений геометрических параметров. Приведем описание выполнения измерений геометрических параметров с использованием контрольно-измерительных приспособлений и с использованием трех осевых координатно-измерительных машин.

При описании измерений на КИМ примем следующие кодовые обозначения:

И – измерение геометрического элемента. Например, запись $I(l_1, 10)$ означает измерение прямой l_1 посредством 10 точек, $I(\Pi_1, 2, 8)$ означает измерение цилиндрической поверхности Π_1 посредством 2 сечений по 8 точек в каждом сечении.

Б – базирование (определение измерительной базы). Например, запись Б(Ось X по направлению Π_1) означает определение оси для измерения по оси цилиндрической поверхности Π_1 .

П – построение геометрического элемента исходя из других элементов. Например, запись $P(l_{cp}, \text{средняя прямая}; l_1, l_2)$ означает построение средней прямой исходя из элементов l_1 и l_2 .

Р – вывод размерной информации в протокол посредством инструментов программного обеспечения для выполнения измерений. Например, $R(//; l_1, l_2)$ – вывод информации о параллельности прямой l_2 относительно базовой прямой l_1 , $R(\text{координаты } x \text{ и } y; \Pi_1 \text{ и } \Pi_2)$ – вывод в протокол координат осей цилиндрических поверхностей Π_1 и Π_2 .

В приводимых ниже эскизах элемент *плоскость* будем изображать посредством треугольника, имеющего три точки в вершинах, элемент *прямая* – прямой с двумя точками на концах, элемент *цилиндр* – цилиндрической поверхностью, имеющей два сечения с тремя точками в каждом из них.

Под измерением геометрического элемента понимается измерение определенного количества точек на поверхности детали с последующим вписыванием рассматриваемого геометрического элемента в массив измеренных точек. Например, плоская поверхность детали измеряется по нескольким точкам, не менее трех, с последующим вписыванием в измеренные точки номинальной плоской поверхности. После выполнения процедуры вписывания определяются геометрические параметры, характеризующие этот элемент и соответственно поверхность детали.

Например, для плоской поверхности такими геометрическими параметрами являются вектор нормали и координаты центральной точки.

В табл. 7, находящейся на следующей странице, приведены: обозначение измеряемого параметра на чертежах, упрощенная принципиальная схема измерения геометрического параметра с использованием контрольно-измерительного приспособления, схема измерения параметра с использованием КИМ и поясняющая последовательность выполнения вычислений геометрического параметра.

3.6 Точность измерений

Цель точностного расчета – определение допустимой величины погрешности измерений, являющейся исходной при выборе метода измерения, модели и типоразмера средства измерений.

Точностной расчет выполняется в следующей последовательности:

- а) определение допустимой погрешности измерения контролируемого геометрического параметра;
- б) определение допустимой величины погрешности средства измерения.

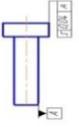
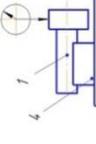
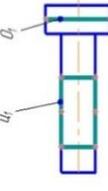
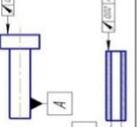
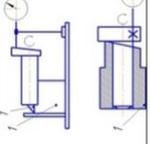
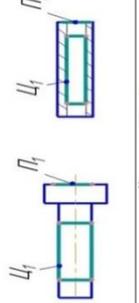
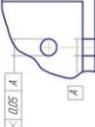
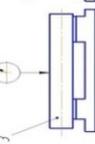
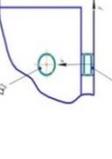
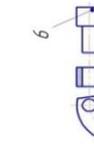
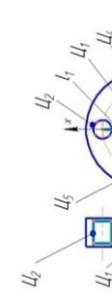
Процесс координатных измерений геометрических параметров по своей природе является стохастическим, на него оказывает влияние множество факторов. Их наиболее общая классификация приведена в работе [27] и может быть представлена следующим образом:

- 1) погрешности, вносимые посредством координатных измерений;
- 2) параметры методики измерения;

Таблица 7. Схемы измерения геометрических параметров

Наименование отклонений	Условное обозначение	Схемы измерения отклонений	Схемы измерения отклонений с использованием координатных средств измерений (КИМ)	Последовательность выполнения измерений/вычислений на КИМ
Непараллельность плоскостей				Первая схема И(1, n), И(1 ₂ , n), P(//; 1, 1 ₂), Вторая схема И(Π ₁ , n), И(Π ₂ , n), P(//; Π ₁ , Π ₂).
Непараллельность осей поверхностей вращения				И(Π ₁ , k, m), И(Π ₁ , k, m), P(//; Π ₁ , Π ₂).
Непараллельность осей вращения и плоскости				Первая схема: И(1, n) или И(Π ₁ , n), P(//; Π ₁ , Π ₂). Вторая схема: И(Π ₁ , n), И(1 ₂ , n), И(Π ₂ , n), И(1 ₂ , n), И(Π ₂ , n), И(Π ₂ , n), P(//; 1 ₂ , 1 ₂), B(ось X по направл. 1 _{сп}), B(начало x и y по оси Π ₁), P(коорд. y; 1 _{сп}).

Окончание табл. 7

Несоосность относительно базовой поверхности				И(Ц ₁ , к, м), И(О ₁ , n), Р(С; Ц ₁ , О ₁);
Торцевое биение				И(Ц ₁ , к, м), И(П ₁ , n), Р (γ, Ц ₁ , П ₁).
Непересечение осей				И(Ц ₁ , к, м), И(Ц ₂ , к, м), Б(Ось х по Ц ₁), Б(начало у по Ц ₁), Р(коорд. у; Ц ₁).
Смещение оси от номинального расположения				И(Ц ₁ , к, м), И(Ц ₂ , к, м), И(Ц ₃ , к, м), И(Ц ₄ , к, м), И(Ц ₅ , к, м), П(Ц ₂ по центрам; Ц ₁ , Ц ₂), Б(Начало осн Х и Y по оси Ц ₁), Б(Ось Х по направлению l ₁), Р(Координаты х и у, Ц ₂ , Ц ₃ , Ц ₄ и Ц ₅).

3) особенности измеряемых деталей (вид и характер погрешности формы измеряемых поверхностей, обусловленной деформациями от зажимных механизмов, качеством поверхностного слоя, доступностью измерительных наконечников для измерения);

4) алгоритмы обработки координат точек, получаемых в процессе измерения;

5) влияние внешних факторов (температуры, вибрации, влажности, засоренности).

На рис. 56 приведена блок схема, включающая основные перечисленные факторы, взятая из [27].

Оценка погрешностей измерений осуществляется с использованием точечных и интервальных оценок. В качестве точечной оценки выступает среднеарифметическое \bar{X} , являющееся оценкой математического ожидания. Интервальная оценка определяется исходя из среднеквадратического отклонения (σ), уровня доверительной вероятности (p) и количества степеней свободы (v_{eff}) с использованием t – распределения (4):

$$(\bar{X} - t_{p, v_{eff}} \sigma; \bar{X} + t_{p, v_{eff}} \sigma) \quad (4)$$

Получение аналитических выражений погрешностей измерений в зависимости от влияющих факторов затруднено из-за их вероятностного характера и сложных связей в процессе измерений. Для определения погрешностей измерений широко используется численное моделирование, основанное на использовании метода Монте-Карло. Целью настоящего пособия является формирование у читателя качественных представлений о действии влияющих факторов и определении уровня поддающихся регулированию факторов. Корректному моделированию с целью оценки величин погрешностей будет посвящено отдельное пособие.

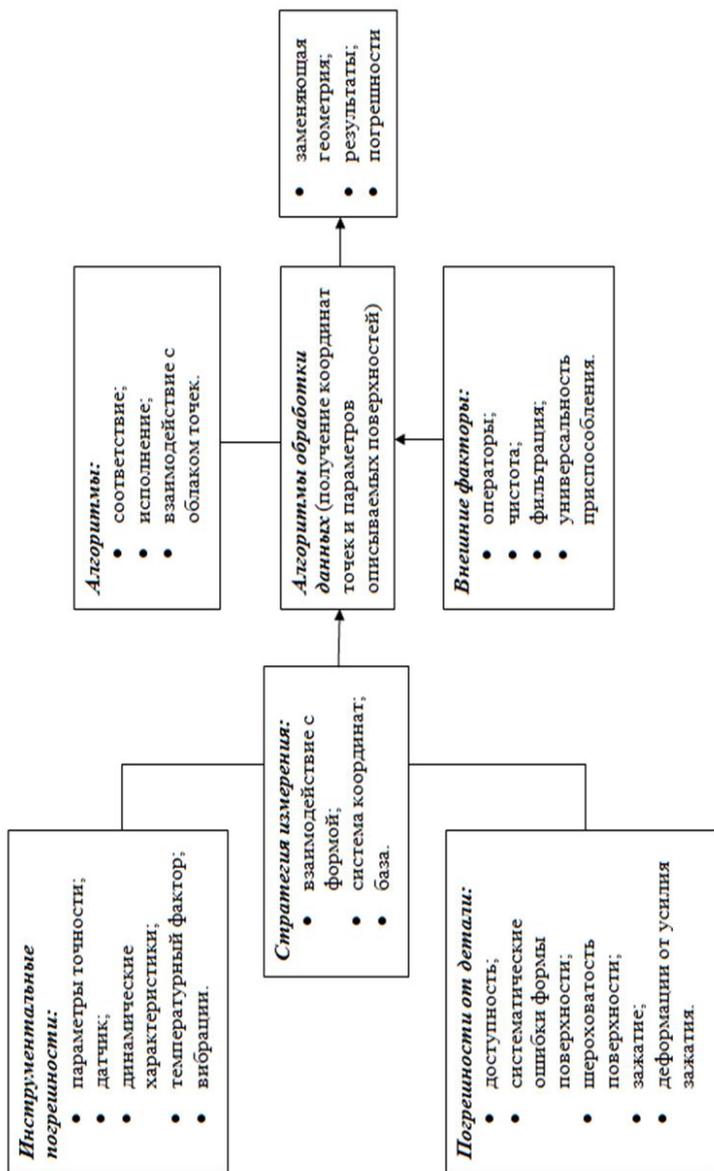


Рис. 56. Факторы, влияющие на погрешность измерения геометрических параметров КИМ

При оценке точности измерений необходимо учесть, что любые координатные измерения реализуются на базе кинематических средств, имеющих направляющие для переноса измерительной головки из точки в точку. Если речь идет не о линейных, а о плоских или пространственных измерениях, то погрешности изготовления этих направляющих не могут быть скомпенсированы соблюдением первого принципа Аббе. Согласно этому принципу линия измерения (траектория движения центра наконечника) должна совпадать с осью шкалы (или другого носителя точности). При плоских и пространственных измерениях этот принцип можно соблюсти лишь для одной из координат. (Иногда, стремясь минимизировать отступление от него, средство измерения komponуют так, чтобы оси шкал пересекались в общей точке, и размещают шкалу в центре рабочего пространства). Именно эта органическая невозможность соблюдения принципа Аббе объясняет доминирующее влияние погрешностей изготовления направляющих на точность КИМ. Из сказанного следует, в частности, что погрешность многокоординатного измерительного прибора при нахождении координат точек, произвольным образом расположенных в его рабочем объеме, будет значительно больше погрешности, возникающей при измерении вдоль какой-либо координатной оси и часто указываемой в качестве точностной характеристики КИМ.

Следует оценить особенности координатных измерений применительно к использованию их для обеспечения взаимозаменяемости в традиционном смысле.

Функциональные качества машин тесно связаны с точностью выполнения их размеров, особенно размеров сопрягаемых поверхностей. Только выполнение размеров в строго определенных пределах допуска может обеспечить беспрепятственную сборку. Оно необходимо и для правильного функционирования машины. Основой современной взаимозаменяемости является определен-

ная трактовка понятия «предельные размеры», которая носит название принципа Тейлора и зафиксирована в ряде международных документов, а также в отечественных стандартах, например в [28].

В ГОСТ 25346-89 этот принцип истолковывается следующим образом: «Для отверстий диаметр наибольшего правильного воображаемого цилиндра, который может быть вписан в отверстие так, чтобы плотно контактировать с наиболее выступающими точками поверхности (размер сопрягаемой детали идеальной геометрической формы, прилегающей к отверстию без зазора), не должен быть меньше, чем проходной предел размера. Дополнительно наибольший диаметр в любом месте отверстия не должен превышать непроходного предела размера». Аналогична этому формулировка для валов.

Соблюдение этого условия может быть проверено методом непосредственного контроля с использованием двух предельных калибров, один из которых, проходной, является комплексным и представляет собой прототип сопрягаемой детали, а другой, непроходной, – элементный (например, при контроле отверстия – штихмасс). Такое сочетание калибров диктуется различием физической природы границ поля допуска. Контроль с помощью калибров является арбитражным. При использовании изготовителем других средств, например показывающих, на нем лежит ответственность за такое их применение, которое обеспечивает соблюдение допусков, соответствующих контролю калибрами. Это в полной мере относится и к координатным измерениям.

Даже контроль с помощью калибров в тейлоровском смысле нельзя считать полостью однозначным. Однозначна лишь проверка комплексным проходным калибром, реализующим прилегающую поверхность. Проверка же элементным непроходным калибром (для гладкого цилиндра это будет штихмасс или скоба) требу-

ет, строго говоря, бесконечного числа пробных сопряжений, чтобы убедиться, что калибр не проходит ни в одном месте. Поскольку это требование, понимаемое буквально, на практике нереализуемо, ограничиваются конечным, обычно небольшим числом пробным сопряжений, полагаясь на так называемый «постулат гладкости». Суть его заключается в предложении, что любая регулярная технология накладывает более или менее жесткие связи на взаимное расположение близких точек обрабатываемой поверхности. Поэтому проверка размера одного участка позволяет с некоторой вероятностью судить и о размерах соседних участков. Чем теснее эта корреляционная связь, тем с большим основанием можно судить о качестве всей поверхности детали по результатам контроля лишь в нескольких ее точках. Именно такой подход оправдывает многочисленные отступления от принципа Тейлора, допускаемые в реальных калибрах, а тем более при контроле показывающими средствами вместо проходного калибра.

Рассмотрим с этой точки зрения координатные измерения. Получаемые при них координаты изолированных точек не могут быть непосредственно сопоставлены с предельными образами, материализуемыми калибрами (например, цилиндром и отрезком). Так, при контроле непроходного размера цилиндра показывающими линейными средствами, например нутромером индикаторным, достаточно каждый отсчет, точнее – максимальный отсчет при покачивании в плоскости продольного сечения, сравнивать с предельным показанием. При этом настройка на диаметр достигается узлом центрирования – мостиком. При координатных измерениях необходимо с предельным непроходным размером сравнивать расстояния между парами точек, если следовать аналогии с нутромером. Однако такую пару точек при измерении следует располагать строго определенным образом относительно оси отверстия, в то время как она (ось) еще неизвестна, подлежит определению.

Не менее сложна задача контроля по проходному размеру. Если пытаться имитировать контроль с помощью калибров, то при буквальном истолковании требований стандарта следовало бы измерить координаты большой совокупности точек поверхности, численно вписать в нее прилегающий цилиндр, определить его диаметр и сравнить с предельным. Даже с учетом постулата гладкости решение такой задачи отнимает много времени.

Ввиду вышесказанного в большинстве программных продуктов для КИМ поверхности определяются при помощи метода наименьших квадратов (МНК) по достаточному множеству точек измерения на КИМ. Например, определив в пространстве координат КИМ положение (направление оси) и диаметр среднего цилиндра, можно найти соосные ему максимальный и минимальный цилиндры, охватывающие (ограничивающие) все размерное поле данной детали, и сравнить диаметры этих цилиндров с допустимыми.

Таким образом, хотя в принципе координатные измерения позволяют более или менее точно реализовать принцип Тейлора путем имитации контроля с помощью калибров, это вряд ли целесообразно для рядовых случаев. Более рационален иной путь, когда при контроле размеров и расположения постулируют отсутствие отклонений формы, а при ее контроле – отсутствие отклонений параметров шероховатости. Такое условие для разобранный примера означает, что при контроле отверстия достаточно измерить координаты трех точек, позволяющие определить его диаметр и положение центра. Это условие, которое можно было бы назвать постулатом приоритета (старшинства), позволяет каждую типовую поверхность или ее сечение представить минимально возможным числом точек (рис. 57).

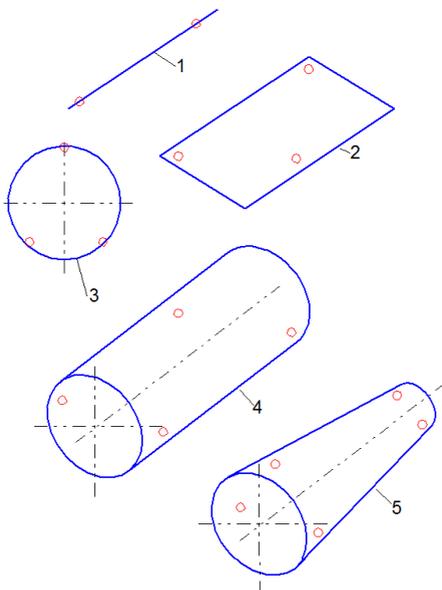


Рис. 57. Минимальный набор точек, определяющий вид поверхности:
1 – отрезок; 2 – плоскость; 3 – окружность; 4 – цилиндр; 5 – конус

Этот постулат соответствует основному положению теоретической метрологии, согласно которому измеряемый объект обладает лишь свойствами, а измеряемый параметр принадлежит модели объекта, и результат измерения представляет собой численное значение параметра модели объекта, полученное в результате физического эксперимента – измерения. В практике метрологии важнейшим является вопрос оценки корректности выбора модели. Использование постулата старшинства экономит время контроля за счет некоторого увеличения случайной составляющей погрешности, что требует оценки допустимости такого подхода в каждом конкретном случае. Так, при автоматизации станков команда на окончание цикла абразивной обработки при врезной подаче все чаще подается по сигналу прибора, непрерывно изменяющего размер детали. В этом случае чем эффективнее удастся снизить слу-

чайную составляющую отклонения размера, тем большую роль в общей неточности обработки играют остающиеся неизменными отклонения формы. В таких случаях необходимо увеличение полноты контроля, что при координатных измерениях эквивалентно увеличению числа точек измерения и, благодаря этому, введению усредняющих параметров.

3.7 Выполнение измерений на координатно-измерительных машинах

Последовательность выполнения работы будет рассмотрена на примере детали, приведенной на рис. 58.

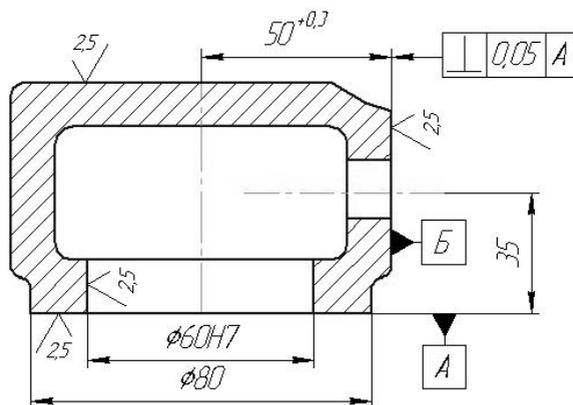
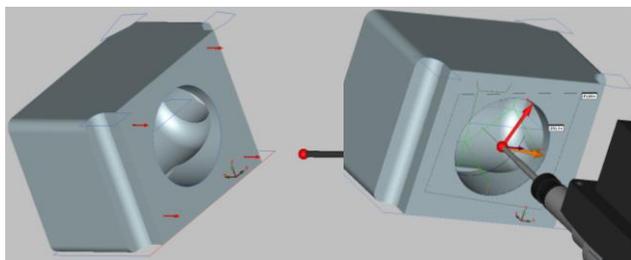


Рис. 58. Эскиз детали, подлежащей контролю

Измерения будем выполнять в следующем порядке.

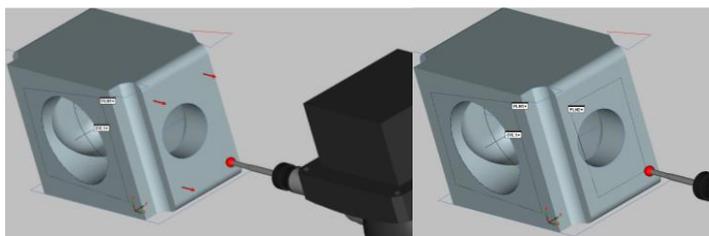
На первом этапе осуществляется последовательное измерение поверхностей деталей. На рис. 59 и 60 приведен фрагмент создания измеряемых геометрических элементов в процессе интерактивной разработки управляющей программы для измерений.



a

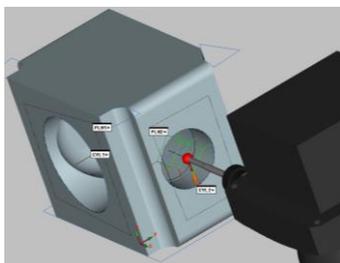
б

Рис. 59. Создание измеряемых геометрических элементов:
 а – измерение точек на базовой поверхности А;
 б – измерение точек цилиндрической поверхности $\varnothing 60H7$



a

б



в

Рис. 60. Создание измеряемых геометрических элементов:
 а – измерение точек на базовой поверхности Б; б – созданный в результате измерений геометрический элемент, плоскость на базовой поверхности Б;
 в – измерение точек цилиндрической поверхности

На следующем этапе выполняются указание базовых элементов, частичный вывод размерной информации в протокол. На рис. 61 приведено диалоговое окно задания базового элемента А.

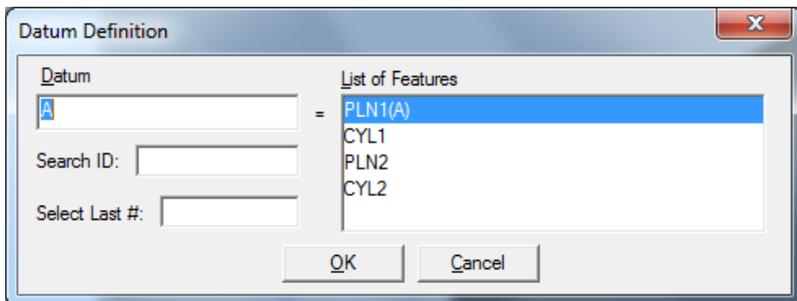
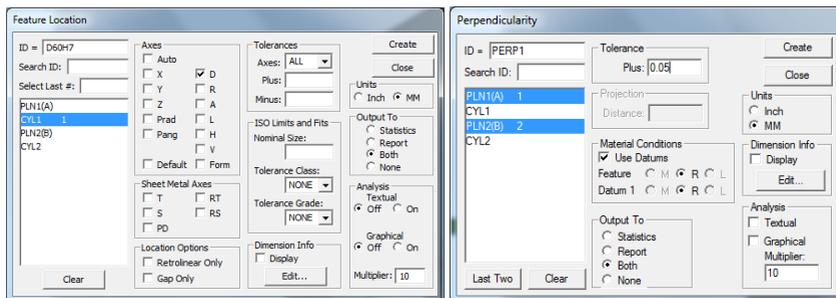


Рис. 61. Задание базового элемента А

На рис. 62 а и 62 б приведено создание команды вывода размерной информации в протокол.



a

б

Рис. 62. Создание команд вывода размерной информации в протокол:
а – диаметра; б – отклонения от перпендикулярности

На следующем этапе выполняется создание локальных систем координат (рис. 63).

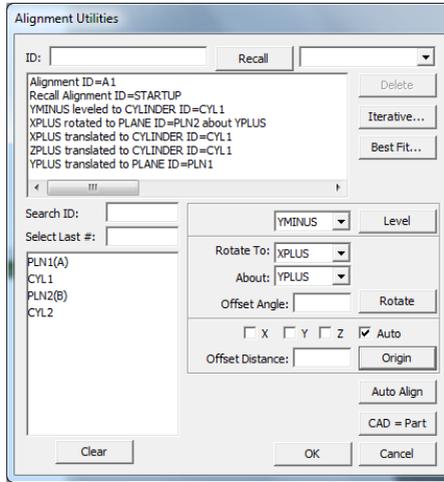


Рис. 63. Диалог создания вспомогательной системы координат

На рис. 64 можно увидеть результат создания новой системы координат.

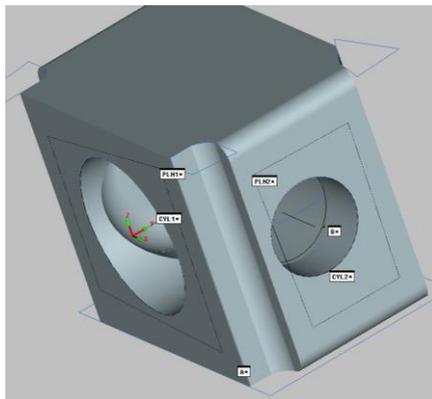


Рис. 64. Результат создания вспомогательной системы координат

Окончательно осуществляются создание команд, вывод размерной информации в протокол (рис. 65).

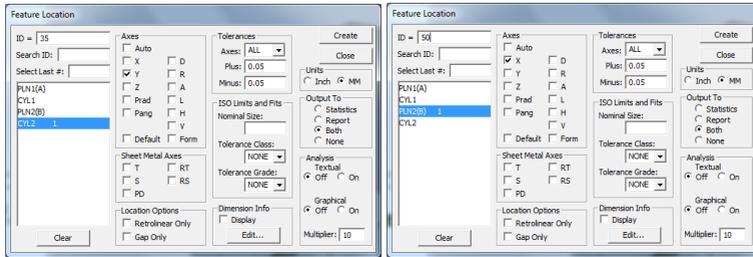


Рис. 65. Создание команд вывода измеряемой информации в протокол

Увеличенно вид разработанной программы приведен на рис. 66.

```

Edit Window - 01.PRG
+ File Header
+ STARTUP = Start Alignment
+ Manual/DCC Mode
+ Dimension Format
+ Load Probe - 40_D5
+ T1A90B180 = Set Active Tip
+ PLN1 = Measured Plane
+ T1A90B180 = Set Active Tip
+ CYL1 = CYLINDER (CONTACT)
+ T1A90B90 = Set Active Tip
+ PLN2 = Measured Plane
+ CYL2 = CYLINDER (CONTACT)
+ A = Datum Definition A : PLN1
+ B = Datum Definition B : PLN2
+ D60H7 = Dimension Location : CYL1
+ PERP1 = Dimension Perpendicularity : PLN1
+ A1 = Start Alignment
+ 35 = Dimension Location : CYL2
+ 50 = Dimension Location : PLN2
  
```

Рис. 66. Разработанная управляющая программа

3.8 Последовательность выполнения практических заданий

3.8.1 Проведение конструкторско-метрологического анализа рабочего чертежа детали

Анализируют технические требования исходя из чертежа детали и ее служебного назначения. Оценивают обоснованность предъявляемых требований, рассматривают ситуации частичного

их выполнения, выбирают способы обеспечения качества в процессе изготовления детали и методы контроля. Выявляют наиболее ответственные параметры, для которых характерны повышенные требования к шероховатости поверхности, точности размеров и формы и т.д.

При ознакомлении с чертежом сборочной единицы изучаются принцип ее работы и технические требования на сборку. Представляется информационная модель, характеризующая деталь с полнотой, достаточной для технологического анализа. Деталь рассматривается как геометрический объект, ограниченный отдельными поверхностями и их сочетанием. Подготовка чертежа детали состоит из двух этапов: определения положения базовой системы координат детали и нумерации элементов детали. Элементы детали нумеруются арабскими цифрами.

Классифицируются поверхности детали по назначению. Различают следующие основные виды поверхности изделий: рабочие исполнительные (рабочие), базовые, вспомогательные и свободные. Рабочие поверхности обладают самыми высокими качественными показателями поверхностного слоя (часто термообработанного). Эти поверхности принимают непосредственное участие в работе изделия. Базовые поверхности определяют положение изделия относительно других изделий в механизме. Высокие требования предъявляются к качеству базовых поверхностей и точности их расположения относительно рабочих поверхностей. С помощью вспомогательных поверхностей определяется положение других изделий, присоединяемых к рассматриваемому изделию. Требования к качеству их изготовления ниже, чем к рабочим и базовым поверхностям. Свободные поверхности – все остальные поверхности, обычно не сопрягаемые с поверхностями других деталей в процессе работы. Они создают конструктивную форму, обеспечивают жесткость, не требуют высокой точности и могут оставаться в состоянии поставки исходной заготовки.

Метрологический анализ чертежа детали включает проверку: взаимной увязки допусков, установленных на размеры, отклонения формы, расположения поверхностей и шероховатость поверхности; достаточности установленных норм точности, т. е. наличия норм точности для всех элементов, определяющих выходные параметры изделия; контролепригодности норм точности.

Рассмотрим последовательность выполнения экспертизы чертежа гидропрессовой втулки (рис. 67). На чертеже приведено: восемь ограниченных допусками линейных размеров; ограниченный допуском угловой размер; два допуска формы, записанные текстом; четыре допуска на взаимное расположение поверхностей; четыре требования к шероховатости поверхности (кроме общего указания).

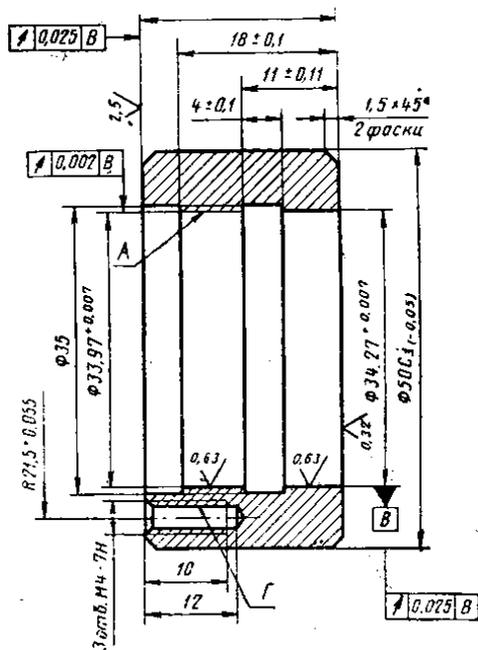


Рис. 67. Эскиз гидропрессовой втулки

Проверяем правильность терминологии при задании отклонений формы. Отмечаем, что допуски установлены только для частных случаев возможных отклонений — овальности и конусообразности — и при этом не учтена возможность появления других видов некруглости и отклонений профиля продольного сечения. На это обстоятельство следует обратить внимание конструктора и убедиться, чтобы в примененные термины вкладывались значения, соответствующие их определениям по стандарту. Совместно с конструктором следует рассмотреть целесообразность установления допусков на некруглость и отклонение профиля продольного сечения. При установлении допуска на некруглость следует учитывать, что величина овальности может в два раза превышать величину некруглости.

Проверяем приемлемость соотношения допусков на шероховатость поверхности и допусков размера и формы:

1) **Наружный диаметр 50С₃**. На чертеже для этой поверхности указана шероховатость $R_z = 80$ мкм. Шероховатость должна быть $R_a = 2,5$ мкм по ГОСТ 2789-73.

2) **Левый торец**. На чертеже указана шероховатость $R_a = 2,5$ мкм. Учитывая наличие допуска на биение торца, равного 25 мкм, для определения требований к шероховатости используем $R_z \leq 0,4\delta_B = 0,4 * 25 = 10$ мкм.

Учитывая соотношение $R_z \approx (4-5)R_a$, назначенное требование к шероховатости можно считать достаточным.

3) **Правый торец**. Проведя аналогичный расчет, убеждаемся, что требование к шероховатости $R_a = 0,32$ мкм – достаточно.

4) **Поверхности диаметром $33,97^{+0,007}$ и $34,27^{+0,007}$** . Для этих поверхностей указана шероховатость $R_a = 0,63$ мкм.

Должно быть выдержано соотношение $R_z \leq 0,6\delta_F = 0,6 * 7 = 4,2$ мкм.

Учитывая наличие допуска формы $R_z \leq 0,6\delta_F = 0,6 * 2 = 1,2$ мкм или $R_a \leq 0,24$ мкм, выбираем второе требование как бо-

лее жесткое и считаем необходимым, в соответствии с ГОСТ 2789-73, установление $R_a = 0,2$ мкм.

При корректировке допуска на некруглость должно быть соответственно скорректировано требование к шероховатости поверхности. Таким образом, из четырех требований к шероховатости два нуждаются в корректировке и, кроме того, должно быть установлено еще одно требование к шероховатости.

Проверяется контролепригодность допусков размеров и на взаимное расположение поверхностей.

В ходе анализа формируется вывод о том, что метрологическая база B имеет малую длину и недостаточную геометрическую точность.

3.8.2 Разработка схемы выполнения измерений геометрических параметров на координатно-измерительных машинах

На данном этапе производится разработка схемы измерений геометрических параметров деталей для координатно-измерительных машин. Возможно два варианта. Первый вариант включает в себя описание, приведенное в четвертом и пятом столбцах табл. 2 (с. 18). При этом приводится описание схемы закрепления детали, а также используемого приспособления. Во втором варианте возможна разработка управляющей программы.

3.8.3 Проведение сравнительного анализа погрешностей

На данном этапе выполняется расчет допустимых погрешностей измерений. По окончании выполнения работ формируется отчет, содержащий результаты выполнения разделов. Отчет дол-

жен завершаться формированием выводов. Выводы должны содержать следующую информацию: преимущества и недостатки выполнения измерений на традиционных и современных средствах измерений, результаты сравнительного анализа точности измерений, рекомендации по внедрению рассмотренных методов в производственный процесс предприятия.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Классификация методов измерений.
2. Погрешность и точность измерений.
3. Место и роль координатно-измерительных машин в современном производственном процессе.
4. Типовые схемы координатно-измерительных машин.
5. Принцип измерения линейно-угловых геометрических параметров на КИМ.
6. Базирование деталей в координатных измерениях.
7. Последовательность написания измерительных программ на КИМ.
8. Измерительные наконечники. Виды и основные компоненты.
9. Погрешности измерения наконечников касания.
10. Основные погрешности процесса контактного измерения поверхностей сложной формы на контактных КИМ.
11. Преимущества и недостатки контактных методов измерения.
12. Требования для выбора методов и средств измерения деталей со сложными поверхностями.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В пособии рассматриваются вопросы повышения точности при изготовлении деталей ГТД на основе анализа поведения инновационной технологической системы. Теоретически рассматриваются первичные погрешности, влияющие на точность геометрических параметров деталей. Выявленные наиболее значимые погрешности изучаются на основе экспериментальных исследований, которые реализуются при выполнении лабораторных работ.

Также приводится описание перспективных энергосберегающих технологий при производстве деталей и узлов двигателей летательных аппаратов и энергосберегающих установок, а именно технологий 3D-печати и современных комплексов контроля геометрических параметров деталей.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Балакшин, Б. С. Основы технологии машиностроения / Б. С. Балакшин. – Москва: Машиностроение, 1969. – 358 с.
2. Вентцель, Е. С. Теория вероятностей / Е. С. Вентцель. – Москва: Государственное издательство физико-математической литературы, 1962.
3. Гжиров, Г. И. Программирование обработки на станках с ЧПУ: справочник / Г. И. Гжиров, П. П. Серебницкий. – Ленинград: Машиностроение, 1990. – 590 с.
4. Древаль, А. Е. Краткий справочник металлиста / А. Е. Древаль, Е. А. Скороходов, А. В. Агеев; под редакцией А. Е. Древаля, Е. А. Скороходова. – 4-е изд., перераб. и доп. – Москва: Машиностроение, 2005. – 960 с.
5. Единая система допусков и посадок СЭВ в машиностроении и приспособлении: справочник: в 2 томах – 2-е изд., перераб. и доп. – Москва: Издательство стандартов, 1989.
6. Иващенко, И. А. Проектирование технологических процессов производства ДЛА / И. А. Иващенко. – Москва: Машиностроение, 1981. – 224 с.
7. Корсаков, В. С. Основы технологии машиностроения / В. С. Корсаков. – Москва: Высшая школа, 1974.
8. Малов, А. Н. Справочник технолога-машиностроителя / А. Н. Малов. – Москва: Машиностроение, 1972. – 586 с.
9. Марочник сталей и сплавов / В.Г. Сорокин, А.В. Волосникова, С.А. Вяткин [и др.]; под общей редакцией В. Г. Сорокина. – Москва: Машиностроение, 1989. – 640 с.

10. Маталин, А. А. Технология машиностроения: учебник для машиностроительных вузов по специальности – «Технология машиностроения, металлорежущие станки и инструменты» / А. А. Маталин. – Санкт-Петербург: Машиностроение, 1985. – 496 с.: ил.

11. Общемашиностроительные нормативы режимов резания: 0–28: справочник: в 2 томах / А. Д. Локтев, И. Ф. Гуцин, Б. И. Балашев [и др.] – Москва: Машиностроение, 1991. – 304 с.: ил.

12. Справочник инструментальщика / И. А. Ординарцев, Г. В. Филипов, А. Н. Шевченко [и др.]; под общей редакцией И. А. Ординарцева. – Ленинград: Машиностроение. Ленинградское отделение, 1987. – 846 с.: ил.

13. Справочник технолога-машиностроителя: в 2 томах. Т. 2 / под редакцией А. Г. Косиловой и Р. К. Мещерякова – 4-е изд., перераб. и доп. – Москва: Машиностроение, 1985. – 496 с.: ил.

14. Справочник технолога-машиностроителя: в 2 томах. Т.1 / под редакцией А. Г. Косиловой и Р. К. Мещерякова – 4-е изд., перераб. и доп. – Москва: Машиностроение, 1985. – 656 с.: ил.

15. Технология машиностроения: учебник для вузов: в 2 т. Т. 1. Основы технологии машиностроения / Бурцев В. М., Васильев А. С., Дальский А. М. [и др.]; редактор Дальский А. М. – Москва: Издательство МГТУ им. Н. Э. Баумана, 1999. – 562 с.

16. Технология технического контроля в машиностроении: справочное пособие / под общей редакцией В. Н. Чупырина. – Москва: Издательство стандартов, 1990. – 400 с.

17. Фираго, В. П. Основы проектирования технологических процессов и приспособлений. Методы обработки поверхностей / В. П. Фираго. – Москва, Машиностроение, 1973.

18. Координатные измерительные машины и их применение: учебник / А. А. Гапшис, А. Ю. Каспарайтис, М. Б. Модестов [и др.]. – Москва: Машиностроение, 1988. – 328 с.

19. Осипович, Д. А. Выбор метода оцифровки для контроля геометрии крупногабаритных сложнопрофильных деталей и узлов авиационных двигателей / Д. А. Осипович, С. Г. Ярушин // Молодой ученый. – 2014. – № 1 (60). – С. 103–109.

20. ГОСТ 10360-2:2009 Геометрические спецификации изделий (GPS). Приемочные и повторные проверочные испытания координатно-измерительных машин (СММ). Часть 2: СММ, используемые для линейных измерений = Geometrical product specifications (GPS) – Acceptance and reverification tests for coordinate measuring machines (CMM) – Part 2: CMMs used for measuring linear dimensions. – Москва: Издательство стандартов, 2010. – 36 с.

21. Schwenke, H. Optical Methods for Dimensional Metrology in Production Engineering Keynote paper / H. Schwenke, U. Neuschaefer-Rube, T. Pfeifer, H. Kunzmann // Annals of the CIRP. – 2002. – V. 51, № 2. – P. 685–699.

22. Denkena, B. Three-dimensional optical Measurement with locally Adapted Projection / B. Denkena, W. Acker // Advanced Material Research. – 2007. – V. 22. – P. 83–90.

23. Knauer, M. C. Phase Measuring Deflectometry: a new approach to measure specular free-form surfaces / M. C. Knauer, J. Kaminski, G. Häusler // Proc. SPIE. – 2004. – V. 5457. – P. 366–376.

24. Weckenmann, A. Probing Systems in Dimensional Metrology, Keynote paper / A. Weckenmann, T. Estler, G. Peggs, D. McMurtry // Annals of the CIRP. – 2004. – V. 53, № 2. – P. 657–684.

25. Руководство по фотограмметрии COMETplus 9.6 / Компания «Steinbichler Optotechnik GmbH».

26. Wilhelm, R. G. Task Specific Uncertainty in Coordinate Measurement / R. G. Wilhelm, R. Hocken, H. Schwenke. – Elsevier, 2003. – P. 4–5.

27. Ратмиров, В. А. Управление станками гибких производственных систем / В. А. Ратмиров. – Москва: Машиностроение, 1987. – 272 с.

28. ГОСТ 25346-89. Единая система допусков и посадок общие положения, Ряды допусков и основных отклонений: межгосударственный стандарт: дата введения 1990-01-01 / Государственный комитет СССР по стандартам. – Москва: Издательство стандартов, 1990. – 27 с.

Учебное издание

Болотов Михаил Александрович
Вдовин Роман Александрович

**ПЕРСПЕКТИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ
ИЗГОТОВЛЕНИЯ ДЕТАЛЕЙ ДВИГАТЕЛЕЙ
И ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК**

Учебное пособие

Редактор *А.С. Никитина*
Компьютерная верстка *А.С. Никитиной*

Подписано в печать 02.12.2020. Формат 60x84 1/16.

Бумага офсетная. Печ. л. 7,0.

Тираж 120 экз. (1-й з-д 1–25). Заказ . Арт. – 15(РЗУ)/2020.

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«САМАРСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ АКАДЕМИКА С.П. КОРОЛЕВА»
(САМАРСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)
443086, САМАРА, МОСКОВСКОЕ ШОССЕ, 34.

Издательство Самарского университета.
443086, Самара, Московское шоссе, 34.

