Гусев Денис Витальевич

ПОВЫШЕНИЕ ПОКАЗАТЕЛЕЙ КАЧЕСТВА ИЗГОТАВЛИВАЕМЫХ ИЗДЕЛИЙ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ТЕХНОЛОГИИ БЫСТРОГО ПРОТОТИПИРОВАНИЯ

05.02.08 – Технология машиностроения

Диссертация на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Научный руководитель:

доктор технических наук, профессор,

Куликов М. Ю.

Москва 2018

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ 4
ГЛАВА 1. ПРИМЕНЕНИЕ СОВРЕМЕННОЙ ТЕХНОЛОГИИ ПРОТОТИПИРОВАНИЯ В ПРОИЗВОДСТВЕ ИЗДЕЛИЙ. ЦЕЛЬ И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ 9
1.1. Общие сведения о формообразовании изделий при применении технологии быстрого прототипирования 9
1.2. Методы формообразования, используемые RP-технологией 14
1.3. Достоинства и недостатки формообразования изделий по методу лазерной стереолитографии – SLA. 18
1.3.1. Принцип работы 3D-принтера по методу стереолитографии 20
1.4. Достоинства и недостатки формообразования изделий по методу послойного наплавления – FDM 22
1.4.1. Принцип работы 3D-принтера по методу FDM……...23
1.5. Достоинства и недостатки формообразования изделий по методу светоотверждения фотополимера – 3SP……..25
1.5.1. Принцип работы 3D-принтера, работающего по методу 3SP……26
1.6. Примеры изделий изготовленных по трем наиболее востребованным методам технологии быстрого прототипирования……29
1.7. Цель и задачи исследования……..36
ГЛАВА 2. МЕТОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ ФОРМИРОВАНИЯ ТОЧНОСТИ И ШЕРОХОВАТОСТИ ПОВЕРХНОСТЕЙ ИЗДЕЛИЙ МЕТОДОМ 3SP-ТЕХНОЛОГИИ ПРОТОТИПИРОВАНИЯ……38
2.1. Критерии оценки эффективности использования метода 3SP для производства изделий 38
2.2. Оценка отклонения формы и взаимного расположения поверхностей образцов, изготовленных методом 3SP 39
2.2.1. Отклонение от точности формы и взаимного расположения поверхностей 39

2.2.2. Экспериментальные исследования отклонения от цилиндричности и круглости 54
2.3. Оценка шероховатости поверхности исследуемых образцов, изготовленных методом 3SP RP-технологии. Результаты измерений 60
2.4. Исследование шаговых параметров шероховатости поверхности образцов, изготовленных методом 3SP RP-технологии 63
2.5. Выводы 73
ГЛАВА 3. РАЗРАБОТКА РЕГРЕСИОННОЙ МОДЕЛИ ФОРМИРОВАНИЯ ШЕРОХОВАТОСТИ ИЗДЕЛИЙ, ИЗГОТОВЛЕННЫХ ПО МЕТОДУ БЫСТРОГО ПРОТОТИПИРОВАНИЯ 3SP 74
3.1. Планирование и обработка результатов многофакторного эксперимента 74
3.2. Разработка регрессионной модели формирования шероховатости поверхности изделия по методу быстрого прототипирования 3SP 75
3.3. Выводы 75
ГЛАВА 4. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕТОДА 3SP-ТЕХНОЛОГИИ БЫСТРОГО ПРОТОТИПИРОВАНИЯ ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ИЗДЕЛИЙ 84
4.1. Разработка программы ЭВМ для расчета ожидаемых параметров точности изделий, получаемых по технологии быстрого прототипирования 84
4.2. Практические рекомендации по обеспечению показателей качества изделия, выращиваемого по технологии быстрого прототипирования методом 3SP 96
4.3. Выводы 98
ЗАКЛЮЧЕНИЕ 99
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ 100
ПРИЛОЖЕНИЕ №1 108
ПРИЛОЖЕНИЕ № 2 110
ПРИЛОЖЕНИЕ № 3 115
ПРИЛОЖЕНИЕ № 4 116

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы. В последние годы все большее применение находят технологии быстрого прототипирования, называемые по-разному в зарубежной литературе — Rapid Prototyping (RP), Rapid Modeling (RM), Rapid Tooling (RT), Rapid Prototyping & Manufacturing (RPM) и т.п [51]. На сегодняшний день сформировалась целая индустрия технологий быстрого прототипирования, состоящая из большого количества методов изготовления.

Эти методы позволяют производить пластмассовые изделия практически любой сложности и конфигурации и нашли широкое применение в машиностроении, особенно в авиационной и ракетно-космической отраслях и атомном машиностроении.

В тоже время действующие технологии быстрого пртотипирования часто не отвечают постоянно повышающимся требованиям к качеству машиностроительных изделий. Это является следствием недостаточного научного обеспечения технологий прототипирования, отсутствия информации о методах управления качеством изделий. Не выявлены основные закономерности изменения технологических параметров процесса прототипирования и связи их с параметрами качества изделий.

В связи с этим, изучение указанных аспектов проблемы повышения эффективности технологий быстрого прототипирования является актуальной научно-технической задачей.

Степень разработанности. Основной задачей исследования являлось повышение эффективности методов RP-технологии, а также установление значимых технологических параметров процесса прототипирования, влияющих на точность форм и шероховатость поверхностей изготавливаемых изделий. На сегодняшний день, как в отечественной, так и в зарубежной литературе отсутствуют сведения о влиянии технологических параметров процесса прототипирования на показатели качества поверхности изделий, изготовленных по RP-технологии прототипирования.

Цель работы. Повышение показателей качества изделий, изготовленных по технологии быстрого прототипирования.

Задачи исследований:

– выбрать на основе априорных данных эффективный метод технологии быстрого прототипирования;

– установить значения технологических параметров процесса прототипирования, влияющих на показатели качества изделий, изготовленных по RP-технологии;

– разработать регрессионную модель зависимости параметра шероховатости Ra от технологических параметров процесса прототипирования изделия;

– разработать программу автоматизированного расчета ожидаемых параметров точности будущего изделия, получаемого по технологии быстрого прототипрования;

– разработать на основе данных экспериментальных исследований практические рекомендации по изготовлению изделий из пластмасс;

– провести промышленную апробацию разработанных рекомендаций.

Научная новизна работы:

- выявлено и экспериментально доказано влияние основных технологических параметров процесса быстрого прототипирования (угола выращивания α, толщины слоя z) на показатели качества изделий;

- выявлены закономерности влияния основных технологических параметров процесса быстрого прототипирования на показатели качества изделий (точность формы и взаимного расположения поверхностей и параметр шероховатости Ra);

- определены особенности формирования изделия, получаемого по технологи быстрого прототипирования, при изменении угла выращивания, толщины слоя и материала деталей;

- разработаны алгоритм и программа для ЭВМ прогнозирования параметров шероховатости поверхностей изделий, точности их форм и

взаимного расположения в зависимости от угла выращивания, толщины слоя и материала изделия с целью управления процессом быстрого прототипирования по методу 3SP (свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2018615757).

Практическая значимость работы:

– разработано программное обеспечение по «Расчету ожидаемых параметров точности изделий, получаемых по технологии прототипирования». Получено свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2018615757 (приложение № 3);

– разработан комплекс рекомендации по выбору технологических параметров процесса прототипирования, обеспечивающих заданную точность и шероховатость. Данные рекомендации позволяют получить шероховатость поверхности изделия $Ra < 1{,}25$ мкм;

– снижена шероховатость изготавливаемых изделий в 1,5–2 раза, что подтверждено производственными испытаниями на ОАО «НПО ИТ», г. Королев. Подтверждено получением акта производственных испытаний (приложение № 4).

Методы исследования. В основе работы лежат экспериментальные методы исследования. Исследования проведены с использованием современных средств неразрушающего контроля; методов зондовой микроскопии для определения шаговых размеров шероховатости поверхности, для определения точности и взаимного расположения поверхностей использовалась современная координатно-измерительная машина. Шероховатость поверхности изделий, изготовленных по технологии быстрого прототипирования, определялась на основе стандартных методов, с использованием профилометра. Обработка результатов экспериментальных исследований выполнена с использованием современного математического аппарата.

На защиту выносятся:

– обоснование целесообразности использования методов технологии быстрого прототипирования для изготовления изделий из пластмасс;

– выявленные основные технологические параметры процесса прототипирования, оказывающие влияние на точность форм и взаимного расположения поверхностей и параметра шероховатости Ra, при использовании технологии прототипирования;

– разработанная регрессионная модель зависимости параметра шероховатости Ra от технологических параметров процесса прототипирования;

– разработанная программа автоматизированного расчета ожидаемых точностных характеристик изделий;

– практические рекомендации по изготовлению изделий из пластмасс методами быстрого прототипирования.

Степень достоверности результатов исследования. Достоверность основных результатов диссертации подтверждается:

– установленными основными технологическими параметрами процесса прототипирования, а также их значениями, варьируя которыми достигается необходимая точность и шероховатость изделий из пластмасс, изготовленных по RP-технологии;

– регрессионной моделью зависимости параметра Ra от технологических параметров процесса прототипирования;

– разработанной программой автоматизированного расчета ожидаемых параметров точностных характеристик изделий;

– разработанными практическими рекомендациями по обеспечению параметров качества, изготавливаемых изделии из пластмасс по технологии быстрого прототипирования.

Апробация работы. Основные положения диссертационной работы докладывались на Всероссийской конференции «Информационные технологии, менеджмент качества, информационная безопасность»,

проходившей в 2015 году (Нальчик, КБГУ), на Международной научно-технической конференции «Состояние и перспективы развития электро- и теплотехнологии»; «XVIII Бенардосовские чтения» (Иваново, ИГЭУ, 2015 г.), на научно-технических семинарах, проводимых кафедрой «Технология транспортного машиностроения и ремонта подвижного состава» Российского университета транспорта (МИИТ)» (РУТ (МИИТ) (2013–2018 гг.).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 11 работ, в том числе 7 статей в изданиях, входящих в перечень ВАК, 2 статьи, входящих в систему цитирования SCOPUS, 2 статьи в других изданиях, 1 свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ.

Объем и структура работы: Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, библиографического списка, включающего 71 наименование и приложений (9 страниц), включает 116 страниц машинописного текста, 66 рисунков и 8 таблиц.

ГЛАВА 1. ПРИМЕНЕНИЕ СОВРЕМЕННОЙ ТЕХНОЛОГИИ ПРОТОТИПИРОВАНИЯ В ПРОИЗВОДСТВЕ ИЗДЕЛИЙ. ЦЕЛЬ И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ

1.1. Общие сведения о формообразовании изделий при применении технологии быстрого прототипирования

В конце XX века стремительное развитие цифровой техники, появление суперкомпьютеров, которые характеризуются высокой производительностью, программ трехмерного моделирования сложных геометрических поверхностей, мощных источников энергии, а также надежных систем управления стимулировали взрывной характер развития технологии послойного синтеза или, как ее иначе называют, технология быстрого прототипирования.

Технология быстрого прототипирования (Rapid Prototyping – RP) – это процесс послойного синтеза (выращивания) физического изделия на основе трехмерной компьютерной модели [35, 36, 37, 38]. Термин «быстрое прототипирование» стал названием этой технологии, поскольку изначально технология создавалась для улучшения или замены той или иной модели изделия или прототипа [12].

Технологию быстрого прототипирования стали активно применять производители наукоемкой продукции [57], реализующие инновационные проекты, для которых получение изделия с удовлетворяющими определенные потребности характеристиками в короткий срок является приоритетом в нынешней экономической ситуации.

Такая технология является весьма актуальной как на этапе конструирования, так и в производственном цикле [39, 40, 41] благодаря тому, что дает возможность оценить достоинства и недостатки готового изделия, протестировать, а самое главное – внести изменения в конструкцию детали, которые не видны на чертежах до запуска в серийное производство.

Технология быстрого прототипирования обладает рядом существенных преимуществ:

– сокращение времени изготовления деталей за счет сокращения числа технологических переходов в операции;

– снижение расхода материалов и потребления энергии при изготовлении;

– высокие технологические параметры процесса изготовления деталей, возможность которых трудна либо недостижима при механической обработке (например, получение особо тонких каналов $d < 1$ мм внутри корпуса; изготовление изделий, имеющих сквозные, глухие, криволинейные каналы);

– получение окончательного изделия, не требующего последующей механической обработки;

– применение особо легких термостойких фотополимерных материалов, снижающих вес изделия;

– минимизация уровня риска получения брака за счет снижения влияния человеческого фактора на производственный процесс, а также за счет отсутствия смены технологических баз;

– экономия производственных площадей за счет малых габаритов 3D-установки;

– относительно экологически чистое и безопасное изготовление изделий;

– безотходное изготовление изделий в отличие от традиционных методов изготовления (в зависимости от вида и типа производства в стружку может уходить до 70 % и более материала обрабатываемой заготовки) [63].

Технология, открывающая такие уникальные возможности, стала востребованной и взята на вооружение многими промышленными отраслями.

Использование RP-технологии можно представить в виде диаграммы (рис 1.1) [50].

Рис. 1.1. Диаграмма распределения использования RP-технологии

Одним из важнейших рынков реализации технологии быстрого прототипирования является машиностроительный комплекс, из которого главным образом выделяются авиационная и ракетно-космическая отрасли, где вес изделия играет огромную роль [1].

Для изготовления изделий из пластмасс в качестве модельного материала могут использоваться различные сверхлегкие пластики и фотополимеры (в зависимости от метода изготовления), жидкие акриловые смолы (термопласты, фотополимеры), из пластмассы (ABS– пластик, PLA–пластик и др.), порошковые металлические и неметаллические материалы (порошки на основе титана, никеля, железа), различные листовые материалов (бумага, картон и др.).

Важнейшим условием получения изделия при формообразовании по технологии прототипирования является правильный подбор и расположение поддерживающих конструкций. На сегодняшний день со всеми современными установками прототипирования поставляется пакет программного обеспечения, в который входит проектирование поддерживающих

конструкций, что может быть сделано двумя способами – как в автоматическом режиме, так и оператором.

В зависимости от пространственной ориентации будущего изделия моделируются типы и количество поддерживающих конструкций [8]. Они довольно прочные, соединены с изделием и удерживают его на платформе. Эти конструкции не дают изделию, имеющему выступающие части и наклонные поверхности, угол которых свыше 25° к рабочей платформе, опадать. После окончания работы поддерживающие конструкции легко удаляются механическим путем либо растворяются специальным химическим раствором. Построение поддерживающих конструкций и слияние их с моделью способствуют улучшению качества [8, 27].

Весь жизненный цикл формообразования изделия по технологии быстрого прототипирования, от этапа проектирования до полного изготовления и последующей его утилизации можно представить в виде структурной схемы (рис. 1.2).

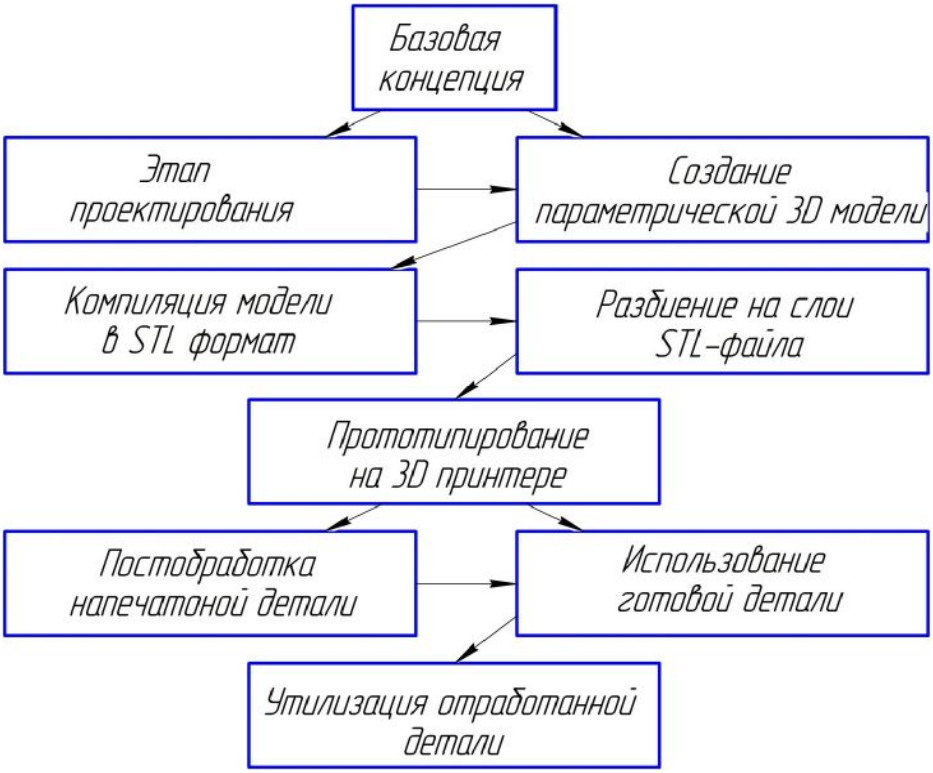


Рис. 1.2. Полный жизненный цикл изделия

Жизненный цикл изделия начинается с базовой концепции, то есть с мысли о будущем готовом изделии, для оценки геометрических форм, внешних обводов, функциональных возможностях, дизайна и просто эстетического вида [38, 39, 41].

Следующий этап – этап проектирования, на котором концепция превращается в рабочую конструкторскую документацию, иногда этот этап можно пропустить при безбумажном электронном документообороте.

Далее это создание твердотельной параметрической компьютерной 3D-модели с размерами, соответствующими рабочей конструкторской документации в системе автоматического проектирования (САПР) [43].

Компиляция твердотельной параметрической модели в формат STL. Компания 3DSystems в 1988 году представила так называемый формат данных STL. Современные установки трехмерной печати все без исключения используют формат STL. Этот формат данных служит для установления рабочих связей между созданной в системе автоматического проектирования 3D-модели и установками 3D-печати. Сейчас почти каждая САПР имеет функцию подготовки к печати на 3D-принтере [38, 39, 41, 43].

Перекомпилированный STL-файл по средством пакета предоставляемых вместе с 3D-принтером программ разбивается на сечения или слои.

Разбитая на сечения или слои модель передается на 3D-принтере по средствам Flash-накопителя либо через прямое подключение компьютера, после чего начинается этап выращивания модели в 3D-принтере.

После этапа прототипирования у готового изделия есть два пути: либо используется в том виде, в котором получилось, либо отправляется на постобработку (УФ-печь, удаление поддерживающих конструкций, шлифование, нарезание резьбы и пр.).

Последний этап – это утилизация изделия, которое прошло все испытания либо пришло внегодность, или отработало эксплуатационное время.

Эффективность использования технологии послойного выращивания изделий из пластмасс напрямую зависит от рационального выбора метода

изготовления. Причем этот выбор должен выполняться на этапе принятия решения об использовании того или иного метода [35, 60], который определяется тем, какие требования предъявляются к качеству готового изделия. Также надо учитывать и эксплуатационные свойства поверхности изделия. Речь идет о формировании таких свойств поверхности, которые невозможно получить другими методами прототипирования. В качестве примеров можно привести следующие:

– износостойкость деталей машин, режущих, деформирующих и мерительных инструментов, технологической оснастки;

– коррозионная стойкость деталей оборудования пищевой, химической, нефтегазовой промышленности, медицинской техники, имплантатов, зубных протезов, хирургических инструментов;

– триботехнические свойства, связанные с повышением работоспособности деталей узлов трения, инструмента, технологической оснастки;

– декоративные свойства обусловливаются различными цветами пленок на стеклянной, керамической, фарфоровой и хрустальной посуде, столовых приборах, корпусах часов, браслетов, бижутерии, фурнитуры и т. д. [19, 57].

В целом изготовление изделий по технологии быстрого прототипирования сводится главным образом к целесообразному выбору метода, удовлетворяющего те или иные поставленные задачи.

1.2. Методы формообразования, используемые RP-технологией

На сегодняшний день сформировалась целая индустрия, связанная с технологией прототипирования: десятки различных методов аддитивных технологий, а также оборудования и материалов для послойного выращивания изделий.

Разные методы технологии быстрого прототипирования характеризуются примерно одинаковыми режимами печати, например, скоростным или

температурным режимами. Так, если поставить высокую скорость печати, изделие изготовится быстрее, но показатели качества его будут хуже.

Показатели качества продукции в соответствии с ГОСТом представляют собой количественную характеристику одного или нескольких свойств продукции, входящих в состав ее качества.

Под качеством поверхности понимают совокупность следующих характеристик: шероховатость (микрогеометрия); волнистость; структурное состояние (микротрещины, надрывы, измельченная структура); упрочнение поверхностного слоя (глубина и степень); остаточные напряжения (глубина их проникновения, величина и знак) [22]. К основным показателям относятся точность (размеров, формы и взаимного расположения поверхностей) и шероховатость поверхности.

Вопросом формирования точности изделий при механической обработке посвящены работы многих российских ученых: Б.С. Балакшина, А.М. Дальского, В.Н. Кована, В.С. Корсакова, А.П. Соколовского и многих других [4, 22, 32, 34, 52].

В работах учёных-технологов А.И. Исаева, А.Г. Суслова, Н.П. Петрова [31, 53, 54, 55] создана целая теория формообразования поверхностного слоя по традиционной технологии механической обработки. Авторы в своих работах предлагают расчетные, аналитические и эмпирические методы научных исследований повышения показателей качества изделий при их формообразовании.

Технология прототипирования, как и традиционная технология механической обработки не стоит на месте и стремится к совершенствованию. Можно выделить основные пути совершенствования показателей качества изделий изготовленных по технологии быстрого прототипирования:

– совершенствование установок RP-технологии, основных механизмов исполнения;

– совершенствование программ управления установками технологии быстро прототипирования, а также программ автоматического проектирования 3D-моделей;

– совершенствование технологических параметров процесса прототипирования, влияющих на показатели качества изделий, поиск эффективных значений;

– совершенствование модельных материалов, использующихся при технологии быстрого прототипировани;

– совершенствование профессиональных навыков обслуживающего персонала установок.

В зависимости от того, в каком агрегатном состоянии находится используемый материал, можно ввести классификацию основных технологий быстрого прототипирования, изображенную на рис. 1.3 [19, 57].

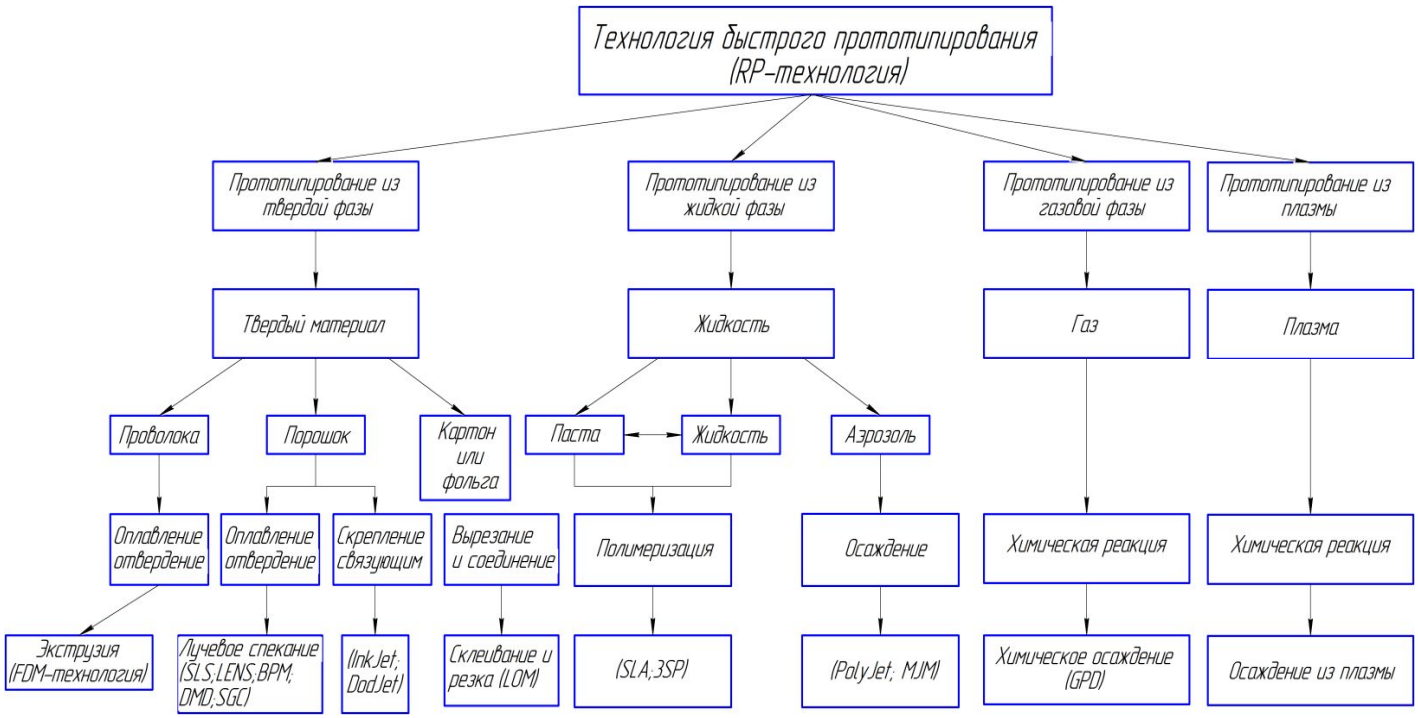


Рис. 1.3. Структурная схема классификации методов технологии быстрого прототипирования

Прототипирование из твердой фазы – это технологии на основе спекания, оплавления либо склеивания порошков и листовых материалов, а также метод экструзии [35,40]. К этой группе относятся следующие методы:

SLS (Selective Laser Sintering) – селективное лазерное спекание [5, 19, 27, 28, 57, 62];

InkJet – напыление головкой капель связующего, отверждающего порошка [5, 19, 27, 28, 57, 62];

LOM (Laminated Object Manufacturing) – склеивание листовых материалов [5, 19, 27, 28, 57, 62];

FDM (Fused Deposition Modeling) – метод послойного наплавления нитевидного материала [5, 19, 27, 28, 57, 62];

DodJet – напыление головкой нагретого полимера [5, 19, 27, 28, 57, 62];

SGC (Solid Ground Curing) – отверждение плотного основания [5, 19, 27, 28, 57, 62];

BPM (Ballistic Particle Manufacturing) – распыление термопластов [5, 19, 27, 28, 57, 62];

DMD (Direct Metal Deposition) – прямое нанесение металла [5, 19, 27, 28, 57, 62];

LENS (Laser Engineering Net Shaping) – формирование с помощью лазерной инженерной сети [5, 19, 27, 28, 57, 62].

Прототипирование из жидкой фазы – это технологии на основе засветки жидких акриловых смол. К такой группе относятся следующие методы:

SLA (Stereo Lithography Apparatus) – стереолитография, засветка УФ-лазером [5, 19, 27, 28, 57, 62];

3SP (Three Scan, Spin and Selectively Photocure) –засветка лазерным ножом по растровым маскам [5, 19, 27, 28, 57, 62];

PolyJet – напыление головкой капель смолы и засветка УФ-лампами [5, 19, 27, 28, 57, 62];

MJM (Multi Jet Modeling) – многоструйное воспроизведение смолы [5, 19, 27, 28, 57, 62].

Прототипирование из газовой фазы, например, аэрозольные методы осаждения материалов:

GPD (Gas Phase Deposition) – осаждение из газовой фазы [5, 19, 27, 28, 57, 62].

К наиболее применяемым и перспективным в машиностроительной отрасли методам технологии быстрого прототипирования из перечисленных можно отнести следующие: лазерная стереолитография (SLA), FDM-метод и метод отверждения фотополимера – 3SP. Основными различиями между методами быстрого прототипирования является способ нанесения модельного материала, который имеет свои особенные физические и эксплуатационные свойства, а также методы его затвердевание.

1.3. Достоинства и недостатки формообразования изделий по методу лазерной стереолитографии – SLA.

В 1987 году появился первый RP-метод, названный стереолитографией – SLA (Stereo Litography Apparatus) [5, 19, 27, 28, 36, 37, 41, 57]. В основе процесса стереолитографии лежит принцип послойного наращивания изделия путем полимеризации жидкого фотополимера под воздействием УФ-излучения лампы или лазера.

На стереолитографических установках, выпускаемых фирмой 3D-System (США), точность моделей получается в пределах от 0,0625 до 0,1 мм [46, 57] в зависимости от типа лазера, использующегося на установке, и длины волны лазера.

Высокая точность и воспроизводимость строящейся поверхности достигается за счет увеличения количества треугольников при триангуляции, вследствие чего увеличивается размер файла, отсюда вытекает требование к хорошему графическому видеоредактору.

Стереолитография позволяет получить точность «отпечатка» порядка десятых долей миллиметра, хорошо воспроизводит мелкие детали и

обеспечивает достаточно ровную поверхность объекта. Готовые модели выдерживают нагрев до 100 °С без изменений формы и размеров. Отверждённый фотополимер легко полируется. Прочность готовых деталей сравнима с прочностью изделий из отверждённых эпоксидных смол [56].

Положительный опыт использования технологий прототипирования для изготовления изделий авиационных агрегатов имеется в ОАО «ОКБ Сухого», на этом предприятии была установлена система технологической линии установок стереолитографии для изготовления изделия [30].

Достоинства способа лазерной стереолитографии: возможность полной автоматизации, высокая точность повторных воспроизведений, отсутствие ограничений по сложности формы изделия, возможность изготовления изделий больших размеров по частям с последующей их сборкой.

К недостаткам лазерной стереолитографии можно отнести: возможность усадки при полимеризации материала (фотополимера), что может приводить к деформациям и, следовательно, снижать точность; относительно высокую стоимость фотополимера; чувствительность установки к изменениям температуры и влажности помещения, к вибрациям; химическую токсичность фотополимеров (до полимеризации).

Фотополимер светочувствителен и токсичен. Поэтому ванна должна быть защищена от света и иметь проточную вентиляцию [62].

Еще одним недостатком является длительное время, затрачиваемое на постобработку [62], среднее время постобработки Уф-лампой составляет 16–18 часов и более, до полного затвердевания фотополимера, в зависимости от сложности готового изделия.

Для эффективного использования стереолитографической установки необходимы высокая техническая квалификация обслуживающего персонала, а также дорогостоящее обучение.

Используется достаточно твердый, но хрупкий полупрозрачный материал, подверженный короблению под влиянием атмосферной влаги.

Широкое применение данный метод нашел в технологии литья по выплавляемым моделям в качестве мастер-моделей, в которые после удаления модели заливается расплавленный металл.

1.3.1. Принцип работы 3D-принтера по методу стереолитографии

Все процессы стереолитографии, как и в других методах, начинаются с проектирования внешних и внутренних поверхностей изделия с точным указанием всех геометрических элементов в одной из сред 3D-проектирования: AutoCAD, 3D Компас [11, 13], Pro-Engineer, 3D-Studio и др. Затем 3D CAD-модель преобразуется в STL-файл.

Важным шагом при подготовке и реализации метода стереолитографии является обеспечение устойчивости будущего изделия на рабочей платформе. Для этого на стадии компьютерной подготовки 3D CAD-модели при помощи специальной программы конструируются внешние поддерживающие конструкции и внутренние переборки. С их помощью обеспечиваются: поддержка выступов и консолей изделия, наклонных поверхностей; предотвращение расслаивания на сложнопрофильных участках; корректировка возможного искривления слоев, примыкающих к платформе; создание составных изделий из нескольких частей; отделение полученного изделия от подвижной платформы [19]. Операции по удалению поддерживающих конструкций производится вне камеры стереолитографической установки.

Основным модельным материалом метода стереолитографии является жидкий фотополимер (He – Cd гелиевокадмиевый).

В методе стереолитографии (рис 1.4) используется лазер как основной рабочий механизм установки. Его обычно позиционируют с помощью зеркальных гальванометров с приводами. Разрешение гальванометров позволяет определить общие размеры изготавливаемых изделий, в то время

как диаметр лазерного луча будет определять минимальную толщину стенки [12].

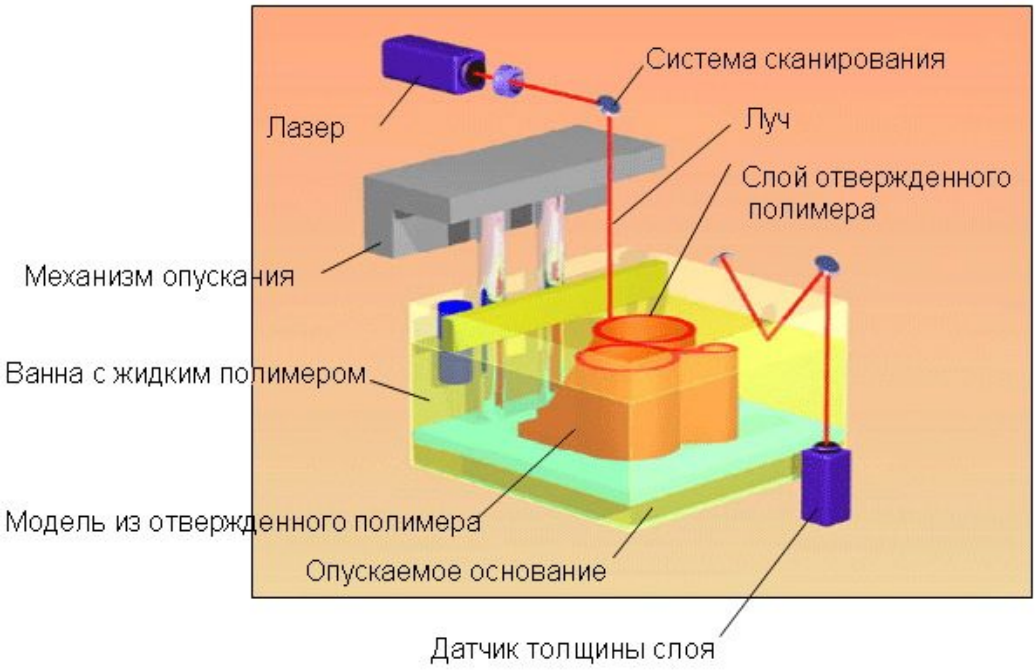


Рис. 1.4. Принципиальная схема установки, работающей по методу стереолитографии

Лазерный луч, управляемый двумя вращающимися зеркалами, фокусируется линзами и засвечивает по поверхности рабочей области. Компьютер использует информацию о конфигурации слоя для того, чтобы управлять зеркалами. При точечной засветке лазером фотополимер затвердевает и образует отдельные твердые точки, которые в совокупности составляют сечение изделия (фотополимер отвердевает только там, где его «касается» лазерный луч).

Далее рабочий стол со сформированной частью изделия опускается на расстояние, равное толщине одного слоя, таким образом повышается уровень полимера. Система выравнивания поверхности рабочего слоя работает по методу протирки, постоянно обеспечивая плоскую поверхность. Далее формируется следующий слой, до тех пор, пока изделие не будет полностью готово. Скорость движения луча и интенсивность излучения в области засветки регулируются таким образом, чтобы отверждение шло на глубину чуть меньшую толщины одного слоя с тем, чтобы обеспечить надежное

соединение с следующем слоем. Изделие строится целиком слой за слоем. В конце цикла изготовления платформа поднимается и объект снимается.

1.4. Достоинства и недостатки формообразования изделий по методу послойного наплавления – FDM

Еще одним из ведущих методов технологии быстрого прототипирования является метод послойного наплавления – FDM [5, 19]. Основоположником этого метода принято считать Скотта Крампа, который в 1992 году получил патент на метод послойного наплавления (FDM). Для создания изделий FDM– метод, как и стереолитография, использует трехмерные объекты на основе твердотельных моделей, созданных в САПР. Концепция этого не лазерного процесса включает предварительный прогрев нитевидного материала [62].

В работе А.И. Грабченко [19] отмечается, что точность изделия, которую можно получить, лежит в пределах от 0,1 до 0,3 мм. Точность получаемых по методу FDM изделий зависит от нескольких факторов: калибровки установки, квалификации обслуживающего персонала, позиционирования изделия на рабочей платформе установки.

Конструкционный материал, применяемый по методу послойной наплавки – это в основном разные термопластики: ABS-пластик, PLA-пластик, но возможно и применение поликарбоната, воска, нейлона и т.д.

При необходимости для укрепления построенного слоями изделия используют поддерживающие конструкции (чаще всего сотовые) из HIPS-пластика, который легко удаляется с помощью растворителя Лимонена. Также конструкции могут быть и из полистирола, воска и других материалов [5, 19, 57].

Основным недостатком данного метода является низкая прочность готового изделия [19]. Всё дело в остаточных термических напряжениях, которые вызывают последующую деформацию и усадку изделия.

На поверхностях изделия могут возникать характерные дефекты («наплывы»), которые затем можно удалить последующей механической обработкой, например, на токарном станке или шлифовальной бумагой. Есть возможность параллельного изготовления нескольких деталей, если они вписываются в рабочую зону установки, но отсюда следует еще один недостаток печати по методу FDM: при перемещении от одного объекта к другому экструдер тянет за собою нить, что приводит к снижению качества изделия.

Также во избежание затвердевания материала, сопла экструдера должны поддерживать постоянную температуру плавления модельного материала.

Изделия, изготовленные по методу FDM, подвержены ярко выраженной анизотропии. Механические свойства готового изделия разные по разным направлениям внутри материала. Еще одним серьезным недостатком является то, что заметны швы между слоями, что сказывается на шероховатости готового изделия.

Конечно, по точности размеров и формы изделия [62], изготовленные по методу FDM, уступают методу стереолитографии, однако метод FDM нашел широкое применение в большинстве дизайнерских задач и в простых бытовых 3D-принтерах. В первую очередь, за счет небольшой себестоимости изготовления изделия, а также сравнительной простоты обращения с установкой.

1.4.1. Принцип работы 3D-принтера по методу FDM

Формообразование из легкоплавких материалов по методу FDM заключается в том, что гранулированный или прутковый материал в специальной камере нагревают до температуры размягчения (точность поддерживания температуры не ниже ±1˚С, что является существенным недостатком данного метода) и продавливают через печатающее сопло (экструдер) диаметром 100–200 мкм. Печатающая головка перемещается в

горизонтальной плоскости по заданной программе, нанося нитевидный материал на предыдущий слой.

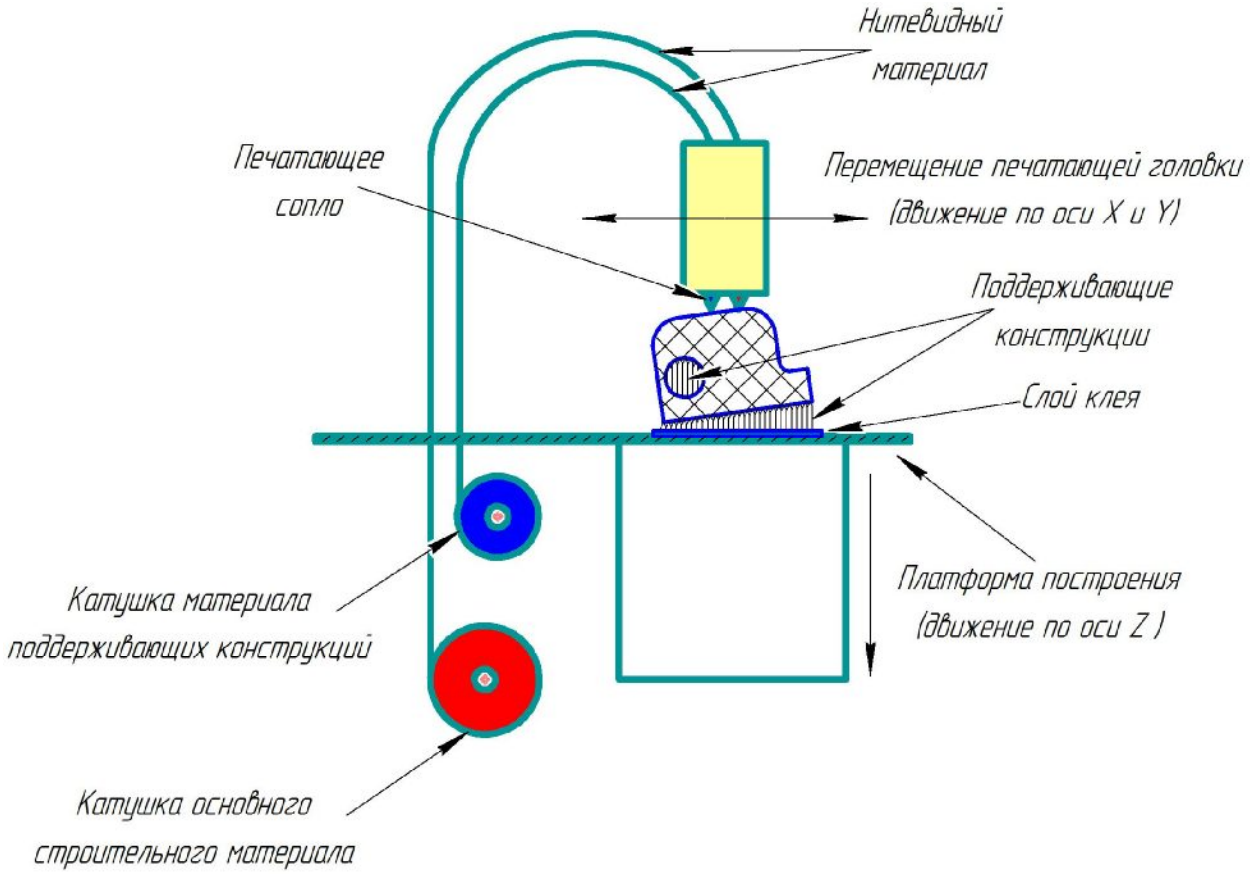


Рис. 1.5. Принципиальная схема установки, работающей по методу стереолитографии

Некоторые установки, работающие по методу FDM, поставляются с системой двойных экструдеров, например, как на рис. 1.5. Двойной экструдер системы имеет два сопла, что очень удобно при печати двумя разными материалами. Например, одно сопло подает основной строительный материал с катушки, а другое –легко удаляемый материал поддерживающих конструкций, необходимый для формирования сложных составных объектов.

Математическая модель изделия, созданная в системе CAD записывается в формат STL, после чего передается на специальное программное обеспечение, созданное для установки FDM. Программа ориентирует изделие, разбивает ее на горизонтальные сечения (слои) и рассчитывает пути перемещения печатающей головки. При необходимости автоматически

генерируются поддерживающие конструкции для нависающих фрагментов изделия.

Во время работы установки ее головка выстраивает геометрию изделия, выдавливая нитевидный материал через сопло, нагретое до 240 °С. Второе сопло выстраивает поддержку. Головка перемещается в направлении X-Y. Существуют установки, где координатный стол (платформа) перемещается по направлению Y, а сопловой блок по направлению X. Платформа опускается на толщину одного слоя, и процесс повторяется. Слои наращиваются один за другим, вплоть до завершения построения модели с поддержкой.

Точность изготовления FDM-изделий зависит от точности ориентирования изделия в рабочем пространстве установки и колеблется от 0,1 до 0,3 мм. Точность по оси Z определяется толщиной слоя и бывает обычно несколько ниже, чем по осям X и Y. Для достижения требуемых параметров качества поверхности, математическую модель будущего изделия ориентируют посредствам программного обеспечения так, чтобы исполнительные поверхности, требующие большей чистоты, располагались вертикально, а менее значимые с точки зрения требований к качеству – горизонтально.

1.5. Достоинства и недостатки формообразования изделий по методу светоотверждения фотополимера – 3SP

Одним из перспективных методов технологии быстрого прототипирования из полимерных материалов является метод светоотверждения фотополимера – 3SP.

Эта технология – одна из самых производительных и точных. Требует минимальных затрат материальных и трудовых ресурсов, что немаловажно в современных условиях рынка машиностроительной продукции. Разработчиком метода светоотверждения фотополимера – 3SP является международная компания EnvisionTec, которую можно отнести к новичкам

рынка прототипирования. Свои первые машины она начала выпускать в 2003 году.

Формирование и засветка видимым ультрафиолетовым светом каждого слоя происходит относительно быстро – 3–5 секунд. Таким образом, если в SLA-машинах применяется «точечный» принцип засветки, то в машинах EnvisionTec – «послойный», то есть осуществляется засветка всего слоя сразу. Этим объясняется весьма высокая скорость построения моделей – в среднем 25 мм в час по высоте при толщине слоя построения 0,05 мм. Материал поддерживающих конструкций – тот же, что и основной материал – акриловый фотополимер [27, 28].

Метод 3SP позволяет получить изделие с точностью порядка сотых долей миллиметра, хорошо воспроизводит мелкие детали. По сравнению с методом стереолитографии, готовые модели выдерживают локальный нагрев свыше 140 °С без изменений геометрической формы и размеров. Точность изделия, которое можно получить, порядка 0,05–0,1 мм.

Отверждённый фотополимер легко полируется. Прочность готовых изделий сравнима с прочностью изделий, получаемых литьем под давлением [19]. При этом не требуется изготавливать сложную и трудоемкую пресс-форму и экологичность метода прототипирования намного выше.

Но и эта технология имеет существенные недостатки. Одним из главных является зависимость от градиента температуры. При изготовлении изделий стоит остро вопрос о создании помещения с термоконстантными условиями, так как фотополимер очень чувствителен к перепадам температуры окружающей среды, что, в свою очередь, ведет к разной скорости полимеризации поверхности изделия. Это может привести к образованию пустот и газовых раковин, что снижает эксплуатационные свойства изделия.

1.5.1. Принцип работы 3D-принтера, работающего по методу 3SP

Процесс печати (рис. 1.6) разработан фирмой Texas Instruments (США) и используется фирмой EnvisionTec (Германия). На установках компании

EnvisionTec полимеризация материала осуществляется не по точкам, как в других методах, например, стереолитографии, а послойно, по растровым маскам при помощи УФ-излучения. Разрешение (для одного рабочего слоя) составляет 1280x1024 пикселя при размере одного пикселя 150 или 90 микрон. Толщина слоев варьируется от 25 до 100 микрон [50].

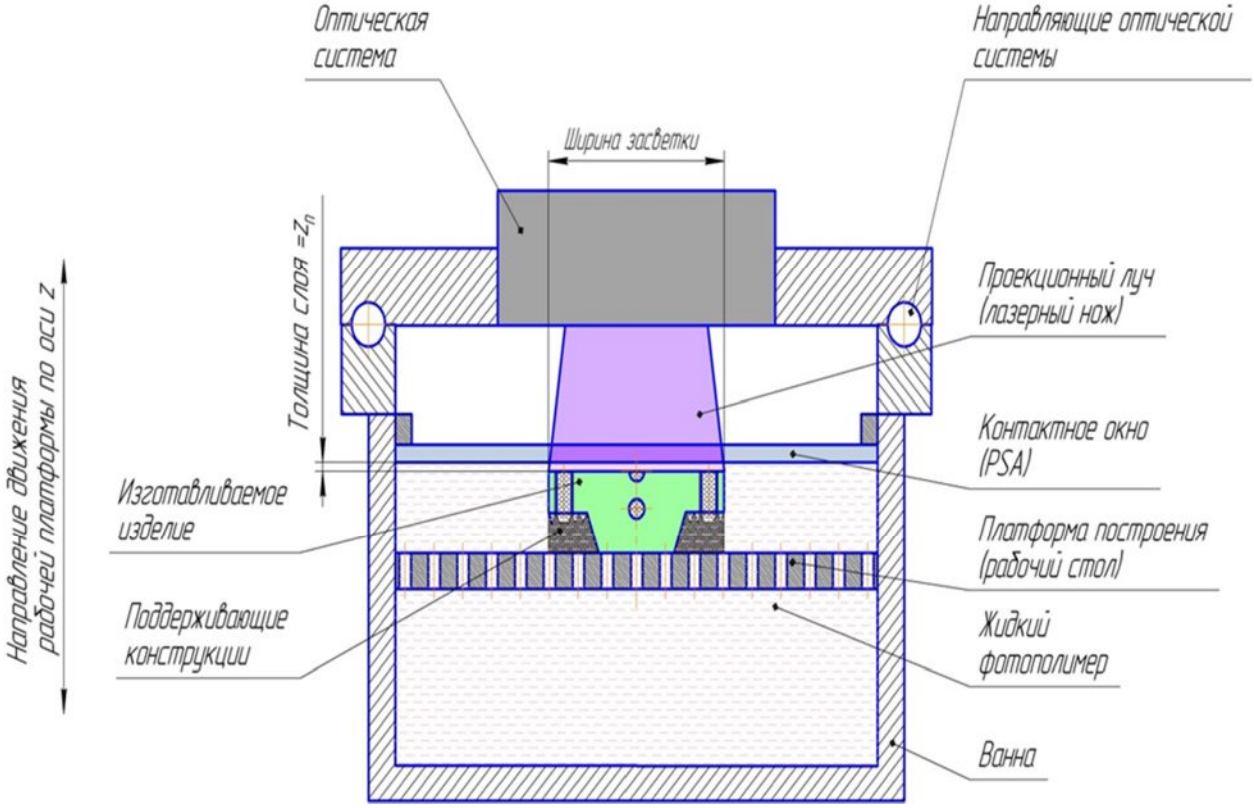


Рис. 1.6. Принципиальная схема установки, работающей по методу 3SP

Затем эти маски проецируются на контактное окно построения с помощью лазерного ножа, повторяя слой за слоем компьютерную параметрическую 3D-модель. Далее рабочая платформа камеры построения опускается вниз на регулируемую высоту, которая соответствует толщине слоя и варьируется от 25 до 100 мкм, и так до полного изготовления изделия. Благодаря этому скорость изготовления зависит не от размеров и сложности изделия, а только от количества слоев. Скорость построения по Z составляет от 10 до 30 мм в час, в зависимости от толщины слоя и шага рабочей платформы. Установки фирмы EnvisionTec [66, 67] позволяют создавать функциональные изделия на большой скорости и при низких затратах [19]. После полного цикла изготовления изделия следует постобработка.

Так как слои не до конца заполимеризовались на всю глубину, то готовое изделие помещают в УФ-печь на несколько секунд под ультрафиолетовое излучение. Под действием ультрафиолетовых лучей происходит полная полимеризация, то есть соединение всех слоев в монолит.

Точкой отчета относительно системы координат Oxyz при прототипировании по методу 3SP является начальное положение лазерного ножа относительно рабочей платформы, которое запрограммировано настройками установки и является неизменным. Перемещение по оси Ox осуществляется лазерным ножом («влево – вправо» засветка всего слоя происходит только в одном направлении от нулевой точки вправо до края платформы и обратно в начальное положение), а Oz –рабочей платформой (платформа опускается вниз на шаг платформы), отсутствие перемещения по Oy обусловлено тем, что фокусировка лазерного ножа покрывает всю платформу, и, следовательно, перемещение вдоль одной координаты не требуется.

3D-принтер, работающий по методу светоотверждения фотополимера, позволяет за один цикл выращивать на рабочей платформе несколько видов изделий разной конфигурации и сложности (рис. 1.7.), накладывая на них ограничения только по размеру рабочей камеры

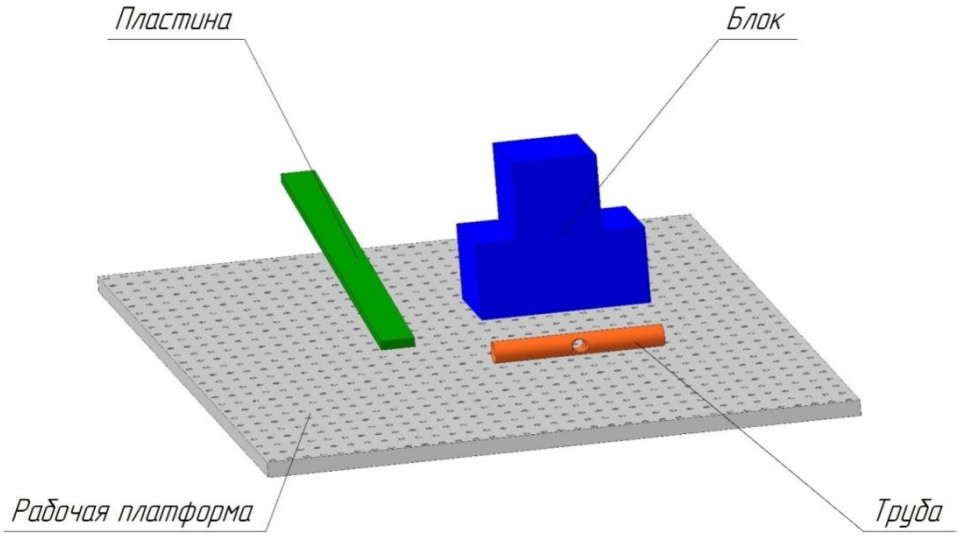


Рис. 1.7. Изделия разного вида, выращенные на установке за один цикл

Изделия сложной формы, имеющие линейные размеры, превышающие размер рабочей камеры, печатаются в несколько этапов.

Первый этап состоит в печати отдельных изделий, входящих в сборку. Второй этап – склейка всех деталей с помощью засветки тем же фотополимером. После окончательной сборки и зачистки швов собранное изделие ничем не отличается от цельно изготавливаемого изделия, как по качественным, так и по прочностным характеристикам. Отличительной особенностью метода 3SP от других методов технологии быстрого прототипирования является то, что изделия, получаемые после выращивания и удаления поддерживающих конструкций, пригодны для дальнейшего использования без всякой механической доработки.

1.6. Примеры изделий изготовленных по трем наиболее востребованным методам технологии быстрого прототипирования

Сопоставим изделия, изготовленные из трех разных методов RP-технологии, а именно: метод 3SP, метод стереолитографии и FDM-метод (рис 1.8).

Рис. 1.8. Используемое оборудование для изготовления

В общем случае методы технологии быстрого изготовления включают в себя следующие этапы:

– трехмерное компьютерное моделирование изделия;

– изготовление изделия по одному из выбранных методов;

– постобработка либо использование готового изделия.

Первое изделия было напечатано на 3D-принтере Prism Pro по методу FDM. Изделие было изготовлено из материала ABS-пластик. Трехмерная модель изделия с расставленными поддерживающими конструкциями показан на рис. 1.9. На рисунке изображено изделие с углом выращивания $\alpha = 0^{\circ}$ по отношению к рабочей платформе.

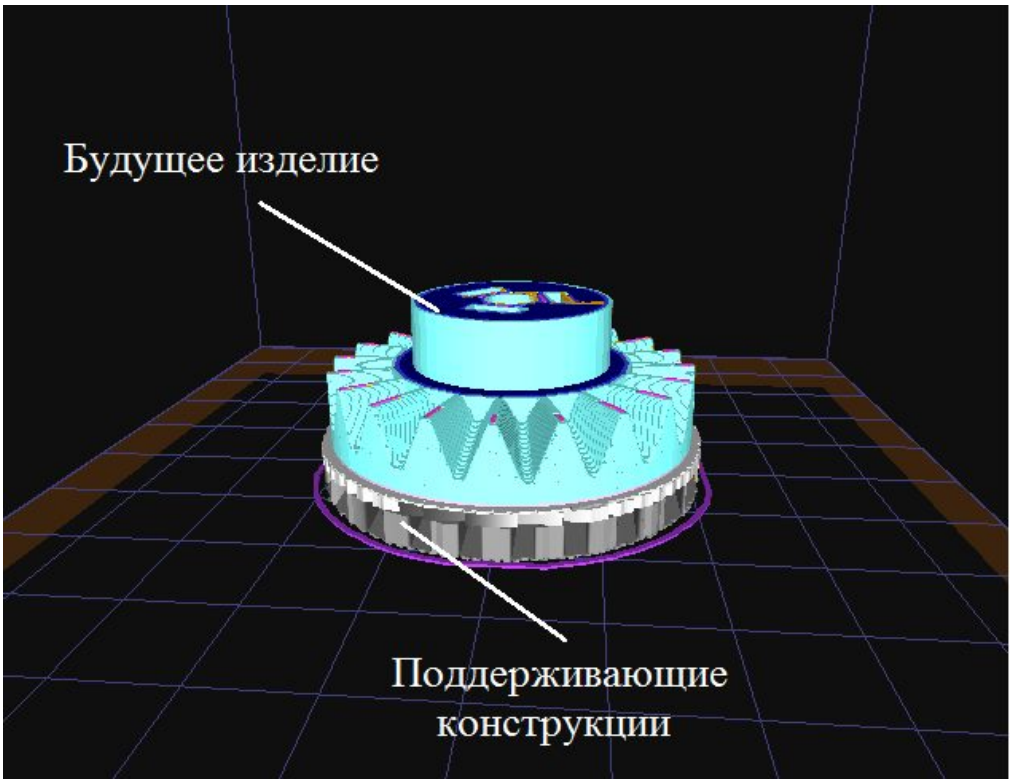


Рис. 1.9. Компьютерная модель изделия

На ответственных поверхностях зубчатого колеса (рис 1.10) наблюдались наплывы. Это произошло из-за того, что на не до конца затвердевший слой материала наносился материал следующего слоя и под действием силы тяжести происходил сдвиг слоев, что приводило к образованию наплывов.

Рис. 1.10. Изделие, изготовленное по методу FDM

На плоской поверхности зубчатого колеса (рис 1.11) видны следы коробления материала. Это произошло из-за слишком быстрого остывания изделия, либо была нарушена термоконстантность камеры построения.

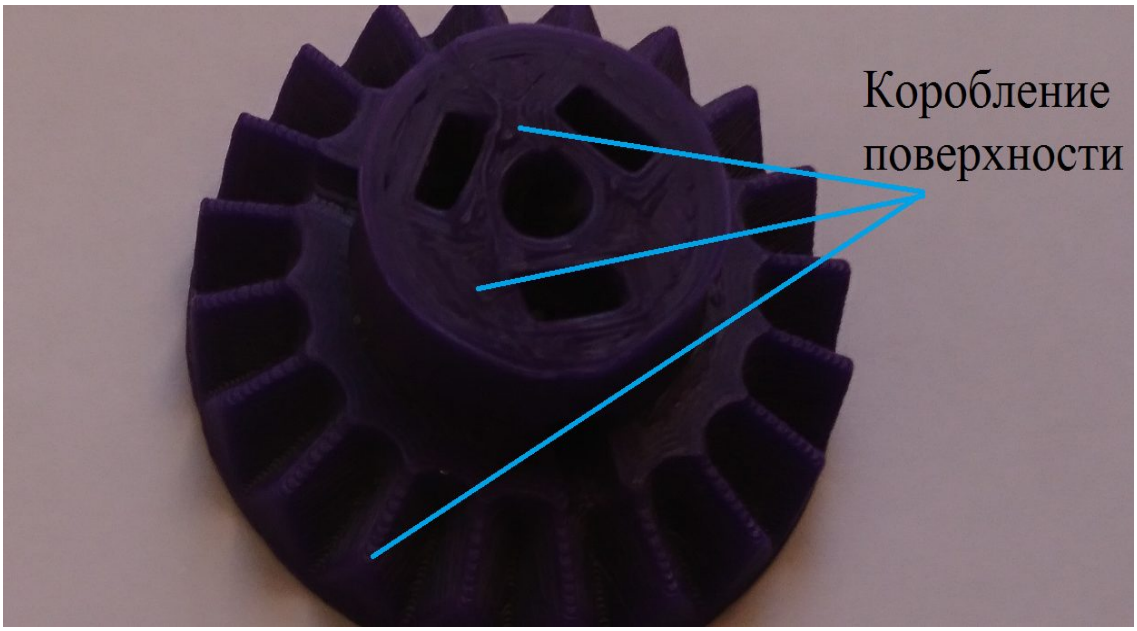


Рис. 1.11. Изделие со следами коробления

Также на изделии наблюдались места пропуска материала. Это говорит о том, что нитевидный материал, из которого изготавливалось изделие,

подавался неравномерно. Возможная причина – это износ частей механизма подачи материала.

Данное изделие подходит больше как выставочный экземпляр для показа возможностей установки, чем рабочее изделие какого-либо узла или агрегата.

Далее рассмотрим изделие (рис. 1.12), изготавливаемое по методу стереолитографии. В работе [9] отмечено, что ориентация изделия в рабочей зоне, тесно связанная с толщиной слоя, что, в свою очередь, влияет на точность изделия. Пространственная ориентация изделия в камере построения, оказывает наибольшее влияние на показатели его качества и цикл изготовления изделия [9], которое состоит из времени засветки и времени технологических пауз (выравнивание рабочего вещества, смена слоя и т.п.).

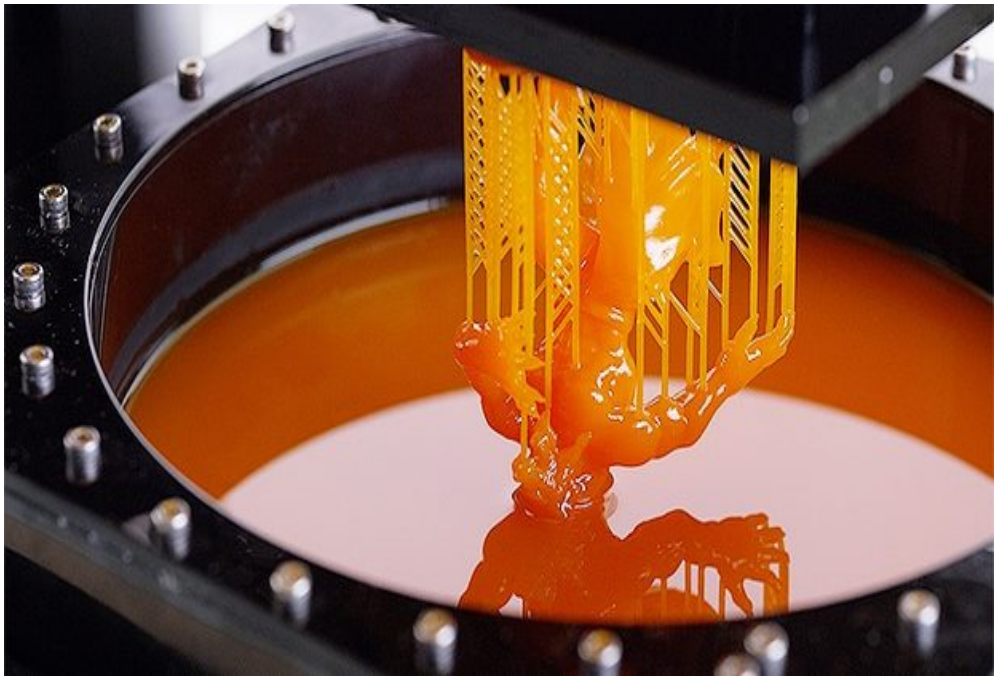


Рис. 1.12. Изделие, изготовленное по методу SLA

Главная особенность метода состоит в том, что под воздействием лазерного излучения происходит послойное формирование изделия, задаваемого математической моделью [51].

После полного цикла изготовления проводим удаление поддерживающих конструкций путем механической обработки. Далее даем изделию высохнуть, либо протираем изделия изопропиловым спиртом.

Далее рассмотрим изготовление по методу 3SP. Трехмерная компьютерная модель изделия с расставленными поддерживающими конструкциями показан на рис. 1.13.

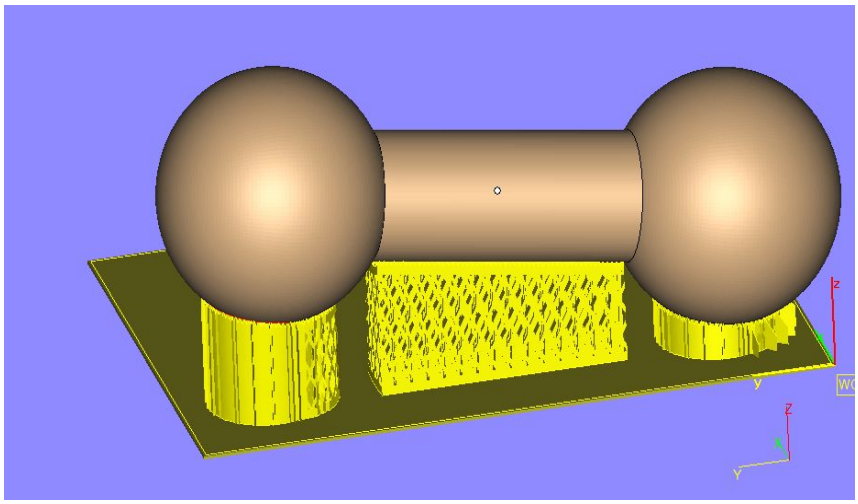


Рис. 1.13. Компьютерная модель

В данном случае изделие ориентированно компьютерной программой. В такой программе моделируется будущее изделие, расположение его главных поверхностей относительно лазерного ножа и рабочей платформы, задаются углы поворота, строятся поддерживающие конструкции и т.д.

Поддерживающие конструкции надежно фиксируют будущее изделие по всей его длине, что предотвращает его смещение вдоль координат, а также лишает поворотов вокруг осей. Данная схема аналогична схеме базирования корпусных деталей на магнитном столе, только в качестве удерживающих сил выступают адгезионные силы поддерживающих конструкций, и является установочной базой.

В качестве модельного материала использован акриловый фотополимер HTM-140. Данный метод имеет ряд особенностей, от которых зависят показатели качество исполнительных поверхностей получаемого изделия. Например, одна из особенностей – пространственная ориентация будущего изделия (рис. 1.14) в рабочей камере установки, выбирается так чтобы, исключить какое-либо смещение слоев в процессе выращивания.

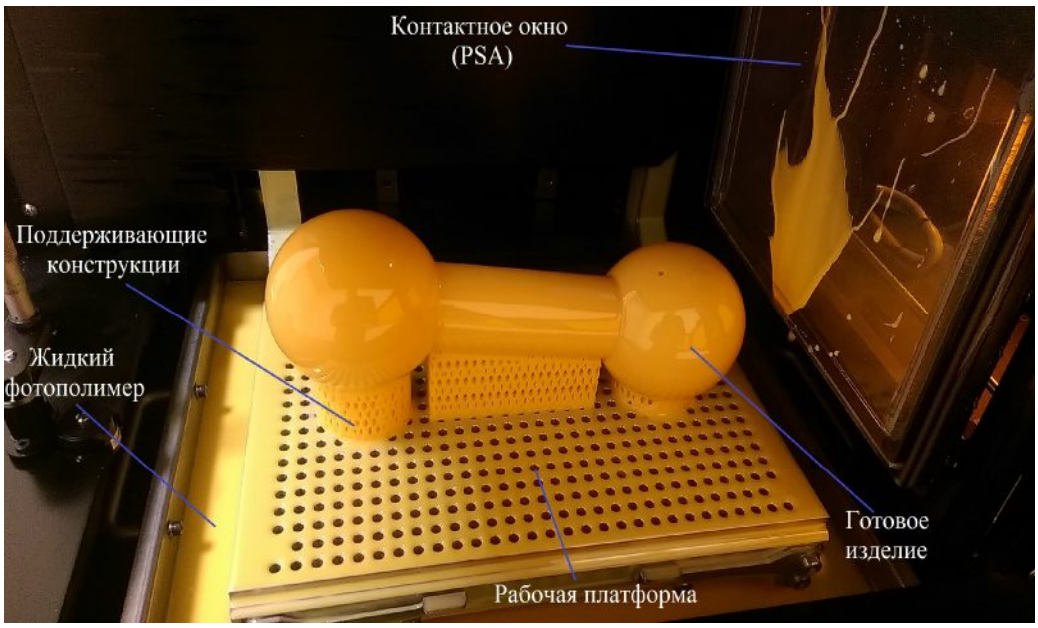


Рис. 1.14. Изделие, изготовленное по методу 3SP

Следует также тщательно выбирать месторасположение поддерживающих конструкций относительно исполнительных поверхностей. На рис. 1.15 видно, что поддерживающие конструкции слились вместе с изделием. С одной стороны произошло упрочнение поверхностного слоя со стороны поддерживающих конструкций, так как они слились в единый монолит с изделием, однако удаление их будет производиться механическим путем, посредствам гравера. Готовое изделие из этого материал имеет свойство хорошей обрабатываемости.

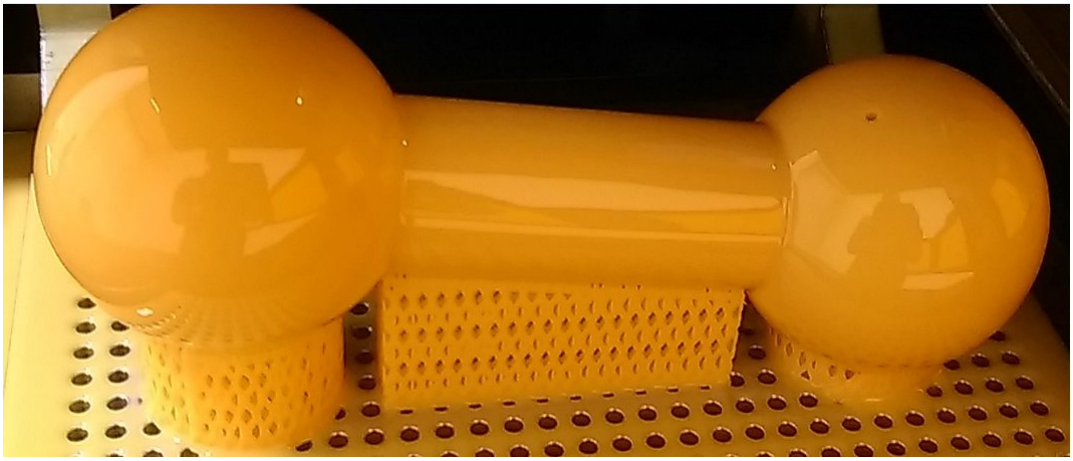


Рис. 1.15 Поддерживающие конструкции

Какой-либо доработки данная модель не требует и полностью готова к эксплуатации.

Во всех рассмотренных случаях пространственная ориентация оказывает влияние на показатели качества, однако основополагающее влияние при формообразовании по технологии быстрого прототипирования оказывают технологические параметры процесса, а именно угол выращивания α и толщина слоя z.

Рис. 1.16. Схематичное изображение угла выращивания

Угол выращивания – угол между наклонной поверхности изготавливаемого изделия и базовой поверхностью платформы построения.

Толщина слоя – толщина модельного материала, отвержденного за один проход исполнительного механизма 3D-принтера.

Из вышеперечисленных методов технологии быстрого прототипирования можно сделать вывод, что метод 3SP имеет ряд преимуществ по сравнению с рассмотренными методами:

– метод 3SP позволяет получать более точные изделия по сравнению с методом стереолитографии и FDM. Колеблется 0,05–0,1 мм для метода 3SP; 0,0625 до 0,1 мм для SLA; от 0,1 до 0,3 мм у FDM;

– производительность метода 3SP больше, чем у методов FDM и SLA за того, что скорость печати быстрее при этом, не приводя к, браку и порче изделия;

– изделия, изготовленные по методу 3SP имеют свойства хорошей обрабатываемости.

Однако в настоящее время, несмотря на достаточно большое количество публикаций, посвященных прототипированию [5, 7, 8, 9, 12, 19, 27, 28, 30, 47, 62, 64, 66, 69, 70], не определена эффективность применения этой технологии для получения изделий с требуемыми показателями качества.

1.7. Цель и задачи исследования

Представленный обзор априорной информации в области применения методов быстрого прототипирования позволяет сделать следующие выводы:

– методы быстрого прототипирования нашли широкое применение во многих отраслях промышленности;

– использование методов прототипирования имеет ряд существенных преимуществ по сравнению с традиционной технологией механической обработки;

– литературный обзор информации о наиболее востребованных методах технологии быстрого прототипирования показывает, что наиболее эффективным является метод 3SP для изготовления изделий из пластмасс;

– в отечественной и зарубежной литературе отсутствует информация о технологических параметрах процесса прототипирования, влияющих на показатели качества;

– не установлены значения технологических параметров процесса прототипирования, влияющих при формообразовании по методу 3SP;

На основании вышеизложенного были сформулированы цель и задачи исследования.

Целью работы является повышение показателей качества изделий, изготовленных по технологии быстрого прототипирования.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

– выбрать на основе априорных литературных данных эффективный метод технологии быстрого прототипирования;

– установить значения технологических параметров процесса прототипирования, влияющих на показатели качества изделий, изготовленных по технологии прототипирования;

– разработать зависимости параметра Ra от технологических параметров процесса прототипирования;

– разработать программу автоматизированного расчета ожидаемых параметров точности будущего изделия, получаемого по технологии быстрого прототипирования;

– разработать на основе данных экспериментальных исследований практические рекомендации по изготовлению изделий из пластмасс;

– провести промышленную апробацию разработанных практических рекомендаций для методов технологии быстрого прототипирования.

ГЛАВА 2. МЕТОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ ФОРМИРОВАНИЯ ТОЧНОСТИ И ШЕРОХОВАТОСТИ ПОВЕРХНОСТЕЙ ИЗДЕЛИЙ МЕТОДОМ 3SP-ТЕХНОЛОГИИ ПРОТОТИПИРОВАНИЯ

2.1. Критерии оценки эффективности использования метода 3SP для производства изделий

Для оценки эффективности использования метода 3SP технологии быстрого прототипирования контролировали перечисленные ниже параметры, характеризующие качество готового изделия:

1. Отклонения формы и взаимного расположения поверхностей, оцениваемые по ГОСТ 10356-66:

– отклонение от плоскостности – наибольшее расстояние от точек реальной поверхности до прилегающей плоскости в пределах нормируемого участка, мкм [14];

– отклонение от параллельности – разность наибольшего и наименьшего расстояний между прилегающими плоскостями на заданной площади или длине, мкм [14];

– отклонение от перпендикулярности – отклонение угла между плоскостями, осями или осью и плоскостью от прямого угла (90^0), выраженное в линейных единицах на заданной длине, мкм [14];

– отклонение от круглости – наибольшее расстояние точек реального профиля до прилегающей окружности, мкм [14];

– отклонение от цилиндричности – наибольшее расстояние от точек реальной поверхности до прилегающего цилиндра, мкм [14].

2. Шероховатость поверхности образцов, оцениваемая по ГОСТ 25142:

– среднее арифметическое отклонение профиля *Ra*, мкм [17];

– наибольшая высота неровностей профиля *Rmax*, мкм [18].

2. 2.2.Оценка отклонения формы и взаимного расположения поверхностей образцов, изготовленных методом 3SP

2.2.1.Отклонениеот точности формы и взаимного расположения поверхностей

Для оценки отклонения точности форм и взаимного расположения поверхностей (отклонения от плоскостности, параллельности, перпендикулярности, а также круглости и цилиндричности) использовалась координатно-измерительная машина Metris LKV.

В качестве образцов были выбраны пластины размером 10x150x3, так как это одна из самых простых форм и по ней легче всего отследить влияние технологических факторов на точностные характеристики. А также обработка плоских поверхностей занимает важное место в машиностроении.

Образцы были изготовленные по RP-технологии из трех разных материалов: HTM-140, E-glass и ABSflex (рис. 2.1), которые чаще всего применяется в машиностроительной отрасли из-за их физико-механических свойств.

а) *б)* *в)*

Рис. 2.1. Исследуемые пластины из разных материалов:
а) HTM-140; *б)* ABSflex; *в)* E-glass

Физико-механические свойства выбранных материалов для изготовления образцов представлены в табл. 2.1.

2.1. Физико-механические свойства материалов

Показатели	Марка материала пластин		
	HTM-140	ABSflex	E-glass
Прочность на растяжение, МПа	56	17,5	35-50
Удлинение при разрыве, %	3.5	8	10-25
Прочность на изгиб, МПа	115	5,3	50-87
Модуль изгиба, МПа	3350	72,9	2500
Температура термической деформации, ˚С	140	100	120

Измеряемые образцы были изготовлены партиями. Каждая партия состояла из 7 образцов, которые отличались друг от друга тем, что угол наклона между исследуемой базовой поверхностью и «контактным окном» варьировался от 0˚ до 12˚ с шагом в 2˚.

Все пластины были изготовлены методом 3SP технологии быстрого прототипирования на 3D-принтере – EnvisionTec Ultra 3 [35, 36, 37].

Измерение напечатанных пластин универсальными методами заняло бы огромное количество времени, что в условиях современного производства недопустимо. Метрологический контроль должен обеспечивать высокую точность и проходить в быстром автоматизированном режиме.

Координатно-измерительная машин (КИМ) позволяет оперативно измерять геометрические параметры простых и сложных изделий, таких как, например, корпусные, измерение которых традиционными способами требует дорогостоящей оснастки. Координатно-измерительная техника сокращает время на наладку обрабатывающих станков, центров и модулей за счёт быстрого и достоверного контроля первых обработанных деталей из последующей партии, исключает брак [47].

Координатно-измерительная машина Metris LKV производства фирмы Nikon Metrology имеет следующие технические характеристики:

– объемная точность от 1,9 мкм;

– повторяемость от 1,8 мкм;
– скорость до 42 м/мин.

Измерения КИМ Metris LKV сложных изделий сводятся к определению математической оценки пространственных координат отдельных точек. Результаты этих измерений можно представить, как в графическом виде, так и в табличном [68].

Координатно-измерительная машина Metris LKV, является наиболее востребованной и обладает высокой точностью измерений. Компоновка КИМ включает в себя измерительный стол (основание), портал, пиноль, щуп (рис. 2.2).

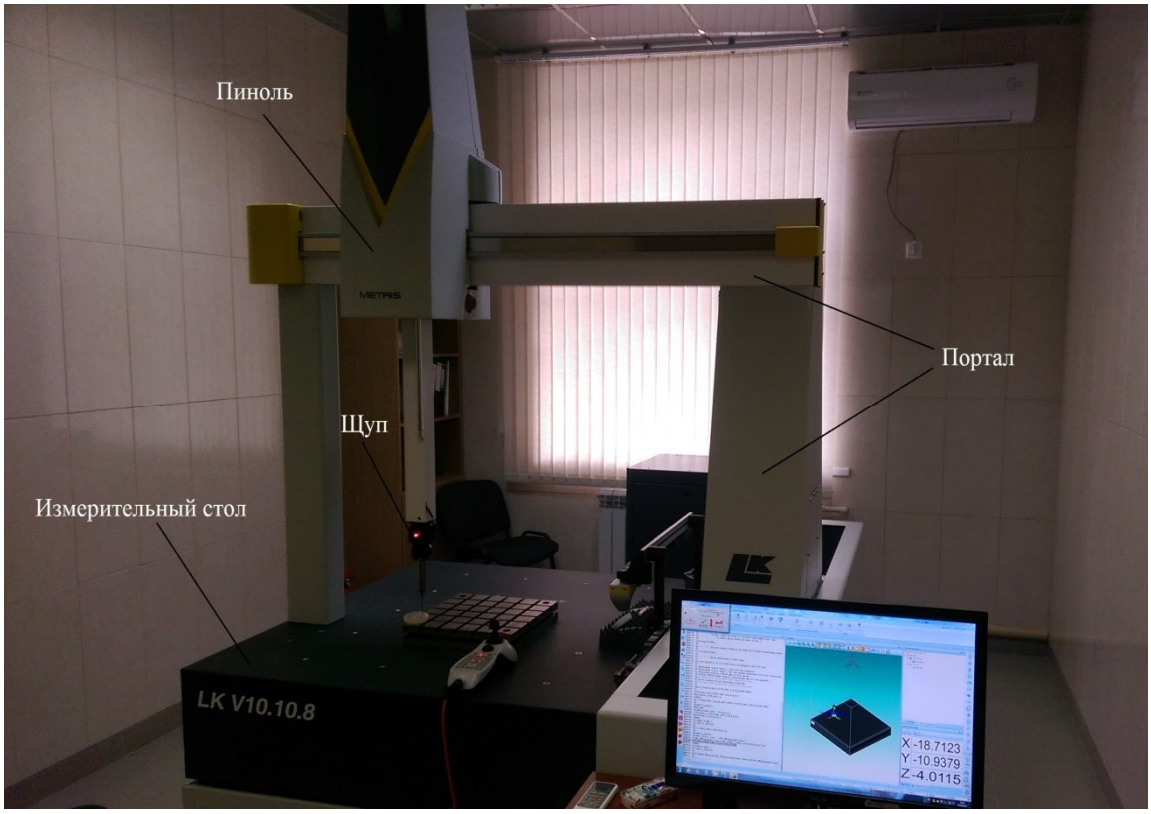


Рис. 2.2. Координатно-измерительная машина Metris LKV

Подвижные компоненты перемещаются по гранитной поверхности на аэростатических замкнутых подшипниках, предназначенных для минимизации трения. Усилие, необходимое для передвижения портала, является относительно небольшим, а отсутствие какого-либо запаздывания в системе позиционирования приводит к снижению погрешности измерения.

Портал координатно-измерительной машины Metris LKV выполнен из углепластика, что обеспечивает высокую жесткость портала, а также малый вес.

По верхней перекладине портала на аэростатических направляющих перемещается колонна, внутри которой вертикально перемещается гранитная пиноль. Пиноль из гранита имеет высокую жесткость и хорошую температурную стабильность. На конце пиноли установлен щуп или поворотная головка со щупом.

Во время проведения измерения точностных характеристик готового изделия на координатно-измерительной машине Metris LKV использовали специализированные измерительные щупы, оснащенные триггерным датчиком и наконечниками, которые в основном изготавливаются из износостойкого синтетического рубина (рис. 2.3).

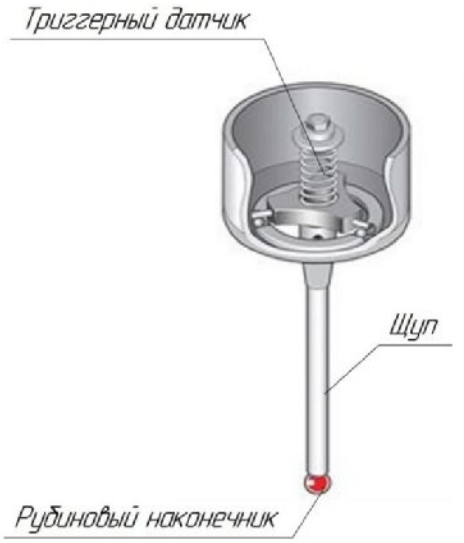


Рис. 2.3. Триггерный датчик

Триггерный датчик построен на основе триггера (от англ. TRIGGER – защелка, курок) – это бистабильный элемент памяти, у которого два стабильных состояния: 0 и 1.

Синтетическим рубиновым щупом определяли значения координат отдельных точек на поверхности исследуемого изделия. Система координат КИМа является базой, от которой производим измерения. Когда шаровидный

наконечник из синтетического рубина соприкасается с измеряемой поверхностью, возникает силовое возмущение в упругом элементе триггера, которое регистрируется с помощью изменения напряжения в тензорезисторе и передается через сигнал радиосвязи, по которому измерительная система каждой оси КИМ определяет координаты точки в пространстве [42].

Так как исследуемые пластинки очень легкие, то при проведении измерений щуп с наконечником из синтетического рубина координатно-измерительной машины Metris LKV сдвигал их, что приводило к погрешностям измерения. Для решения данной проблемы было сконструировано специальное поддерживающее приспособление, которое жестко фиксировало пластины (рис. 2.4).

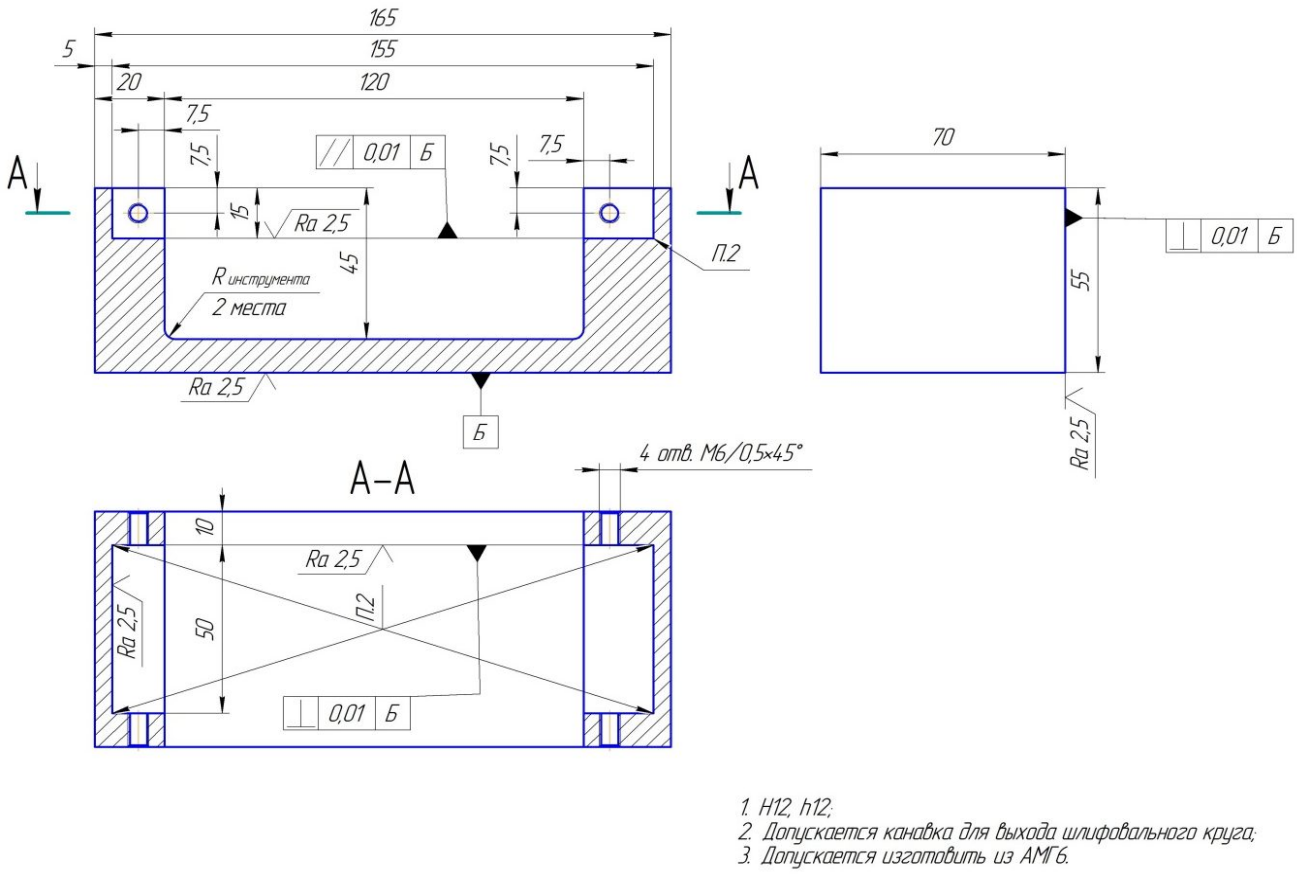
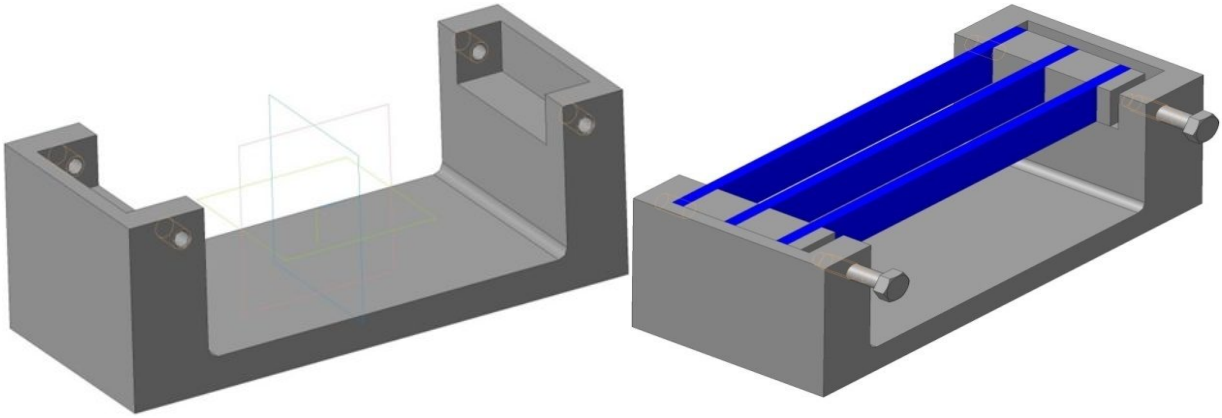


Рис. 2.4. Чертеж поддерживающего приспособления

Поддерживающее приспособление было разработано в системе «легкого» [9, 19] автоматического проектирования, которое полностью удовлетворяет возможности твердотельного моделирования (рис. 2.5).



а) *б)*

Рис. 2.5. *а* – компьютерная модель поддерживающего приспособления; б – Компьютерная модель поддерживающего приспособления с установленными и закрепленными в нем исследуемыми образцами

Фотографии готового специального поддерживающего приспособления для координатно-измерительной машины Metris LKV представлены на рис. 2.6.

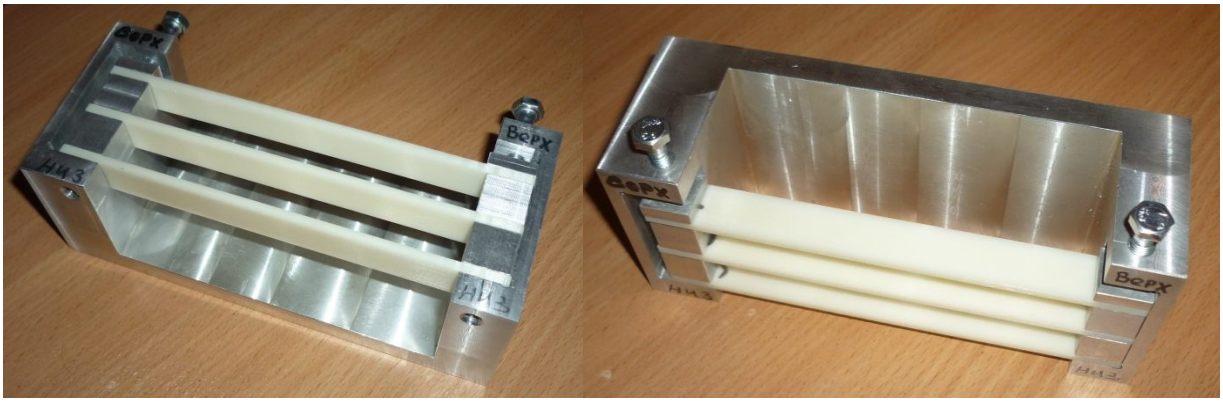


Рис. 2.6. Фотография поддерживающего приспособления в сборе с установленными в нем экспериментальными образцами

Поддерживающее приспособление было изготовлено из высокопрочного дюралюминиевого сплава Д16Т. Сплав Д16Т обладает стабильной структурой, то есть малым эффектом коробления, а также хорошей механической

обрабатываемостью. В табл. 2.2 приведены механические свойства дюралюминиевого сплава Д16Т.

2.2. Механические свойства высокопрочного дюралюминиевого сплава Д16Т

Марка сплава	Хим. система	σ, МПа	σ_B, МПа	δ, %	HB	KCU, КДж м^2	σ_{-1}, МПа
Д16Т	Al-Cu-Mg	300	440	20,0	130	250	120

В специальное приспособление устанавливали по три исследуемые пластины для ускорения процесса измерения, между которыми устанавливали кубики для того, чтобы щуп с наконечником из синтетического рубина мог свободно проходить и мерить поверхности. Кубики были изготовлены из того же сплава, что и поддерживающее приспособление, чтобы исключить погрешность измерений из-за разности коэффициентов температурного расширения. Крепление пластин происходило с помощью двух винтов на прижим для исключения сдвига пластин, которое привело бы к погрешности измерений.

Схема исследования отклонения точности форм и взаимного расположения поверхностей пластин представлена на рис. 2.7.

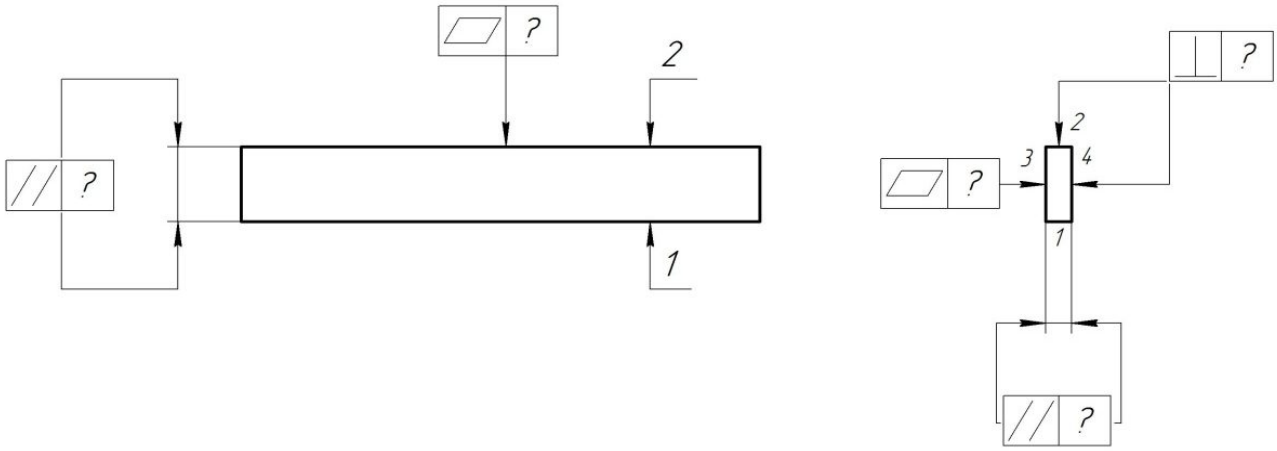
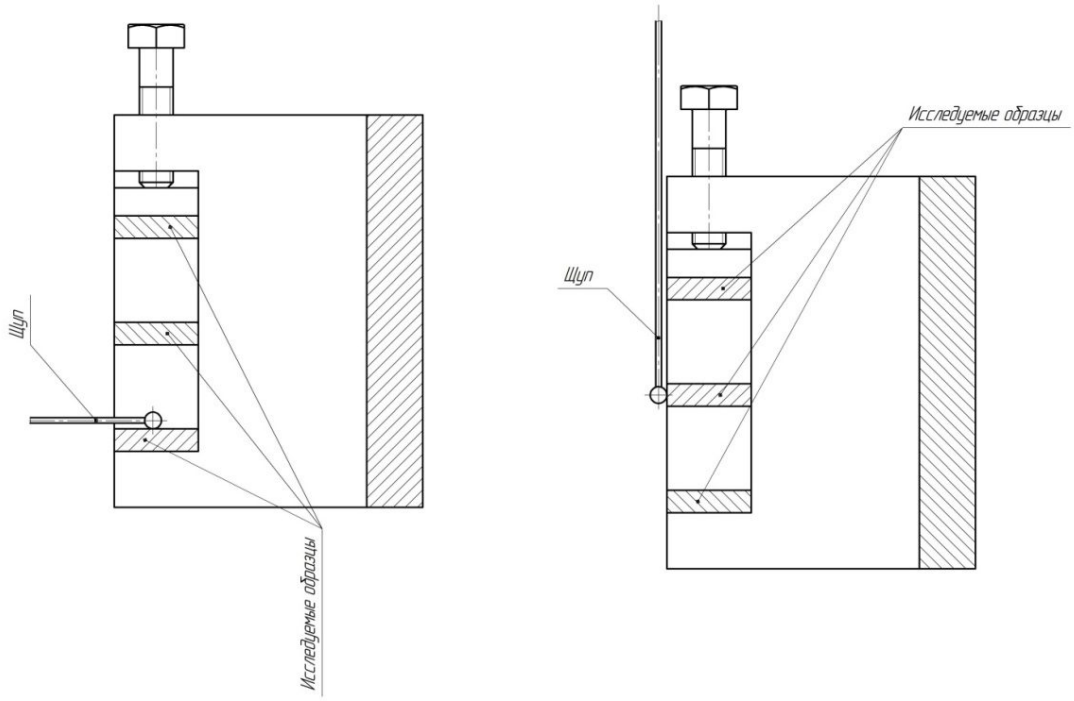


Рис. 2.7. Схема исследования взаимного расположения поверхностей

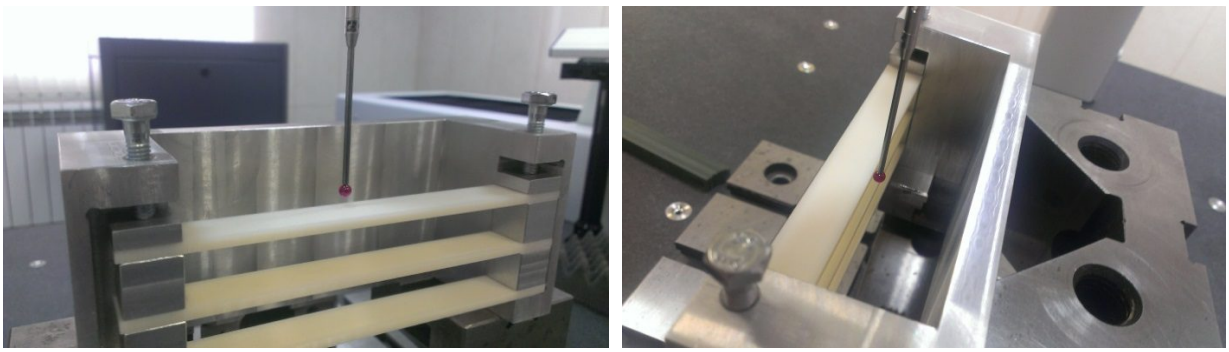
Схема измерения отклонения форм и взаимного расположения поверхностей с применением разработанного ранее поддерживающего приспособления показана на рис. 2.8.



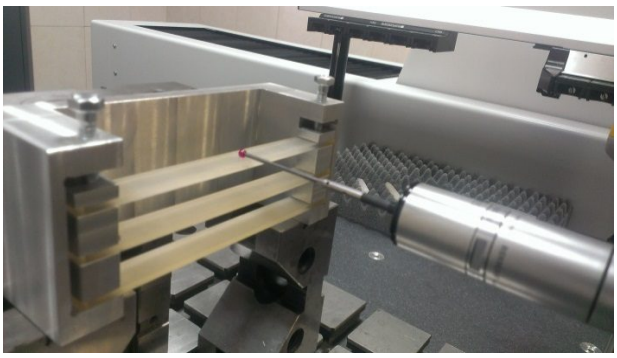
а) *б)*

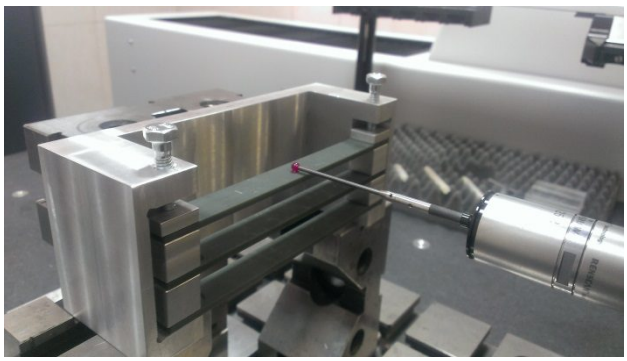
Рис. 2.8. Схема измерений: *а* – измерения отклонения плоскостности и параллельности поверхности 3 и 4, а также отклонения взаимной перпендикулярности; *б* – измерения отклонения плоскостности и параллельности поверхности 1 и 2

Рисунок 2.9 иллюстрирует проведения измерений на координатно-измерительной машине Metris LKV. Фотографии 1–2 демонстрируют измерения пластин, изготовленных из материала Crystal, 3 фотография 3 – измерение пластин, изготовленных из материала ABS-M, 4 – материал HTM-140.



1) *2)*





3) *4)*

Рис. 2.9. Фотографии процесса проведения измерений

Результаты измерений отклонений точностных характеристик, полученные при помощи координатно-измерительной машины Metris LKV представлены в приложении 1.

Используя результаты, полученные на координатно-измерительной машине Metris LKV, при помощи компьютерной программы OriginPro была произведена статистическая обработка, выведены полиномиальные зависимости влияния угла выращивания на точностные характеристики исследуемых образцов.

OriginPro - это профессиональное решение, предназначенное для анализа числовых данных и функций. Программа позволяет создавать графики и диаграммы на основе обработанных данных, а также поддерживает прочие продвинутые метода визуализации [6].

На рисунках 2.10–2.14 показаны графики простых полиномиальных зависимостей выходных параметров для образцов, изготовленных из трех различных материалов (E-glass, ABSflex, HTM-140) на 3D-принтере EnvisionTec Ultra 3, описывающих оптимальную точку частного экстремума.

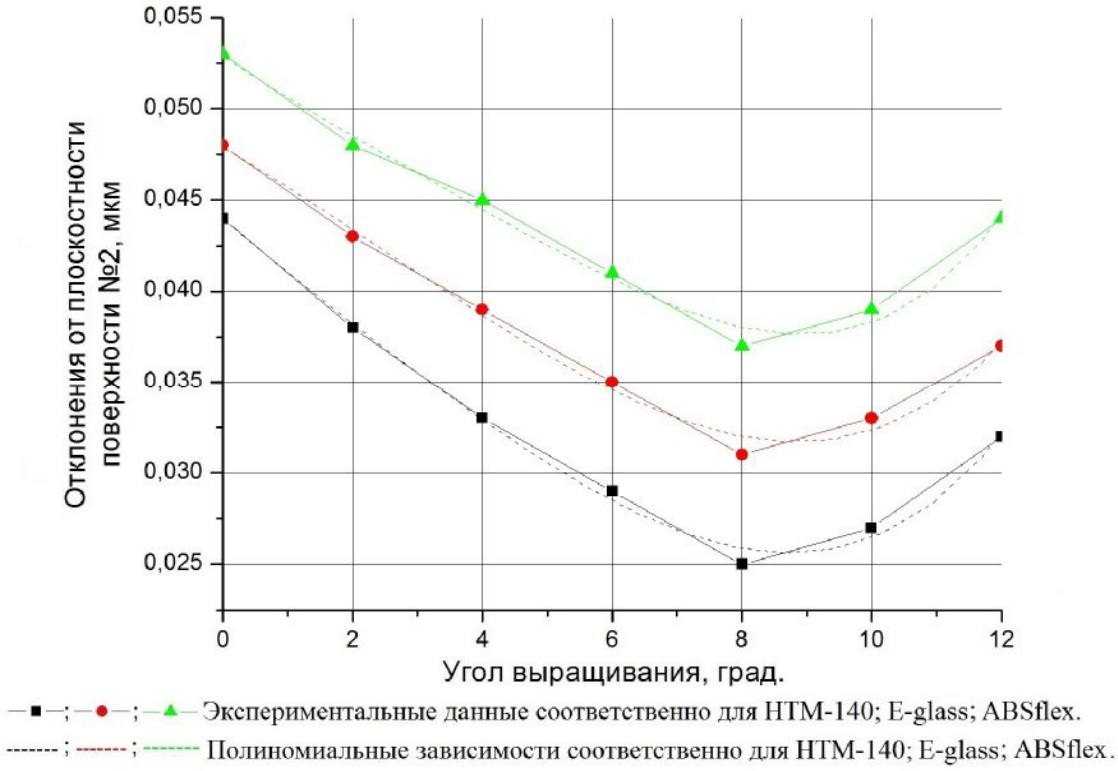


Рис. 2.10. Зависимость отклонения от плоскостности поверхности № 2 от угла выращивания образцов

Проведя аппроксимацию измеренных значений отклонения точностных характеристик от угла выращивания, получили полином 4-й степени для каждой серии исследуемых образцов:

y_1 = 2E-06x^4 – 3E-05x^3 + 0,0001x^2 – 0,0024x + 0,0529 – для образцов из материала E-glass; (2.1)

y_1= 7E-07x^4 + 7E-06x^3 – 9E-05x^2 – 0,0021x + 0,0479 – для образцов из материала ABSflex; (2.2)

y_1 = 1E-06x^4 – 4E-06x^3 + 4E-05x^2 – 0,0029x + 0,0439 – для образцов из материала HTM-140; (2.3)

где y_1 – отклонения от плоскостности поверхности № 2;

x – угол выращивания образцов, от 0˚ до 12°.

В зависимости от информационной матрицы, то есть от точек измерения отклонения, получаются полиномиальные зависимости между переменными

технологическими факторами, такими как угол выращивания и материал образцов.

На рис. 2.10 показан график зависимости отклонения плоскостности поверхности № 2 от угла выращивания образцов. Полиномиальные зависимости всех измеряемых образцов носят нелинейный характер, а скорее параболический, что говорит о том, что есть некая точка экстремума (угол выращивания α = 8˚), в которой отклонения точности формы и взаимного расположения поверхностей минимальны, чем в остальных случаях. Также параболический закон может свидетельствовать о нестабильности роста изделия при изготовлении, то есть не исключено влияние на процесс изготовления температуры окружающей среды, неоднородности модельного материала, давления и др.

На всех полиномиальных зависимостях повторяется полученная закономерность.

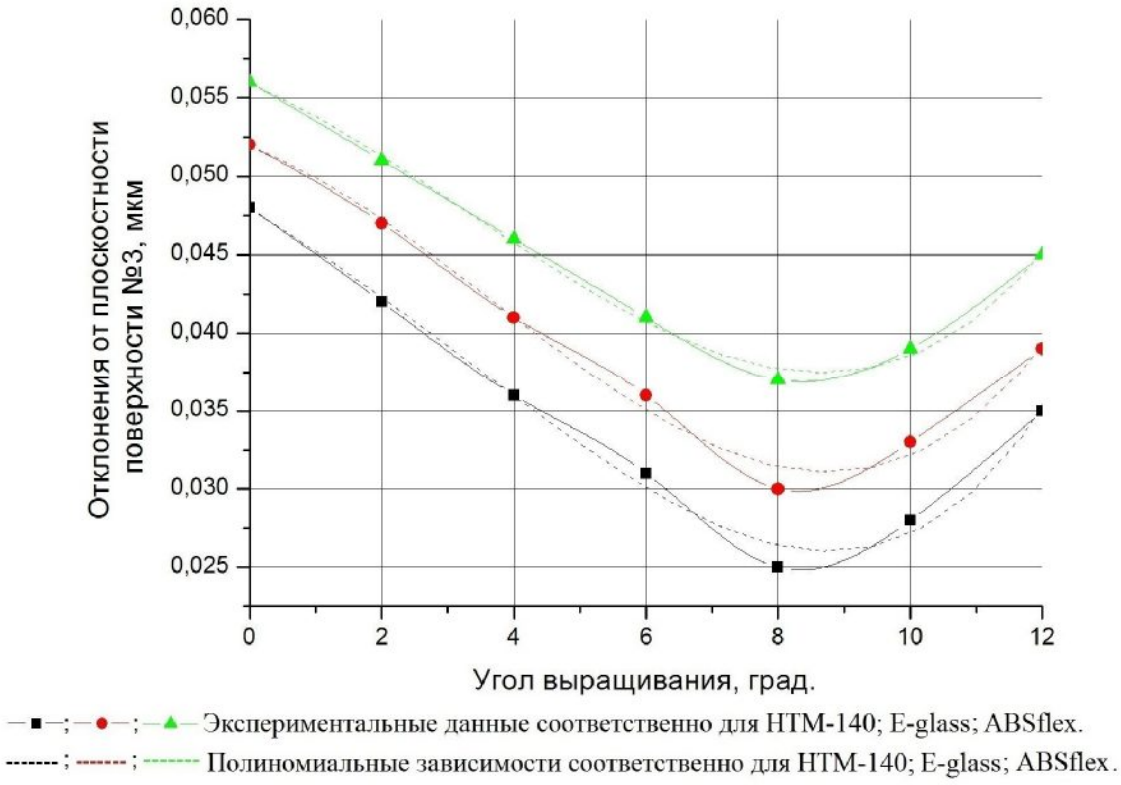


Рис. 2.11. Зависимость отклонения от плоскостности поверхности №3 от угла выращивания образцов

y_2 = 5E-07x^4 + 2E-05x^3 – 0,0003x^2 – 0,0019x + 0,0559 – для образцов из материала E-glass; (2.4)

y_2 = -2E-18x^4 + 4E-05x^3 – 0,0005x^2 – 0,0016x + 0,0519 – для образцов из материала ABSflex; (2.5)

y_2 = 1E-06x^4 + 8E-06x^3 – 0,0002x^2 – 0,0025x + 0,0479 – для образцов из материала HTM-140. (2.6)

где, y_2– отклонения от плоскостности поверхности № 3;

x – угол выращивания образцов, от 0˚ до 12˚.

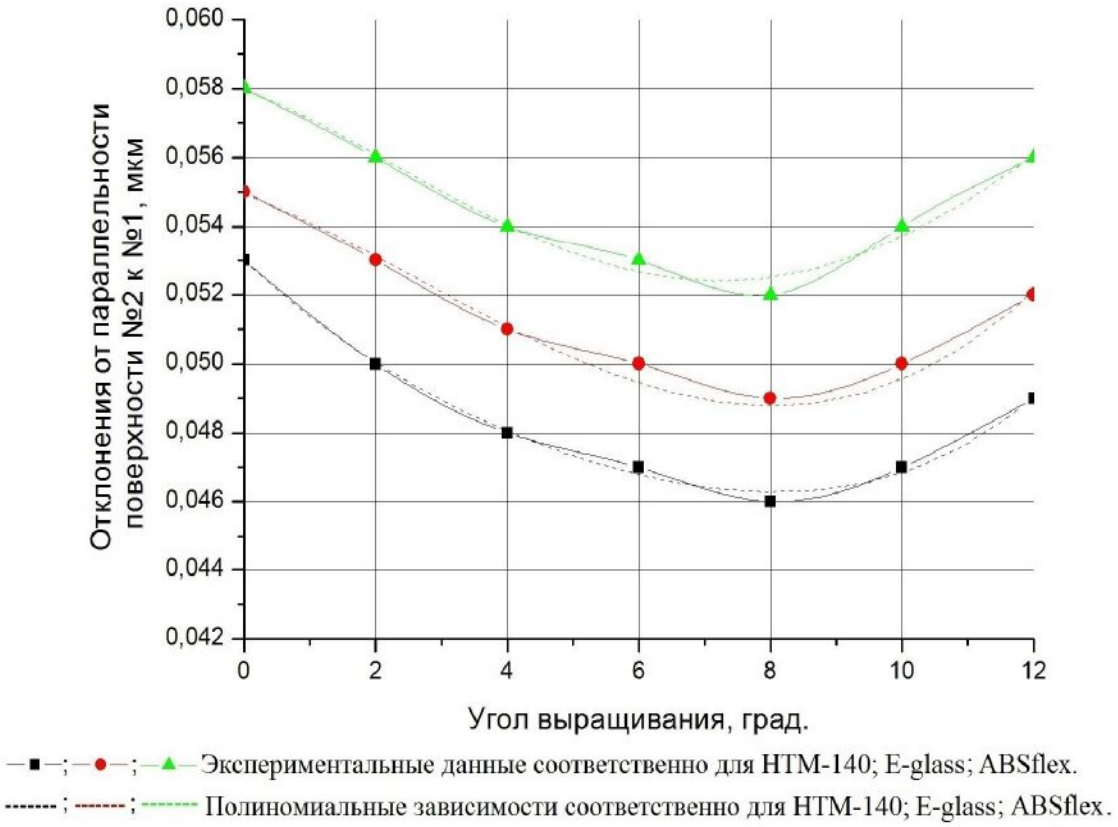


Рис. 2.12. Зависимость отклонения параллельности поверхности № 2 к № 1 от угла выращивания образцов

y_3 = 4E-06x^4 + 2E-05x^3 – 0,0003x^2 – 0,001x + 0,0561 – для образцов из материала E-glass; (2.7)

y_3 = –3E-05x^4 + 0,0006x^3 – 0,0034x^2 + 0,0057x + 0,0541 – для образцов из материала ABSflex; (2.8)

$y_3 = -3E\text{-}05x^4 + 0{,}0005x^3 - 0{,}0028x^2 + 0{,}0035x + 0{,}0487$ – для образцов из материала НТМ-140; (2.9)

где, y_3– отклонения от плоскостности поверхности № 2 к № 1;

x – угол выращивания образцов, от 0˚ до 12˚.

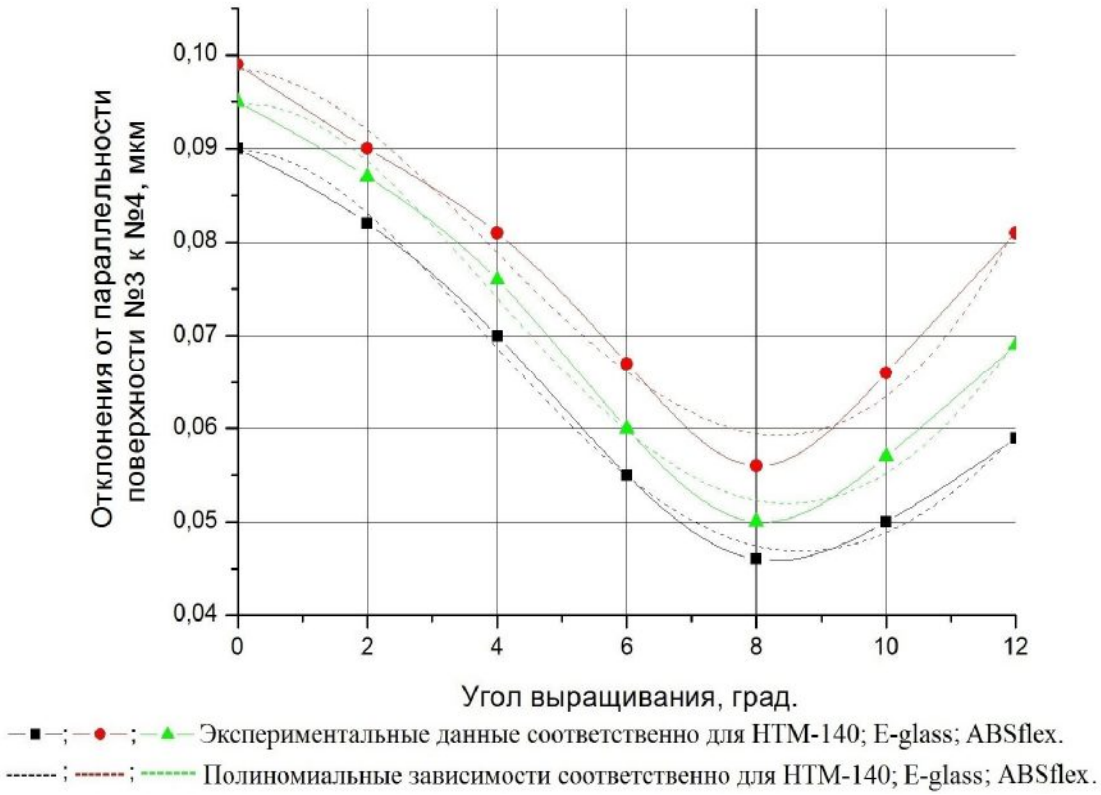


Рис. 2.13. Зависимость отклонения от параллельности поверхности № 3 к № 4 от угла выращивания образцов

$y_4 = -0{,}0002x^4 + 0{,}003x^3 - 0{,}0187x^2 + 0{,}0314x + 0{,}786$ – для образцов из материала E-glass; (2.10)

$y_4 = 0{,}0002x^4 - 0{,}0025x^3 + 0{,}0095x^2 - 0{,}0201x + 0{,}1114$ – для образцов из материала ABSflex; (2.11)

$y_4 = -0{,}0001x^4 + 0{,}0023x^3 - 0{,}0128x^2 + 0{,}016x + 0{,}0774$ – для образцов из материала НТМ-140; (2.12)

где, y_4 – отклонения от параллельности поверхности № 3 к № 4;

x – угол выращивания образцов, от 0˚ до 12˚.

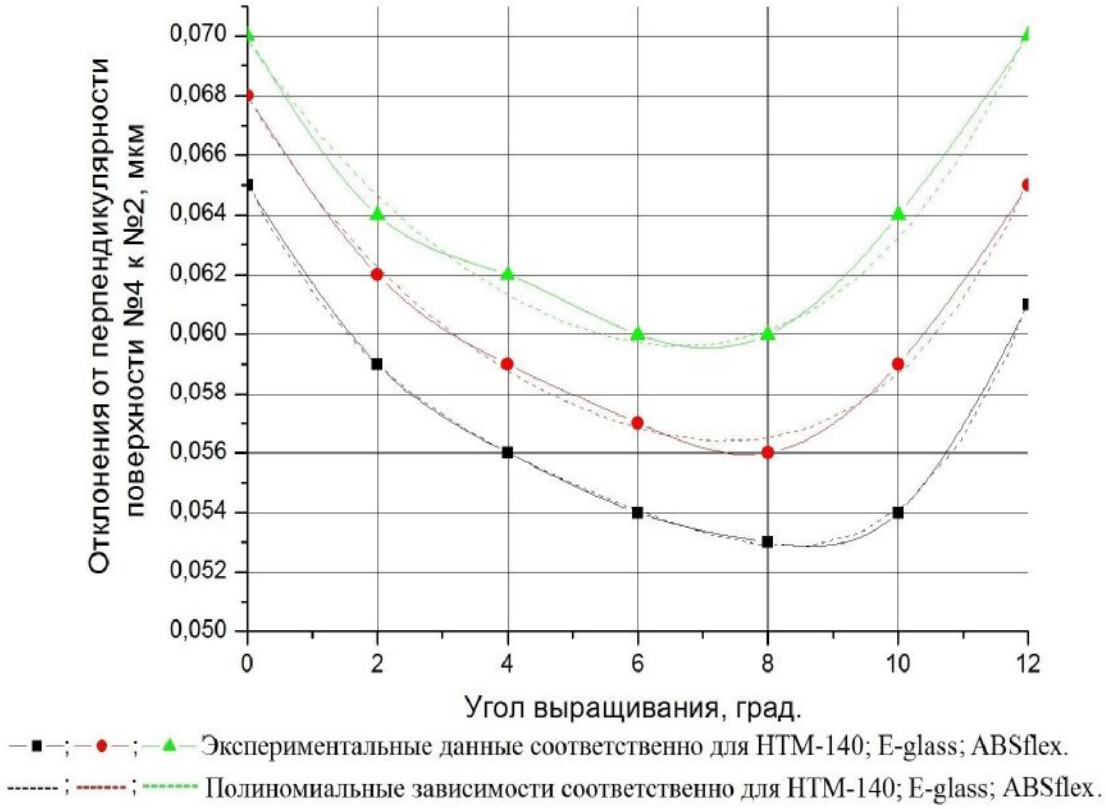


Рис. 2.14. Зависимость отклонения от перпендикулярности поверхности № 4 к № 2 от угла выращивания образцов

y_5 = 8E-06x^4 – 0,0002x^3 + 0,001x^2 – 0,0046x + 0,0674 – для образцов из материала E-glass; (2.13)

y_5 = –1E-05x^4 + 0,0003x^3 – 0,0029x^2 + 0,0054x + 0,0996 – для образцов из материала ABSflex; (2.14)

y_5 = – 2E-06x^4 + 1E-04x^3 – 0,0012x^2 + 0,0021x + 0,0544 – для образцов из материала НТМ-140; (2.15)

где, y_5 – отклонения от перпендикулярности поверхности № 4 к № 2;

x – угол выращивания образцов, от 0˚ до 12˚.

Приведя уравнения, выведенные эмпирическим путем, к единой системе полиномов, получили математический аппарат, позволяющий прогнозировать точностные характеристики изделия в зависимости от угла выращивания α.

Система уравнений для определения точностных характеристик партии образцов, изготовленных из материала E-glass:

$$\begin{cases} y_1 = 2E-06x^4 - 3E-05x^3 + 0{,}0001x^2 - 0{,}0024x + 0{,}0529 \\ y_2 = 5E-07x^4 + 2E-05x^3 - 0{,}0003x^2 - 0{,}0019x + 0{,}0559 \\ y_3 = 4E-06x^4 + 2E-05x^3 - 0{,}0003x^2 - 0{,}001x + 0{,}0561 \\ y_4 = -0{,}0002x^4 + 0{,}003x^3 - 0{,}0187x^2 + 0{,}0314x + 0{,}786 \\ y_5 = 8E-06x^4 - 0{,}0002x^3 + 0{,}001x^2 - 0{,}0046x + 0{,}0674 \end{cases} \quad (2.16)$$

Система уравнений для определения точностных характеристик партии образцов, изготовленных из материала ABSflex:

$$\begin{cases} y_1 = 7E-07x^4 + 7E-06x^3 - 9E-05x^2 - 0{,}0021x + 0{,}0479 \\ y_2 = -2E-18x^4 + 4E-05x^3 - 0{,}0005x^2 - 0{,}0016x + 0{,}0519 \\ y_3 = -3E-05x^4 + 0{,}0006x^3 - 0{,}0034x^2 + 0{,}0057x + 0{,}0541 \\ y_4 = 0{,}0002x^4 - 0{,}0025x^3 + 0{,}0095x^2 - 0{,}0201x + 0{,}1114 \\ y_5 = -1E-05x^4 + 0{,}0003x^3 - 0{,}0029x^2 + 0{,}0054x + 0{,}0996 \end{cases} \quad (2.17)$$

Система уравнений для определения точностных характеристик партии образцов, изготовленных из материала HTM-140:

$$\begin{cases} y_1 = 1E-06x^4 - 4E-06x^3 + 4E-05x^2 - 0{,}0029x + 0{,}0439 \\ y_2 = -1E-06x^4 + 8E-06x^3 - 0{,}0002x^2 - 0{,}0025x + 0{,}0479 \\ y_3 = -3E-05x^4 + 0{,}0005x^3 - 0{,}0028x^2 + 0{,}0035x + 0{,}0487 \\ y_4 = -0{,}0001x^4 + 0{,}0023x^3 - 0{,}0128x^2 + 0{,}016x + 0{,}0774 \\ y_5 = -2E-06x^4 + 1E-04x^3 - 0{,}0012x^2 + 0{,}0021x + 0{,}0544 \end{cases} \quad (2.18)$$

Проанализировав графические и полиномиальные зависимости, можно проследить, что точностные характеристики образцов из разных материалов имеют схожий характер, но все же отличаются друг от друга. Это обусловлено тем, что материалы образцов, обладают разной силой адгезионного взаимодействия между недополимеризовавшимися слоями и разным коэффициентом вязкости исходного материала. Из представленных результатов следует, что эти отличия между зависимостями точностных характеристик изделий из разных материалов минимальны, а значит, и степень влияния их тоже незначительна.

Точность сходимости графических зависимостей отклонения точности форм и взаимного расположения поверхностей, по данным программы OriginPro, составляет 93,8 %.

На основе анализа построенных графиков, а также полиноминальных зависимостей 4-й степени, можно сделать вывод, что отклонения точности форм и взаимного расположения поверхностей всех образцов, выращенных по технологии быстрого прототипирования методом 3SP, имеет единую закономерность:

– при увеличении угла выращивания от 0° до 8°, происходит заметное улучшение точности форм и взаимного расположения их поверхностей. Это можно объяснить тем, что при увеличении угла наклона к базовой поверхности уменьшается площадь засвечиваемого слоя, тем самым уменьшается объем слоя и адгезионная сдвигающая сила PSA (контактного окна);

– при углах свыше 8° происходит смещение не до конца затвердевшего слоя за счет силы тяжести, действующей на предыдущий слой, что ведет к ухудшению точности форм и взаимного расположения поверхностей.

2.2.2. Экспериментальные исследования отклонения от цилиндричности и круглости

Точность цилиндрических поверхностей готового изделия характеризуется точностью геометрических размеров, отклонениями формы, то есть от круглости, цилиндричности и отклонением профиля продольного сечения цилиндрической поверхности [20].

Отклонение от цилиндричности является комплексной величиной, учитывающей сразу два параметра: это отклонение от круглости и отклонение профиля продольного сечения [42]. Поэтому в данном исследовании акцент был сделан на исследование отклонений от цилиндричности и от круглости.

Для проведения исследования влияния толщины слоя (шага платформы z) на точностные характеристики цилиндрических поверхностей, получаемых по технологии быстрого прототипирования методом 3SP, была разработана деталь типа «втулка», эскиз которой представлен на рис. 2.15.

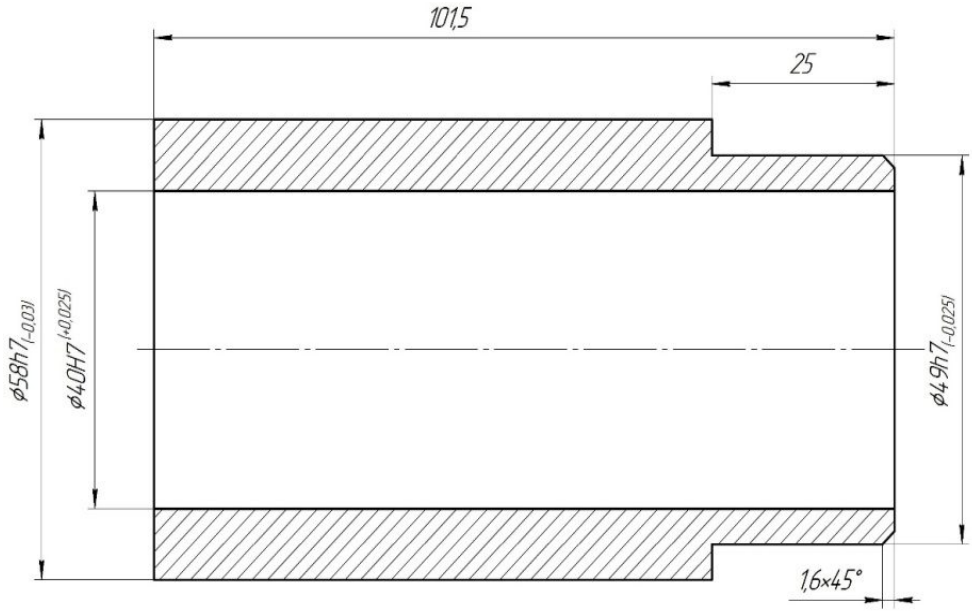


Рис. 2.15. Эскиз втулки

По эскизу втулки в среде трехмерного проектирования САПР [11, 13] была создана трехмерная компьютерная модель (рис. 2.16).

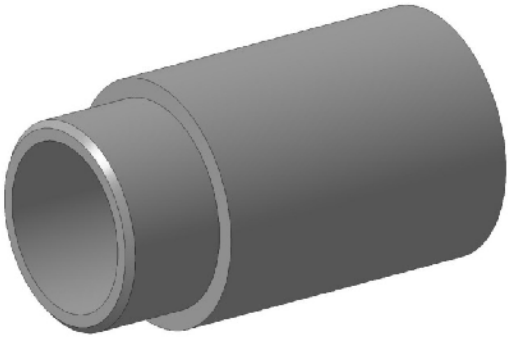


Рис. 2.16. Трехмерная модель втулки

В данном исследовании изделие размещали внутри рабочей камеры установки, с использование угла выращивания α, который был определен ранее. То есть ось вращения цилиндра располагалась под углом 82˚ к поверхности стола, тогда угол выращивания между торцевой поверхностью цилиндра и столом составлял α = 8˚. На рисунке 2.17 показано размещение

изготавливаемого образца с поддерживающими конструкциями внутри виртуальной рабочей камеры установки с выставленным углом выращивания.

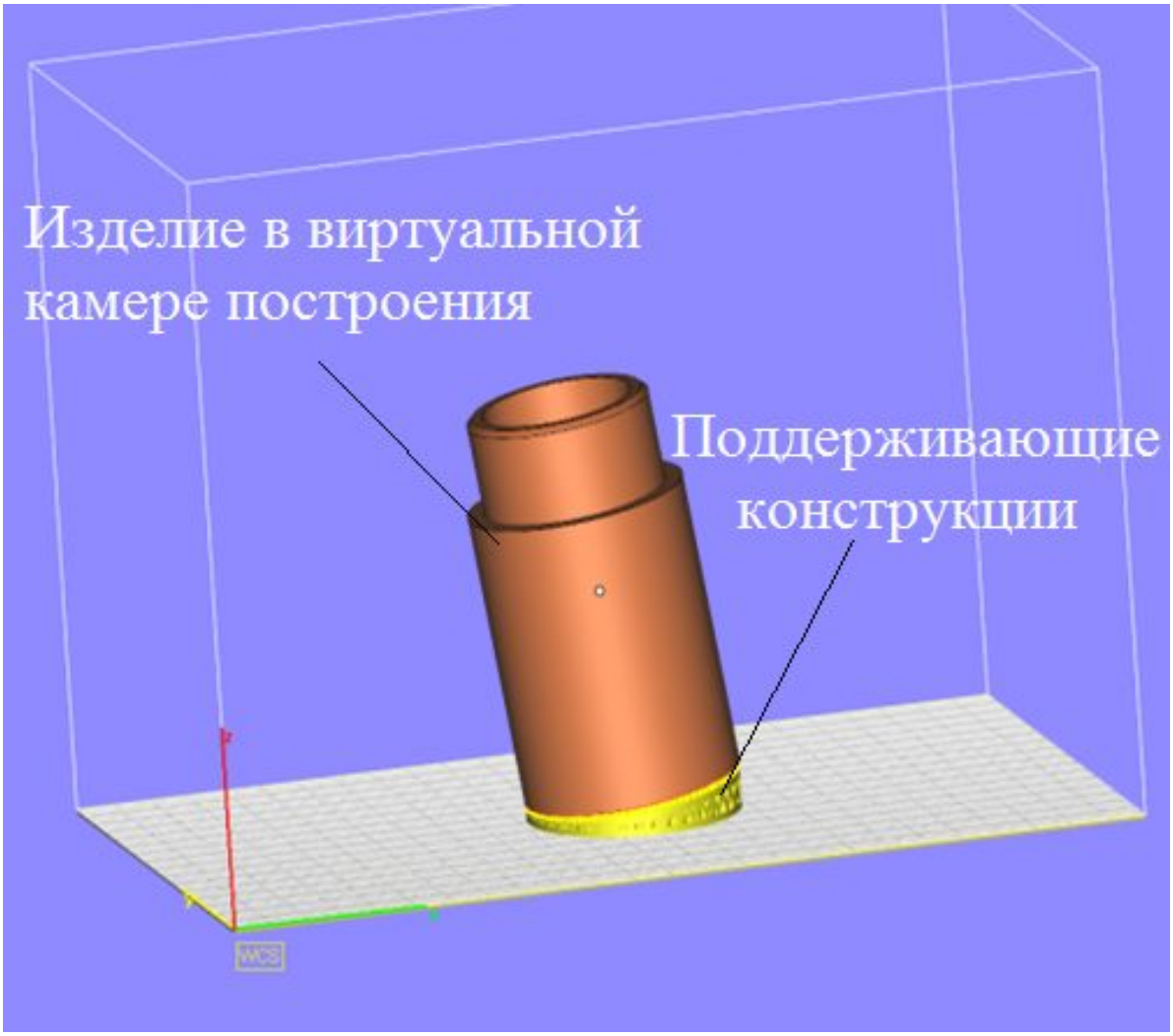


Рис. 2.17. Компьютерное размещение втулки в рабочей части установки

Была изготовлена партия втулок из материала HTM-140 на 3D-принтере EnvisionTec Ultra 3. Каждая партия состояла из 5 деталей [36, 37, 38], которая отличалась друг от друга толщиной слоя от 25 до 100 мкм с шагом 25 мкм. После изготовления без дополнительной механической обработки втулки были исследованы отклонения от цилиндричности и от круглости, с использованием координатно-измерительной машины Metris LKV. На рисунке 2.18 показан ход измерение одной втулки.

Рис. 2.18.Измеряемый образец, установленный на измерительную плиту координатно-измерительной машины Metris LK V

Для определения отклонения от круглости применялся метод поперечных сечений (рис. 2.19) с использованием специального пакета программ, поставляемого вместе с координатно-измерительной машиной Metris LKV.

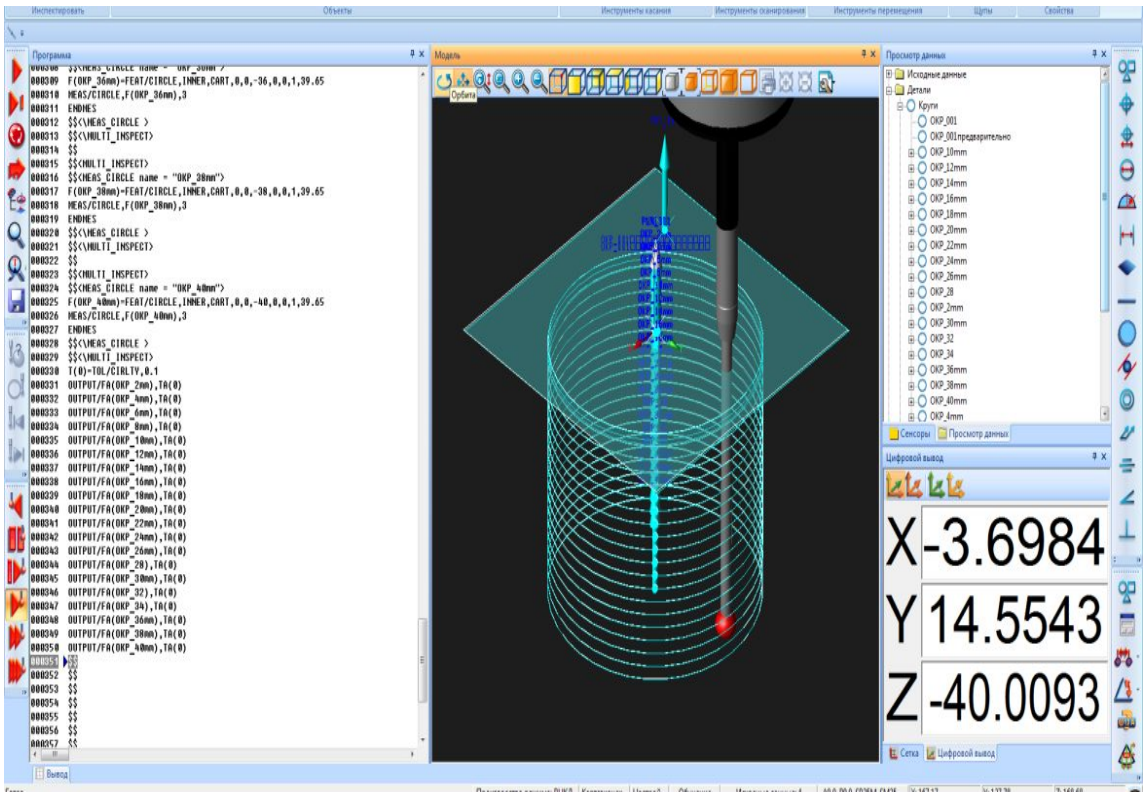


Рис. 2.19. Интерфейс программы CAMIO, используемой для обработки полученных данных с координатно-измерительной машины Metris LKV

Суть метода состоит в том, что втулки устанавливается так, чтобы ее ось совпадала и была параллельна оси вращения КИМ. После этого поверхность втулки измеряют в нескольких поперечных сечениях от общей базовой оси, в том числе в начале и конце нормируемого участка. Измеренные профили записываются на одной общей диаграмме, и на ней проводится прилегающая окружность. Наибольшее расстояние от точек профилограммы до прилегающей окружности и есть отклонение от круглости [25].

Для определения отклонения от цилиндричности применялся метод поперечных сечений, а также метод образующих.

Метод образующих представляет собой измерения в нескольких продольных сечениях. Измеренные профили записываются на одной и той же линейной профилограмме, и на ней строится прилегающий профиль продольного сечения, общий по отношению ко всем профилограммам образующих.

При измерениях были получены значения отклонений для двух основных точностных параметров цилиндрических поверхностей, которые представлены в табл. 2.3.

2.3. Результаты измерений отклонений точностных характеристик

№ партии	Толщина слоя z, мкм	Отклонение от цилиндричности, мм	Отклонение от круглости, мм
1	2	3	4
1	25	0,038	0,016
2	50	0,046	0,029
3	75	0,051	0,035
4	100	0,060	0,047

По полученным данным были построены графические зависимости точностных характеристик от толщины слоя (рис. 2.20).

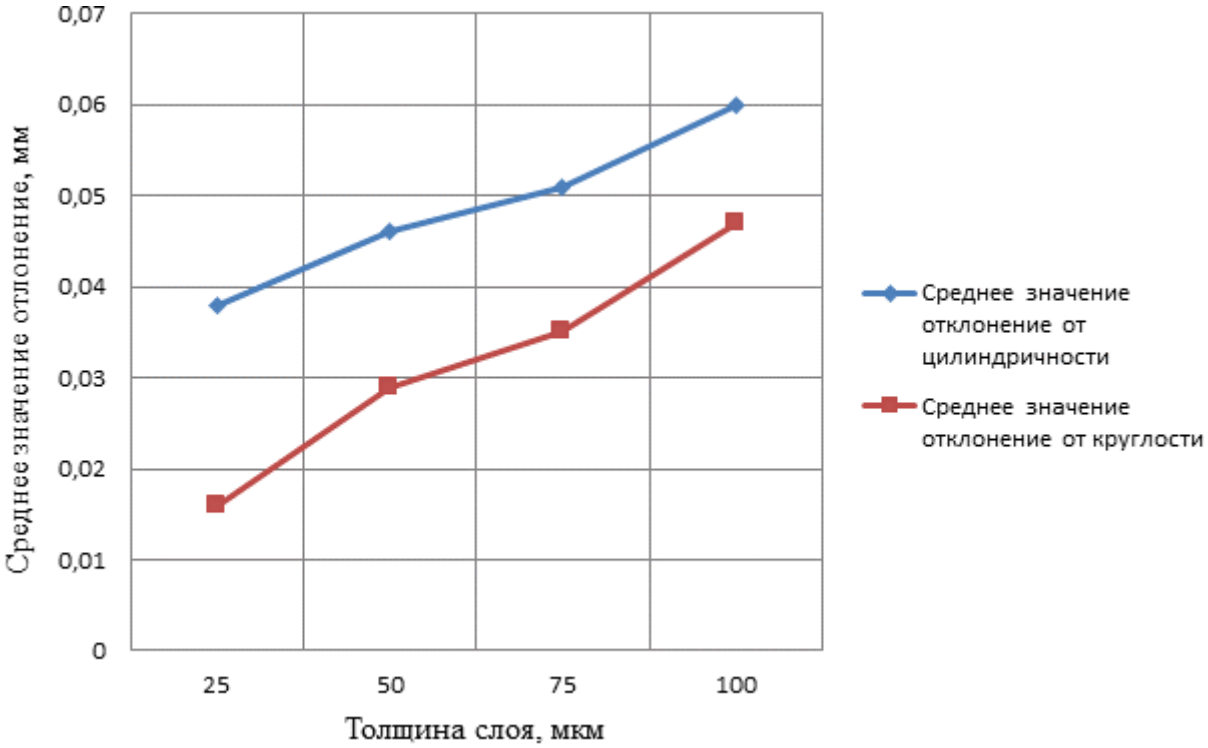
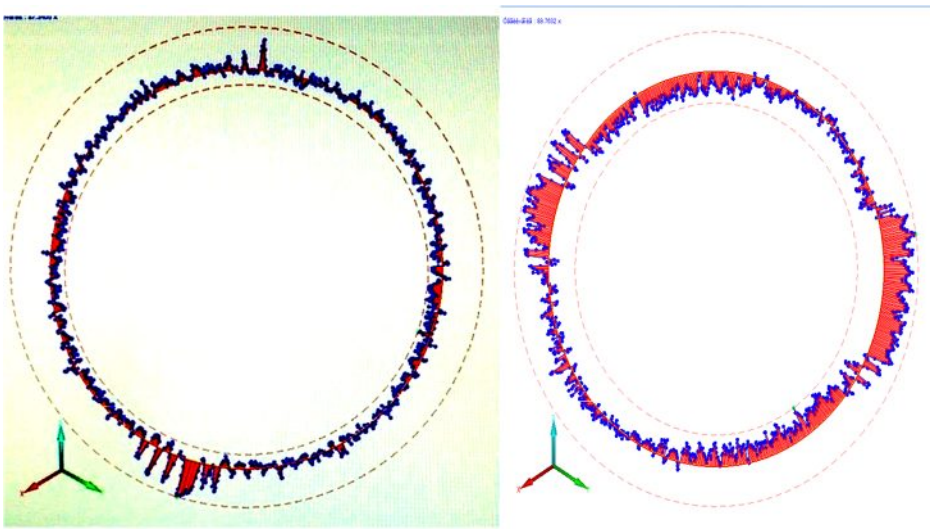


Рис. 2.20. Графики зависимости точностных характеристик от толщины слоя

На рис. 2.21 показана круглограмма отклонения от круглости цилиндрической поверхности втулок диаметром 58 мм, выращенных с толщиной слоя в 25 мкм и 100 мкм соответственно. В данном случае круглограмма измеренной поверхности строилась по 500 точкам. Измерения поперечных сечений повторялись через каждые 2 мм.



а) *б)*

Рис. 2.21. Круглограммы цилиндрических поверхностей исследуемых втулок: *а* – выращенные при толщине слоя 25 мкм; *б*– выращенные при толщине слоя 100 мкм

Проведя анализ полученных данных, можно сделать вывод, что погрешности формообразования не зависят от сложности геометрии изделия, а важным технологическим параметром, влияющим на точностные характеристики, является толщина слоя *z*.

2.3. Оценка шероховатости поверхности исследуемых образцов, изготовленных методом 3SP RP-технологии. Результаты измерений

Для измерения шероховатости были выбраны пластины (150x10x3 мм), как и в предыдущем параграфе.

Среднее арифметическое отклонение профиля измеряемых образцов *Ra* и других параметров шероховатости определяли с помощью профилометра TR110, который обеспечивает высокую точность показаний в широком диапазоне измерений.

Было изготовлено 4 партии исследуемых образцов, на установке Ultra 3 фирмы EnvisionTec, по 7 штук в каждой. Каждая партия отличалась углом выращивания между исследуемой базовой поверхностью и «контактным

окном», который варьировался от 0˚ до 12˚ с шагом в 2˚, а также варьировалась и толщина слоя от 25 до 100 мкм с шагом 25 мкм. Образцы были изготовлены из материала: E-glass, HTM-140, ABSflex.

Результаты измеренной шероховатости с помощью профилометра TR110 представлены в приложении № 2.

На основании полученных данных были построены графики зависимости среднего арифметического отклонения (*Ra*) профиля поверхности от угла выращивания образца к базовой поверхности рабочего стола.

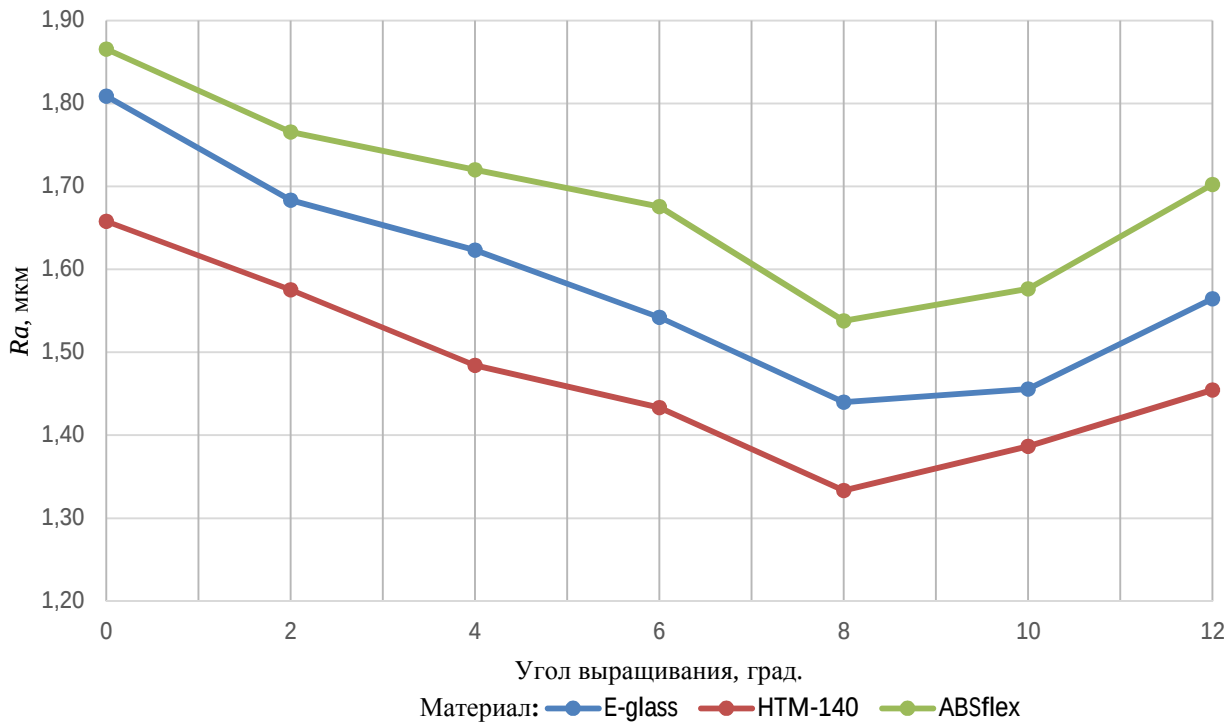


Рис. 2.22. График зависимости *Ra* от угла выращивания при толщине слоя *z* = 25 мкм

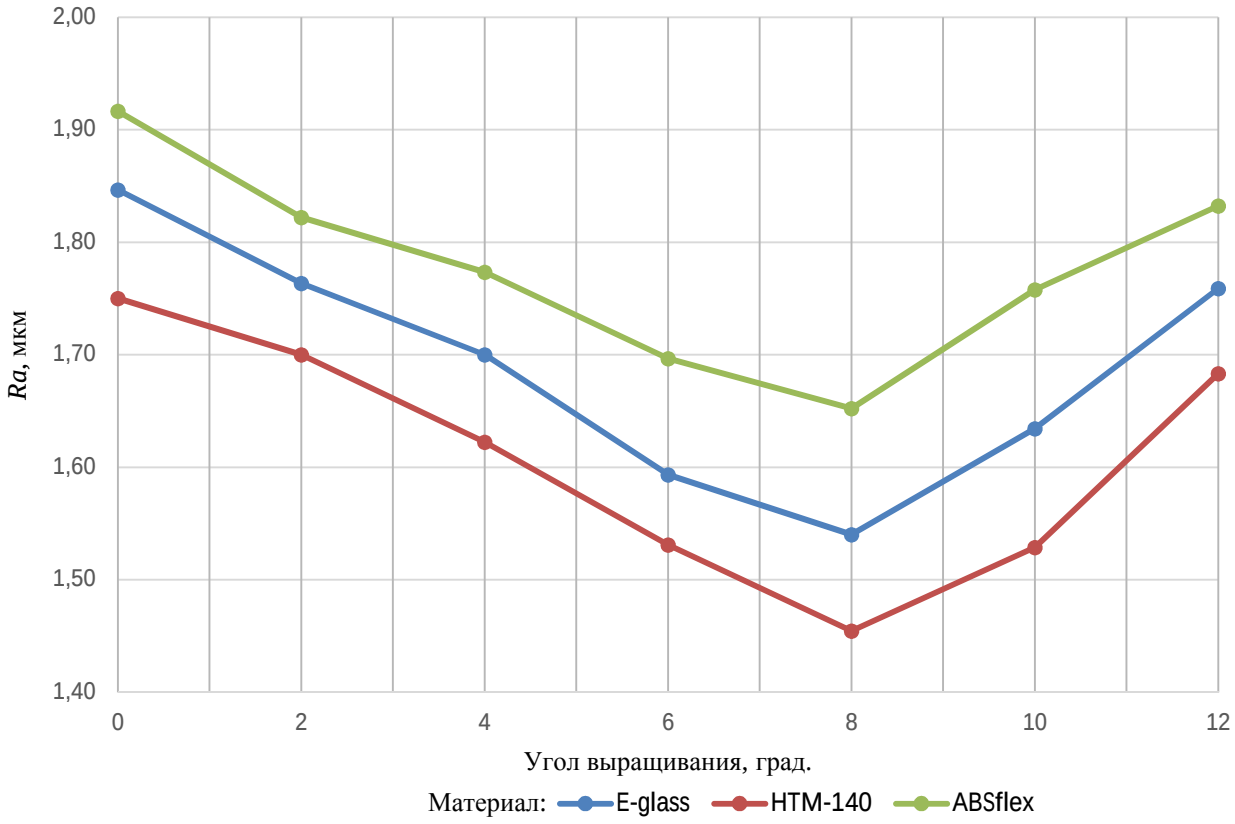


Рис. 2.23. График зависимости *Ra* от угла выращивания при толщине слоя *z* = 50 мкм

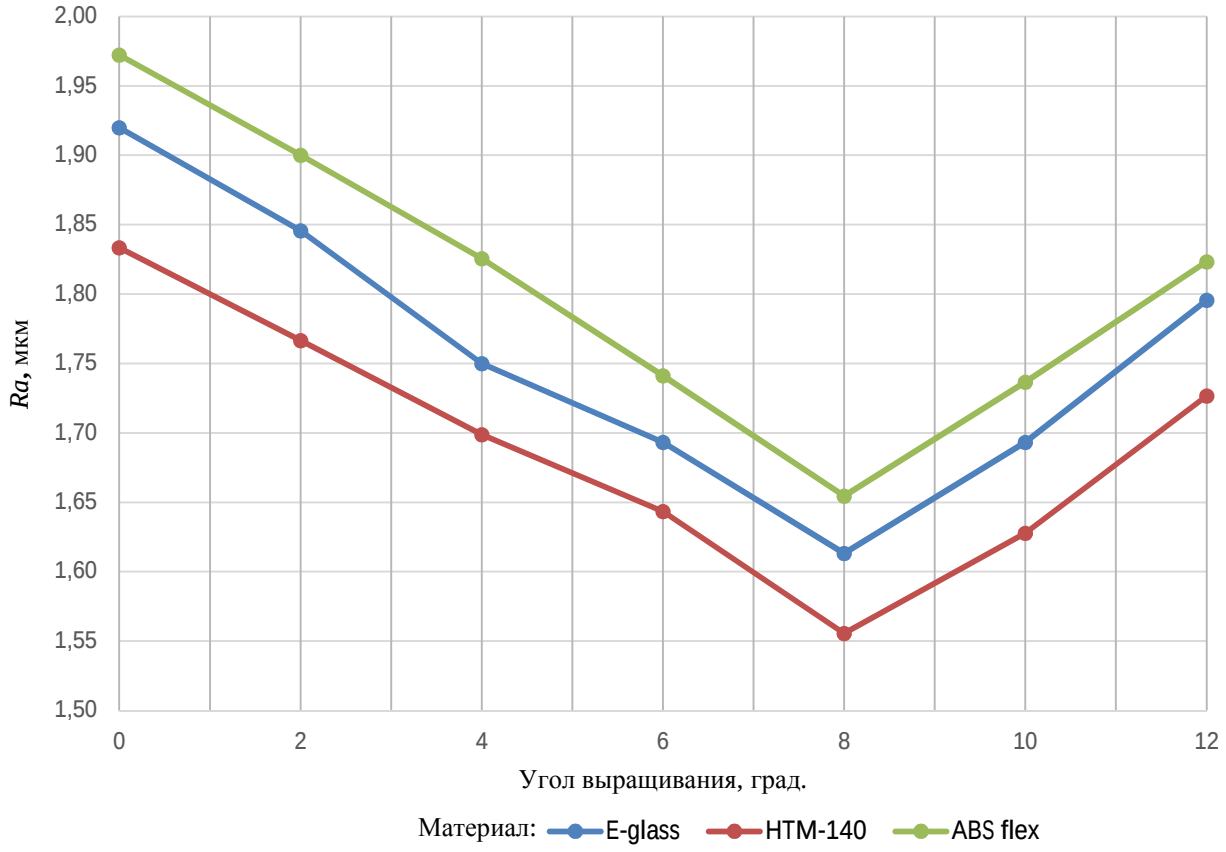


Рис. 2.24. График зависимости *Ra* от угла выращивания при толщине слоя *z* = 75 мкм

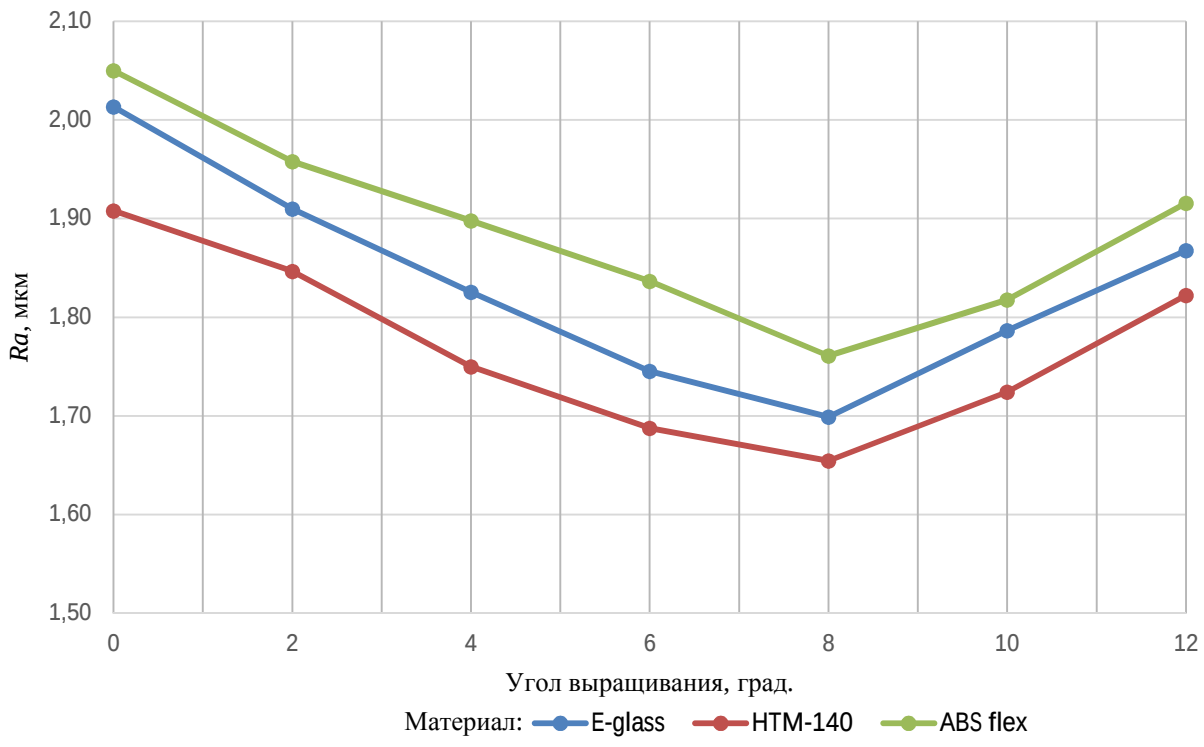


Рис. 2.25. График зависимости *Ra* от угла выращивания при толщине слоя *z* = 100 мкм

Из анализа графиков, представленных на рисунках 2.22-2.25 можно сделать вывод, что при изготовлении образцов, варьируя технологическими параметрами процесса прототипирования, а именно толщиной слоя *z* и углом выращивания *α*, происходит заметное улучшение параметров шероховатости изделия. При уменьшении толщины наращиваемого слоя, а также при увеличении угла выращивания от 0˚ до 8˚, не происходит сдвига еще не до конца затвердевшего слоя, а при минимальной толщине слоя *z* = 25 мкм происходит полная полимеризация на всю глубину изделия.

По полученным результатам был сделан вывод, что поверхность исследуемых образцов является сильно пересеченной. Одной из причин такого эффекта может быть тефлоновая пленка, от которой отлипают образцы.

2.4. Исследование шаговых параметров шероховатости поверхности образцов, изготовленных методом 3SP RP-технологии

Для определения шаговых параметров шероховатости поверхности изделия был использован сканирующий зондовый микроскоп фирмы SolverPro, работающий в режиме атомно-силовой микроскопии.

Атомно-силовая микроскопия (АСМ) – один из мощных современных методов исследования морфологии поверхности и локальных свойств поверхности с высоким пространственным разрешением. Метод открыл широкие возможности для комплексного изучения морфологии и различных характеристик поверхности [58].

Использование метода АСМ позволило провести более глубокие и точные исследования шероховатости исследуемых образцов. В качестве основного инструмента для изучения микрорельефа поверхности использовался сканирующий зондовый микроскоп SolverPro (рис. 2.26), который позволяет производить измерения в режиме атомно-силового микроскопа на воздухе.

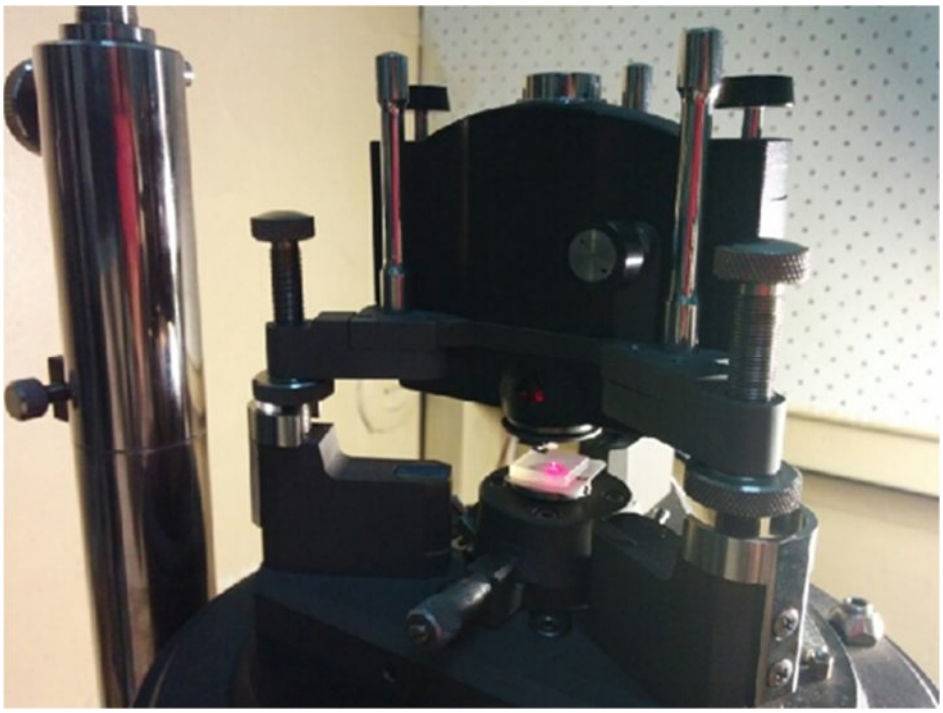


Рис. 2.26. Сканирующий зондовый микроскоп «SolverPro» с установленным в нем исследуемым образцом

Сканирующий зондовый микроскоп SolverPro в конфигурации для АСМ включает следующие основные системы и блоки:

1. Блок подвода и сканирования.
2. Система видеонаблюдения.
3. Система виброизоляции.
4. Сканирующая измерительная головка для работы в жидкости.

5. Бипотенциостат.

6. Электрохимическая ячейка.

7. Предусилитель.

При анализе результатов полученных с помощью АСМ был выявлен и объяснен механизм формирования шероховатости образцов, изготовленных методом 3SP быстрого прототипирования.

На рисунке 2.27 изображена трехмерная компьютерная модель базирования пластины под углом выращивания $\alpha = 8^{\circ}$ в виртуальной рабочей камере установки.

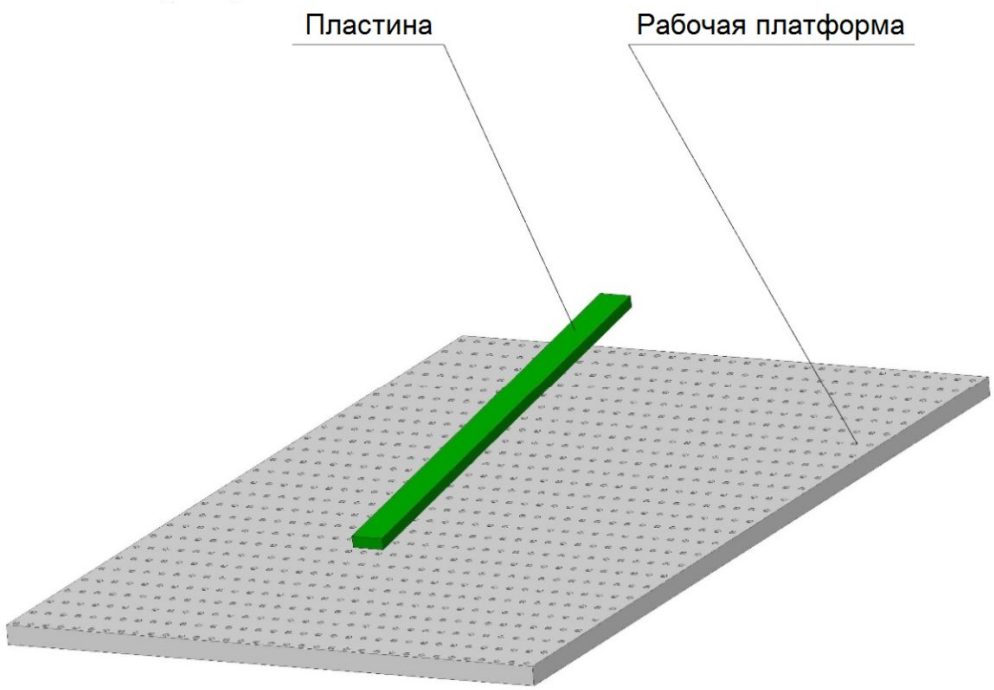
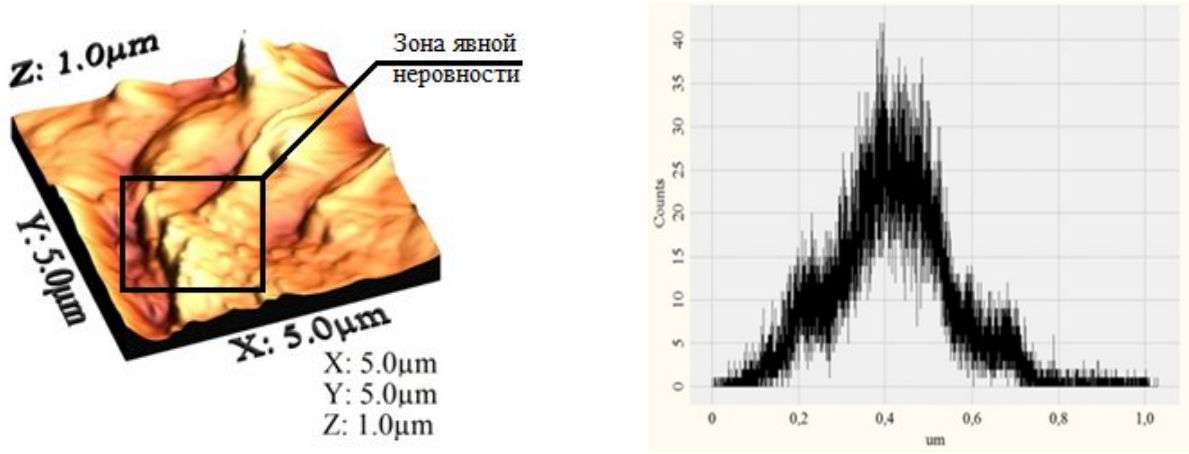


Рис. 2.27. Трехмерная модель изделия

Образцами для исследования шаговых параметров шероховатости поверхности были выбраны пластины размером 10x10x3 мм, а исследуемая поверхность – плоскость 10x10 мм. Партия образцов состояла из 7 пластин, каждая из которых отличалась углом выращивания, который варьировался от 0° до 12° с шагом в 2°.

Результаты, полученные при помощи зондового микроскопа, обрабатывались с применением программного обеспечения NOVA SolverPro, в результате чего был получен трёхмерный рельеф поверхности и значения шаговых параметров образцов.

Результаты исследований каждой партии образцов представлены на рис. 2.28–2.34.



а) *б)*

Рис. 2.28. Микрорельеф образца, выращенный под углом наклона 0° к базовой поверхности

Sy – размах высот (peak to peak value, ISO 4287/1), мкм. Определяется как сумма высот наибольшего выступа и наибольшей впадины. Параметр *Sy* нужен для общей оценки степени пересеченности рельефа изделия.

Sa – средняя шероховатость (average roughness, ISO 4287/1), мкм.

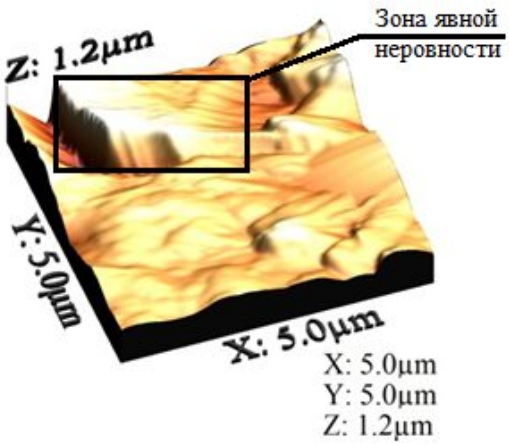
Параметр *Sa* определяет шероховатость поверхности в виде двумерного среднего значения (т.е. первого начального момента) и центр распределения.

На изображениях микрорельефа исследуемых образцов видно, что их поверхность не является совершенно плоской, на ней имеются «зоны явных неровностей» различного масштаба. Это говорит о неравномерности микрорельефа. Зоны представляют собой области с выступами и впадинами и явно выделяются на фоне остального рельефа поверхности.

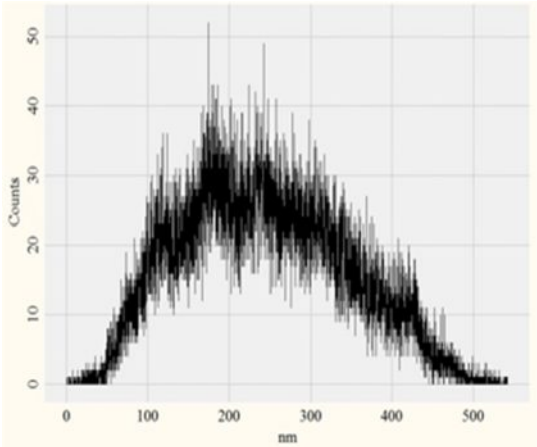
Площадь сканирования составляла 5×5 мкм, при таком разрешении заметны достаточно крупные фрагменты микрорельефа.

На рисунке 2.28, *а* изображен микрорельеф исследуемого образца, выращенный под углом α = 0˚ к базовой поверхности рабочего стола. За счет высокого разрешения полученных изображений зона явной неровности у данного образца находится ближе к краю исследуемой зоны и при детальном рассмотрении представляет собой цепь округлых возвышенностей.

На рисунке 2.28, *б* изображена гистограмма размеров неровностей в плоскости X–У исследуемой пластины. Гистограмма представляет собой результат наложения функции распределения микронеровностей поверхности, имеющей различные размеры. Размеры максимума на гистограмме показывают максимальное количество неровностей, соответствующих данному размеру. На гистограмме видно, что неровности в основном лежат в пределах от 0,2 до 0,3 мкм.



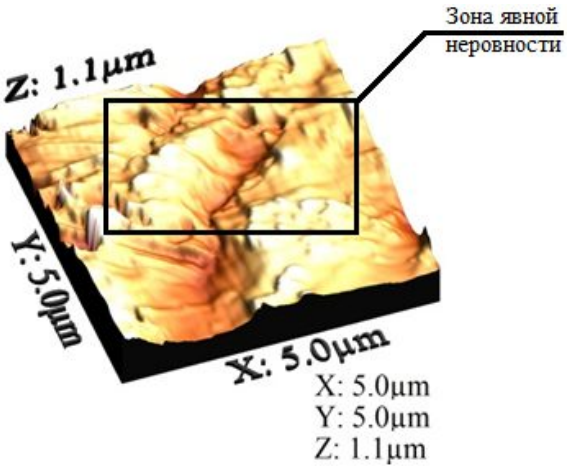
а)

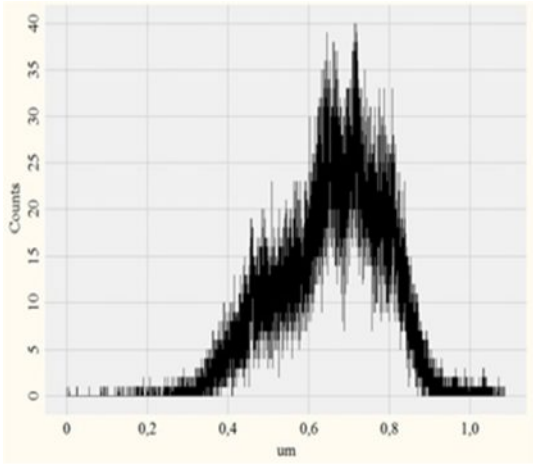


б)

Рис. 2.29. Микрорельеф образца, выращенный под углом наклона 2˚ к базовой поверхности

На рисунке 2.29, *а* изображен микрорельеф исследуемого образца, выращенный под углом α = 2˚ к базовой поверхности рабочего стола. Зона явной неровности у данного образца находится ближе к верхнему краю. Гистограмма образца дает понять, что значение распределения неровностей лежит в пределах от 0,1 до 0,35 мкм.

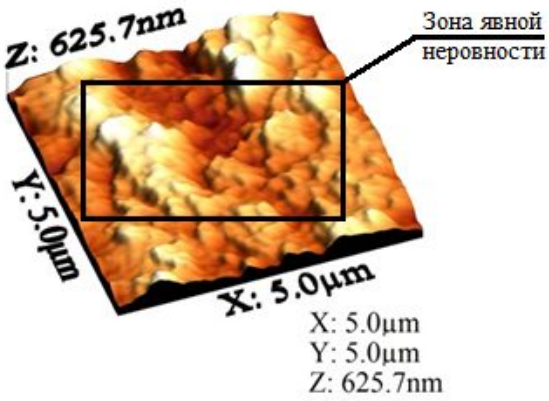


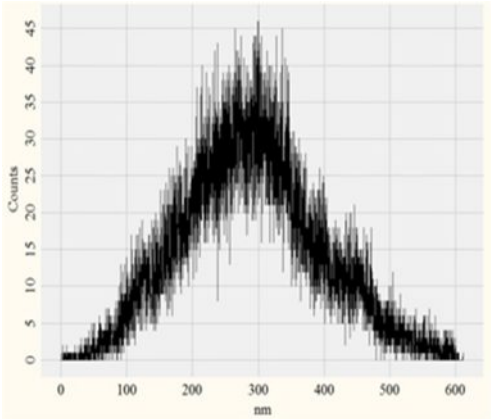


а) *б)*

Рис. 2.30. Микрорельеф образца, выращенный под углом наклона 4° к базовой поверхности

На рисунке 2.30, *а* изображен микрорельеф исследуемого образца, выращенный под углом α = 4° к базовой поверхности рабочего стола. Зона явной неровности у данного образца находится ближе к середине исследуемой зоны. Гистограмма образца дает понять, что значение распределения неровностей числа неровностей лежит в пределах от 0,4 до 0,8 мкм.

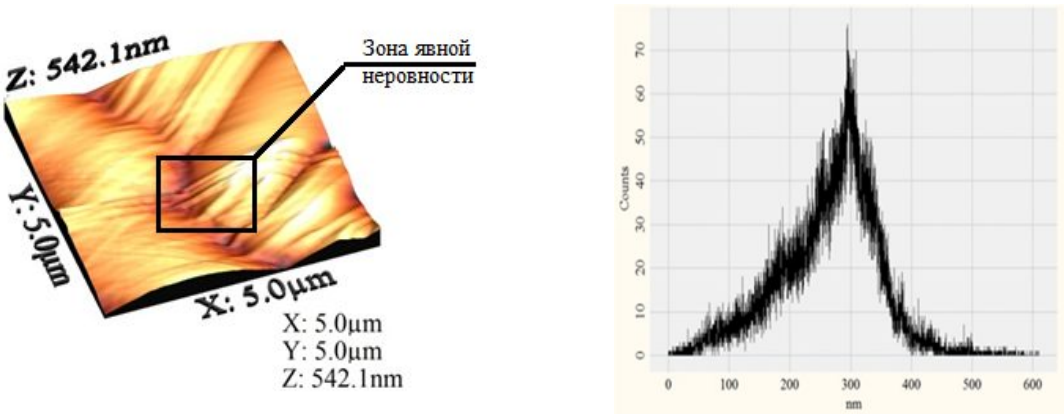




а) *б)*

Рис. 2.31. Микрорельеф образца, выращенный под углом наклона 6° к базовой поверхности

На рисунке 2.31, *а* изображен микрорельеф исследуемого образца, выращенный под углом α = 6˚ к базовой поверхности рабочего стола. Зона явной неровности у данного образца находится ближе к середине исследуемой зоны и представляет собой вытянутые неровности преимущественно в одном направлении. Гистограмма образца дает понять, что значение распределения неровностей лежит в пределах от 0,15 до 0,4 мкм.

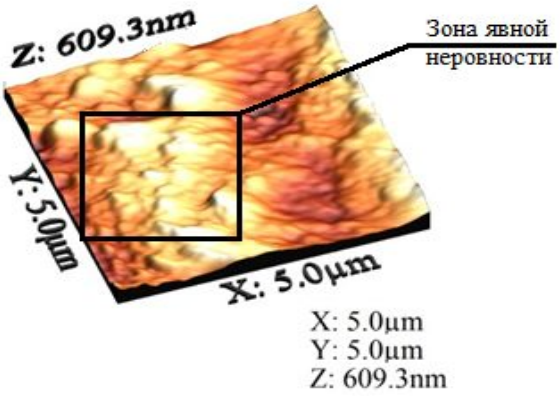


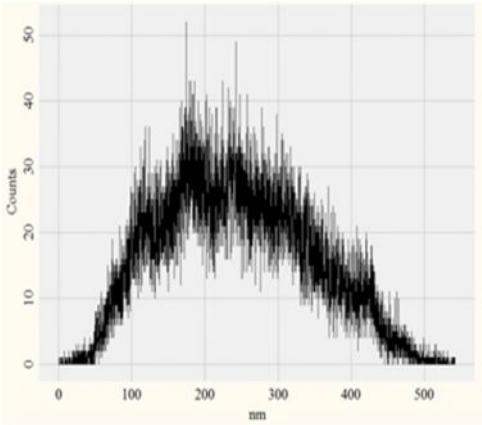
а) *б)*

Рис. 2.32. Микрорельеф образца, выращенный под углом наклона 8˚ к базовой поверхности

На рисунке 2.32, *а* изображен микрорельеф исследуемого образца, выращенный под углом α = 8˚ к базовой поверхности рабочего стола. Зона явной неровности у данного образца находится ближе к середине исследуемой зоны, и неровность в отличие от предыдущих образцов характеризуется впадиной. Значения шаговых параметров шероховатости образца является, минимальны по сравнению с остальными образцами. Гистограмма распределения микронеровностей по поверхности образца носит более нормальный характер, также называемый распределением Гаусса.

Гистограмма образца дает понять, что значение распределения неровностей лежит в пределах от 0,2 до 0,35 мкм.

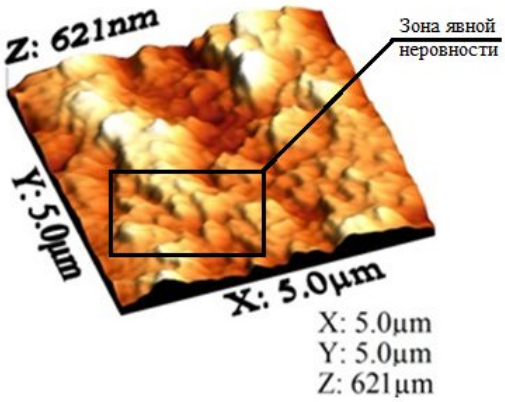


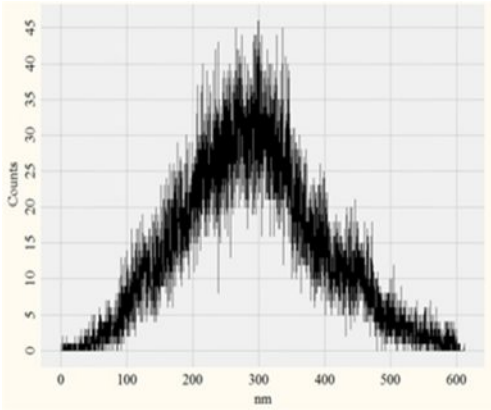


а) *б)*

Рис. 2.33. Микрорельеф образца, выращенный под углом наклона 10° к базовой поверхности

На рисунке 2.33, *а* изображен микрорельеф исследуемого образца, выращенный под углом α = 10° к базовой поверхности рабочего стола. Зона явной неровности у данного образца находится ближе к краю исследуемой зоны. Гистограмма данного образца дает понять, что значение большего числа неровностей лежит в пределах от 0,095 до 0,350 мкм, примерно так же, как и у образца под № 2. Далее средняя шероховатость образцов пошла на увеличение.





а) *б)*

Рис. 2.34. Микрорельеф образца, выращенный под углом наклона 12° к базовой поверхности

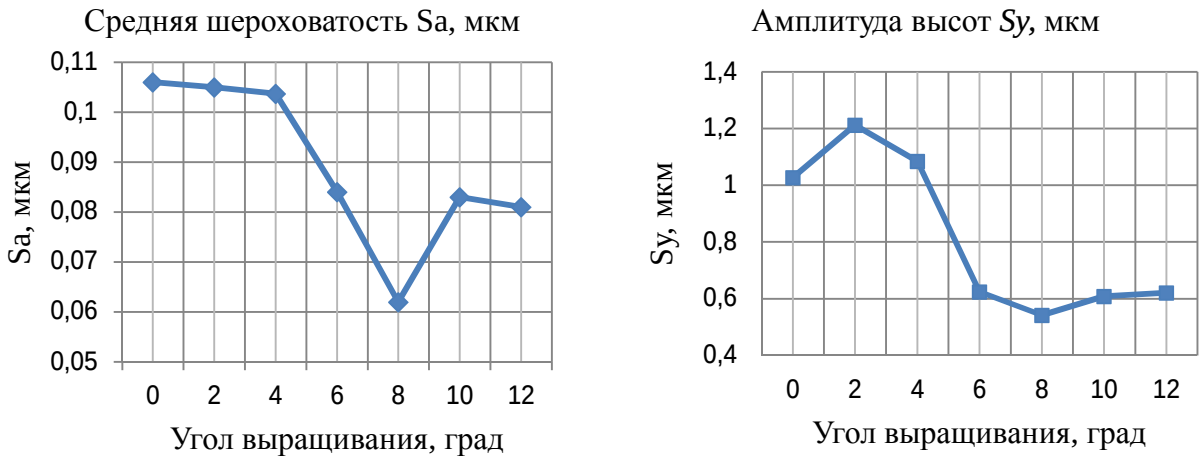
На рисунке 2.34, *а* изображен микрорельеф исследуемого образца, выращенный под углом α = 12˚ к базовой поверхности рабочего стола. Зона явной неровности у данного образца находится ближе к середине исследуемой зоны. Гистограмма данного образца дает понять, что значение большего числа неровностей лежит в пределах от 0,12 до 0,4 мкм.

С помощью зондовой микроскопии был получен не только микрорельеф поверхности исследуемых образцов, но и значения шаговых параметров шероховатости. Результаты были сведены в табл. 2.4.

2.4. Сводная таблица, измеренных значения шаговых параметров шероховатости

№ образца	Угол выращивания *α*, град.	Средняя шероховатость *Sa*, мкм	Амплитуда высот *Sy*, мкм
1	0	0,106	1,028
2	2	0,105	1,213
3	4	0,1037	1,085
4	6	0,084	0,625
5	8	0,062	0,542
6	10	0,083	0,609
7	12	0,081	0,621

На основании полученных данных были построены графики зависимости шаговых параметров шероховатости (рис. 2.35) профиля поверхности от угла выращивания образца к базовой поверхности рабочего стола.



а) *б)*

Рис 2.35. Графики зависимости шаговых параметров шероховатости

С помощью атомно-силовой микроскопии получилось объяснить формирование шероховатости на поверхности изготавливаемых образцов по технологии быстрого прототипирования методом 3SP.

На всех изображениях отчетливо видны зоны неровностей, есть основание полагать, что данная структура рельефа формируется в связи с тем, что одним из главных рабочих механизмов установки наряду с лазером является так называемое PSA (контактное окно). Контактное окно – это стеклянная рамка, обтянутая политетрафторэтиленовой (тефлоновой) пленкой, через которую лазер засвечивает слой фотополимера выращиваемого изделия. В результате межмолекулярного взаимодействия между тефлоновой пленкой и жидким фотополимером, обладающим низким свойством поверхностного натяжения, в процессе разделения поверхностей «отлипания» от контактного окна формируется профиль поверхности исследуемых образцов. Профиль изделия повторяет рельеф тефлоновой пленки, что отрицательно сказывается на шероховатости готового изделия. Размеры неровностей, исследуемых образцов определяются дефектом (наличием пор) тефлоновой пленки.

Как видно на первом изображении, при выращивании изделия с углом наклона в $\alpha = 0^{\circ}$ шероховатость изделия значительно хуже, чем на остальных

образцах. Это можно объяснить тем, что, например, на пятом изображении при выращивании изделия при угле α = 8˚ площадь наращиваемого слоя меньше, чем при угле α = 0˚, и в процессе отлипания от контактного окна воздействие следующего слоя минимально на предыдущий слой, который еще до конца не заполимеризовался. При угле наклона базовой поверхности более α = 8° отрицательное воздействие оказывает сила тяжести слоя, которая стремится привезти к сдвигу еще не затвердевшего слоя фотополимера.

2.5. Выводы

1. Доказано, что важнейшим технологическим параметром процесса прототипирования, влияющим на формообразование методом 3SP RP-технологии, является угол выращивания α.

2. Доказано, что еще одним важнейшим технологическим параметром процесса прототипирования, влияющим на параметры шероховатости на формообразование методом 3SP RP-технологии, является толщина слоя *z*.

3. Установлено, что при парном взаимодействие угла выращивания и толщины слоя происходит значительное улучшение показателей качества. При угле выращивания α = 8° и толщине слоя *z* =25 мкм, R<1,3.

4. Установлено, что сложность геометрии изделия не влияет на погрешности формообразования.

5. Установлено, что влияние коэффициента вязкости материала на точность изготавливаемых изделий незначительно.

ГЛАВА 3. РАЗРАБОТКА РЕГРЕСИОННОЙ МОДЕЛИ ФОРМИРОВАНИЯ ШЕРОХОВАТОСТИ ИЗДЕЛИЙ, ИЗГОТОВЛЕННЫХ ПО МЕТОДУ БЫСТРОГО ПРОТОТИПИРОВАНИЯ 3SP

3.1. Планирование и обработка результатов многофакторного эксперимента

Важнейшей задачей обработки полученных в ходе эксперимента данных является построение регрессионной модели исследуемого объекта. На сегодняшний день в экспериментальных исследованиях все чаще прибегают к использованию абстрактных моделей. Регрессионная модель напрямую связана с планированием эксперимента, при котором всегда нужно стремиться к его упрощению без потери точности и достоверности данных.

Планирование эксперимента – это процедура выбора числа и условий проведения опытов, необходимых и достаточных для решения поставленной задачи с требуемой точностью [2, 3, 33, 56, 59]. Главными задачами планирования эксперимента являются:

- поиск оптимальных условий эксперимента;
- построение интерполяционных формул;
- оценка и уточнение констант теоретических моделей;
- выбор существенных факторов из их множества;
- исследование диаграмм.

Задача поиска оптимальных условий проведения эксперимента состоит в нахождении наилучших (оптимальных) условий реализации эксперимента. Эта задача исследования наиболее распространенная.

Процедура планирования эксперимента состоит из следующих этапов:

- выбор параметра оптимизации;
- выбор математической модели;

- выбор независимых переменных факторов и интервалов их варьирования;
- построение плана эксперимента;
- реализация плана эксперимента;
- определение коэффициентов уравнения регрессии;
- оценка статической значимости коэффициентов уравнения регрессии и адекватности получаемой математической модели.

Целью планирования эксперимента служит нахождение условий и режимов проведения экспериментальных исследований, при которых удается получить адекватные и достоверные данные об объекте исследования.

3.2. Разработка регрессионной модели формирования шероховатости поверхности изделия по методу быстрого прототипирования 3SP

Уравнение зависимости параметра шероховатости *Ra* поверхности от исходных технологических параметров процесса прототипирования для изделий, изготовленных по методу 3SP RP-технологии:

$$R_a = C_{Ra} \times a^{x_{Ra}} \times z^{y_{Ra}} , \qquad (3.1)$$

где, R_a – среднее арифметическое отклонение профиля, мкм;

C_{Ra} – постоянный коэффициент;

$a^{x_{Ra}}$ – угол выращивания, град.;

$z^{y_{Ra}}$ – шаг перемещения рабочей платформы, мкм.

Далее уравнение зависимости *Ra* от исходных технологических параметров процесса прототипирования логарифмируем и получаем выражение вида:

$$\ln Ra = \ln C_{Ra} + x_{Ra} \times \ln a + y_{Ra} \times \ln z . \qquad (3.2)$$

Преобразование независимых переменных $\tilde{x}_i$ к безразмерным переменным x_i производится через уравнение:

$$x_i = \frac{2\ln\tilde{x}_1 - \ln\tilde{x}_{i\max} - \ln\tilde{x}_{1\min}}{\ln\tilde{x}_{i\max} - \ln\tilde{x}_{i\min}}. \qquad (3.3)$$

В исследуемых образцах рассматривались два фактора (k = 2), влияющих на параметр оптимизации на двух уровнях (p = 2), тогда для определения влияния режимов формирования показателей качества изделия при прототипировании строится полный факторный эксперимент типа:

$$N = p^k = 2^2. \qquad (3.4)$$

Матрица планирования эксперимента представлена в табл. 3.1:

3.1. Матрица планирования эксперимента 2^2

Номер опыта, j	Кодированные значения факторов				Отклик
	x_0	x_1	x_2	x_{12}	y_j
1	+	+	+	+	y_1
2	+	+	+	-	y_2
3	+	+	-	-	y_3
4	+	-	-	-	y_4

Здесь x_0 – фиктивная переменная для оценки свободного коэффициента «b_0» (одинаковая во всех строчках и равная +1).

В матрице планирования эксперимента, представленной в табл. 3.1, использовались кодированные значения факторов + и – (верхний и нижний уровень):

верхний уровень $\alpha = 10^0$ (+);
нижний уровень $\alpha = 6^0$ (–);
верхний уровень z = 75 мкм (+);
нижний уровень z = 50 мкм (–).

Регрессионные модели можно построить для каждого из параметров, но одновременно оптимизировать несколько функций невозможно [2, 3, 33, 56, 59]. Обычно оптимизируется параметр, наиболее важный с точки зрения исследования. После проведения экспериментов была построена рабочая

матрица. Матрица планирования эксперимента, а также рабочая матрица представлены в табл. 3.2.

3.2. Матрица планирования эксперимента и значения выходных факторов

Номер опыта	Матрица планирования				Рабочая матрица			
	x_0	x_1	x_2	x_{12}	Угол выращивания α, град.	Шаг перемещения рабочей платформы *z*, мкм	Результаты экспериментов y_1 (R_a), мкм	Среднее значение $y_u / \bar{y}_u$ (R_a),мкм
1	+	+	+	+	10	75	1,61/1,64/1,64 1,62/1,65/1,65 1,61/1,61/1,62	1,63/0,488
2	+	+	+	–	6	75	1,65/1,65/1,62 1,62/1,67/1,65 1,65/1,62/1,66	1,64/0,494
3	+	+	–	–	10	50	1,59/1,57/1,57 1,49/1,51/1,53 1,51/1,47/1,52	1,53/0,425
4	+	+	–	+	6	50	1,52/1,51/1,51 1,58/1,54/1,58 1,54/1,5/1,5	1,53/0,425

Графическую интерпретацию полного факторного эксперимента можно представить в виде декартовой системы координат (рис. 3.1).

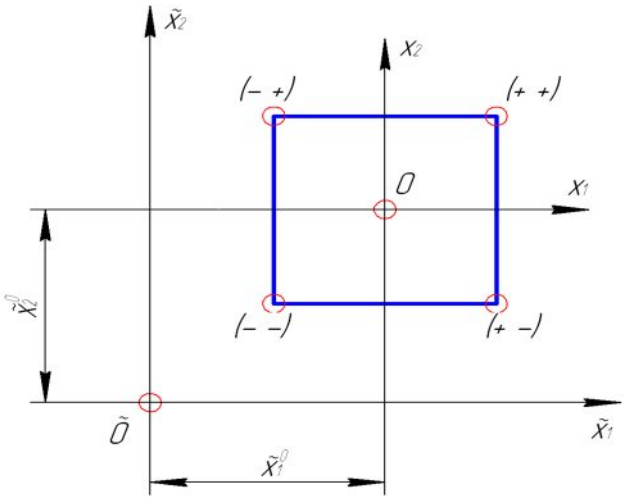


Рис. 3.1. Графическая интерпретация полного факторного эксперимента – 2^2

В соответствии с матрицей планирования эксперимента использовали четыре различных условия обработки.

Уравнение регрессии для полного факторного уравнения типа 2^2 имеет вид:

$$\bar{y} = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + b_{12} x_1 x_2 . \qquad (3.5)$$

Рассчитываем коэффициенты уравнения регрессии b_0, b_1 и b_2:

$$b_0 = \frac{\sum_{j=1}^{n} \bar{y}_u}{N}, \qquad (3.6)$$

$$b_0 = \frac{1}{4}(0{,}488 + 0{,}494 + 0{,}425 + 0{,}425) = 0{,}458, \qquad (3.7)$$

$$b_i = \frac{\sum_{j=1}^{n} x_{ij} \bar{y}_j}{N}, \qquad (3.8)$$

$$b_1 = \frac{1}{4}(0{,}488 + 0{,}494 + 0{,}425 - 0{,}425) = 0{,}245, \qquad (3.9)$$

$$b_2 = \frac{1}{4}(0{,}488 + 0{,}494 - 0{,}425 - 0{,}425) = 0{,}03, \qquad (3.10)$$

b_{12} – коэффициент, характеризующий эффект взаимодействия факторов,

$$b_{12} = \frac{1}{4}(0{,}488 - 0{,}494 - 0{,}425 - 0{,}425) = -0{,}214. \qquad (3.11)$$

Тогда в результате преобразований уравнение математической модели будет иметь следующий вид:

$$\bar{y} = 0{,}458 + 0{,}245 x_1 + 0{,}03 x_2 - 0{,}214 x_1 x_2 . \qquad (3.12)$$

Далее выполняется обработка полученных результатов, то есть проверяются значимость коэффициентов уравнения регрессии, адекватность математической модели и т.д.

Вычисляем дисперсию для каждой строчки матрицы планирования эксперимента по результатам опытов по формуле:

$$S_j^2 = s_j^2 = \frac{\sum_{1}^{n} (y_i - \bar{y})^2}{n - 1}, \qquad (3.13)$$

где, $\bar{y}$ – среднее арифметическое значение параметра оптимизации; n – число повторных опытов.

$$S_1^2 = s_1^2 = \frac{0{,}126}{8} = 0{,}0158\ , \tag{3.14}$$

$$S_2^2 = s_2^2 = \frac{0{,}0056}{8} = 0{,}0007\ , \tag{3.15}$$

$$S_3^2 = s_3^2 = \frac{0{,}424}{8} = 0{,}0053\ , \tag{3.16}$$

$$S_4^2 = s_4^2 = \frac{0{,}192}{8} = 0{,}024\ . \tag{3.17}$$

Результаты посчитанной дисперсии сведены в табл. 3.3.

3.3. Дисперсия матрицы планирования эксперимента

Номер опыта	1	2	3	4
S_j^2	0,0158	0,0007	0,053	0,024
S_j	0,12	0,03	0,23	0,15

Суммарная дисперсия матрицы планирования эксперимента:

$$\sum_{j=1}^{8} S_j^2 = 0{,}29\,. \tag{3.18}$$

Значимость коэффициентов регрессии определяется по критерию Стьюдента:

$$\frac{y - \bar{y}}{S} > t\ , \tag{3.19}$$

$$t_{расч} > t_{табл}\,, \tag{3.20}$$

где, t – критерий Стьюдента. Для значения доверительной вероятности P_D = 0,95 и для 4-х повторных опытов t = 3,18. Для третьего опыта $y_{\min}$=1,49 $y_{\max}$=1,59

$\bar{y} = 1{,}54$

для минимума:

$$\frac{y - \bar{y}}{S_{\min}} = \frac{1{,}54 - 1{,}49}{0{,}01} = 5, \qquad (3.21)$$

для максимума:

$$\frac{y - \bar{y}}{S_{\min}} = \frac{1{,}59 - 1{,}54}{0{,}01} = 5. \qquad (3.22)$$

Условие выполняется $t_{расч} > t_{табл}$

Проверяем результаты исследований на однородность дисперсий по критерию Кохрена:

$$G_p = G_{\max} = \frac{s_{j\max}^2}{\sum_{j=1}^{N} s_j^2} = \frac{0{,}046}{0{,}29} = 0{,}16 \cdot \qquad (3.23)$$

Найдем число степеней свободы:

$$f = n - 1 = 9 - 1 = 8. \qquad (3.24)$$

Табличное значение критерия Кохрена для доверительной вероятности $P_D = 0{,}95$ при числе опытов в матрице $N = 4$ и числе степеней свободы $f = 8$

$$G_{0,95} = 0{,}52, \qquad (3.25)$$

$G_p < G_{0,95} = 0{,}16 < 0{,}52$ условие выполняется, данные дисперсии считаются однородными.

Определим дисперсию воспроизводимости исследования:

$$S_y^2 = s_y^2 = \frac{\sum_{j=1}^{N} s_j^2}{n - 1} = \frac{0{,}29}{8} = 0{,}004. \qquad (3.26)$$

Дисперсия ошибки определения i-го коэффициента уравнения регрессии S_{bi} вычисляется по формуле

$$S_{bi}^2 = s_{bi}^2 = \frac{s_{bi}^2}{N \times n} = \frac{0{,}046}{4 \times 9} = \frac{0{,}867}{36} = 0{,}024, \qquad (3.27)$$

$$S_{bi} = \sqrt{S_{bi}^2} = \sqrt{0{,}0000048} = \pm 0{,}15. \qquad (3.28)$$

Доверительный интервал определяется по формуле:

$$|\Delta b_i| = a_{ст.т} \times S_{bi}, \tag{3.29}$$

где, $a_{ст.т}$ – критерий Стьюдента, $a_{ст.т}$ = 2,04, тогда

$$|\Delta b_i| = a_{ст.т} \times S_{bi} = 2{,}04 \times 0{,}15 = 0{,}306. \tag{3.30}$$

Так как $|b_i| > |\Delta b_i|$, то все коэффициенты b_i уравнения регрессии являются значимыми.

Проверяем гипотезу адекватности по критерию Фишера:

$$F_p = \frac{S^2_{\max}}{S^2_{\min}} = \frac{S^2_4}{S^2_2} = \frac{0{,}053}{0{,}15} = 0{,}125. \tag{3.31}$$

При этом число степеней свободы:

$$f = n - 1 = 8. \tag{3.32}$$

В соответствии с числом степеней свободы выбирается табличное значение критерия Фишера при доверительной вероятности 0,95:

$$F_{табл} = 6{,}04, \tag{3.33}$$

$F_p < F_{табл} = 0{,}125 < 6{,}04$ – дисперсия является однородной.

Далее рассчитываем дисперсию адекватности:

$$S^2_{ад} = \frac{1}{N - (k+1)} \sum_{1}^{4} \left(\bar{y}_j - \hat{y}_j\right)^2. \tag{3.34}$$

Найдем значения $\left(\bar{y}_j - \hat{y}_j\right)^2$ для каждой строчки матрицы планирования экспериментов, вычислив предварительно значения $\hat{y}_j$ по математической модели:

$$\bar{y} = 0{,}458 + 0{,}245 x_1 + 0{,}03 x_2 - 0{,}214 x_1 x_2. \tag{3.35}$$

Рассчитываем $\bar{y}$:

$$\bar{y}_1 = 0{,}458 + 0{,}245 + 0{,}03 + 0{,}214 = 0{,}947, \tag{3.36}$$

$$\bar{y}_2 = 0{,}458 + 0{,}245 + 0{,}03 - 0{,}214 = 0{,}519, \tag{3.37}$$

$$\bar{y}_3 = 0{,}458 + 0{,}245 - 0{,}03 - 0{,}214 = 0{,}459, \tag{3.38}$$

$$\bar{y}_4 = 0{,}458 - 0{,}245 - 0{,}03 - 0{,}214 = -0{,}031. \tag{3.39}$$

Далее рассчитываем $(\bar{y}_j - \hat{y}_j)^2$:

$$(\bar{y}_1 - \hat{y}_1)^2 = (0{,}488 - 0{,}494)^2 = 0{,}21, \tag{3.40}$$

$$(\bar{y}_2 - \hat{y}_2)^2 = (0{,}494 - 0{,}519)^2 = 0{,}000625, \tag{3.41}$$

$$(\bar{y}_3 - \hat{y}_3)^2 = (0{,}425 - 0{,}459)^2 = 0{,}00116, \tag{3.42}$$

$$(\bar{y}_4 - \hat{y}_4)^2 = (0{,}425 - (-0{,}031))^2 = 0{,}21, \tag{3.43}$$

$$\sum_{j=1}^{4} (\bar{y}_j - \hat{y}_j)^2 = 0{,}0000031. \tag{3.44}$$

После расчетов математическую модель необходимо проверить на адекватность.

Дисперсия адекватности рассчитывается по формуле:

$$S_{ад}^2 = \frac{1}{N - (k+1)} \sum_{1}^{4} (\bar{y}_j - \hat{y}_j)^2 = \frac{0{,}0000031}{4 - (2+1)} = 0{,}0000031 \tag{3.45}$$

Адекватность данной математической модели определяется по критерию Фишера:

$$F_{раас} = \frac{S_{ад}^2}{S_y^2} = \frac{0{,}0000031}{0{,}000016} = 0{,}19, \tag{3.46}$$

$$F_{табл} = 6{,}04, \tag{3.47}$$

$F_{расч} < F_{табл} = 0{,}19 < 6{,}04$, то есть данная математическая модель является адекватной.

Для перехода от математической модели к натуральным значениям факторов подставляем их значения соответственно кодировке:

$$x_1 = \frac{2\ln\tilde{x}_1 - (\ln 6 + \ln 10)}{\ln 10 - \ln 6} = \frac{2\ln\tilde{x}_1 - 1{,}79 - 2{,}3}{2{,}3 - 1{,}79}, \tag{3.48}$$

$$x_1 = \frac{2\ln\tilde{x}_1 - 4{,}09}{0{,}51} = \frac{\ln\tilde{x}_1 - 2{,}045}{0{,}255}, \tag{3.49}$$

$$x_2 = \frac{2\ln\tilde{x}_2 - (\ln 75 + \ln 50)}{\ln 75 - \ln 50} = \frac{2\ln\tilde{x}_2 - 4{,}32 - 3{,}91}{4{,}32 - 3{,}91}, \tag{3.50}$$

$$x_2 = \frac{2\ln\tilde{x}_2 - 8{,}23}{0{,}41} = \frac{\ln\tilde{x}_2 - 4{,}115}{0{,}205}. \tag{3.51}$$

Подставляем значения x_1 и x_2 в уравнение математической модели:

$$\bar{y} = 0{,}458 + 0{,}245x_1 + 0{,}03x_2 - 0{,}214x_1x_2, \tag{3.52}$$

$$\bar{y} = 0{,}458 + 0{,}211\left(\frac{\ln\tilde{x}_1 - 2{,}045}{0{,}255}\right) + 0{,}245\left(\frac{\ln\tilde{x}_2 - 4{,}115}{0{,}205}\right) \tag{3.53}$$

$$0{,}13 + 0{,}04\ln\tilde{x}_1 + 0{,}03\ln\tilde{x}_2 + 0{,}013\ln\tilde{x}_1\ln\tilde{x}_2. \tag{3.57}$$

Следовательно, уравнение зависимости *Ra* от исходных технологических факторов имеет вид:

$$\ln Ra = 0{,}13 + 0{,}04\ln a + 0{,}03\ln Z - 0{,}013\ln a\ln Z. \tag{3.58}$$

Далее можно преобразовать полученное выражение:

$$R_a = \frac{e^{0{,}13} \times a^{0{,}04} \times z^{0{,}03}}{(a \times z)^{0{,}013}} \tag{3.59}$$

3.3. Выводы

1. На основании разработанной регрессионной модели получена зависимость параметра *Ra* от технологических параметров процесса прототипирования.

2. Анализируя полученную регрессионную модель, можно сделать вывод, что парное взаимодействие технологических параметров процесса прототипирования оказывает значительное влияние на параметры шероховатости поверхности изделия, полученных по RP-технологии.

3. Установлено, что имеется чёткая связь между выходными факторами и технологическими параметрами процесса прототипирования.

ГЛАВА 4. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕТОДА 3SP-ТЕХНОЛОГИИ БЫСТРОГО ПРОТОТИПИРОВАНИЯ ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ИЗДЕЛИЙ

4.1. Разработка программы ЭВМ для расчета ожидаемых параметров точности изделий, получаемых по технологии быстрого прототипирования

В современном мире, когда пользователю поставляется 3D-принтер, он по сути остается один на один с машиной и программой автоматического проектирования, то есть информация о точности будущего изделия у него отсутствует, из-за чего первоначально производится большое количество брака. Это приводит к разочарованию, а иногда и нецелесообразности применения методов прототипирования. Чтобы иметь хоть какое-то представление о точности получаемого изделия, приходится изготавливать большое количество тестовых моделей, варьируя технологическими факторами, оказывающими влияние на точность изделия, что, в свою очередь, отнимает большое количество времени и приводит к огромным затратам на покупку материала.

Для уменьшения времени внедрения технологии прототипирования в производственный процесс и более быстрого обучения работы с ней для пользователя нами разработана и реализована программа расчета ожидаемых параметров точности готового изделия.

Для расчета параметров ожидаемой шероховатости и отклонения точности форм и взаимного расположения поверхностей, с использованием уравнения (3.59–3.60) для шероховатости и полиномами, полученными в ходе обработки данных в программе Origin (2.16–2.18), была разработана и зарегистрирована программа для ЭВМ «Расчет ожидаемых параметров точности изделий, получаемых по технологии прототипирования» (приложение № 3).

Графический интерфейс программы выполнен в визуальном редакторе Qt Creator. Для обработки запросов ввода-вывода данных реализована система сочетаний кнопок «сигнал-слотов» Qt. Мета-объектный компилятор (meta-object compiler, moc) просматривает описание классов в файлах исходных кодов и генерирует код на C++ [44], работающий под управлением Windows [48]. Разработанная программа позволяет:

– рассчитать ожидаемые параметры шероховатости и отклонения форм и взаимного расположения поверхностей готового изделия, получаемого по технологии быстрого прототипирования методом 3SP;

– проанализировать гистограммы расчётной и ожидаемой шероховатости;

– оперативно получить справку для основных определений, используемых в технологии быстрого прототипирования.

При запуске программы перед пользователем открывается главный рабочий интерфейс программы «Расчет ожидаемых параметров точности изделий, получаемых по технологии прототипирования», который изображен на рис. 4.1.

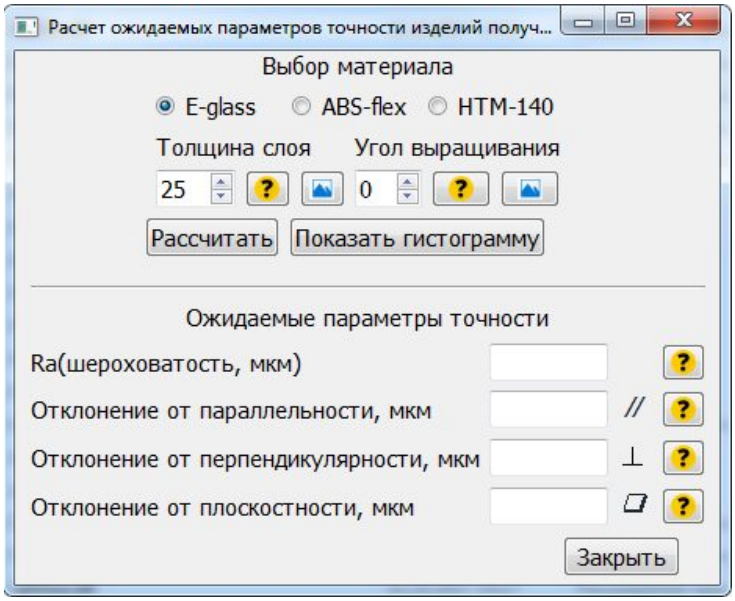


Рис. 4.1. Интерфейс программы «Расчет ожидаемых параметров точности изделий, получаемых по технологии прототипирования»

Рабочее окно разделено на два основных блока – это блок ввода данных и блок вывода результатов. В блоке ввода данных пользователю предоставляется возможность выбора материала изделия, толщины слоя и угла выращивания.

После запуска программы по умолчанию в интерфейсе программы задан материал E-glass, толщина слоя 25 мкм, а угол выращивания 0˚. Пользователю доступен выбор одного из трех основных модельных материалов: E-glass, ABSflex, HTM-140. Поле «Толщина слоя» имеет специальные две кнопки, позволяющие задать нужное значение от 25 мкм до 100 мкм с шагом в 25 мкм. Точно такое же устройство представляет и поле «Угол выращивания», только значение можно задать от 0˚ до 12˚ с шагом в 2˚. На рисунке 4.2 показан блок ввода данных.

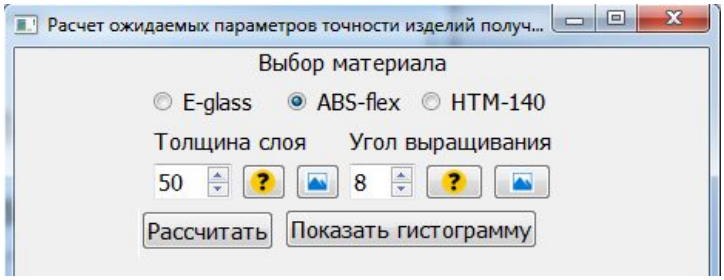


Рис.4.2. Блок ввода данных

Также в программе реализована система подсказок, если навести на иконку с символом вопросительного знака (рис. 4.3 *а*), перед оператором всплывает определение, а если навести на иконку с символом картинки (рис. 4.3 *б*), то всплывает пояснительная картинка.

а)

б)

Рис.4.3. Картинки иконок подсказок программы: *а* – определения; *б* – пояснительная картинка

В блоке ввода данных реализованы четыре всплывающие подсказки. Первые две из них связаны с определением толщины слоя и графическим отображением этого параметра. Следующие подсказки связаны с определением угла выращивания. Все это делает данный блок программы более понятным и простым в обращении даже для начинающего пользователя.

На рисунке 4.4 изображен пример всплывающих подсказок в окне работающей программы для упрощения работы с ней.

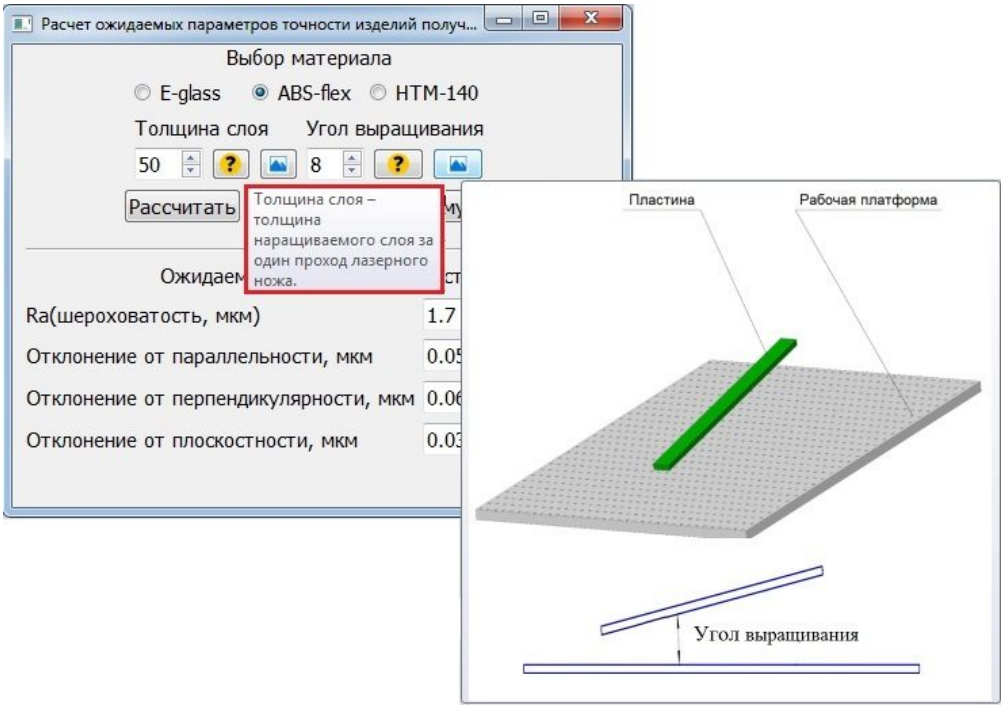


Рис. 4.4. Всплывающие подсказки в окне программы

На рисунке 4.4 показаны две подсказки, но в программе они всплывают по одной.

После ввода основных параметров и нажатия кнопки «Рассчитать» в программе производится расчет по заданному алгоритму уравнением и полиномам. Все полученные данные отображаются в блоке вывода результатов (рис. 4.5).

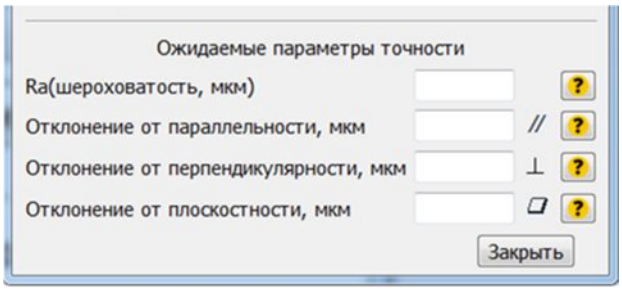


Рис. 4.5. Блок вывода результатов

Блок вывода результатов состоит из четырех полей: ожидаемый параметр *Ra*, отклонение от плоскостности, отклонение от параллельности, отклонение от перпендикулярности. Все параметры выводятся в микрометрах. Данный блок также содержит ряд подсказок, которые всплывают при наведении курсора на их иконку. Подсказки представляют собой определения по ГОСТу [14, 15, 16, 17, 18] основных рассчитываемых параметров точности.

Блок ввода данных кроме кнопки «Рассчитать» имеет кнопку «Показать гистограмму». Построение гистограммы осуществляется стандартными средствами Qt Charts, входящими в состав Qt 5.10. В конструкторе класса hist, наследуемом от QWidget, для обеспечения функционала вывода окна и для возможности использования системы «сигнал-слотов» определяются начальные параметры гистограммы. Функция hist recalculate () вызывается при отображении гистограммы и приводит к очистке и повторной инициализации всех столбцов.

Кнопка «Показать гистограмму» при нажатии приводит к расчёту и демонстрации гистограммы, при этом кнопка меняет свое название на «Скрыть гистограмму». Перед оператором в новом окне строится гистограмма зависимости параметра *Ra* от угла выращивания α. Происходит сравнение расчетных и ожидаемых значений (рис. 4.6), что позволяет оператору визуально оценить расхождения в гистограммах.

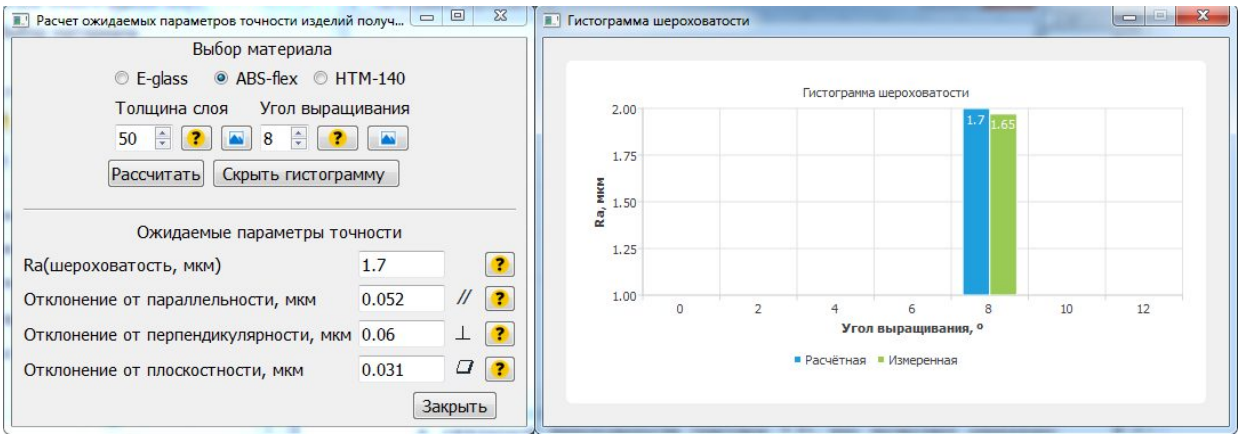


Рис. 4.6. Интерфейс программы с ожидаемыми результатами и гистограммой

По итогам сравнения выполняются соответствующие операции. При ручном закрытии гистограммы путем нажатия кнопки «X» (стандартного элемента Windows «Закрыть окно») вызывается лямбда-функция для изменения текста (и следовательно, функции) мульти кнопки. Для реализации такого поведения у оконного класса гистограммы, наследуемого от QObject, переопределено событие closeEvent. При вызове данного события генерируется сигнал closed (). В основном классе Mainwindow этот сигнал связывается с лямбда-функцией, описанной выше. Таким образом предотвращается рассинхронизация при закрытии окна гистограммы вручную.

При закрытии окна гистограммы одновременно с закрытием основного окна у оконного класса MainWindow переопределено событие closeEvent. При его вызове вызывается функция объекта histogram класса hist “close”, которая и закрывает окно гистограммы

Для закрытия программы «Расчет ожидаемых параметров точности изделий, получаемых по технологии прототипирования», возможны два варианта. Первый вариант – воспользоваться кнопкой «Закрыть», расположенной внизу программы под блоком вывода результатов. Второй вариант – воспользоваться стандартной кнопкой для всех программ, работающих под управлением Windows [48].

На рисунке 4 .7 приведен алгоритм функции расчета параметров, который реализован в программе.

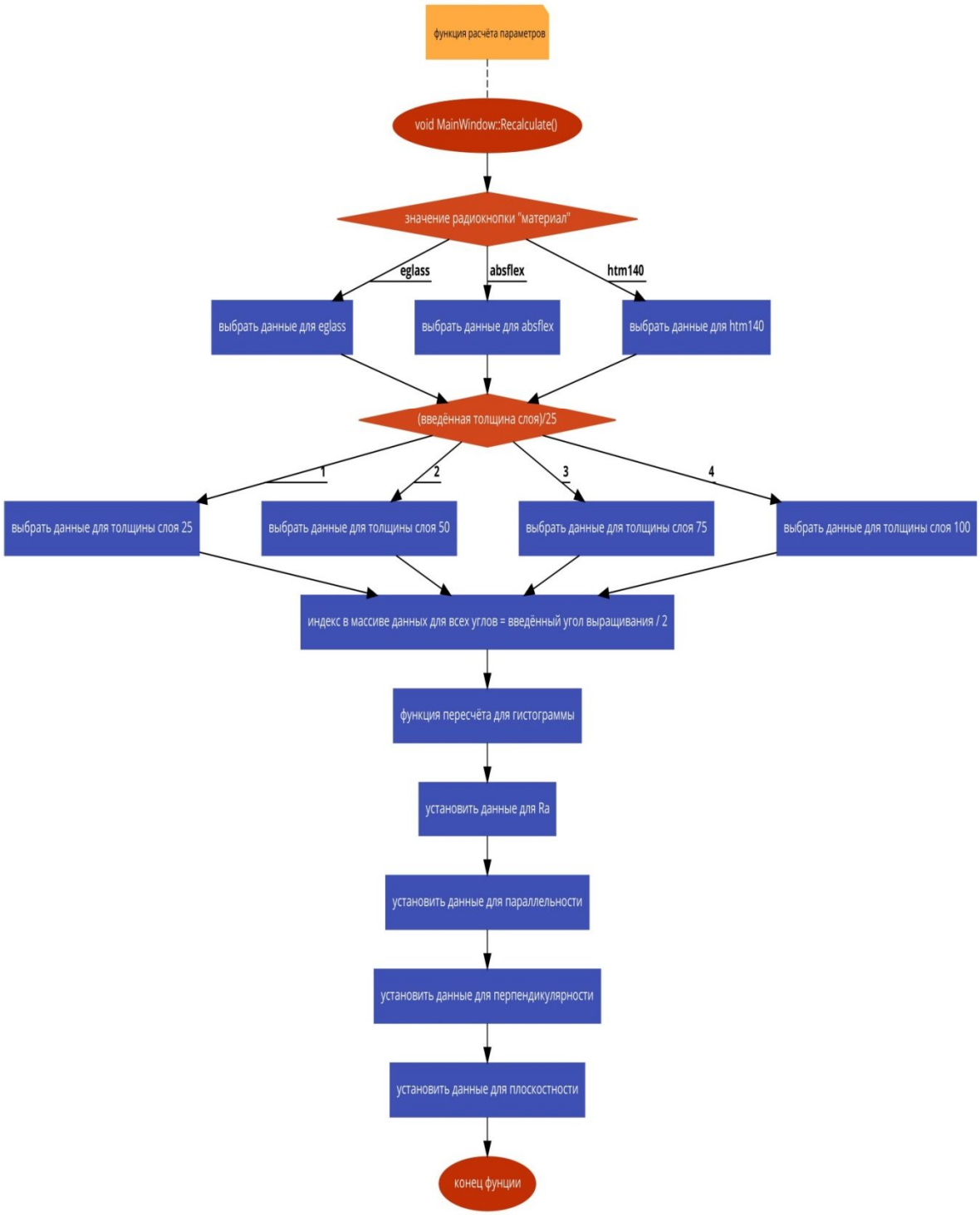


Рис. 4.7. Алгоритм функции расчета параметров

На рисунке 4.8 приведен алгоритм пересчета блока функций гистограмм программы.

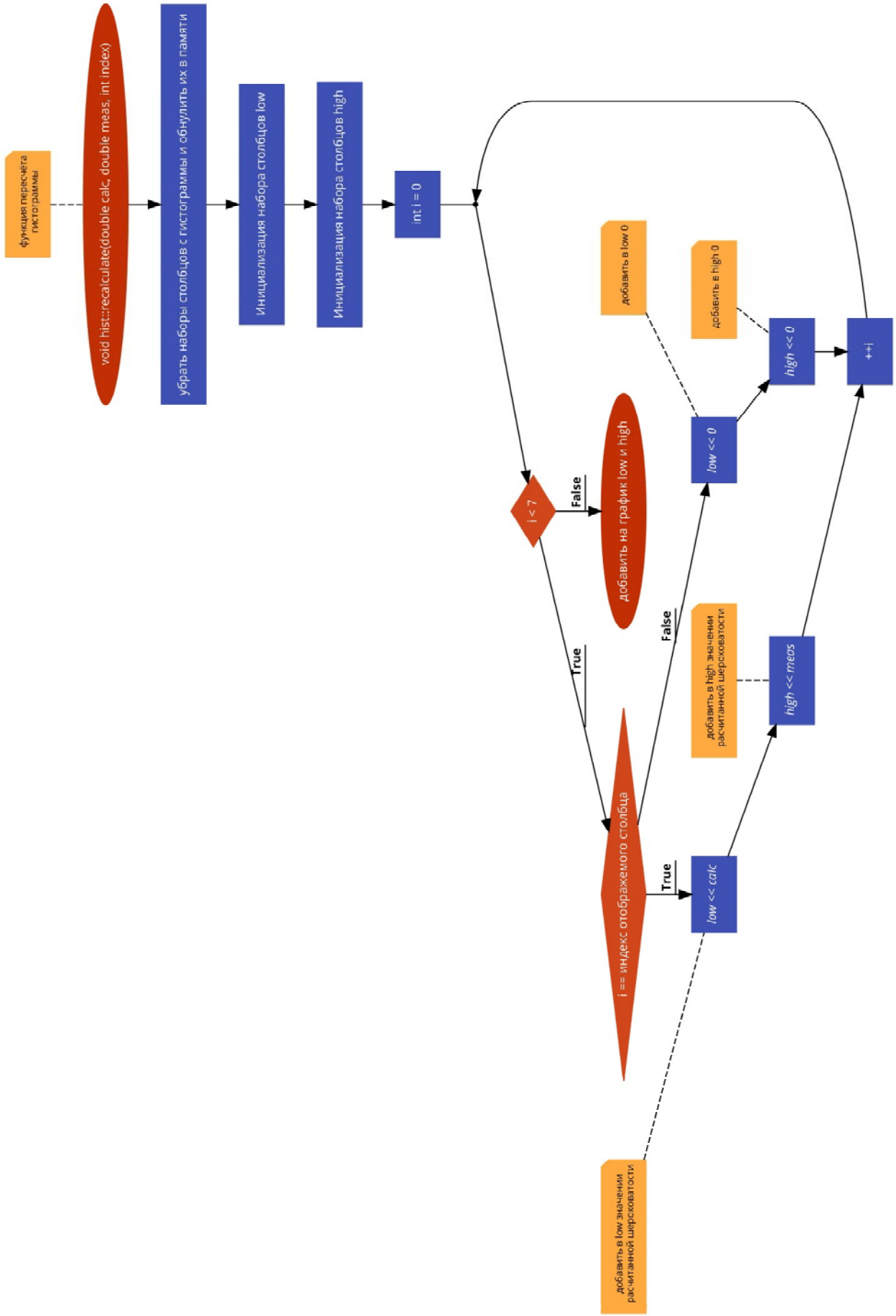


Рис. 4.8. Алгоритм функции пересчета блока гистограмм

На рисунке 4.9 показан алгоритм работы кнопки Показать/скрыть гистограмму

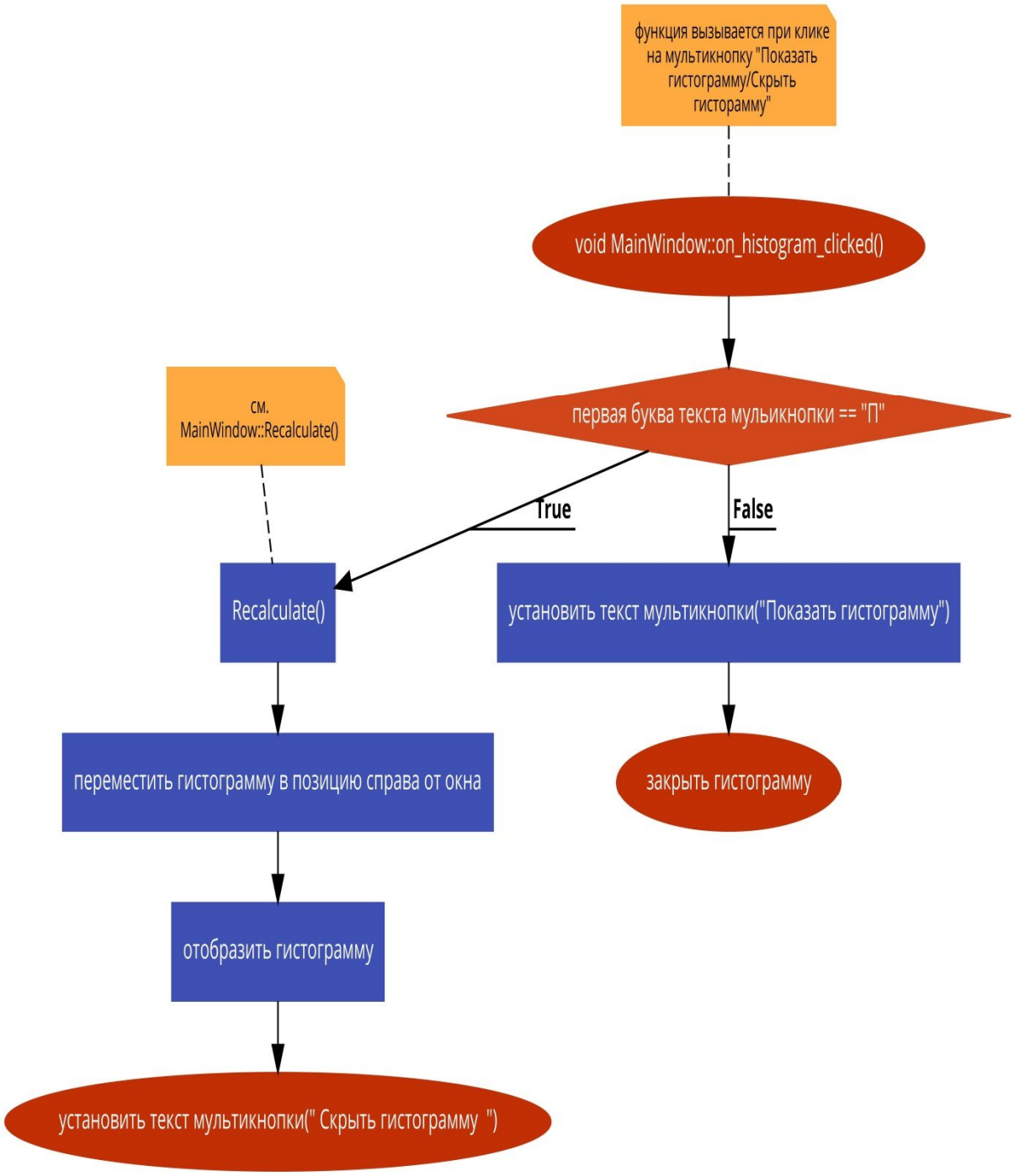
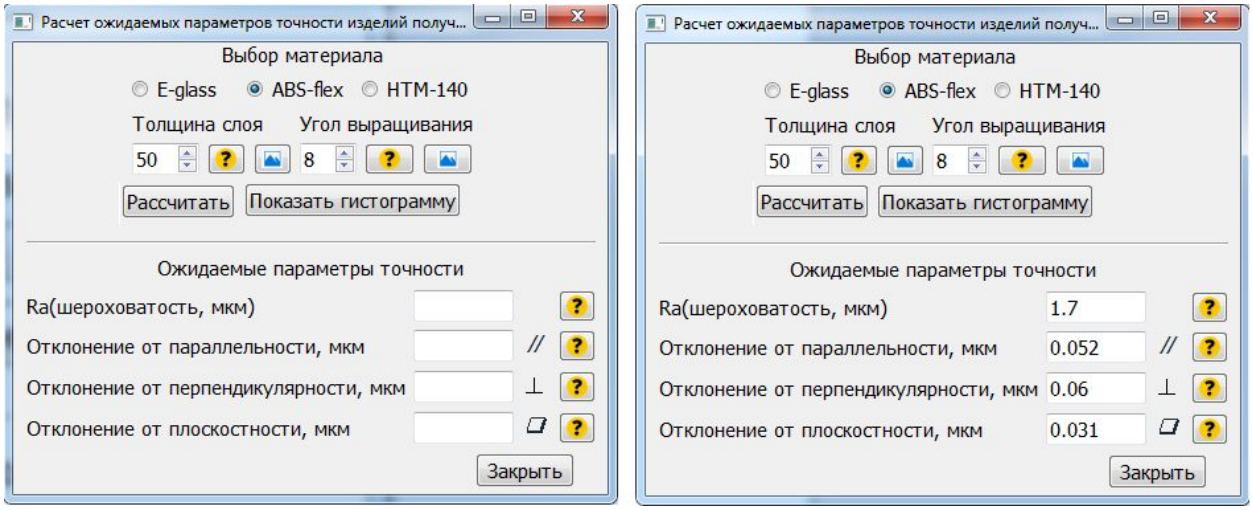


Рис. 4.9. Алгоритм работы кнопки Показать/Скрыть гистограмму

На рисунке 4.10 представлен пример работы программы. В поле ввода материала выбран материал ABSflex, далее установлена толщина слоя, равная z = 50 мкм, а угол выращивания задан α = 8˚. После нажатия кнопки

«Рассчитать» получаем следующие ожидаемые характеристики точности будущего готового изделия (рис. 4.10 *б*).



а) *б)*

Рис. 4.10 *а* – заполнения программы; *б* – результат расчёта

Разработанная программа прошла успешные производственные испытания на базе ОАО «Научно-производственное объединение измерительной техники» г. Королёв (приложение № 4).

4.2. Практические рекомендации по обеспечению показателей качества изделия, выращиваемого по технологии быстрого прототипирования методом 3SP

На основании анализа полученных данных в ходе выполнения работы можно предложить некоторые практические рекомендации для выращивания изделий по технологии быстрого прототипирования методом 3SP.

Данные рекомендации разработаны для типовых 3D-принтеров компании EnvisionTec Ultra 3 HD, использующих в качестве основных модельных материалов фотополимеры E-glass, ABSflex, HTM-140.

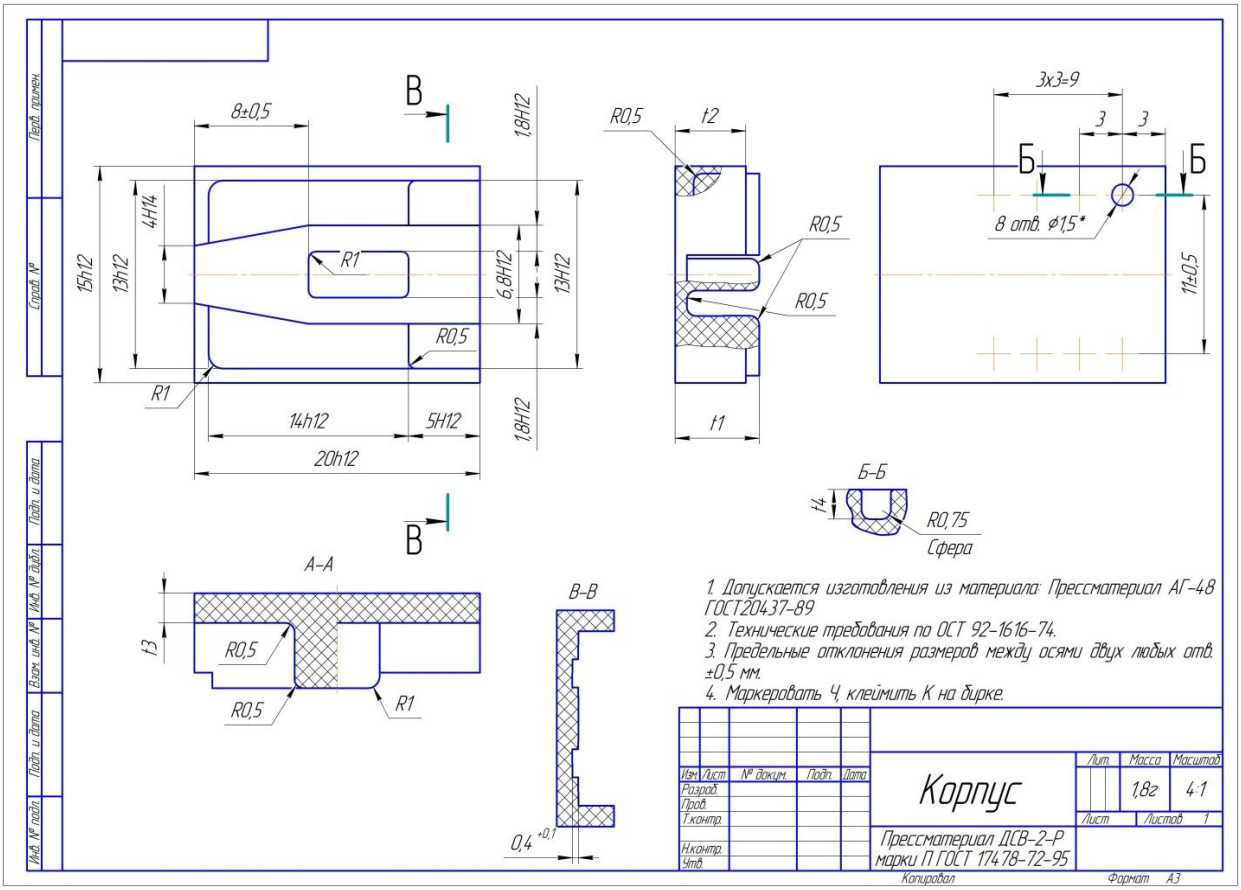
Практические рекомендации по изготовлению изделий по методу 3SP технологии быстрого прототипирования представлены в табл.4.1.

4.1. Практические рекомендации по обеспечению требуемых параметров шероховатости

Технологические параметры процесса прототипирования		Ожидаемый параметр *Ra* готового изделия
Угол выращивания α, град.	Толщина слоя *z*, мкм	
Материал E-glass		
0; 2; 4	100	$Ra > 2{,}1$
0; 4	50–75	$1{,}7 < Ra < 1{,}92$
6; 10; 12	25–50	$1{,}48 < Ra < 1{,}76$
8	25	$1{,}38 < Ra < 1{,}48$
Материал ABSflex		
0; 2; 4	100	$Ra > 2{,}5$
0; 4	50–75	$1{,}77 < Ra < 1{,}97$
6; 10; 12	25–50	$1{,}69 < Ra < 1{,}83$
8	25	$1{,}61 < Ra < 1{,}65$
Материал HTM-140		
0; 2; 4	100	$Ra > 2$
0; 4	50–75	$1{,}73 < Ra > 1{,}85$
6; 10; 12	25–50	$1{,}43 < Ra < 1{,}71$
8	25	$1{,}3 < Ra < 1{,}42$

Разработанные рекомендации успешно используются на производстве ОАО «Научно-производственное объединение измерительной техники» г. Королёв при изготовлении корпусов датчиков.

Далее приведен один из примеров успешного использования рекомендаций для изготовления изделий. Чертеж изделия, размещение в виртуальной камере 3D-принтера, а также готовый корпус датчика представлены на рис. 4.11–4.13.



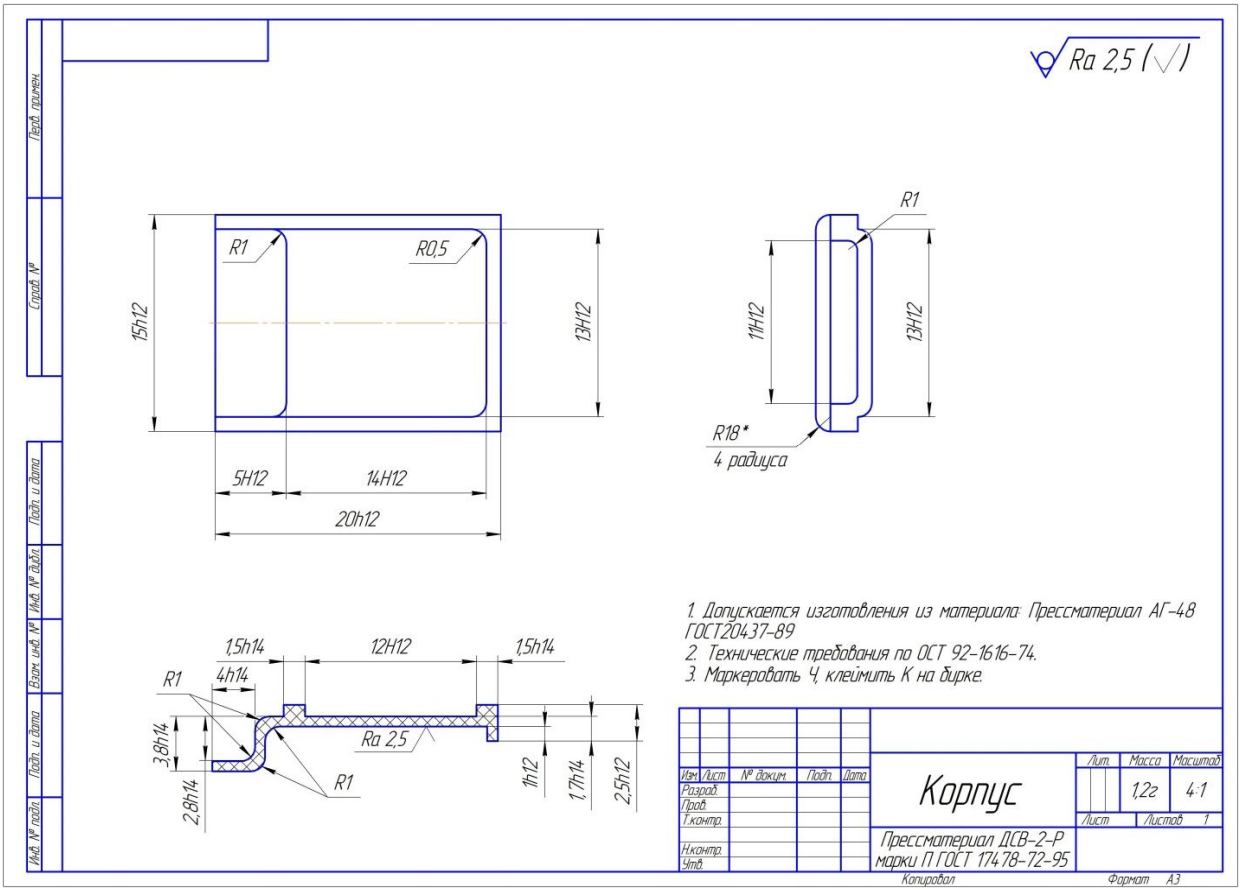


Рис. 4.11. Чертеж изделия

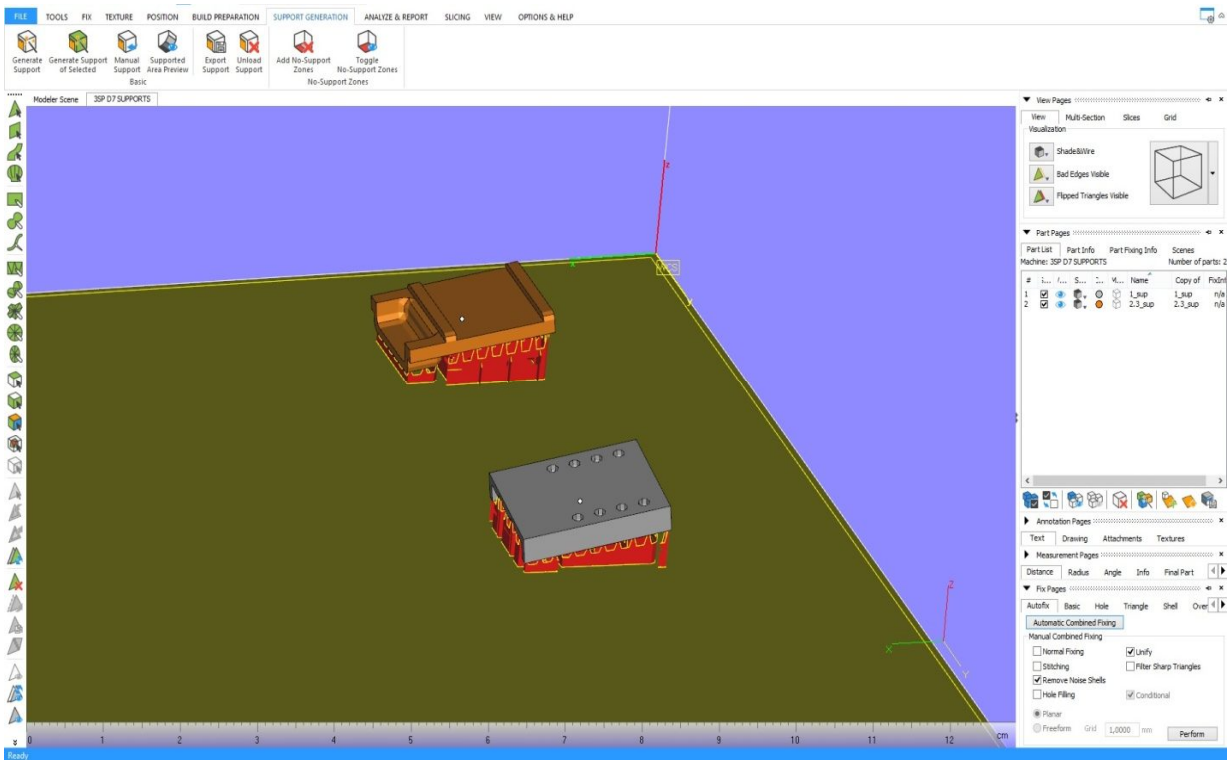


Рис. 4.12. Размещение 3D-модели в виртуальной камере 3D-принтера

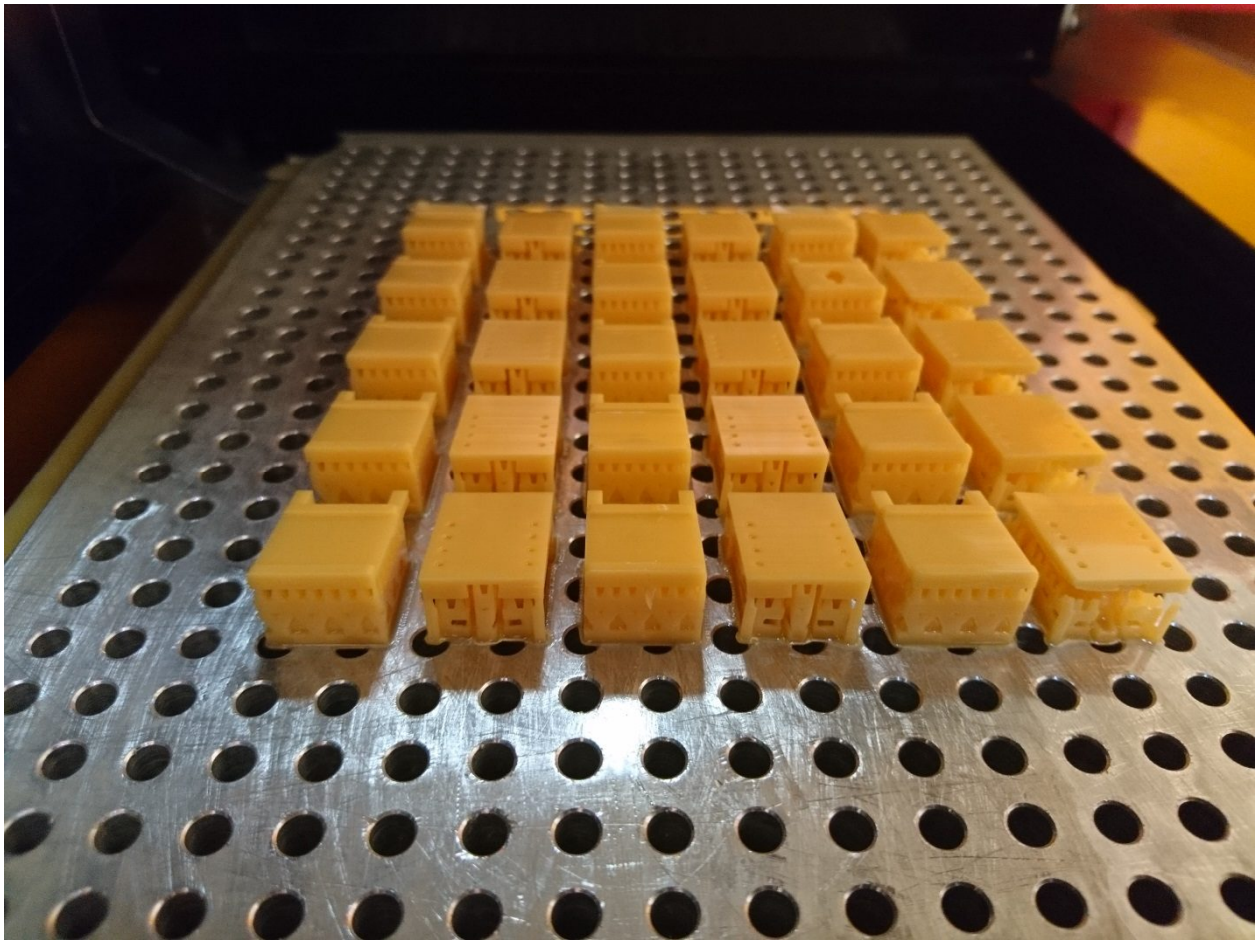


Рис. 4.13. Готовые изделия в рабочей камере 3D-принтера.

Как видно на рис. 4.13, на рабочей платформе еще остается пустое пространство, где можно разместить еще несколько изделий, но делать мы этого не стали, так как с одной рабочей сессии 3D-принтера получается достаточное для заказчика количество готовых изделий.

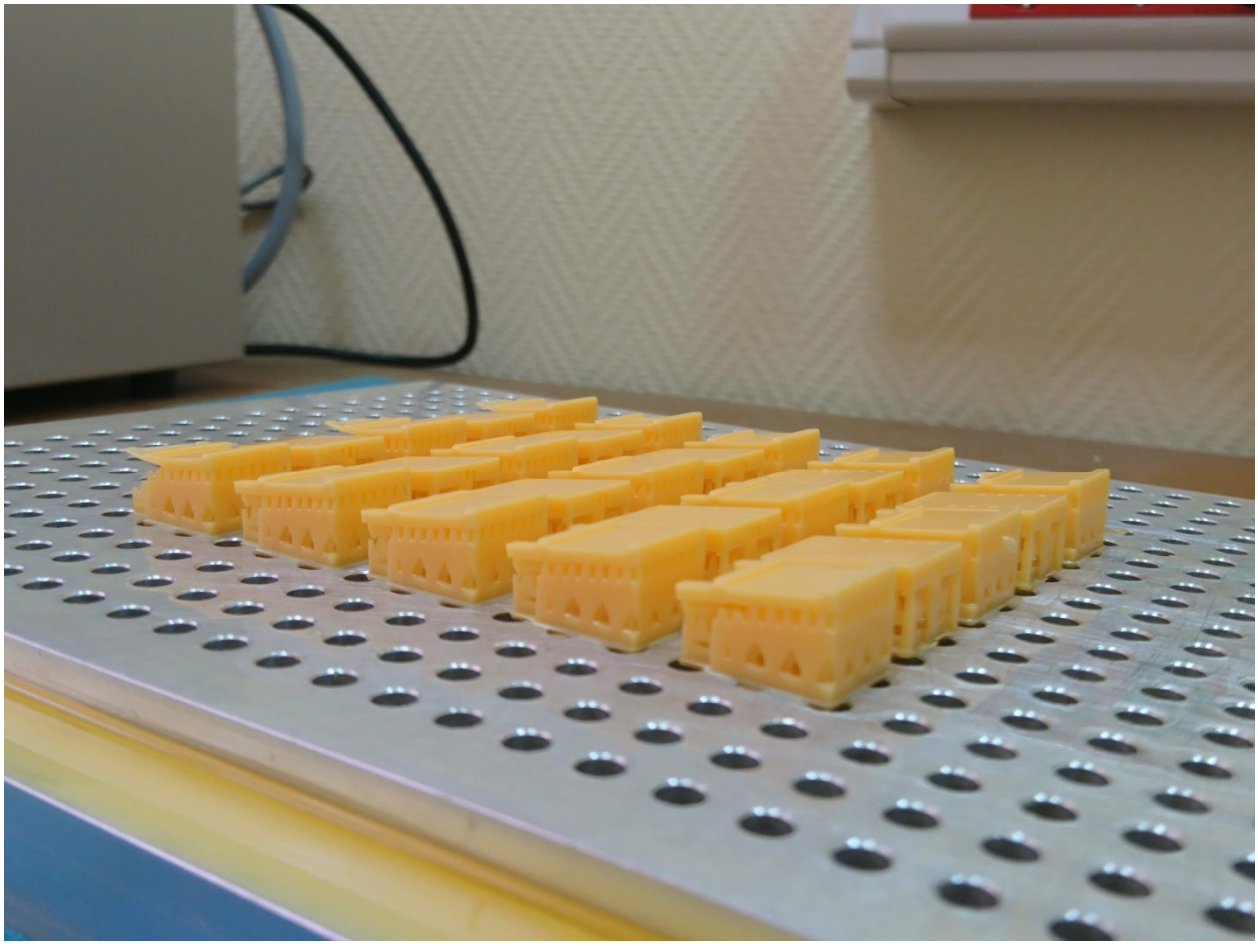


Рис. 4.14. Готовые изделия

На рисунке 4.14 показаны готовые корпуса датчика. Датчик в сборе состоит из двух полукорпусов. Поэтому изготовление происходило сериями, состоящими из 25 деталей, то есть 12 пар готовых к сборке корпусов и одного запасного изделия. Существенно уменьшилось время на изготовление и затраты на трудоемкость, а также позволила загрузить 3D-принтер на 70–80 %.

Внедрение технологии быстрого прототипирования по методу 3SP на базу ОАО «Научно-производственное объединение измерительной техники» г. Королёв, разработанные рекомендации, а также программа позволили

отказаться от обработки вредного материала и заменить его на более экологичный фотополимер. Произошло сокращение конструкторско-технологической подготовки производства, больше не требуется изготовление пресс-форм, которые, в свою очередь, требовали трудоемкого обслуживания, что позволило отказаться от технологии горячего прессования, что уменьшило себестоимость изготовления корпусов датчиков.

4.3. Выводы

1. На основе результатов статистического анализа разработаны и реализованы расчетные процедуры в программе для ЭВМ «Расчет ожидаемых параметров точности изделий, получаемых по технологии прототипирования» (свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2018615757). Программа позволяет рассчитать ожидаемую шероховатость и отклонения форм и взаимного расположения поверхностей (отклонения от плоскостности, параллельности, перпендикулярности) готового изделия, получаемого по технологии быстрого прототипирования методом 3SP, еще до его изготовления.

2. Разработан комплекс практических рекомендации по обеспечению требуемых параметров шероховатости для изготовления изделий из пластмасс по методу 3SP технологии быстрого прототипирования.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Доказано, что важнейшими технологическими параметрами процесса прототипирования, влияющими на формообразование методом 3SP RP-технологии, является угол выращивания α, а также толщина слоя z.

2. Установлены значения технологических процессов прототипирования угол выращивания α = 8° и толщина слоя равная z = 25 мкм, при которых величина параметра шероховатости Ra <1,3 мкм и отклонения точностных параметров минимальны.

3. Доказано, что сложность геометрии изделия не влияет на отклонения точности форм и взаимного расположения поверхностей (отклонения от плоскостности, параллельности, перпендикулярности, а также круглости и цилиндричности).

4. Разработана регрессионная модель зависимости параметра шероховатости Ra от технологических параметров процесса прототипирования (угол выращивания α и толщина слоя z) изделия. Парное взаимодействие технологических параметров процесса прототипирования оказывает значительное влияние на параметры шероховатости поверхности изделия.

5. Разработана и реализована программа для ЭВМ «Расчет ожидаемых параметров точности изделий, получаемых по технологии прототипирования» (Свидетельство). Программа позволяет рассчитать ожидаемый параметр шероховатости Ra и отклонения форм и взаимного расположения поверхностей (отклонения от плоскостности, параллельности, перпендикулярности) готового изделия, получаемого по технологии быстрого прототипирования методом 3SP, еще до его изготовления.

6. Разработан комплекс практических рекомендации по обеспечению требуемых параметров шероховатости для изготовления изделий по методу 3SP технологии быстрого прототипирования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Автушенко А.А., Анамова Р.Р., Иванов А.О., Рипецкий А.В., Осипов А.В. Методика применения аддитивных технологий на этапах изготовления опытных образцов агрегатов и узлов авиационной техники // Вестник Брянского государственного технического университета. – 2015. – Вып. 46. – С. 8.

2. Адлер Ю.П., Грановский Ю.В., Маркова Е.В. Теория эксперимента: прошлое, настоящее, будущее. – М. : Знание, 1982. – 64 с.

3. Адлер Ю.П., Маркова Е.В., Грановский Ю.В. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий. – М. : Наука, 1976. – 278 с.

4. Балакшин Б.С. Основы технологии машиностроения : учебник. – 3-е изд., доп. – М. : Машиностроение, 1969. – 561 с.

5. Бобцова С.В. Исследование и разработка методов использования технологий быстрого прототипирования в приборостроении : дис. канд. техн. наук. – СПб., 2005. – 124 с.

6. Богданов А.А. Визуализация данных в origin. – М. : Альтекс-А, 2003. – 112 с.

7. Бойцов Б.В., Куприков М.Ю., Маслов Ю.В. Повышение качества подготовки производства применением технологий быстрого прототипирования // Труды МАИ. – 2011. – Вып. 49. – С. 6.

8. Бондарь А.Ю. Исследование технологических параметров изготовления пластмассовых образцов с применением лазерной фотополимеризации : дис. канд. техн. наук. – Ижевск, 1998. – С. 5–11.

9. Васильев Ф.В. Исследование факторов, влияющих на процесс послойного синтеза методом лазерной стереолитографии : дис. канд. техн. наук. – М., 2011. – 161 с.

10. Вдовина Т.В. Визуальные исследования: основные методологические подходы // Вестник российского университета дружбы народов. Серия: Социология. – 2012. – № 1. – С. 16–26.

11. Гаврилов А.Н., Скородумов С.В. Моделирование технологических процессов с помощью ЭВМ: учебное пособие. – М.: МАИ, 1982. – 43 с.

12. Гибсон Я., Розен Д., Стакер Б. Технологии аддитивного производства. Трехмерная печать, быстрое прототипирование и прямое цифровое производство. – М. : Техносфера, 2016. – 656 с.

13. Горелов В.Н., Кокорев И.А. Построение чертежей и 3с1-моделей в системе КОМПАС-3с1: учебное пособие. – Самара: Самарский гос. технический ун-т, 2011. – 109 с.

14. ГОСТ 10356-63 Отклонения формы и расположения поверхностей. – М. : Изд-во стандартов, 1963.

15. ГОСТ 21495-76 Базирование и базы в машиностроении. Термины и определения. – М. : Изд-во стандартов, 1976.

16. ГОСТ 26877-91 Методы измерения отклонений формы. – М. : Изд-во стандартов, 1991.

17. ГОСТ 2789-73 Шероховатость поверхности. Параметры и характеристики. – М. : Изд-во стандартов, 1973.

18. ГОСТ 27964-88 Измерение параметров шероховатости. Термины и определения. – М. : Изд-во стандартов, 1988.

19. Грабченко А.И., Внуков Ю.Н., Доброскок В.Л. Интегрированные генеративные технологии : учебное пособие. – Харьков : НТУ «ХПИ», 2011. – 416 с.

20. Гузанов Б.Н., Большакова М.Ю., Соколова Т.Б., Мигачева Г.Н. Обеспечение качества машиностроительной продукции : учебное пособие. – Екатеринбург : РГППУ, 2015. – 226 с.

21. Гусев Д.В. Исследование точностных параметров деталей, полученных методом прототипирования // Международная научно-техническая конференция «Состояние и перспективы развития электро- и теплотехнологии»; «XVIII Бенардосовские чтения». – Иваново, 2015. – С. 284–287.

22. Дальский А.М. Технология конструкционных материалов. – М. : Машиностроение, 2004. – 512 с.

23. Доценко А.И., Буяновский И. А. Основы триботехники :учебник. – М.: Инфра-М, 2014. – 345 с.

24. Егоров М.Е., Дементьев В.И., Дмитриев В.Л. Технология машиностроения :учебник для втузов. – 2-е изд.,, доп. – М. : Высш. шк., 1976. – 534 с.

25. Единая система допусков и посадок СЭВ в машиностроении и приборостроении : справочник: в 2 т. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Изд-во стандартов, 1989.

26. Джонсон Н., Лион Ф. Статистика и планирование эксперимента в технике и науке. Методы обработки данных – М. : Мир, 1980. – 511 с.

27. Зленко М.А., Забеднов П.В. Аддитивные технологии в опытном литейном производстве. Технологии литья металлов и пластмасс с использованием синтез-моделей и синтез-форм // Металлургия машиностроения. – 2013 – № 3. – С. 43–48.

28. Зленко М.А., Попович А.А., Мутылина И.Н. Аддитивные технологии в машиностроении : учебное пособие. – СПб. : СПбГУ, 2013. – 221 с.

29. Иноземцев В.Е. Обеспечение качества поверхностного слоя пористых металлокерамических материалов при чистовой механической обработке : дис. канд. техн. наук. – М., 2012. – С. 49–57.

30. Ильин А.А., Гаранин С.В., Кошкин В.В., Филатов А.А. Опыт использования технологии прототипирования для изготовления деталей авиационных агрегатов // Литейное производство. – 2007. – № 6. – С. 39–41.

31. Исаев А.И. Исследование процессов обработки металлов резанием // Труды Московского авиационного технологического института. – М. : Оборонгиз, 1960. – Вып. 45. – 170 с.

32. Кован В.М. Справочник технолога-машиностроителя. – М. : Машгиз, – 1963. – 912 с.

33. Комб Дж. Уход от литья (стереолитография) // Автомобильная промышленность США. – 1990. – № 5. – С. 19–20.

34. Корсаков В.С. Основы конструирования приспособлений : учебник для вузов. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Машиностроение, 1983. – 277 с.

35. Куликов М.Ю., Ларионов М.А., Гусев Д.В. О взаимодействии шероховатости поверхности прототипированных образцов с условиями их базирования при изготовлении // Ученые записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. – 2016. – № 1(25). – С. 88–92.

36. Куликов М.Ю., Липницкий Ю.М., Ларионов М.А., Гусев Д.В. Использование генеративных технологий при изготовлении размероподобных моделей для наземных аэродинамических испытаний изделий РКТ // Известия Кабардино-Балкарского государственного университета. – 2014. – Т. IV, № 5. – С. 34–36.

37. Куликов М.Ю., Ларионов М.А., Гусев Д.В., Гаврилина Е.Н. Исследование влияния базирования при прототипировании на точностные характеристики изделия методами атомно-силовой микроскопии // Всероссийская конференция «Информационные технологии, менеджмент качества, информационная безопасность». – Вып. 5, т. 2. – Нальчик, 2015. – С. 131–137.

38. Куликов М.Ю., Ларионов М.А., Гусев Д.В. Исследование взаимосвязи шероховатости поверхности прототипированных образцов с условиями их базирования при изготовлении // Вестник Брянского государственного технического университета. – 2016. – Вып. 2(50). – С. 108–111.

39. Куликов М.Ю., Ларионов М.А., Гусев Д.В. Исследование закономерностей формирования точностных параметров деталей при прототипировании // Вестник Брянского государственного технического университета. – 2016. – Вып. 2(50). – С. 104–107.

40. Куликов М.Ю., Ларионов М.А., Гусев Д.В. Погрешность формообразования тел вращения при использовании технологий быстрого

прототипирования // Вестник Брянского государственного технического университета. – 2016. – Вып. 3(51). – С. 177–183.

41. Куликов М.Ю., Ларионов М.А., Гусев Д.В. Технологии 3D-печати для аэродинамических моделей РКТ // Мир транспорта. – Вып. 4, т. 13. – 2015. – С. 54–57.

42. Ларионов М.А. Повышение точности консольного растачивания глубоких отверстий на основе моделирования процесса их обработки : дис. канд. техн. наук. – М., 2012. – 131 с.

43. Ли К., Основы САПР (CAD/CAM/CAE). – С.Пб. : Питер, 2004.

44. Мартынов Н.Н. Программирование для Windows на C/C++ : учебное пособие. – М. : Бином, 2004.

45. Миронов В.Л. Основы сканирующей зондовой микроскопии : учебное пособие для студентов старших курсов высших учебных заведений / РАН, Институт физики микроструктур. – Н. Новгород, 2004. – 114 с.

46. Норенков И.П., Кузьмик П.К. Информационная поддержка наукоемких изделий. CALS-технологии. – М. : Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2002. – 319 с.

47. Пекарш А.И., Феоктистов С.И., Колыхалов Д.Г., Шторт В.И. Координатно-измерительные машины и комплексы // Наука и технологии в промышленности. – 2011. – № 3. – С. 36–48.

48. Рихтер Д. Windows для профессионалов (Программирование для Windows NT 4 и Windows 95 на базе Win 32 API) : пер. с англ.. – М. : Изд. отд. «Рус. Редакция» ТОО «Channel Trading», 1997. – 679 с.

49. Рогов В.А., Ушомирская Л.А., Чудаков А.Д. Основы высоких технологий. – М. : Вузовская книга, 2001. – 253 с.

50. Руководство по эксплуатации профилометра TR110. Time Group Inc. 2013. – 18 с.

51. Рыцев С.Б. Разработка и исследование системы компактного интеллектуального производства деталей летательных аппаратов на базе

скоростной технологии контурного послойного синтеза : автореф. канд. …техн. наук. – М., 2011. – 139 с.

52. Соколовский А.П. Научные основы технологии машиностроения. – М. : Машгиз, 1955. – 515 с.

53. Суслов А.Г. Качество поверхностного слоя деталей машин. – М.: Машиностроение, 2000. – 160 с.

54. Суслов А.Г. Технологическое обеспечение параметров состояния поверхностного слоя деталей. – М. : Машиностроение, 1987. – 105 с.

55. Суслов А.Г. Технология машиностроения : учебник. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Машиностроение, 2007. – 430 с.

56. Терехова Н.Ю., Сафин Д.Ю. Современные технологии 3D-моделирования и быстрого прототипирования оборудования и его элементов : методическое пособие к выполнению практического занятия «Моделирование оборудования и технологических процессов машиностроения» / МГТУ им. Н.Э. Баумана. – М., 2013. – 19 с.

57. Товажнянский Л.Л., Грабченко А.И. Интегрированные технологии ускоренного прототипирования и изготовления : монография. – 2-е изд., перераб. и доп. – Харьков : Модель Вселенной, 2005. – 224 с.

58. Толстихина А.Л. Атомно-силовая микроскопия кристаллов и пленок со сложной морфологией поверхности : автореф. канд. …техн. наук. – М., 2013. – С. 3–11.

59. Хамханов К.М. Основы планирования эксперимента : методическое пособие. – Улан-Удэ, 2001. – 54 с.

60. Чернышев С.И. Повышение эффективности интегрированных технологий послойного выращивания изделий на основе статистического прогнозирования : автореф. канд. …техн. наук. Харьков, 2006. – С. 3–11.

61. Чичинадзе А.В., Браун Э.Д., Буше Н.А. и др. Основы трибологии (трение, износ, смазка). – 2-е изд. переработ, и доп. – М. : Машиностроение, 2001. – 478 с.

62. Шишковский И.В. Лазерный синтез функционально-градиентных мезоструктур и объемных изделий. – М. : Физмалит, 2009. – 424 с.

63. Ярославцев В.М. Резание с опережающим пластическим деформированием в технологиях утилизации металлической стружки // Наука и образование : научное издание МГТУ им. Н.Э. Баумана. – 2013. – № 7. – С. 79–90.

64. Adapted from an article on Helisys originally appearing in Rapid Prototyping Report, June 1991. – S. 43–54.

65. Konstruieren mit CATIA V5: Methodik der parametisch-assoziativen Flachenmodellierung / Egbert BraB. 3., vollst. neu bearb. und erw. Aufl. – Mtinchen : Hanser, 2009. – 672 p.

66. Kulikov M.Yu., Larionov M.A., Sheptunov S.A., Gusev D.V. Manufacturing of Highquality Products to the Method of 3SP RP – Technology // 2017 IEEE Conference on Quality Management, Transport and Information Security, Information Technologies (IT&MQ&IS). – Proceedings. – September, 24–30, 2017. – P. 726–729.

67. Kulikov M.Yu., Larionov M.A., Sheptunov S.A., Gusev D.V. The Influence of Pre-Settings of the Automated System Rapid Prototyping on the Qualitative Characteristics of Formation // 2016 IEEE Conference on Quality Management, Transport and Information Security, Information Technologies (IT&MQ&IS). – Proceedings. – October 4–11, 2016. – P. 205–208.

68. Neumann H.J., Christoph R., Hans Joachim Neumann. Multisensor Coordinate Metrology. – 2013. – 131 p.

69. Rapid Prototyping: mit neuen Technologien schnell vom Entwurf zum Serienprodukt; Augsburg, 16. Juli 1997 / Gunther Reinhart. Mtinchen : Utz, Wiss., 1997.

70. Rapid prototyping & tooling: Potentiale Erfahrungen – Praxisbeispiele – Trends. Tagung Duisburg. 26. September 2002 / Gesellschaft Produktionstechnik. – Dusseldorf : VDI-Verlag, 2002. – S. 115–120.

71. Binnig G., Rohrer H., Gerber C., Weibel E. Surface studies by scanning tunneling microscopy // Phys. Rev. Lett. 1982. – Vol. 49, № 1. – S. 57–61.

ПРИЛОЖЕНИЕ №1

Результаты измерений отклонений точностных характеристик на координатно-измерительной машины Metris LKV

Материал	№ образца	Угол выращивания	Отклонения				
			Плоскостность поверхности № 2	Плоскостность поверхности № 3	Параллельность поверхности № 2 к № 1	Параллельность поверхности № 3 к № 4	Перпендикулярность поверхности № 4 к № 2
1	2	3	4	5	6	7	8
E-glass (прозрачные пластины)	1	0	0,053	0,056	0,055	0,095	0,068
	2	2	0,048	0,051	0,053	0,087	0,062
	3	4	0,045	0,046	0,051	0,076	0,059
	4	6	0,041	0,041	0,05	0,060	0,057
	5	8	0,037	0,037	0,049	0,050	0,056
	6	10	0,039	0,039	0,05	0,057	0,059
	7	12	0,044	0,045	0,052	0,069	0,065
1	2	3	4	5	6	7	8
НТМ-140 (зеленые пластины)	1	0	0,044	0,048	0,053	0,090	0,065
	2	2	0,038	0,042	0,05	0,082	0,059
	3	4	0,033	0,036	0,048	0,070	0,056
	4	6	0,029	0,031	0,047	0,055	0,054
	5	8	0,025	0,025	0,046	0,046	0,053
	6	10	0,027	0,028	0,047	0,050	0,054
	7	12	0,032	0,035	0,049	0,059	0,061
1	2	3	4	5	6	7	8
ABSflex (белые пластины)	1	0	0,048	0,052	0,058	0,099	0,07
	2	2	0,043	0,047	0,056	0,090	0,064
	3	4	0,039	0,041	0,054	0,081	0,062
	4	6	0,035	0,036	0,053	0,067	0,06
	5	8	0,031	0,030	0,052	0,056	0,06

ПРОДОЛЖЕНИЕ ПРИЛ. № 1

1	2	3	4	5	6	7	8
	6	10	0,033	0,033	0,054	0,066	0,064
	7	12	0,037	0,039	0,056	0,081	0,070

ПРИЛОЖЕНИЕ № 2

Результаты измерений параметра *Ra* на профилометре TR 110

№ Образца	Угол выращивания	№ точки (*z* = 25 мкм)									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	*Ra*
E-glass (прозрачные пластины)											
1	0	1,81	1,81	1,84	1,87	1,81	1,79	1,79	1,77	1,79	1,81
2	2	1,63	1,58	1,67	1,72	1,78	1,69	1,69	1,68	1,71	1,68
3	4	1,6	1,56	1,57	1,62	1,75	1,74	1,67	1,55	1,55	1,62
4	6	1,51	1,51	1,56	1,48	1,58	1,59	1,57	1,55	1,53	1,54
5	8	1,35	1,38	1,49	1,47	1,45	1,47	1,42	1,45	1,48	1,44
6	10	1,45	1,45	1,45	1,43	1,44	1,48	1,44	1,48	1,48	1,46
7	12	1,55	1,55	1,58	1,59	1,54	1,56	1,56	1,61	1,54	1,56
НТМ-140 (зеленые пластины)											
1	0	1,65	1,64	1,63	1,62	1,71	1,65	1,68	1,68	1,66	1,66
2	2	1,64	1,63	1,55	1,55	1,61	1,51	1,55	1,57	1,57	1,58
3	4	1,63	1,62	1,44	1,47	1,47	1,48	1,43	1,41	1,41	1,48
4	6	1,45	1,41	1,41	1,47	1,43	1,46	1,48	1,41	1,38	1,43
5	8	1,41	1,39	1,4	1,4	1,35	1,29	1,31	1,29	1,35	1,35
6	10	1,45	1,4	1,38	1,41	1,4	1,39	1,39	1,33	1,33	1,39
7	12	1,5	1,47	1,44	1,42	1,42	1,45	1,45	1,47	1,47	1,45
ABSflex (белые пластины)											
1	0	1,89	1,89	1,85	1,85	1,83	1,89	1,85	1,87	1,87	1,87
2	2	1,78	1,77	1,79	1,68	1,79	1,78	1,75	1,73	1,82	1,77
3	4	1,72	1,72	1,74	1,69	1,77	1,77	1,7	1,69	1,68	1,72

4	6	1,68	1,63	1,62	1,68	1,69	1,73	1,72	1,68	1,65	1,68
5	8	1,52	1,52	1,56	1,51	1,57	1,52	1,52	1,57	1,55	1,54
6	10	1,61	1,59	1,59	1,57	1,57	1,55	1,55	1,55	1,61	1,58
7	12	1,65	1,67	1,75	1,73	1,72	1,7	1,69	1,7	1,71	1,70
№ точки (*z* = 50 мкм)											
№ Образца	Угол выращивания	1	2	3	4	5	6	7	8	9	*Ra*
E-glass (прозрачные пластины)											
1	0	1,86	1,91	1,87	1,88	1,77	1,84	1,87	1,85	1,77	1,85
2	2	1,72	1,77	1,77	1,72	1,72	1,74	1,83	1,79	1,81	1,76
3	4	1,71	1,71	1,75	1,68	1,72	1,72	1,71	1,65	1,65	1,70
4	6	1,61	1,58	1,58	1,61	1,58	1,59	1,57	1,61	1,61	1,59
5	8	1,51	1,52	1,59	1,55	1,54	1,57	1,54	1,54	1,5	1,54
6	10	1,62	1,63	1,61	1,67	1,64	1,61	1,61	1,64	1,68	1,63
7	12	1,78	1,77	1,78	1,78	1,78	1,78	1,71	1,71	1,74	1,76
НТМ-140 (зеленые пластины)											
1	0	1,78	1,76	1,75	1,78	1,78	1,7	1,71	1,75	1,75	1,75
2	2	1,74	1,75	1,65	1,81	1,77	1,69	1,61	1,61	1,67	1,70
3	4	1,71	1,7	1,66	1,62	1,62	1,52	1,57	1,59	1,61	1,62
4	6	1,52	1,51	1,51	1,58	1,54	1,58	1,54	1,5	1,5	1,53
5	8	1,47	1,47	1,44	1,46	1,49	1,47	1,46	1,42	1,41	1,45
6	10	1,59	1,57	1,57	1,49	1,51	1,53	1,51	1,47	1,52	1,53
7	12	1,71	1,71	1,71	1,7	1,7	1,69	1,64	1,65	1,64	1,68

ABSflex (белые пластины)											
1	0	1,89	1,76	1,83	1,82	1,85	1,8	1,93	1,93	1,97	1,92
2	2	1,83	1,82	1,81	1,61	1,81	1,81	1,85	1,81	1,85	1,82
3	4	1,84	1,68	1,68	1,72	1,71	1,72	1,75	1,71	1,8	1,77
4	6	1,69	1,67	1,66	1,66	1,67	1,62	1,69	1,69	1,69	1,70
5	8	1,61	1,74	1,74	1,77	1,77	1,75	1,66	1,67	1,65	1,65
6	10	1,71	1,85	1,82	1,83	1,81	1,8	1,78	1,78	1,78	1,76
7	12	1,85	1,85	1,82	1,83	1,81	1,8	1,84	1,84	1,85	1,83
№ точки (*z* = 75 мкм)											
№ Образца	Угол выращивания	1	2	3	4	5	6	7	8	9	*Ra*
E-glass (прозрачные пластины)											
1	0	1,89	1,82	1,82	1,78	1,85	1,83	1,91	1,92	1,93	1,92
2	2	1,88	1,71	1,75	1,77	1,77	1,79	1,91	1,86	1,86	1,85
3	4	1,75	1,68	1,65	1,71	1,61	1,75	1,72	1,7	1,79	1,75
4	6	1,71	1,65	1,59	1,55	1,64	1,67	1,69	1,73	1,71	1,69
5	8	1,68	1,73	1,71	1,69	1,74	1,7	1,59	1,58	1,57	1,61
6	10	1,71	1,85	1,78	1,79	1,84	1,76	1,64	1,64	1,68	1,69
7	12	1,83	1,85	1,78	1,79	1,84	1,76	1,83	1,78	1,7	1,80
НТМ-140 (зеленые пластины)											
1	0	1,88	1,79	1,75	1,77	1,81	1,74	1,85	1,81	1,83	1,83
2	2	1,81	1,71	1,69	1,69	1,7	1,68	1,74	1,72	1,77	1,77
3	4	1,71	1,65	1,62	1,62	1,67	1,65	1,71	1,69	1,71	1,70
4	6	1,65	1,65	1,62	1,62	1,67	1,65	1,65	1,62	1,66	1,64

5	8	1,57	1,64	1,64	1,62	1,65	1,65	1,56	1,56	1,61	1,56
6	10	1,61	1,74	1,73	1,71	1,7	1,79	1,61	1,61	1,62	1,63
7	12	1,71	1,74	1,73	1,71	1,7	1,79	1,71	1,71	1,74	1,73
ABSflex (белые пластины)											
1	0	2	1,86	1,88	1,92	1,91	1,89	1,95	1,99	1,99	1,97
2	2	1,91	1,82	1,82	1,81	1,85	1,81	1,9	1,91	1,92	1,90
3	4	1,86	1,72	1,73	1,73	1,71	1,75	1,85	1,81	1,8	1,83
4	6	1,74	1,67	1,66	1,65	1,67	1,62	1,75	1,76	1,78	1,74
5	8	1,69	1,75	1,75	1,73	1,77	1,72	1,64	1,64	1,65	1,65
6	10	1,73	1,81	1,82	1,83	1,81	1,8	1,74	1,72	1,72	1,74
7	12	1,82	1,81	1,82	1,83	1,81	1,8	1,82	1,85	1,85	1,82
№ точки (*z* = 100 мкм)											
№ Образца	Угол выращивания	1	2	3	4	5	6	7	8	9	*Ra*
E-glass (прозрачные пластины)											
1	0	2,01	1,97	1,95	1,89	1,89	1,85	1,95	2	2	2,01
2	2	1,97	1,81	1,81	1,79	1,8	1,89	1,91	1,86	1,9	1,91
3	4	1,82	1,72	1,75	1,7	1,75	1,75	1,89	1,81	1,81	1,83
4	6	1,75	1,7	1,69	1,69	1,72	1,72	1,79	1,79	1,71	1,75
5	8	1,7	1,75	1,8	1,79	1,8	1,8	1,69	1,68	1,7	1,70
6	10	1,79	1,85	1,89	1,79	1,8	1,8	1,79	1,78	1,78	1,79
7	12	1,83	1,85	1,89	1,79	1,88	1,88	1,86	1,88	1,85	1,87

НТМ-140 (зеленые пластины)											
1	0	1,93	1,96	1,94	1,85	1,85	1,9	1,9	1,91	1,93	1,91
2	2	1,87	1,78	1,75	1,75	1,8	1,75	1,84	1,82	1,82	1,85
3	4	1,75	1,68	1,72	1,72	1,7	1,7	1,75	1,71	1,71	1,75
4	6	1,69	1,67	1,65	1,63	1,64	1,64	1,68	1,65	1,65	1,69
5	8	1,67	1,71	1,74	1,71	1,72	1,72	1,66	1,68	1,65	1,65
6	10	1,71	1,82	1,83	1,81	1,81	1,85	1,71	1,75	1,75	1,72
7	12	1,81	1,82	1,83	1,81	1,81	1,85	1,85	1,81	1,81	1,82
ABSflex (белые пластины)											
1	0	2,05	1,94	1,94	1,92	1,92	1,95	2,05	2,05	2,01	2,05
2	2	2	1,92	1,92	1,91	1,91	1,89	1,95	2	2	1,96
3	4	1,94	1,82	1,83	1,83	1,81	1,81	1,89	1,85	1,85	1,90
4	6	1,82	1,77	1,76	1,75	1,77	1,77	1,85	1,88	1,88	1,84
5	8	1,79	1,79	1,79	1,87	1,87	1,82	1,74	1,75	1,75	1,76
6	10	1,8	1,92	1,92	1,91	1,91	1,89	1,8	1,8	1,82	1,82
7	12	1,9	1,92	1,92	1,91	1,91	1,89	1,89	1,95	1,95	1,92

ПРИЛОЖЕНИЕ № 3

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2018615757

"Расчет ожидаемых параметров точности изделий, получаемых по технологии прототипирования"

Правообладатель: ***Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Российский университет транспорта (МИИТ)" (РУТ (МИИТ)) (RU)***

Авторы: ***Ларионов Максим Александрович (RU), Гусев Денис Витальевич (RU), Волков Дмитрий Валентинович (RU)***

Заявка № **2018613239**

Дата поступления **03 апреля 2018 г.**

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ ***16 мая 2018 г.***

Руководитель Федеральной службы по интеллектуальной собственности

Г.П. Ивлиев

ПРИЛОЖЕНИЕ № 4

НПО ИТ
РОССИЙСКИЕ КОСМИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ

АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО
«НАУЧНО-ПРОИЗВОДСТВЕННОЕ ОБЪЕДИНЕНИЕ
ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ ТЕХНИКИ»

Российская Федерация, 141074, Московская область, г. Королев, ул. Пионерская, дом 2. Телефон: +7 (499)750-40-50 доб. 10-78, Факс: +7 (495)488-96-48, +7 (495)516-50-80, E-mail: npoit@npoit.ru
ОКПО 07515339, ОГРН 1095018006555, ИНН/КПП 5018139517/501801001

26.02.18 № НТЦ-5/459

На № _____

УТВЕРЖДАЮ
Заместитель генерального директора
по производству и технологиям
_____/С.В. Сорокин
«26» 02 2018г.

АКТ
ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ИСПЫТАНИЙ
программы «Расчета ожидаемых параметров точности изделий, получаемых по технологии прототипирования» и схемы базирования для изготовления изделий по технологии быстрого прототипирования

Комиссия, состоящая из представителей Акционерного общества «Научно-производственное объединение измерительной техники», г. Королёв, составила настоящий акт о нижеследующем:

1. В сентябре 2017г. на производственном оборудовании АО «НПО ИТ» были опробованы методические рекомендации по выбору оптимальных режимных параметров процесса быстрого прототипирования по методу 3SP для изготовления корпусных деталей датчиковой аппаратуры, а также программа «Расчета ожидаемых параметров точности изделий, получаемых по технологии прототипирования».
2. В результате проведенных испытаний были изготовлены корпуса для датчиков температуры на 3D-принтере EnvisionTec ULTRA 3 HD методом 3SP.
3. В настоящий момент комиссия констатирует, что применение рекомендаций по выбору оптимальной схемы базирования для изготовления изделий по технологии быстрого прототипирования методом 3SP позволяет снизить шероховатость изготавливаемых изделий в 1,5–2 раза (Ra<1,25 мкм), а программа «Расчета ожидаемых параметров точности изделий, получаемых по технологии прототипирования» позволяет произвести предварительный расчет ожидаемой шероховатости и точности (отклонения от плоскостности, параллельности, перпендикулярности) готового изделия, получаемого по технологии быстрого прототипирования методом 3SP, до его изготовления.

Подписи членов комиссии:

Советник генерального директора
по научной работе, д.т.н. А.П. Мороз

Главный технолог, к.т.н. М.Н. Дерябин

№ 002129