

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

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

Р.А. ВДОВИН, А.В. БАЛЯКИН, Е.С. ГОНЧАРОВ

СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ
ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ
КРУПНОГАБАРИТНЫХ ОТЛИВОК
ДЕТАЛЕЙ ГТД

Одобрено редакционно-издательским советом федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева» в качестве дополнительной учебной литературы для обучающихся по основной образовательной программе по направлению подготовки 24.04.05 Двигатели летательных аппаратов

САМАРА
Издательство Самарского университета
2022

УДК 004.9
ББК 32.81
В253

Рецензенты: канд. техн. наук, руководитель проекта по инновационному развитию ПАО «ОДК-Кузнецов» Д. Н. Д м и т р и е в ,
канд. техн. наук, начальник бюро программного управления АО «Салют» Г. О. Б е л о в

Вдовин, Роман Александрович

В253 **Современные технологии при производстве крупногабаритных отливок деталей ГТД:** монография / *Р.А. Вдовин, А.В. Балякин, Е.С. Гончаров.* – Самара: Издательство Самарского университета, 2022. – 112 с. : ил.

ISBN 978-5-7883-1853-0

В монографии рассматриваются современные технологии 3D печати и компьютерного моделирования, используемые при изготовлении крупногабаритных тонкостенных отливок деталей для промышленных газотурбинных двигателей и энергетических установок, отличающихся стабильными свойствами литого металла и повышенной размерной точностью.

Книга адресована научным работникам, инженерам-технологам, аспирантам и студентам, специализирующимся в области технологии двигателестроения.

УДК 004.9
ББК 32.81

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение.....	4
Глава 1. Проектирование крупногабаритных тонкостенных электронных моделей отливок деталей с адаптированной конструкцией под технологические возможности и ограничения промышленных 3D принтеров	6
Глава 2. Оптимизация конструкции литниково-питающей системы отливки крупногабаритной и тонкостенной детали, адаптированной под технологические возможности и ограничения промышленных 3D принтеров и производственное оборудование индустриальных предприятий	38
Глава 3. Цифровой двойник технологического процесса литья крупногабаритных и тонкостенных отливок деталей, спроектированный с использованием отечественного программного обеспечения СКМ ЛП «ПолигонСофт»	55
Глава 4. Описание процесса изготовления опытного образца крупногабаритной тонкостенной отливки детали, отличающейся повышенной размерной точностью	73
Глава 5. Разработка методики контроля геометрических размеров крупногабаритных тонкостенных отливок деталей, базирующейся на принципах реверс инжиниринга (3D сканирования) и обратного проектирования	84
Заключение.....	108
Список использованных источников.....	110

ВВЕДЕНИЕ

В монографии рассматривается создание современного высоко-технологического производства крупногабаритных тонкостенных отливок деталей для перспективных индустриальных ГТД и ГТУ.

В настоящее время для серийного производства деталей двигателей используется базовая технология, ключевой особенностью которой является проектирование и изготовление металлических пресс-форм. В текущих условиях технологического суверенитета, импортозамещения и импортоопережения развитие отечественного двигателестроения, основанного на использовании отечественных ресурсосберегающих технологий, отечественного оборудования и программного обеспечения является крайне важной актуальной задачей. В этой связи длительность этапов проектирования, создания и ввода в эксплуатацию новых конструкций двигателей должна быть минимальна. Проведенный анализ традиционного технологического процесса показал, что трудоемкость проектирования и изготовления металлических пресс-форм для изготовления отливок деталей составляет от 6 месяцев и более, при условии, что конструкция проектируемых пресс-форм должна учитывать огромное количество технологических параметров (усадку металла в отливках, припуски для последующих этапов механической обработки и пр.). Таким образом, в условиях производства новых конструкций двигателей, которые характеризуются многовариантностью и итерационностью, просчет и ошибки на стадии проектирования приводят в конечном итоге к значительным финансовым и временным затратам.

В этой связи модернизация существующего технологического процесса заготовительного производства в части исключения доро-

гостоящего и длительного этапа проектирования и изготовления металлических пресс-форм и внедрения технологий 3D печати позволит без потери качества изготавливать различные конструкции деталей современных двигателей для отработки технологии в разы быстрее и с минимальными затратами.

Данная монография описывает разработанную отечественную конкурентоспособную технологию, позволяющую в кратчайшие сроки и с минимальными трудозатратами изготавливать выжигаемые модели отливок деталей промышленных ГТД и ГТУ, характеризующихся повышенной размерной точностью.

Глава 1. ПРОЕКТИРОВАНИЕ КРУПНОГАБАРИТНЫХ ТОНКОСТЕННЫХ ЭЛЕКТРОННЫХ МОДЕЛЕЙ ОТЛИВОК ДЕТАЛЕЙ С АДАПТИРОВАННОЙ КОНСТРУКЦИЕЙ ПОД ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ВОЗМОЖНОСТИ И ОГРАНИЧЕНИЯ ПРОМЫШЛЕННЫХ 3D ПРИНТЕРОВ

Применение литья крупногабаритных тонкостенных заготовок газотурбинных двигателей (ГТД) и энергетических установок (ЭУ) по выжигаемым моделям полученным методом аддитивных технологий дает существенный эффект. Основное преимущество по сравнению с традиционной технологией, подразумевающей изготовление выжигаемых или выплавляемых моделей в пресс-форме – сокращение времени получения первой отливки, снижение затрат на оснастку.

При использовании выжигаемых крупногабаритных тонкостенных заготовок, получаемых по технологии FDM-печати на 3D принтере работы, выполняются в следующей последовательности:

- построение трехмерной модели отливки совместно с литниковой питающей системой (ЛПС);
- конвертация 3D модели отливки с ЛПС в формат *.stl, необходимый для работы 3D-принтера;
- слайсинг 3D модели отливки с ЛПС и выращивание на 3D принтере;
- постобработка поверхности модели (удаление поддерживающих структур);
- формирование литейной оболочки;
- выжигание модели отливки с ЛПС и удаление несгоревших остатков;

- формовка литейной формы в опоку и ее прокалка;
- заливка расплава в литейную форму;
- выбивка залитой формы и обрезка ЛПС.

Формирование литейной оболочки, заливка расплава и все последующие операции идентичны традиционной технологии литья по выплавляемым моделям.

Проведем анализ работ по изготовлению пластиковых FDM-моделей, оказывающих влияние на алгоритм проектирования крупногабаритных тонкостенных электронных моделей отливок деталей с адаптированной конструкцией под технологические возможности и ограничения промышленных 3D принтеров. Послойное выращивание по FDM-технологии имеет особенности, которые необходимо учитывать для получения необходимого качества поверхности. Сущность процесса FDM состоит в укладке разогретой полимерной нити. В плоскости своего стола 3D-принтер может воспроизводить контур детали с высокой точностью, определяемой точностью приводов. В результате криволинейные поверхности в горизонтальных сечениях получаются гладкими. В вертикальных сечениях наклонных поверхностей достичь такого же качества невозможно, так как кривизна поверхностей формируется посредством сдвига слоев относительно друг друга. Если наклон поверхностей относительно горизонтали невелик, нити вышележащих слоев смещаются на значительную величину и поверхность становится ступенчатой. Поэтому перед выращиванием модели необходимо анализировать геометрию будущей отливки, предусматривать припуски на обрабатываемых поверхностях и ориентировать модель на платформе построения принтера оптимальным образом. Уменьшению погрешностей также способствует использование минимального диаметра нити (толщины слоя). Для распространенных моделей принтеров минимальное значение составляет 0,178 мм. Стоит отметить, что уменьшение толщины слоя приводит к увеличению

времени выращивания изделия и соответственно увеличению его стоимости.

Правила проектирования крупногабаритных тонкостенных электронных моделей отливок деталей с адаптированной конструкцией под технологические возможности и ограничения промышленных 3D принтеров являются необходимостью и предпосылкой для полного использования возможностей аддитивной технологии для производства выжигаемых моделей. Такие правила проектирования могут определять аспекты геометрической точности и доступной шероховатости поверхности. В целом, методический подход к систематическому созданию правил проектирования реализуется аналогично для всех геометрических структур, как схематично показано на рисунке 1.1.



Рисунок 1.1 – Методический подход к систематическому созданию правил проектирования деталей под технологические возможности и ограничения 3D принтеров

Как одна из самых сложных базовых геометрий, наклонные конструкции, создают ограничения для процессов FDM-печати на 3D принтере. Именно для этой геометрии возникает наибольшее количество особенностей, и необходимо провести наиболее тщательный анализ.

Схема технологического процесса FDM печати представлена на рисунке 1.2.

На этапе проектирования отливки и ЛПС формируются требования к поверхностям, их взаимному расположению, точности изго-

товления с учетом возможностей и ограничений 3D принтеров. Послойное выращивание по FDM технологии имеет особенности, которые необходимо учитывать для получения необходимого качества поверхности. Сущность процесса FDM состоит в укладке разогретой полимерной нити. При этом в материале происходят физические процессы, представленные на рисунке 1.3. Параметры, влияющие на результат печати, представлены на рисунке 1.4.



Рисунок 1.2 – Схема технологического процесса FDM печати

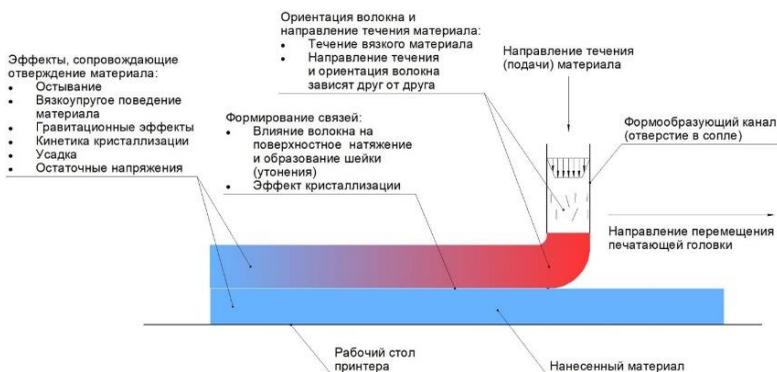


Рисунок 1.3 – Физические процессы, проходящие в материале в процессе FDM печати

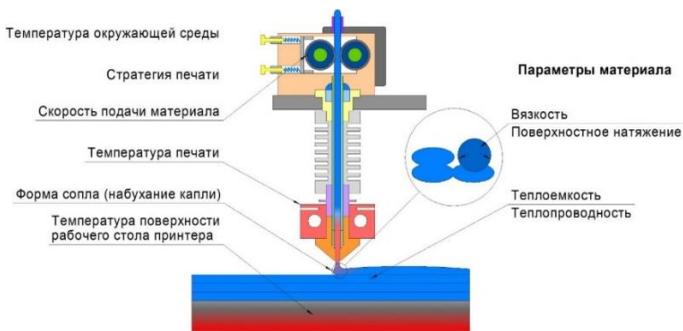
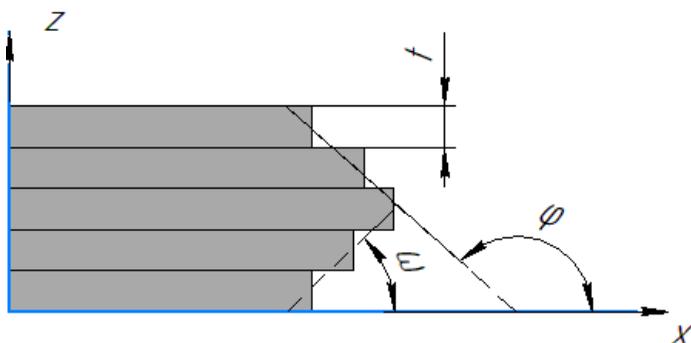


Рисунок 1.4 – Основные параметры, влияющие на качество печати

В плоскости стола 3D принтер воспроизводит контур детали с высокой точностью, определяемой точностью приводов. Криволинейные поверхности в горизонтальных сечениях получаются с меньшей шероховатостью, чем в вертикальных сечениях и наклонных поверхностях. Так как кривизна поверхностей формируется посредством сдвига слоев относительно друг друга, формируется эффект «лесенки». Из-за данного эффекта возникают большие значения шероховатости и поверхность становится ступенчатой рисунок 1.5.



ω – острый угол наклона; ϕ – тупой угол наклона; t – толщина слоя

Рисунок 1.5 – Схема образования эффекта «лесенки» на наклонных поверхностях

Изготовление наклонных конструкций является одним из ограничивающих критериев в процессе FDM-печати. В зависимости от материала и технологических параметров минимальный угол наклона для изготовления неподдерживаемых конструкций определен для FDM между 20° и 56° . Как следствие, основное ограничение для изготовления наклонных конструкций обусловлено необходимостью вспомогательных структур в процессе FDM-печати. С ростом угла наклона увеличивается волнистость поверхности, увеличивается шероховатость поверхности, возникает дефект не сплавления слоев. Без использования поддержки, для получения хорошего качества поверхности, максимальный угол построения лежит в интервале от 53° до 56° .

С учетом вышеизложенного, сформулируем правила проектирования крупногабаритных тонкостенных электронных моделей отливок деталей с адаптированной конструкцией под технологические возможности и ограничения промышленных 3D принтеров:

1) необходимо определиться с расположением модели на печатном столе. Поверхности, расположенные поверх поддерживающих опор, не будут иметь такую же шероховатость, как поверхности, расположенные непосредственно на печатном столе;

2) необходимо минимизировать количество поддерживающих структур. 3D-принтеры не могут печатать в воздухе, а для больших выступов требуются поддерживающие структуры (поддержки). Чтобы сэкономить время, материал и улучшить качество поверхности объекта, необходимо проектировать объект таким образом, чтобы свести к минимуму необходимость в поддерживающих структурах;

3) при проектировании моделей, места соединения поверхностей необходимо скруглять радиусом или фаской;

4) печать имеет меньшую прочность в направлении, параллельном напечатанным слоям, чем в направлении, перпендикулярном напечатанным слоям. Если напечатанная деталь должна выдерживать определенные нагрузки, необходимо это учитывать;

5) при необходимости, можно разделить модель на несколько частей, а затем найти оптимальное положение для этих частей на платформе построения;

6) при моделировании деталей, которые должны соединяться друг к другу, необходимо учитывать допуск (зазор между деталями). В последствии невозможно будет соединить две детали с нулевым зазором (у размеров, напечатанных в номинал). Необходимо создать зазоры между соединительными поверхностями. Не существует единого «универсального» значения – все зависит от размера модели, горизонтальной или вертикальной ориентации, поверхностей деталей, которые должны соединяться, калибровки, настроек 3D печати, используемого материала и других аспектов. Обычно достаточно зазора в пределах 0,15 – 0,2 мм;

7) круглое отверстие, напечатанное вертикально, не будет идеально круглым. Для достижения лучшего результата круглые отверстия необходимо располагать по горизонтали;

8) при моделировании стенок модели необходимо учитывать диаметр сопла при печати и минимальную ширину печати. Например, ширина одного периметра при печати со стандартным соплом диаметром 0,4 мм составляет около 0,45 мм. Это влияет на общую ширину стенок модели:

- невозможно напечатать толщину стенки меньше диаметра сопла;

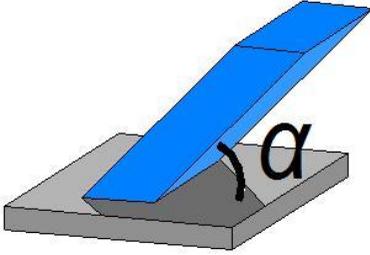
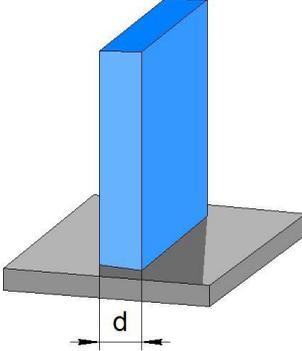
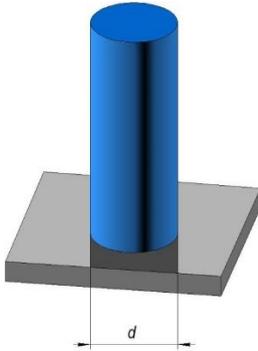
- невозможно напечатать толщину стенки больше одного периметра, но меньше двух периметров;

- один периметр, равен примерно диаметру сопла;

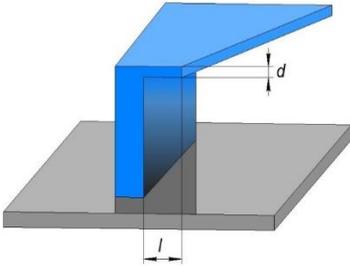
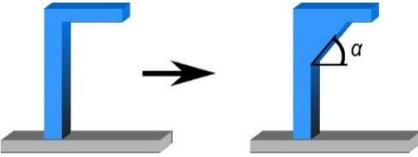
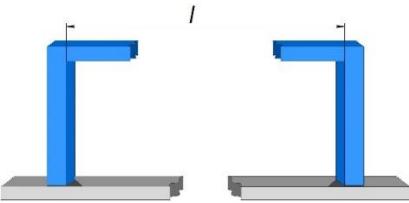
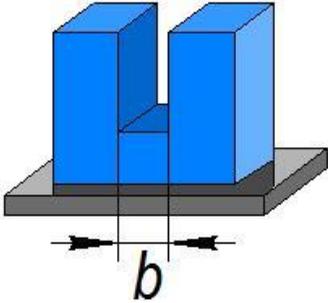
- толщину стенок лучше подбирать кратную одному периметру (диаметру сопла);

9) при моделировании крупногабаритных тонкостенных электронных моделей отливок деталей с адаптированной конструкцией необходимо учитывать технологические возможности и ограничения промышленных 3D принтеров и рекомендации, приведенные в таблице 1.1.

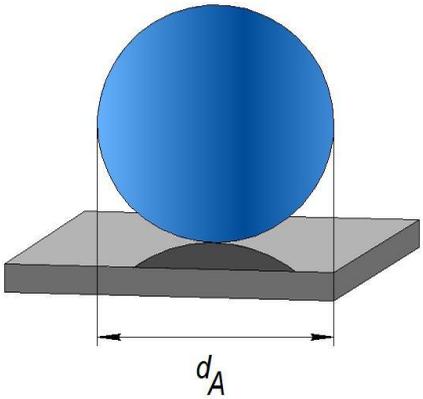
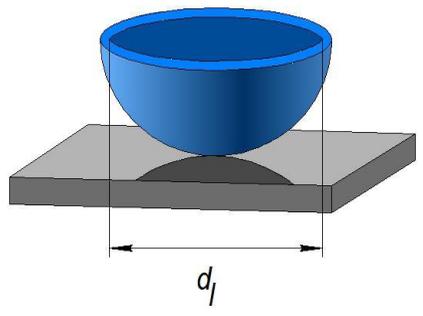
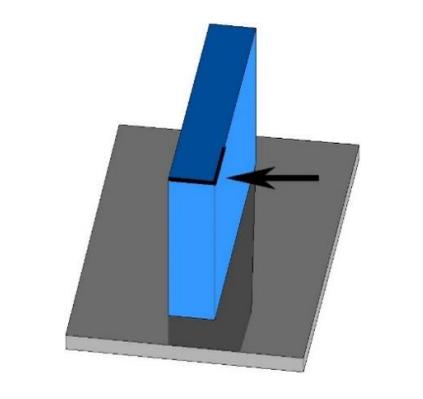
Таблица 1.1 – Рекомендации по расположению 3D моделей при FDM печати

	Вид поверхности	Ограничения FDM	Примечание
	1	2	3
Наклонные		$0^\circ \leq \alpha \leq 30^\circ$: Необходимые опорные конструкции $30^\circ < \alpha \leq 90^\circ$: элемент технологичный	Необходимо поддерживать конструкции с большим наклоном поддерживающие конструкции не нужны
Тонкие стенки		$d \geq 0,3$ мм, для сопла диаметром 0,4 мм	Меньшие стенки разрушаются в процессе
Цилиндры		$d \geq 1$ мм	Соединение со столом 3D принтера требует более больших диаметров

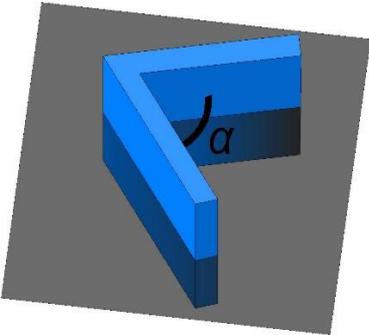
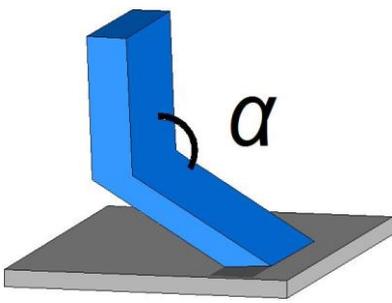
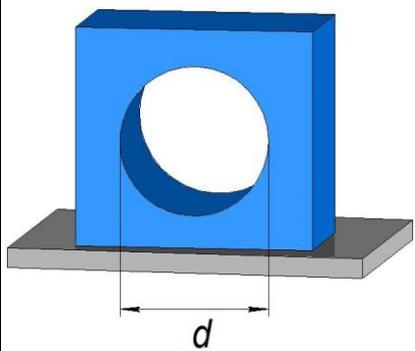
Продолжение табл. 1.1.

		1	2	3
Выступы (нависающие поверхности)			Невозможно	Самонесущие конструкции, рекомендуемые для процесса FDM печати необходимо заменять печатью мостов как показано ниже
			$l \leq 2 \text{ мм}$	
			l до 100 мм	
Паз			$b \geq 0.3 \text{ мм}$	Меньшие пазы запечатываются в процессе FDM печати

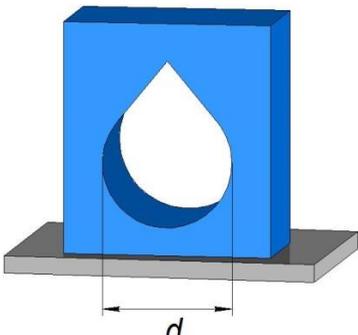
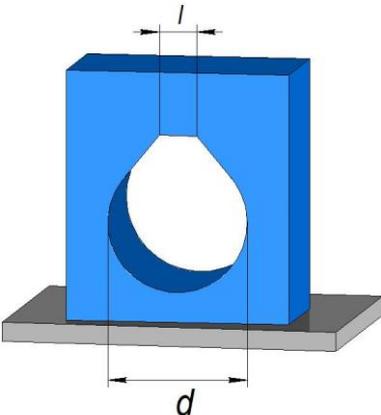
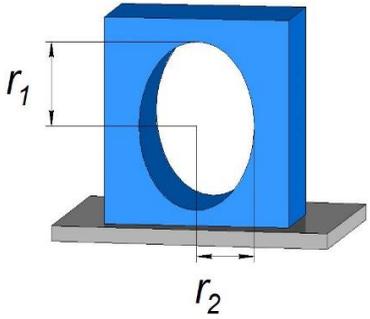
Продолжение табл. 1.1

	1	2	3
Сфера (внешний радиус)		$d_A \geq 2 \text{ мм}$ Необходимые опорные конструкции	Необходимо удаление опорных конструкций; Для получения качественной поверхности требуется добавление припуска для постобработки. Либо разделение шара на две половинки
Полусфера (внутренний)		$d_I \geq 1 \text{ мм}$ Необходимые опорные конструкции	Необходимо удаление опорных конструкций; Для получения качественной поверхности требуется добавление припуска для постобработки. Выращивать необходимо от плоскости
Внешние кромки (углы)		$90^\circ \leq \alpha \leq 180^\circ$: внешние края должны быть закруглены	Должна быть гарантирована минимальная толщина стенок; Изготовление острых кромок возможно с использованием постобработки

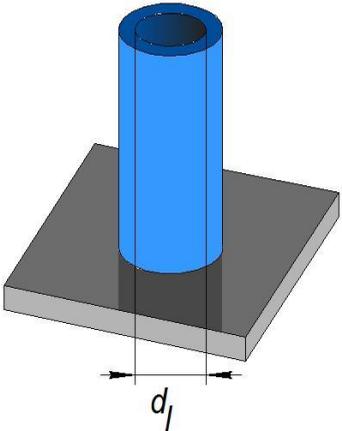
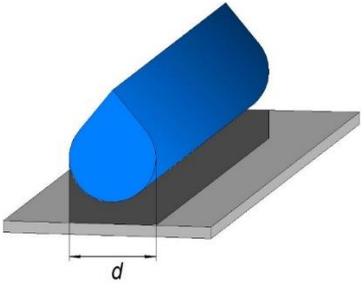
Продолжение табл. 1.1

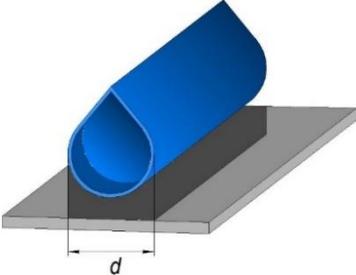
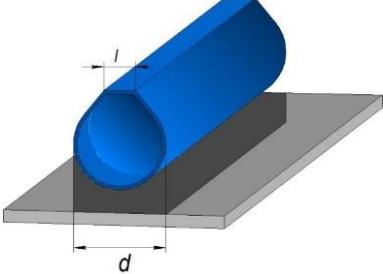
	1	2	3
внутренние кромки (углы)		$90^\circ \leq \alpha \leq 180^\circ$: элемент технологичный, независимо от угла	Сопло не может вырастить стенки с острыми углами, угол будет с минимальным радиусом, зависящим от диаметра сопла
Скос (фаски)		$90^\circ \leq \alpha \leq 180^\circ$: элемент технологичный	Для удержания конструкции на столе 3D принтера требуется большая площадь поверхности (добавить кайму)
Отверстия		$d \geq 2 \text{ мм}$ Необходимые опорные конструкции	Необходимо удаление опорных конструкций; Для получения качественной поверхности требуется добавление припуска для постобработки. Без поддержек отверстие будет не цилиндрическим

Продолжение табл. 1.1

1	2	3
	<p>Элемент технологичный</p>	
	<p>$l \leq 5 \text{ мм}$</p> <p>Элемент технологичный</p>	<p>Самонесущие конструкции отверстия могут быть изготовлены FDM печатью независимо от диаметра</p>
	<p>$r_1 \gg r_2$</p>	<p>Эллиптические отверстия могут быть изготовлены FDM печатью независимо от диаметра</p>

Продолжение табл. 1.1

	1	2	3
Каналы		$d_1 \geq 0,4 \text{ мм}$	<p>Меньшие каналы герметизируются в процессе FDM печати</p>
Горизонтальные каналы		<p>Элемент технологичный</p>	<p>Самонесущие конструкции канала могут быть изготовлены FDM печатью независимо от диаметра без внутренних поддерживающих конструкций могут выполняться пустотелыми с целью экономии материала</p>

1	2	3
	Элемент технологичный	
	$l \leq 5 \text{ мм}$ Элемент технологичный	

С учетом всего выше написанного разработан алгоритм проектирования крупногабаритных тонкостенных электронных моделей отливок деталей с адаптированной конструкцией под технологические возможности и ограничения промышленных 3D принтеров, приведённый на рисунке 1.6.

Для исследования технологических возможностей и ограничений промышленного 3D принтера и геометрической точности печати и обрабатываемости конструкций изготавливается комплексная тестовая модель из PLA пластика (рисунок 1.7), которая позволяет проверить качество напечатанных свесов, перемычек, стабильность экструзии, возможность появления стрингинга (спагеттизации) и зависимость результата от температуры. Важным преимуществом этой модели является инструкция к ней, в которой указаны потенциальные решения различных проблем при 3D печати [1].



Рисунок 1.6 – Алгоритм проектирования крупногабаритных тонкостенных электронных моделей отливок деталей с адаптированной конструкцией под технологические возможности и ограничения промышленных 3D принтеров (Продолжение см. на с. 21, 22)



Рисунок 1.6 – Продолжение



Рисунок 1.6 – Окончание

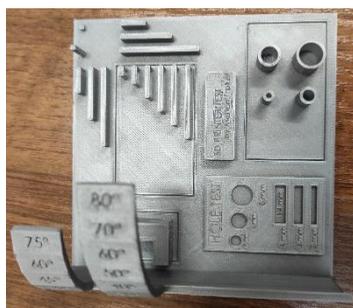
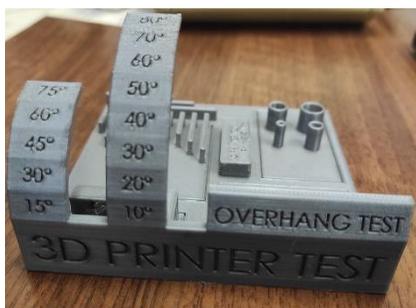


Рисунок 1.7 – Образец для исследования возможности 3Д печати конструкций из PLA пластика

Анализ качества напечатанной комплексной тестовой модели показал хорошие настройки 3D принтера для печати из PLA пластика. Проведем исследование, устанавливающее взаимосвязь свойств и качества изготавливаемых моделей, из PLA пластика, от расположения на платформе построения и температура экструзии материала.

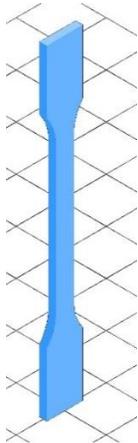
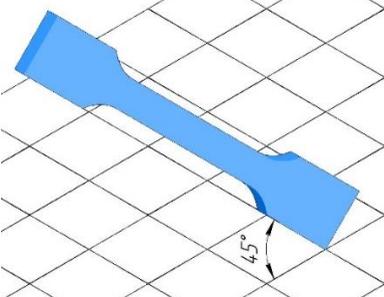
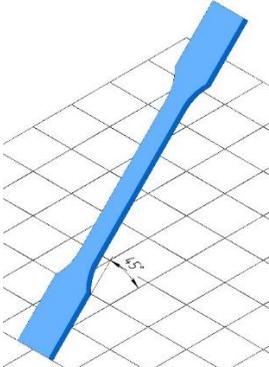
Параметры печати и расположение моделей на платформе построения.

Для выявления технологических возможностей и ограничений промышленных 3D принтеров, зависимости свойств и качества образцов, изготовленных из PLA пластика, от расположения образцов на платформе построения, был составлен план эксперимента (таблица 1.2), в котором в качестве переменных параметров были приняты: температура экструзии материала (215°C, 225°C и 235°C) и расположение образцов на платформе построения.

Таблица 1.2 – План проведения эксперимента

Расположение образцов на платформе построения	Температура, °C / номер образца		
1	2		
	215°C Образец 1,2,3	225°C Образец 1,2,3	235°C Образец 1,2,3
	215°C Образец 4,5,6	225°C Образец 4,5,6	235°C Образец 4,5,6

Окончание табл. 1.2

1	2		
	<p>215°С Образец 7,8,9</p>	<p>225°С Образец 7,8,9</p>	<p>235°С Образец 7,8,9</p>
	<p>215°С Образец 10,11,12</p>	<p>225°С Образец 10,11,12</p>	<p>235°С Образец 10,11,12</p>
	<p>215°С Образец 13,14,15</p>	<p>225°С Образец 13,14,15</p>	<p>235°С Образец 13,14,15</p>

Параметры выращивания образцов, которые оставались постоянными:

- температура платформы построения 70°C;
- размер сопла (0,4 мм);
- высота слоя (0,2 мм);
- обдув – 50 %;
- текучесть материала 95%;
- скорость печати – 45 мм/с.

Для определения механических свойств при растяжении по ГОСТ 34370-2017 [2], с использованием 3D принтера были изготовлены образцы по ГОСТ 33693-2015 [3]. (рисунок 1.8). Образцы выращивались с различной ориентацией на платформе построения 3D принтера: горизонтально, вертикально и под углом 45°, при разных температурах экструзии материала (215°C, 225°C и 235 °C) таблица 1.2.

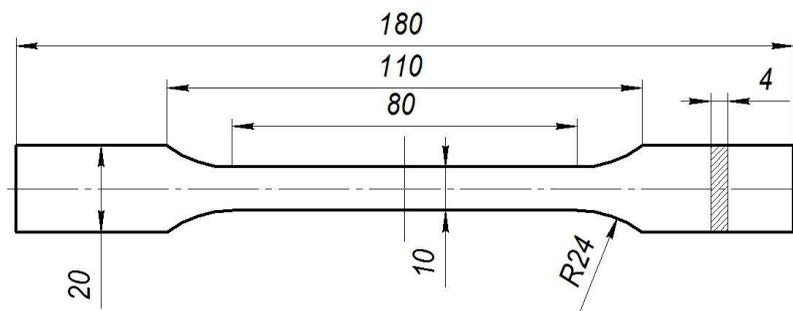


Рисунок 1.8 – Вид образца для определения механических свойств при растяжении по ГОСТ 33693

Исследование зависимости шероховатости поверхности от расположения.

На шероховатость поверхности влияет послойный метод выращивания и толщина выращиваемого слоя. Неудовлетворительное

качество поверхности выращенных моделей (высокая шероховатость) зачастую приводит к длительным доводочным работам, которую, как правило, для сложнопрофильных поверхностей, выполняют вручную. Исследование шероховатости было проведено для всех образцов, изготовленных для механических испытаний. На рисунке 1.9 представлена схема проведения измерений – каждый образец подвергался измерению шероховатости в двух направлениях.

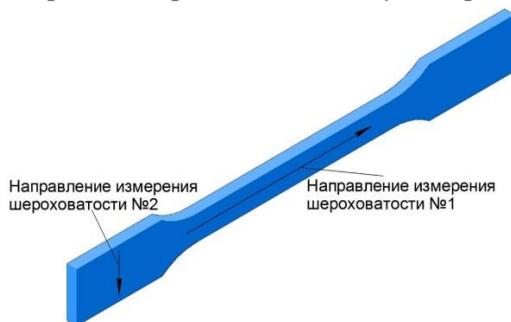


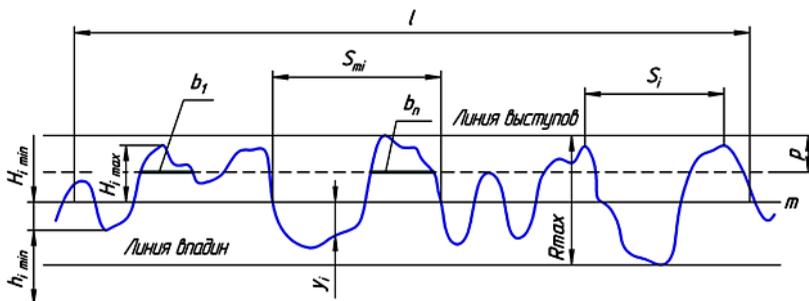
Рисунок 1.9 – Схема измерения шероховатости

Измерение шероховатости проводилось с помощью профилометра ИШП-210, использующего контактный щуповой метод измерения.

Критерием сравнения выступает параметр R_a – среднего арифметического значения отклонения профиля в пределах заданной длины (рисунок 1.10), так как данный параметр является наиболее предпочтительным при задании шероховатости.

Результаты измерения шероховатости образцов по параметру R_a представлены в сводной таблице 1.3. Анализ результатов таблицы 1.3 показал, что наименьшая шероховатость по параметру R_a – направление измерения 1 (вдоль длинной стороны образца см. рисунок 1.9), достигается на образцах под номерами 4, 5 и 6 для всего диапазона температур. Наименьшая шероховатость по параметру R_a , в направлении измерения 2 (вдоль короткой стороны образца см.

рисунок 1.9), достигается на образцах под номерами 7, 8 и 9 для всего диапазона температур.



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

Рисунок 1.10 – Параметры шероховатости

Таблица 1.3 – Значения шероховатости образцов, измеренных в направлении 1 и 2

Температура	№ образца	Направление 1 (продольное)		Направление 2 (поперечное)	
		Ra, мкм	Среднее значение	Ra, мкм	Среднее значение
1	2	3	4	5	6
215°C	1	0,78	0,77	8,59	8,58
	2	0,89		8,61	
	3	0,65		8,53	
	4	0,56	0,49	3,43	2,91
	5	0,42		2,42	
	6	0,48		2,89	

Окончание табл. 1.3

1	2	3	4	5	6	
	7	9,6	10,01	0,31	0,25	
	8	10,23		0,24		
	9	10,21		0,19		
		10	10,84	11,06	0,66	1,18
		11	11,01		1,74	
		12	11,32	1,13		
		13	7,41	6,63		
		14	7,72	7,45	6,42	6,49
15		7,22	6,41			
225°C	1	0,23	0,24	1,78	2,24	
	2	0,18		2,48		
	3	0,3		2,45		
	4	0,16	0,19	9,92	10,02	
	5	0,27		10,07		
	6	0,13		10,06		
	7	9,89	10,21	0,34	0,69	
	8	10,05		1,37		
	9	10,68		0,35		
	10	12,36	11,99	0,47	1,65	
	11	11,55		2,72		
	12	12,08		1,77		
	13	7,11	6,94	3,08	3,82	
	14	6,86		5,65		
	15	6,86		2,74		
235°C	1	0,45	0,43	1,69	1,43	
	2	0,36		1,03		
	3	0,49		1,57		
	4	0,19	0,26	9,69	9,81	
	5	0,45		9,84		
	6	0,13		9,91		
	7	10,99	11,1	0,36	0,29	
	8	11,62		0,24		
	9	10,68		0,27		
	10	11,95	12,05	0,61	1,08	
	11	12,61		0,94		
	12	11,59		1,69		
	13	7,08	6,86	6,01	6,25	
	14	7,05		6,06		
	15	6,46		6,68		

На шероховатость образца оказывает влияние его расположение на платформе построения, а также направление укладки расплавленной нити. Так для получения наименьшей шероховатости при выращивании необходимо располагать модели максимальным размером вдоль направления выращивания. Образцы, которые были изготовлены перпендикулярно направлению выращивания, имеют наиболее грубую шероховатость поверхности.

Исследование влияния линейной усадки и ориентации моделей на размерную точность.

Усадка материала – это уменьшение объёма и линейных размеров в процессе их формирования, а также охлаждения от температуры расплава до температуры окружающей среды. Усадка является одним из основных показателей, характеризующих свойства материала, поскольку является причиной появления внутренних напряжений и т.д. Её необходимо учитывать при разработке технологических процессов 3D печати по технологии FDM, т.к. в процессе изготовления деталей происходит расплавление исходного материала и его кристаллизация или застывание. Относительные численные характеристики изменения размеров пластиковых изделий при застывании и охлаждении называются коэффициентами усадки. Усадка материала в жидком состоянии характеризуется обычно объёмными единицами, в твёрдом состоянии – линейными.

Линейная усадка – это разница между размерами 3D модели и полученной по этой модели изделия в процессе 3D печати. Линейная усадка измеряется в процентах от указанных размеров изделия, полученного на 3D принтере в сравнении с размерами 3D модели созданной в CAD системе.

Основная причина линейной усадки заключается в термическом сжатии получаемого при выращивании изделия при её охлаждении до комнатной температуры. Линейная усадка начинается при температуре, когда образовалось достаточное количество твёрдой фазы. Эту температуру называют температурой начала линейной усадки.

Дальнейшее сокращение размеров при охлаждении определяется температурным коэффициентом линейного расширения, который обычно составляет одну треть от температурного коэффициента объёмного расширения. Повышение величины линейной усадки связано с термическими напряжениями, возникающими при охлаждении. Величина линейной усадки PLA пластика, заявленная производителем данного материала при изготовлении изделий, составляет 0,8 – 1,0%.

Для определения линейной усадки и оценки стабильности геометрических размеров были проведены измерения линейных размеров образцов. Измерения производились с помощью гладких микрометров МК-25 и МК-200, имеющих цену деления 0,01 мм и допустимую погрешность $\pm 0,004$ мм. У образцов проводились измерения трех линейных размеров, a , b и c , соответствующих 4, 180 и 10 мм на 3D-модели (рисунок 1.11).

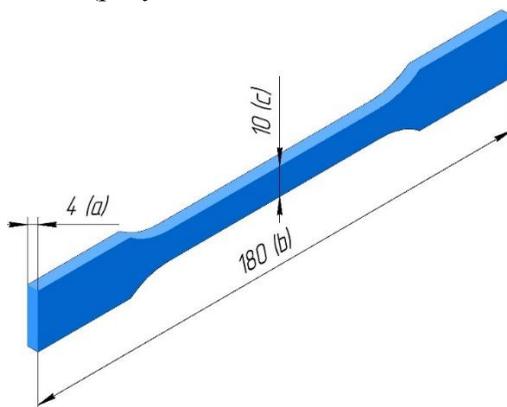


Рисунок 1.11 – Измеряемые параметры у образцов

В таблице 1.4 представлены результаты измерения образцов и величин свободной линейной усадки, расчет которой проводился по формуле (1.1):

$$\alpha_l = (l_0 - l) / l_0, \quad (1.1)$$

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

Таблица 1.4 – Результаты измерения образцов и величины
 линейной усадки

Темпера- тура	№ образца	4 (a), мм	α_l (a), %	180 (b), мм	α_l (b), %	10 (c), мм	α_l (c), %
1	2	3	4	5	6	7	8
215 °C	1	4,06	-0,015	180,23	-0,0013	10,03	-0,003
	2	4,11	-0,028	179,9	0,0006	9,93	0,007
	3	4,09	-0,023	180,16	-0,0009	9,98	0,002
	4	4,09	-0,023	180,31	-0,0017	9,84	0,016
	5	3,93	0,018	180,48	-0,0027	10,27	-0,027
	6	3,91	0,023	180,18	-0,0010	10,3	-0,030
	7	4,16	-0,040	179,35	0,0036	10,13	-0,013
	8	3,98	0,005	179,55	0,0025	10,12	-0,012
	9	3,98	0,005	179,74	0,0014	10,05	-0,005
	10	4,02	-0,005	179,79	0,0012	9,99	0,001
	11	3,96	0,010	179,82	0,0010	10,06	-0,006
	12	4,23	-0,058	179,74	0,0014	10,22	-0,022
	13	4,03	-0,008	179,85	0,0008	10,02	-0,002
	14	3,91	0,023	179,91	0,0005	10,13	-0,013
	15	4,05	-0,013	179,89	0,0006	10,31	-0,031
225 °C	1	4,35	-0,087	180,23	-0,0013	9,77	0,023
	2	4,33	-0,083	180,18	-0,0010	9,81	0,019
	3	4,34	-0,085	180,25	-0,0014	9,82	0,018
	4	3,9	0,025	180,43	-0,0024	10,25	-0,025
	5	4,01	-0,002	180,33	-0,0018	10,22	-0,022
	6	3,96	0,010	180,33	-0,0018	10,23	-0,023
	7	3,94	0,015	179,47	0,0029	9,99	0,001
	8	3,95	0,013	179,4	0,0033	10,02	-0,002
	9	3,96	0,010	179,43	0,0032	10,04	-0,004
	10	4,16	-0,040	179,92	0,0004	10,07	-0,007
	11	4,06	-0,015	179,83	0,0009	10,07	-0,007
	12	4,27	-0,067	179,84	0,0009	10,17	-0,017
	13	3,97	0,007	179,81	0,0011	10,15	-0,015
	14	3,9	0,025	179,82	0,0010	10,2	-0,020
	15	4,0	0,000	179,80	0,0011	10,1	-0,010

Окончание табл. 1.4

235 °С	1	4,22	-0,055	180,27	-0,0015	9,98	0,002
	2	4,1	-0,025	180,29	-0,0016	9,92	0,008
	3	4,18	-0,045	180,23	-0,0013	10,01	-0,001
	4	3,96	0,010	180,44	-0,0024	10,23	-0,023
	5	3,97	0,007	180,28	-0,0016	10,28	-0,028
	6	4,02	-0,005	180,38	-0,0021	10,17	-0,017
	7	4,03	-0,008	179,47	0,0029	10,04	-0,004
	8	4,02	-0,005	179,4	0,0033	10,06	-0,006
	9	3,93	0,018	179,45	0,0031	10,04	-0,004
	10	4,16	-0,040	179,82	0,0010	10,07	-0,007
	11	4,24	-0,060	179,72	0,0016	10,19	-0,019
	12	3,94	0,015	179,86	0,0008	10,05	-0,005
	13	3,99	0,002	179,79	0,0012	10,12	-0,012
	14	3,91	0,023	179,82	0,0010	9,89	0,011
	15	4,04	-0,010	179,81	0,0011	10,12	-0,012

Анализ данных из таблицы 1.4 показал, что расположение на платформе построения и процесс (направление) укладки расплавленного пластика имеет влияние на усадку материала. В процессе выращивания образцов имеет место сложно прогнозируемая объемная усадка материала. Так же на усадку материала большое влияние оказывает теплообмен. В процессе выращивания материал расплавляется и укладывается на платформу построения по программе согласно контуру 3D модели, затем он при остывании кристаллизуется и усаживается. На величину усадки образцов будет влиять:

– температура расплавления материала (от 215°С до 235°С), чем выше температура расплавления материала, тем больше время остывания и, тем больше усадка материала;

– близость образца к платформе построения – чем ближе образец к платформе построения, тем больше время остывания и, тем больше усадка материала. Так как образцы на платформе построения расположены под разными углами, платформа построения разо-

грета до 70°C, то температурное воздействие на каждую группу образцов будет различное.

Увеличение размеров образцов объясняется воздействием силы притяжения на расплавленный пластик. В момент экструзии и укладки пластика по программе пластик растекается и увеличивает размер образца. Для компенсации усадки материала при проектировании деталей, изготавливаемых на 3D принтере по технологии FDM из PLA пластика их необходимо масштабировать на коэффициент усадки, который будет зависеть от толщины детали и ее расположения на платформе построения и будет составлять до 0,03 % (таблица 1.4).

Исследование влияния расположения моделей на механические свойства материала.

Механические свойства определяют конструкционную прочность материалов. В численном виде они характеризуют поведение материалов под действием внешних нагрузок, что позволяет их сравнивать между собой и рационально выбирать материалы для изготовления различных изделий.

К основным механическим свойствам материала относятся: прочность, жесткость, упругость, пластичность, твердость, ударная вязкость.

Механические свойства определяются по результатам механических испытаний стандартных образцов материалов. Испытание на растяжение было проведено на разрывной машине MTS 322 Test Frame. Растяжению подверглись образцы, в количестве 45 штук (все образцы из каждого положения при всех температурах). В процессе испытания самопишущий прибор машины в автоматическом режиме строит графическую зависимость между действующей на образец растягивающей нагрузкой F (Н) и вызванным этой нагрузкой абсолютным удлинением образца Δl (мм).

Характер пластической деформации был неравномерным и постепенно локализовался в определенной части образца. После того,

как локальные напряжения в этой области превышали предел прочности, происходило разрушение образца. Результаты представлены в таблице 1.5.

Таблица 1.5 – Результаты испытания на растяжение

Температура	№ образца	Макс. нагрузка (ср. значение), N	Макс. напряжение, (ср. значение), МПа	Деформация при траверсе (ср. значение), %
215°С	1, 2, 3	639	32	127
	4, 5, 6	532	6,22	1,39
	7, 8, 9	114	5,68	1,78
	10, 11, 12	85,2	4,26	1,2
	13, 14, 15	86,6	4,68	1,3
225°С	1, 2, 3	756	37,8	53,3
	4, 5, 6	625	8,9	2,03
	7, 8, 9	154	7,72	1,59
	10, 11, 12	123	3,7	1,3
	13, 14, 15	135	4,2	1,5
235°С	1, 2, 3	694	35	85,96
	4, 5, 6	587	7,9	1,98
	7, 8, 9	211	7,98	2,65
	10, 11, 12	142	2,8	2,12
	13, 14, 15	140	2,65	2,08

Максимальные напряжения на растяжение были получены на образцах под № 1, 2, 3 и близкие значения для образцов под № 4, 5, 6. Это объясняется тем, что растяжение образцов производилось вдоль направления выращивания образцов. При испытании на разрыв происходило вытягивание валиков пластика, в поперечном направлении результаты не значительные. При построении детали на 3D принтере необходимо учитывать условия работы данной детали и ориентировать её на платформе построения таким образом, чтобы получить максимальные механические свойства в нужном направлении.

Исследование водопоглощения образцов, изготовленных из PLA пластика.

Исследования проводились согласно ГОСТ 4650-2014 [4]. Стандарт устанавливает метод определения водопоглощения (абсорбции воды) пластмасс в виде образцов плоской или искривленной формы в направлении «сквозь толщину». Настоящий стандарт устанавливает также методы определения массы воды, поглощенной образцом пластмассы определенных размеров при погружении в воду или под воздействием влажного воздуха в контролируемых условиях.

Сущность метода. Испытуемые образцы погружают в дистиллированную воду при температуре (23 ± 2) °С или кипящую дистиллированную воду или выдерживают в атмосфере относительной влажностью 50 % при заданной температуре в течение установленного периода времени. Массу воды, поглощенную каждым испытуемым образцом, определяют или вычисляют по разности между массой образца до и после испытания, выраженной в процентах по отношению к начальной массе. При необходимости можно определить массу воды, потерянной испытуемым образцом после просушивания.

Испытания проводили на трех образцах. Образцы для испытаний требуемых размеров изготовлены 3D печатью из пластика PLA. Режимы изготовления образцов указаны в таблице 1.2. Образцы перед испытанием тщательно подготавливались. Любой загрязнитель поверхности образца для испытания, который может повлиять на поглощение воды, необходимо удалить с помощью очищающего средства, которое не действует на пластмассу, предварительно определив степень стойкости пластмассы к нему в соответствии с ГОСТ 12020, например, стойкость «0» (без изменений). После очистки перед началом испытания образцы высушивались при температуре 23 °С и относительной влажности 50 % в течение 2 часов.

Для предотвращения загрязнения образцов использовали чистые перчатки.

Среднее значение водопоглощения образцов из PLA пластика составило 1,05 %.

Исследование зольности образцов, изготовленных из PLA пластика.

Сущность метода заключается в озолении пробы пластмассы и последующем прокаливании остатка в муфельной печи до постоянной массы. Пробу равномерно распределяют по основанию тигля и осторожно нагревают до полного озоления, не допуская воспламенения пробы. После озоления тигель помещают в муфельную печь и прокаливают в течение 30 минут при температуре, 600 °С, затем охлаждают в эксикаторе в течение 1 часа и взвешивают. Прокаливание повторяют до тех пор, пока разность результатов двух последовательных взвешиваний будет не более 0,0002 г.

Среднее значение зольности образцов из PLA пластика составляет 0,009 %.

Таким образом, был разработан алгоритм проектирования крупногабаритных тонкостенных электронных моделей отливок деталей с адаптированной конструкцией под технологические возможности и ограничения промышленных 3D принтеров. Были изучены параметры печати и влияние расположения моделей на платформе построения 3D принтера. Для исследования технологических возможностей и ограничений промышленного 3D принтера и геометрической точности печати и обрабатываемости конструкций изготовлена комплексная тестовая модель, которая позволила проверить качество напечатанных свесов, перемычек, стабильность экструзии, возможность появления стрингинга и зависимость результата 3D печати комплексной тестовой модели от температуры. Также было изучено влияние расположения образцов на платформе построения на шероховатость, получаемых образцов, их механиче-

ские свойства и усадку материала. По результатам проделанной работы была получена зависимость свойств материала PLA его положения на платформе построения 3D принтера. Определены средние значения водопоглощения и зольности образцов из PLA пластика.

Глава 2. ОПТИМИЗАЦИЯ КОНСТРУКЦИИ ЛИТНИКОВО-ПИТАЮЩЕЙ СИСТЕМЫ ОТЛИВКИ КРУПНОГАБАРИТНОЙ И ТОНКОСТЕННОЙ ДЕТАЛИ, АДАПТИРОВАННОЙ ПОД ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ВОЗМОЖНОСТИ И ОГРАНИЧЕНИЯ ПРОМЫШЛЕННЫХ 3D ПРИНТЕРОВ И ПРОИЗВОДСТВЕННОЕ ОБОРУДОВАНИЕ ИНДУСТРИАЛЬНЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ

Литниково-питающая система в случае отливки крупногабаритных изделий представляет собой разветвленную сеть подводящих каналов и питателей (рисунок 2.1). Из-за большой металлоемкости процесс заливки может происходить одновременно через несколько литниковых чаш (в данном случае количество литниковых чаш 6 штук). Однако слишком развитая конструкция ЛПС значительно усложняет процесс изготовления выжигаемой модели [5, 6].

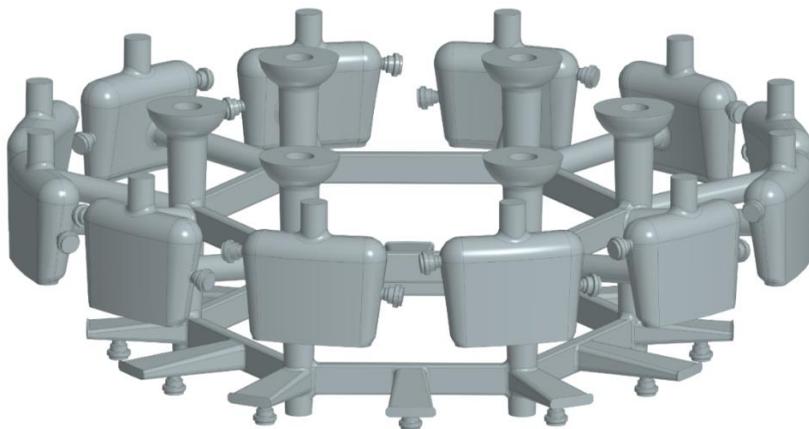


Рисунок 2.1 – Пример ЛПС крупногабаритной детали

Печатать ЛПС вместе с моделью затруднительно, так как стандартная ЛПС не рассчитана под особенности FDM печати, под всеми элементами создается большое количество материала поддержки, который трудно, а зачастую, невозможно удалить, не разрушив основную ЛПС. В технологии FDM печати существует возможность использования водорастворимой поддержки, однако для этих целей необходима установка с двумя экструдерами. Помимо необходимости в использовании более сложного и дорогостоящего оборудования, водорастворимый пластик имеет ограниченную область оптимальных параметров печати, за пределами которой поддержка может не пропечатываться. Кроме того, стоимость водорастворимого пластика выше стоимости используемого (в данном случае PLA) примерно в 2–4 раза.

На рисунках 2.2–2.5 представлены два варианта выращивания неоптимизированной модели отливки целиком, без разделения (сегментации) на составные части. Использовалось сопло диаметром 1 мм, высота слоя составляла 0,5 мм, что довольно грубо. Однако даже такие параметры печати показывают, что общее время изготовления детали составляет примерно 44 дня, при этом на печать поддерживающих структур уходит свыше 43 килограммов пластика и примерно 60% от общего времени печати (рисунок 2.3).

Во втором случае (рисунок 2.4) продолжительность процесса выращивания занимает примерно 32 дня, суммарный расход материала на выращивание поддерживающих структур составляет порядка 23 килограмм и примерно 45% от общего времени печати (рисунок 2.5). Столь большое количество времени непрерывной печати усложняет контроль за принтером, увеличивает вероятность сбоев и непредвиденных обстоятельств, таких как отключение электричества, окончание пластика, резкий перепад температур и влажности в комнате из-за смены погоды.

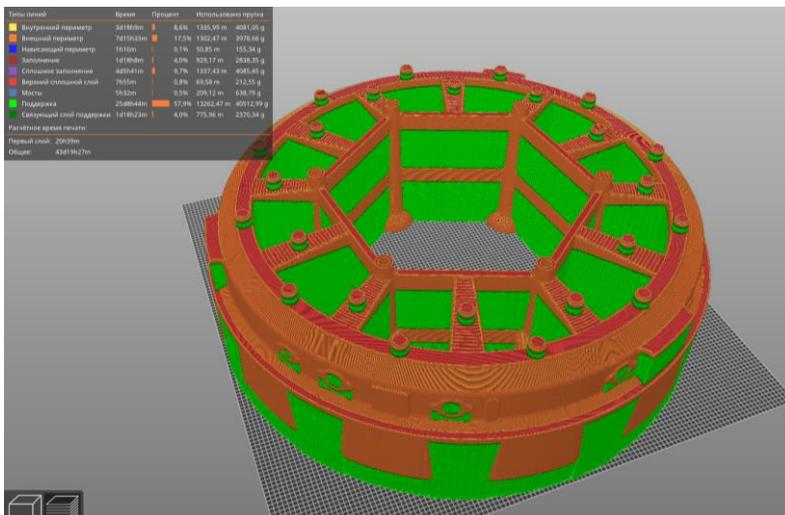


Рисунок 2.2 – Процесс слайсинга неоптимизированной модели отливки с расположением на литниковых чашах

Типы линий	Время	Процент	Использовано прутка	
Внутренний периметр	3d18h9m	8,6%	1335,99 m	4081,05 g
Внешний периметр	7d15h33m	17,5%	1302,47 m	3978,66 g
Нависающий периметр	1h16m	0,1%	50,85 m	155,34 g
Заполнение	1d18h8m	4,0%	929,17 m	2838,35 g
Сплошное заполнение	4d5h41m	9,7%	1337,43 m	4085,45 g
Верхний сплошной слой	7h55m	0,8%	69,58 m	212,55 g
Мосты	5h32m	0,5%	209,12 m	638,79 g
Поддержка	25d8h44m	57,9%	13262,47 m	40512,99 g
Связующий слой поддержки	1d18h23m	4,0%	775,96 m	2370,34 g

Расчётное время печати:
 Первый слой: 20h39m
 Общее: 43d19h27m

Рисунок 2.3 – Распределение времени и материала для выращивания неоптимизированной модели отливки с расположением на литниковые чаши

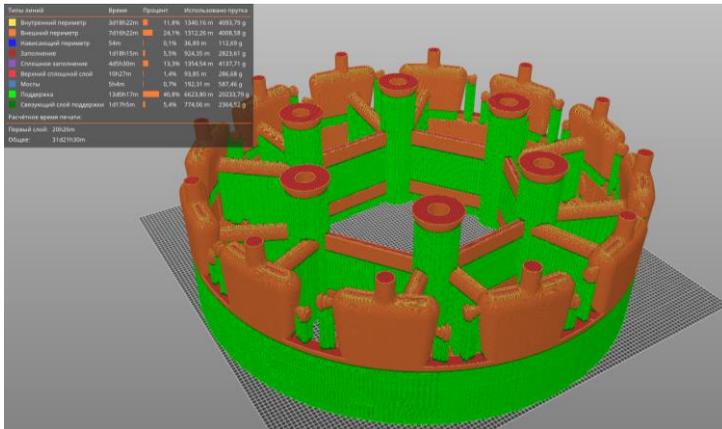


Рисунок 2.4 – Процесс слайсинга неоптимизированной модели отливки с расположением на промывниках

Типы линий	Время	Процент	Использовано прутка	
Внутренний периметр	3d18h22m	11,8%	1340,16 m	4093,79 g
Внешний периметр	7d16h22m	24,1%	1312,26 m	4008,58 g
Нависающий периметр	54m	0,1%	36,89 m	112,69 g
Заполнение	1d18h15m	5,5%	924,35 m	2823,61 g
Сплошное заполнение	4d5h30m	13,3%	1354,54 m	4137,71 g
Верхний сплошной слой	10h27m	1,4%	93,85 m	286,68 g
Мосты	5h4m	0,7%	192,31 m	587,46 g
Поддержка	13d0h17m	40,8%	6623,80 m	20233,79 g
Связующий слой поддержки	1d17h5m	5,4%	774,06 m	2364,52 g

Расчётное время печати:
Первый слой: 20h26m
Общее: 31d21h30m

Рисунок 2.5 – Распределение времени и материала на печать неоптимизированной модели отливки с расположением на промывниках

С целью уменьшения продолжительности процесса выращивания неоптимизированной модели под процесс FDM, целесообразнее использовать разделение элементов ЛПС на составные ча-

сти. Для обеспечения геометрической точности изготовления отливки и исключения погрешностей при последующей сборке элементов отливки, модель самой отливки детали печатается цельной. При подобной постановке задачи продолжительность процесса выращивания будет составлять примерно 12 дней (рисунок 2.6), что значительно меньше предыдущих вариантов. Таким образом, при выращивании модели отливки детали отдельно от элементов ЛПС удастся значительно сократить длительность изготовления всего изделия. Помимо этого, при разделении ЛПС на элементы можно использовать FDM принтеры, имеющие меньшие рабочие области печати и, соответственно, более низкую стоимость.

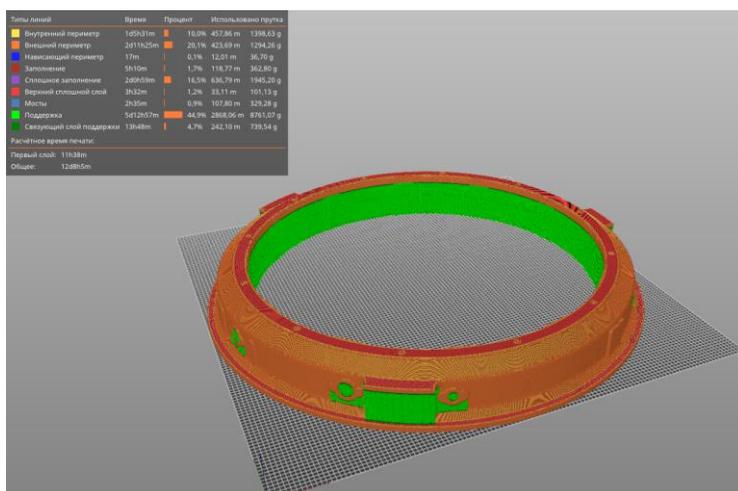


Рисунок 2.6 – Процесс слайсинга 3D модели отливки детали

При выращивании изделия параметры печати можно адаптировать под изготавливаемую геометрию детали, с целью увеличения скорости печати и уменьшения расхода материала. Например, можно применить соответствующий стиль поддержки, который использует меньшее количество поддержки (рисунок 2.7). Помимо этого,

при выращивании крупногабаритной модели отливки плотность поддерживающих структур можно задать ниже, чем при печати маленьких изделий, т.е. увеличить расстояние между линиями поддержки (рисунок 2.8).

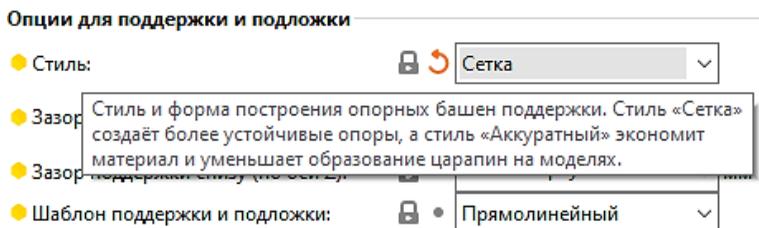


Рисунок 2.7 – Подбор оптимальных параметров поддержки

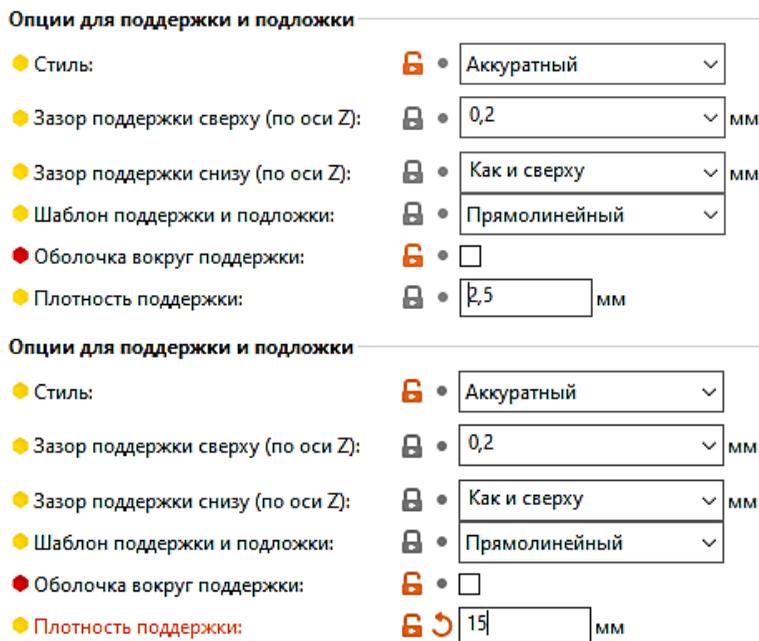


Рисунок 2.8 – Изменение параметров поддержки

Как показано на рисунке 2.9, изменение данного параметра приводит к уменьшению требуемого количества материала почти в 4 раза. Расстояние между линиями поддержки будет влиять на устойчивость конструкции при выращивании в вертикальном направлении. При использовании крупных сопел поддерживающие структуры печатаются более толстой линией, поэтому конструкция получается более жесткой.

При разделении ЛПС на составные элементы также остается проблема с наличием большого количества поддерживающих структур в связи с тем, что ЛПС имеет сложную и развитую геометрию (рисунок 2.10). Поэтому имеет смысл деления ЛПС на части, чтобы ускорить процесс выращивания и уменьшить количество потребляемого пластика.

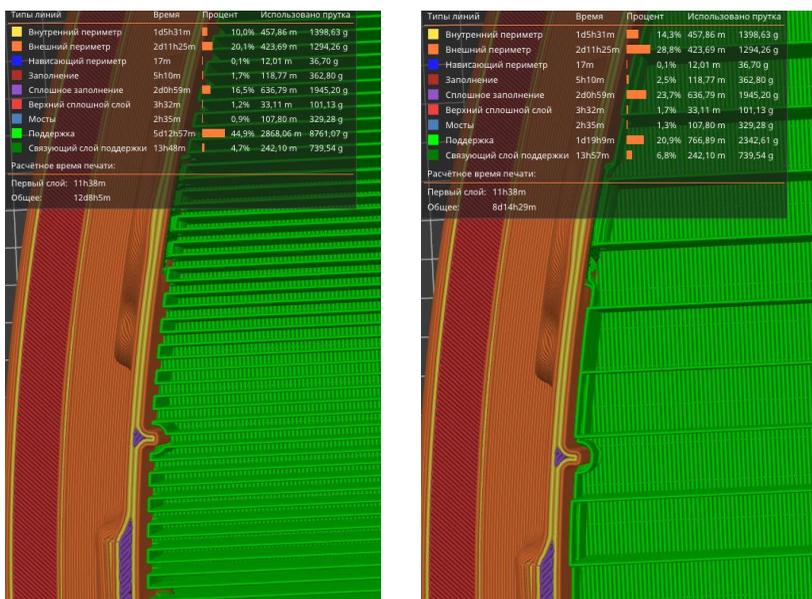


Рисунок 2.9 – Влияние изменение параметров поддержки на использование материала и время печати

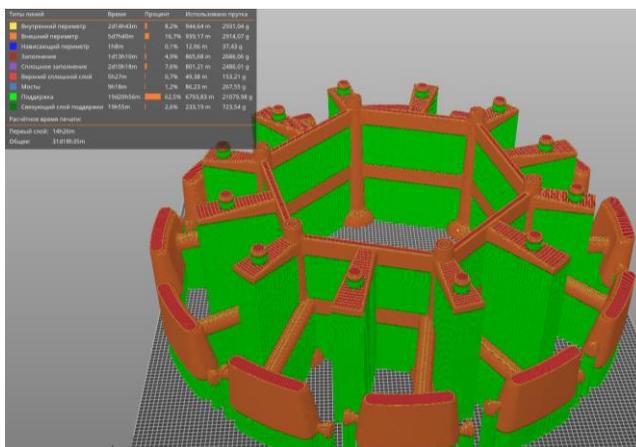


Рисунок 2.10 – Процесс слайсинга ЛПС

Рассмотрим процесс слайсинга отдельных элементов ЛПС и варианты их разбиения на составные части. К прибылям подходят шейки прибылей, соединяющие их со стояками. Для уменьшения тепловых узлов на всех элементах ЛПС стыки элементов исполнены со скруглениями, что уменьшает технологичность процесса печати. Данные скругления рассчитываются исходя из толщины будущей керамической оболочки. Если сделать сечение шейки прибыли как показано на рисунке 2.11, то под шейкой прибыли необходимо построить большое количество материала поддержки. Целесообразно сделать сечение шейки ближе к прибыли, чтобы уменьшить материал поддержки (рисунок 2.12). Разрез модели по скруглению необходимо производить таким образом, чтобы на обеих разделяемых частях при печати создавалось минимальное количество поддерживающих структур, но при этом не изменялась (не искажалась) геометрия модели после сборки. При подобном подходе под промывниками также создаются поддерживающие структуры, что так же не технологично. Поэтому наиболее эффективным способом будет отделение промывников от прибыли и выращивание их от

дельно. Помимо этого, необходимо добавить элементы для стыковки прибыли с остальными частями ЛПС и моделью отливки детали (рисунок 2.13).

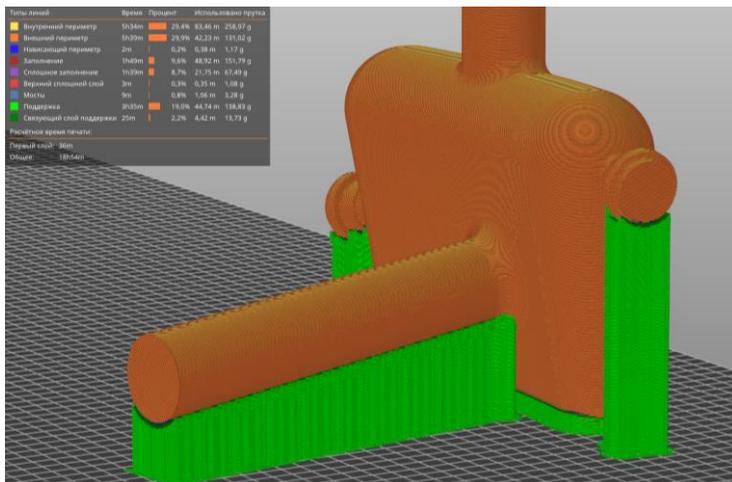


Рисунок 2.11 – Неоптимальный вариант рассечения ЛПС

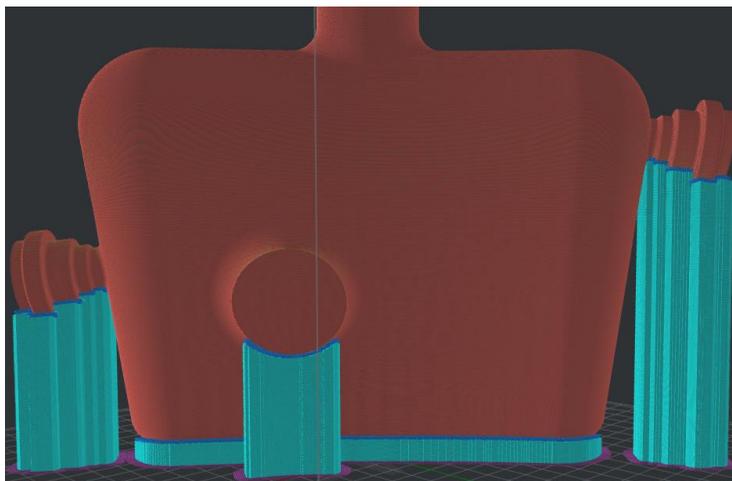


Рисунок 2.12 – Вариант прибыли с отрезанной шейкой

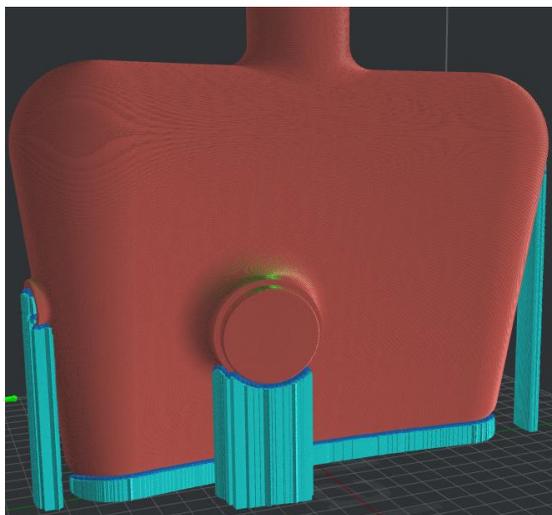


Рисунок 2.13 – Конечный вариант рассечения прибыли

Шейку прибыли необходимо печатать отдельно с вертикальным расположением на платформе. Усадка в вертикальном направлении минимальна, так как слои укладываются на предыдущие с некоторой задержкой, которой достаточно для остывания предыдущего слоя. К тому же величину объемной усадки в направлениях X и Y легко компенсировать простым увеличением 3D модели в этих направлениях на коэффициент усадки. Существует два варианта изготовления шейки прибыли: полностью полый или же с малым процентом заполнения. На рисунке 2.14 показаны оба варианта выращивания. На рисунке 2.15 показано внутреннее заполнение в 5% на одном из вариантов исполнения шейки прибыли. Отличия между этими вариантами не только в проценте внутреннего заполнения, но и в создании поддерживающих структур (рисунок 2.16). Если поддерживающие структуры не создавать, но торец шейки будет провисать, так как мост тянется на длину в 36 мм. Также эти варианты будут отличаться временем, необходимым для выращивания. Как

видно из рисунка 2.17, время печати между вариантами отличается на 14 минут, а потребляемый расход материала на 15%. При этом процесс выращивания происходит на стандартных режимах, но для пустотелой модели режимы выращивания можно увеличивать значительно (до двух раз), без уменьшения качества.

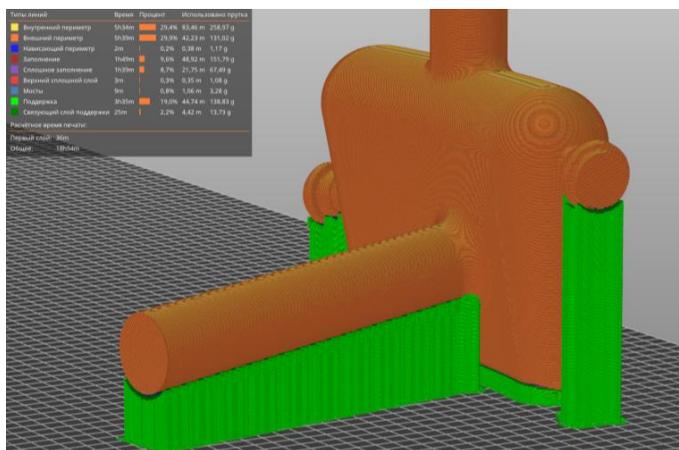


Рисунок 2.14 – Неоптимальный вариант рассечения ЛПС

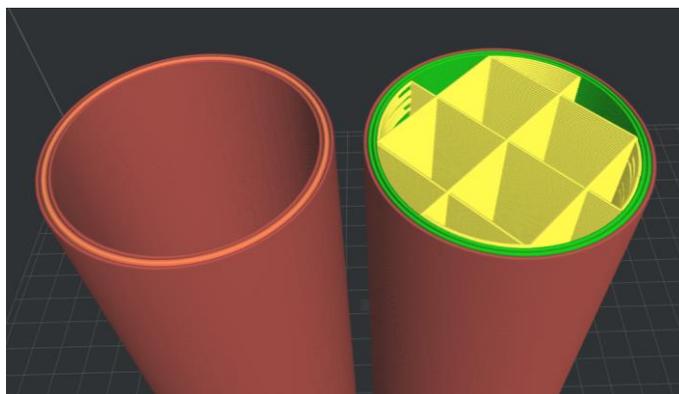


Рисунок 2.15 – Сечение шейки прибыли

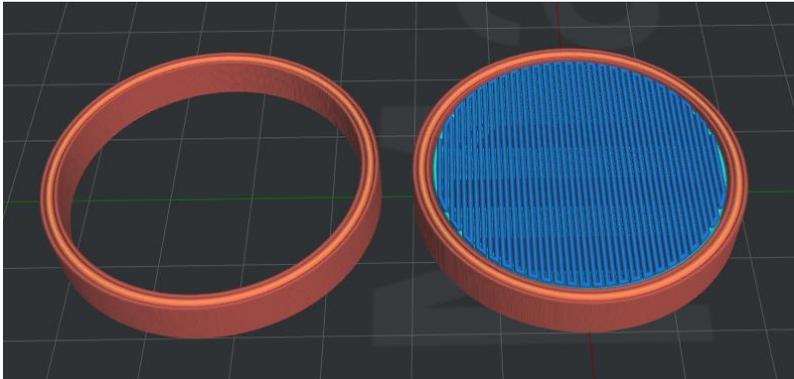


Рисунок 2.16 – Создание материала поддержки на втором варианте исполнения шейки

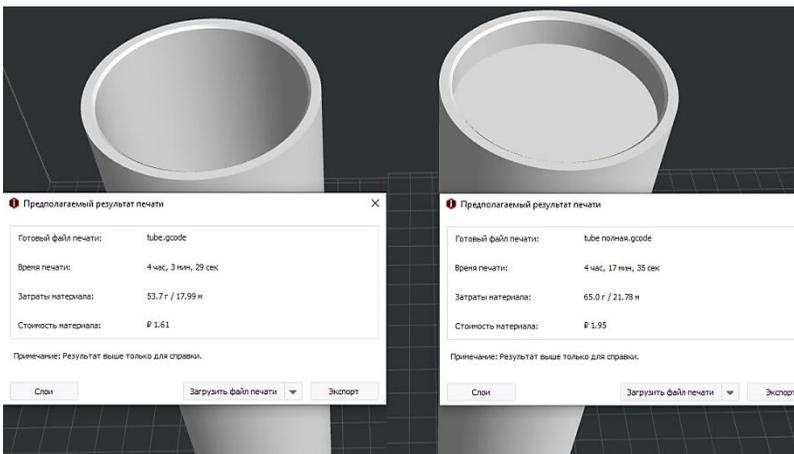


Рисунок 2.17 – Сравнение результатов печати двух вариантов исполнения шейки прибыли

Помимо шеек прибыли аналогично можно выращивать и другие подводящие каналы, имеющие простую геометрическую форму – соединения между стойками. Часть из них имеют прямоугольное сечение с закругленными краями, для избежания образования тре-

щин из-за тепловых узлов. Скругления по краям детали позволяют ускорить процесс выращивания, так как алгоритм работы принтера подразумевает снижение скорости перемещения печатающего сопла вблизи острого угла. Также скругленные углы позволяют осуществить более плавный переход от одной грани к другой. Аналогично шейкам прибыли, есть два варианта исполнения рассматриваемых элементов: полностью полыми или же с низким процентом заполнения. На рисунке 2.18 представлен процесс слайсинга полностью полого подводящего канала. Примерное время выращивания на стандартных режимах и ускорениях составит порядка 5 часов, потребляемый пластик – 61,3 грамм. На рисунке 2.19 изображен вариант с низким процентом заполнения, время выращивания больше на 10%, а расход материала меньше на 40 %. Помимо этого, полую модель можно выращивать с увеличенной в 3 – 4 раза скоростью, по сравнению со стандартной.

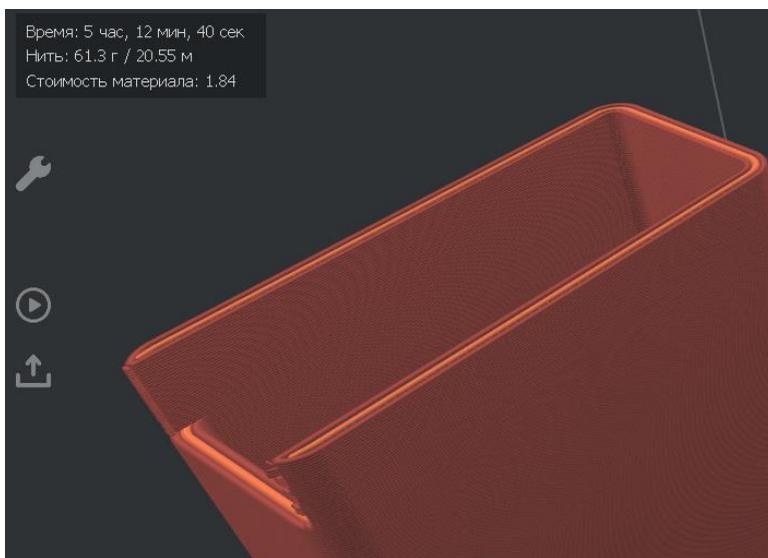


Рисунок 2.18 – Полностью полый вариант соединения между стояками

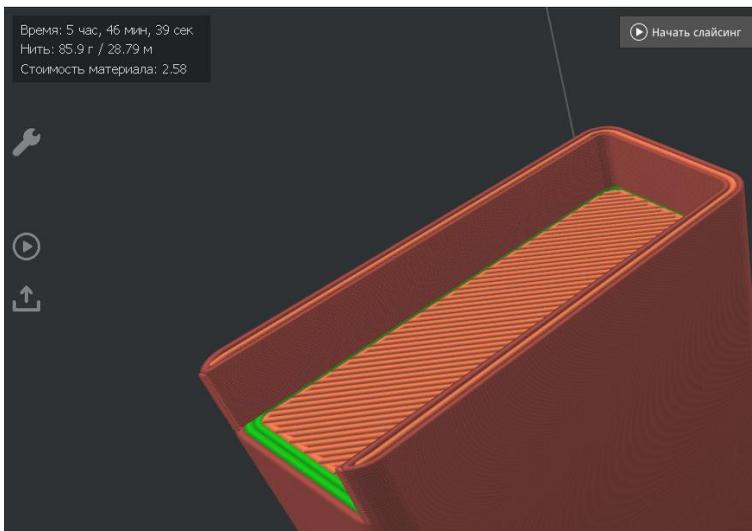


Рисунок 2.19 – Вариант соединения между стояками с внутренним заполнением

Промывники не оказывают значительного влияния на процесс заливки металла, поэтому их конструкцию можно немного модифицировать. Если их выращивать отдельно от самой отливки детали или ЛПС, то нижнюю поверхность, под которой создаются поддерживающие структуры можно сделать наклонной, с целью сокращения материала поддержки (рисунок 2.20). Если не изменять геометрию, а сразу отправить на принтер g-код без созданной поддержки, то во время процесса выращивания из-за коробления наклон появится автоматически. Однако велика вероятность деформации всей детали во время печати. Это уменьшает не только объем используемого материала, но и продолжительность процесса и трудоемкость последующей обработки, т.к. материал поддержки не всегда удаляется легко, особенно при больших скоростях печати, когда укладка слоев может происходить менее точно, с небольшим прилипанием материала поддержки к основной детали.

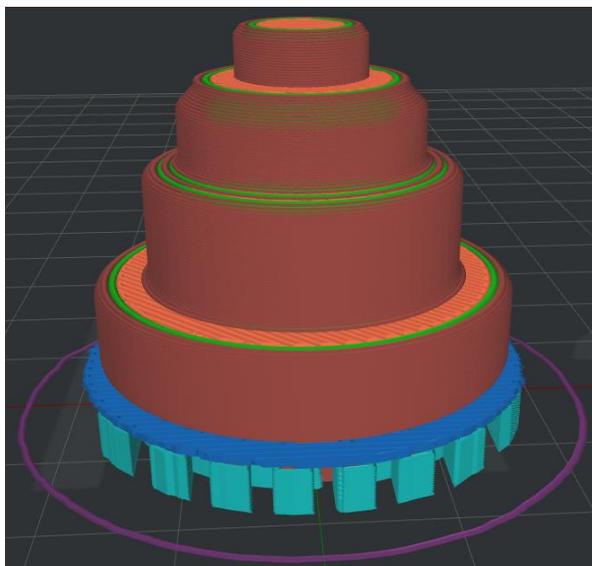


Рисунок 2.20 – Процесс слайсинга промывника

Далее рассмотрим процесс выращивания питателей. В сечениях питатели представляют собой прямоугольник с закругленными углами. Вариантов исполнения питателей три: полностью полые, полые с верхней крышкой и вариант с заполнением. Три варианта исполнения показаны на рисунке 2.21. Сечения вариантов питателей во время слайсинга показаны на рисунке 2.22. Радиусы скруглений сверху питателей, в местах крепления их к модели отливки приводят к созданию поддерживающих структур, что увеличивает время выращивания и трудоемкость последующей обработки деталей. В варианте питателя с верхней крышкой материал поддержки создается внутри самой детали, чтобы поддерживать верхнюю стенку. Из-за малой ширины питателя в месте, где он соединяется с моделью отливки детали, целесообразно использовать мосты при печати, чтобы материал поддержки можно было убрать. Таким образом, разница между вариантом питателя с верхней крышкой и полностью

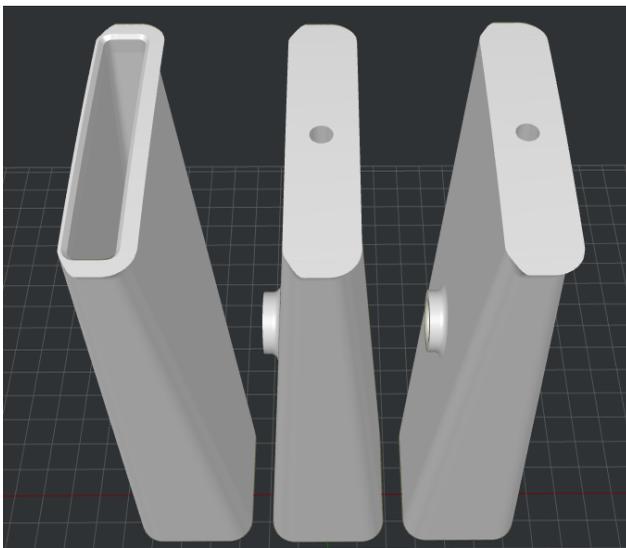


Рисунок 2.21 – Варианта выращивания питателей

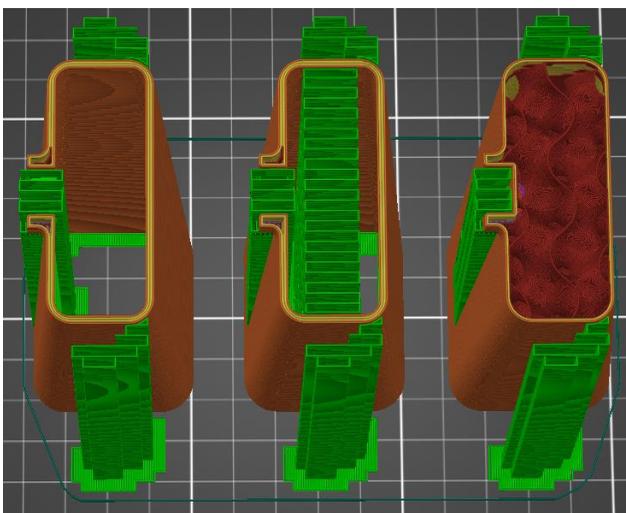


Рисунок 2.22 – Сечения вариантов выращивания питателей
во время слайсинга

полым питателем незначительная (рисунок 2.22). Поэтому выбирать между этими вариантами изготовления стоит исходя из оптимальных элементов крепления питателей к модели отливки детали. Наиболее оптимальным будет вариант выращивания промывника с крышкой, соединение с деталью отливки выполняется с помощью небольшого штыря, который так же печатается.

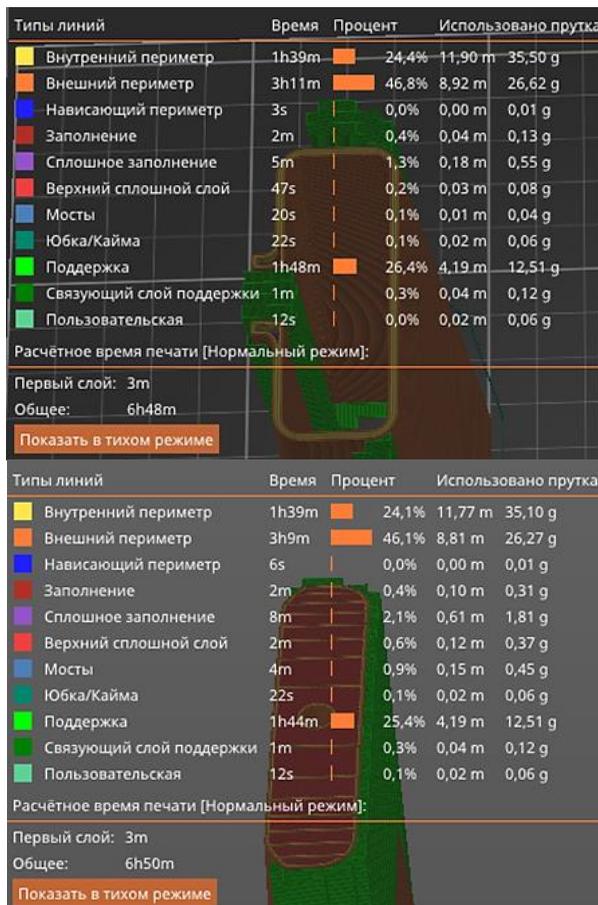


Рисунок 2.23 – Сравнение расчетных параметров печати полностью полого питателя и питателя с крышкой

Глава 3 ЦИФРОВОЙ ДВОЙНИК ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ЛИТЬЯ КРУПНОГАБАРИТНЫХ И ТОНКОСТЕННЫХ ОТЛИВОК ДЕТАЛЕЙ, СПРОЕКТИРОВАННЫЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ОТЕЧЕСТВЕННОГО ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ СКМ ЛП «ПОЛИГОНСОФТ»

Цифровой двойник технологического процесса литья крупногабаритной и тонкостенной отливки детали был разработан для отливки «Корпус наружный» (рисунок 3.1).

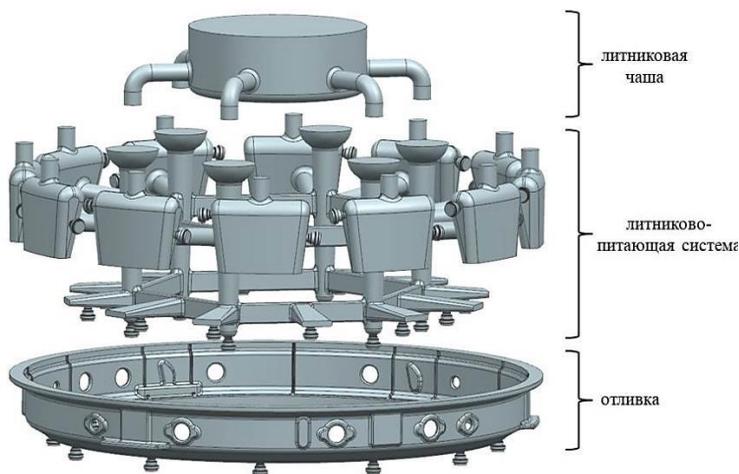


Рисунок 3.1 – 3D модель отливки детали «Корпус наружный» с литниково-питающей системой

В качестве инструмента моделирования использовалось отечественное программное обеспечение – система компьютерного моде-

лирования литейных процессов (СКМ ЛП) «ПолигонСофт». Это система численного моделирования, вычислительное ядро которой состоит из тех решателей: гидродинамического, теплового и напряжений. Вместе с набором дополнительных опций они моделируют все традиционные литейные технологии и многие специальные процессы: литья в песчаную форму с любым связующим; литья в кокиль (в том числе охлаждаемый или подогреваемый); литья по выплавляемым моделям; литья в вакууме (в том числе направленной кристаллизации); литья по процессу вакуумно-пленочной формовки; литья под высоким и низким давлением; непрерывного литья; центробежного литья; жидкой штамповки (литье с кристаллизацией под давлением); затвердевания с учетом подвода электрического тока. СКМ ЛП «ПолигонСофт» позволяет производить расчеты с любыми литейными сплавами и материалами формы, включая стержни, фильтры, утеплители, противопопригарные покрытия, холодильники (в том числе внутренние), экзотермические вставки и т.п. Качество и достоверность расчета напрямую связаны с возможностью сквозного моделирования технологии. Алгоритм работы программы ПолигонСофт основан на методе конечных элементов, за исключением модуля течения, который использует метод конечных разностей. Пакет оснащен большим количеством математических моделей, способных воспринимать задание комплексных граничных условий для различных расчетных областей. Достоинство этой системы – применение адекватных математических моделей для описания сложных процессов литейного производства, позволяющее пользователю достоверно прогнозировать различные технологические и эксплуатационные свойства отливки, а также большая термодинамическая база отечественных материалов. К недостаткам системы можно отнести ограниченное количество расчетных модулей [7, 8].

На рисунке 3.2 представлена спроектированная конечно-элементная модель отливки детали с ЛПС в сеточном генераторе.

Для проведения компьютерного моделирования технологического процесса литья необходимо произвести настройку задачи в препроцессоре Мастер. Для этого сначала необходимо загрузить препроцессор и расположить геометрию модели отливки таким образом, чтобы ось Y была направлена вертикально вверх – противоположно вектору скорости заливки расплава (рисунок 3.3).



Рисунок 3.2 – Спроектированная конечно-элементная модель отливки и ЛПС

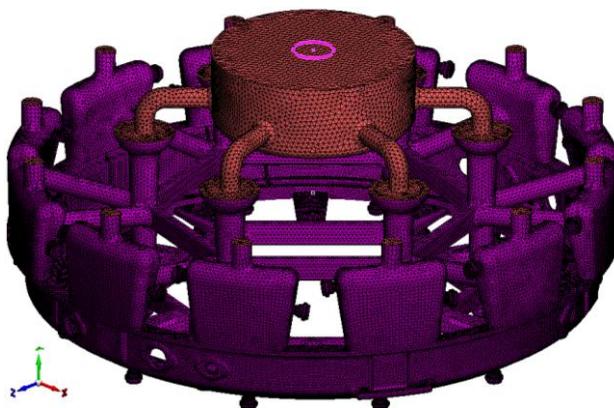


Рисунок 3.3 – Расположение модели отливки с ЛПС в препроцессоре Мастер

После импорта геометрии важно определить объемы и границы геометрической модели. Объемам, в дальнейшем, будут заданы свойства материалов, а на границах назначены условия теплообмена. В СКМ ЛП ПолигонСофт различают объемы двух типов: отливка и форма. При этом форма может состоять из разных материалов (в нашем случае это опока, наполнитель, керамическая форма). Тип «Отливка» отображается красным цветом, а «Форма» - синим (рисунок 3.4).

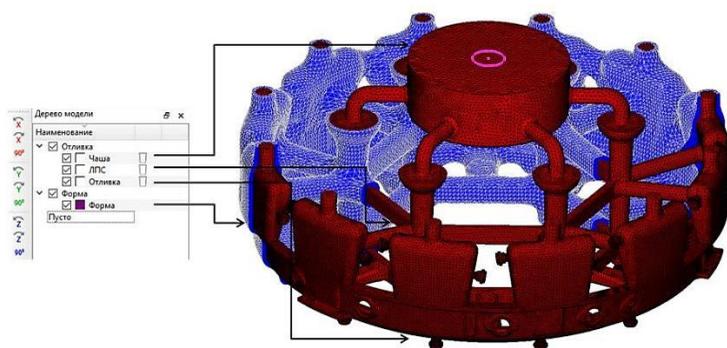


Рисунок 3.4 – Назначение геометрической модели типов объема

Затем необходимо определить внутренние и внешние границы геометрической модели. Система «ПолигонСофт» на стадии загрузки геометрической модели автоматически определяет границы «отливка-форма», «форма-отливка», «отливка-среда» и «форма-среда». Этим границам, как и объемам, присваиваются индексы: 1, 2, 8 и 9 соответственно. Для настраиваемой задачи этого вполне достаточно.

Отличительной особенностью используемой СКМ ЛП «ПолигонСофт» является наличие обширной базы данных отечественных литейных материалов: тепловых свойств сплавов, свойств материалов формы, параметров теплопередачи, температурных режимов, тепловых потоков, усадочных свойств сплавов (рисунок 3.5–3.10) [9, 10].

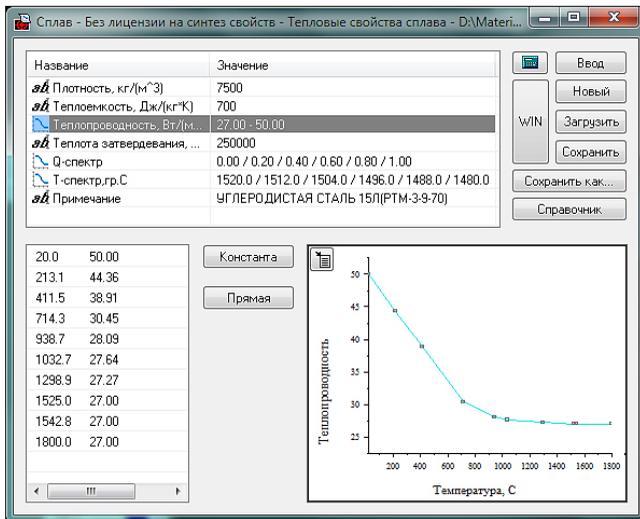


Рисунок 3.5 – Пример тепловых свойств сплава

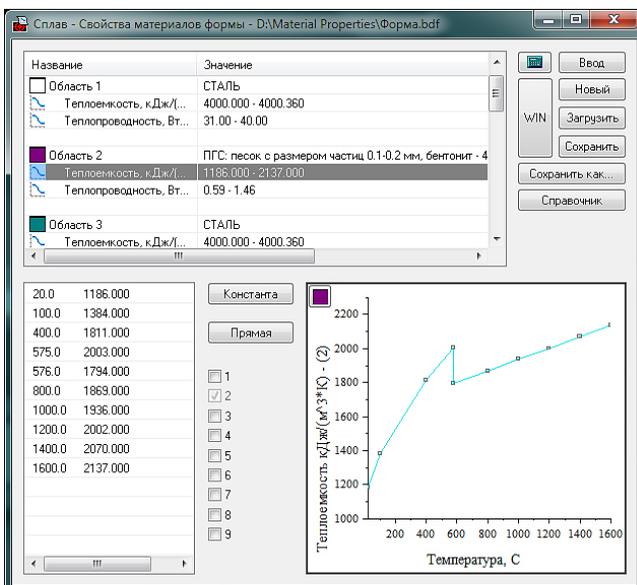


Рисунок 3.6 – Пример свойств материалов формы

Теплопередача: D:/Default_ru.afo

Новый... Открыть... Сохранить Сохранить как... Close Фильтры: Все В проекте

Имя	Режим	Значение	Доля поверхности, [0...1]
1 Оглика - Форма	Тело-Тело		
Кoeff. теплопередачи слоя (α, Вт/м²/К)		0	
Теплопередача (β, Вт/м²/К)	Значение	1000	1
Конвекция (β₂, Вт/м²/К)	Значение	0	0
Степень черноты		0	0
17 Оглика - Среда (конвекция, излучение)	Тело-Среда		
Кoeff. теплопередачи слоя (α, Вт/м²/К)		0	
Теплопередача (β, Вт/м²/К)	Значение	0	0
Конвекция (β₂, Вт/м²/К)	Значение	10	1
Степень черноты		0,8	1
18 Форма - Среда (конвекция, излучение)	Тело-Среда		
Кoeff. теплопередачи слоя (α, Вт/м²/К)		0	
Теплопередача (β, Вт/м²/К)	Значение	0	0
Конвекция (β₂, Вт/м²/К)	Значение	10	1
Степень черноты		0,5	1

Рисунок 3.7 – Пример параметров теплопередачи

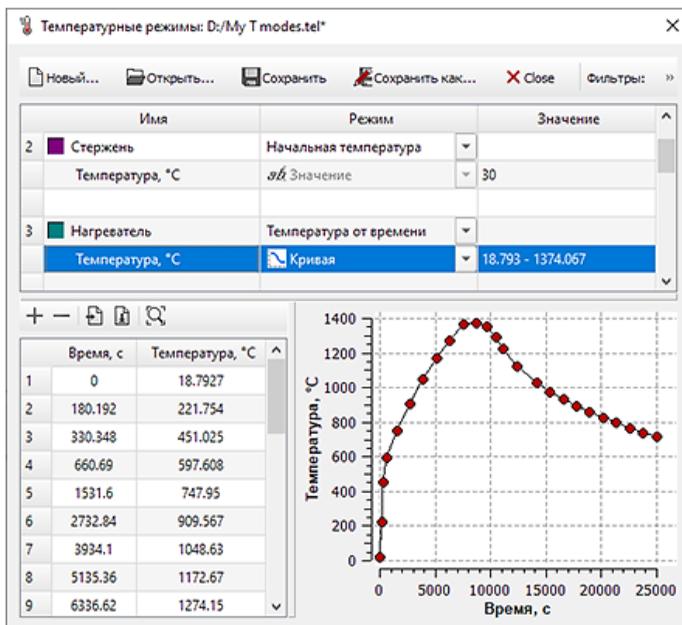


Рисунок 3.8 – Пример температурных режимов

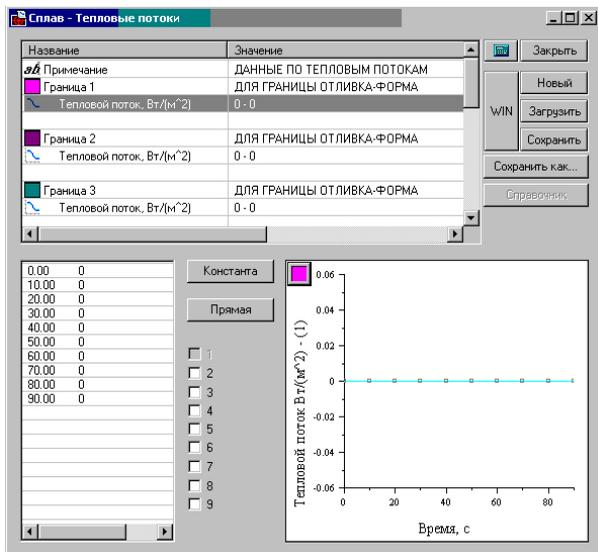


Рисунок 3.9 – Пример тепловых потоков

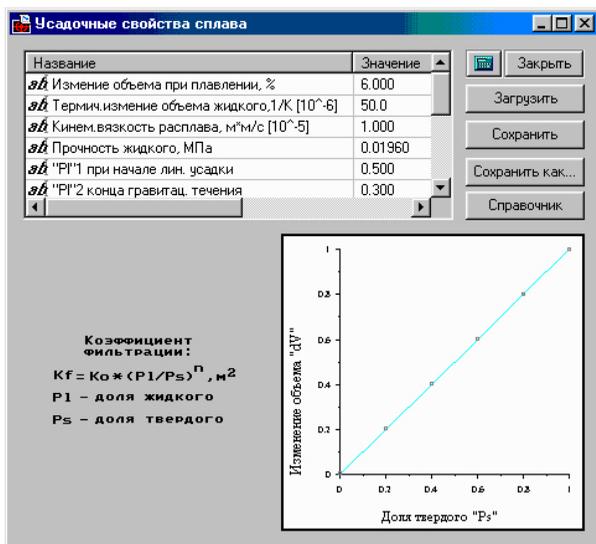


Рисунок 3.10 – Пример усадочных свойств сплава

В таблице 3.1 представлены основные свойства технологического процесса литья отливки детали «Корпус наружный» из жаропрочного никелевого сплава ВЖЛ14Н-ВИ.

Таблица 3.1 – Основные свойства технологического процесса

№ п/п	Технические характеристики	Требования											
		C	Si	Mn	Cr	Mo	Al	Ti	Nb	B	Ce	Fe	Ni
1	Химический состав сплава ВЖЛ14Н-ВИ по ОСТ 190126-85	0,03-0,08	≤ 0,4	≤ 0,4	18-20	4,0-5,0	1,2-1,5	2,5-2,9	1,8-2,8	0,00-5	0,02-5	8-10	ос-но-ва
2	Метод изготовления отливки	Литье по выжигаемым моделям.											
3	Характеристика литейной формы (исходные данные)	Керамическая форма: материал обсыпки – плавеный кварц SiO ₂ , покраска на плавленом кварце. Утеплена только прибыль.											
4	Характеристика сплава ВЖЛ14Н-ВИ	<p>Физические свойства сплава: плотность – 8,17 г/см³;</p> <p>Механические свойства сплава: предел прочности (σ_b): 43 – 106 кг/мм²; предел текучести ($\sigma_{0,2}$): 38 – 80 кг/мм²; относительное удлинение (δ): 8 – 20 %;</p>											
5	Режимы плавки-заливки	<p>Оборудование: вакуумная плавильная установка ВИАМ-24.</p> <p>Температура прокалики формы перед заливкой: T = 980 °C, 12 часов;</p> <p>Температура перегрева: T = 1600 + 10 °C;</p> <p>Температура заливки металла: T = 1470 °C, 30 секунд.</p>											

Для корректного расчета необходимо всем объемам, относящимся к типу «Форма» задать соответствующие индексы. В данном случае, шаблон индексов объемов избыточен и предназначен для литья по выплавляемым моделям.

При моделировании процесса литья по выплавляемым моделям необходимо задать точку подвода металла и диаметр струи заливаемого расплава (рисунок 3.11).

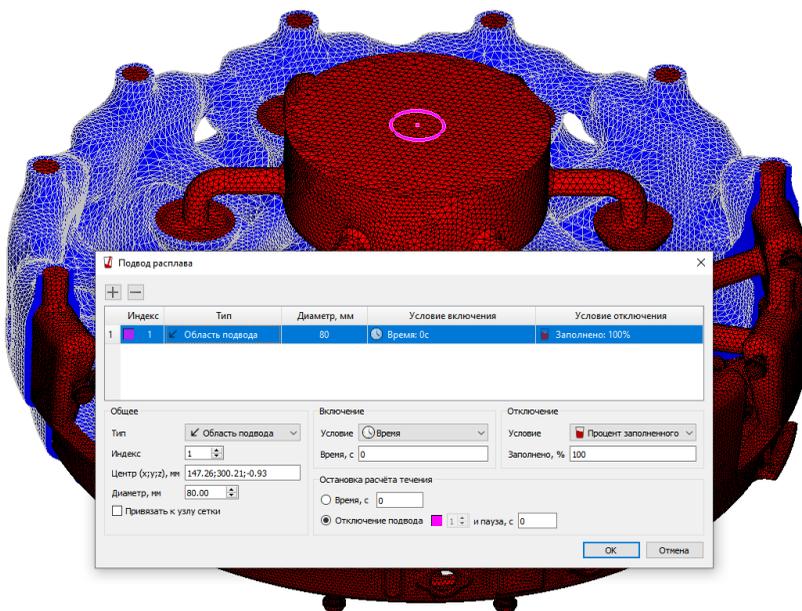


Рисунок 3.11 – Задание подвода расплава металла

На заключительном этапе настраиваются параметры расчета (рисунок 3.12).

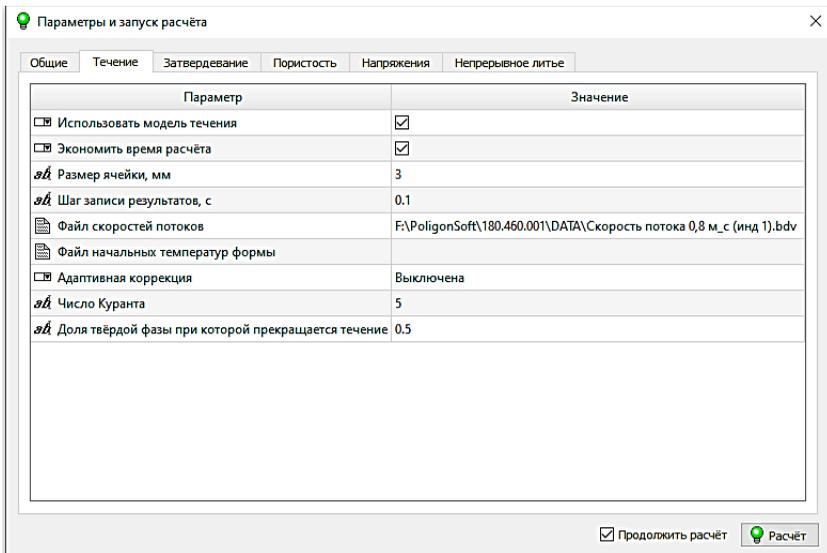
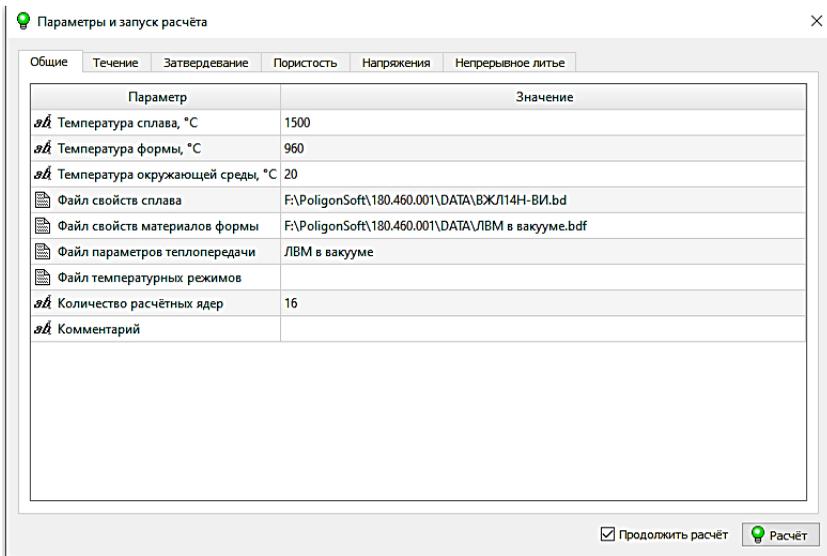


Рисунок 3.12 – Задание параметров расчета в СКМ ЛП ПолигонСофт (окончание см. на с. 65)

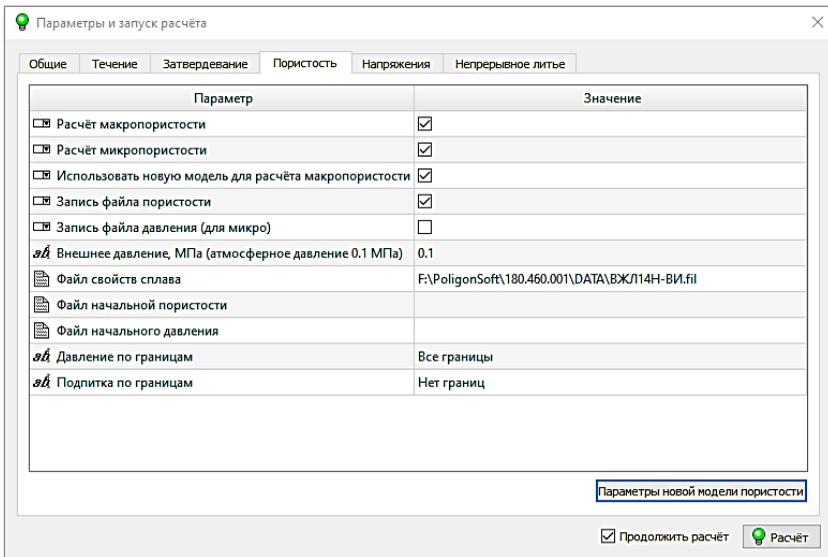
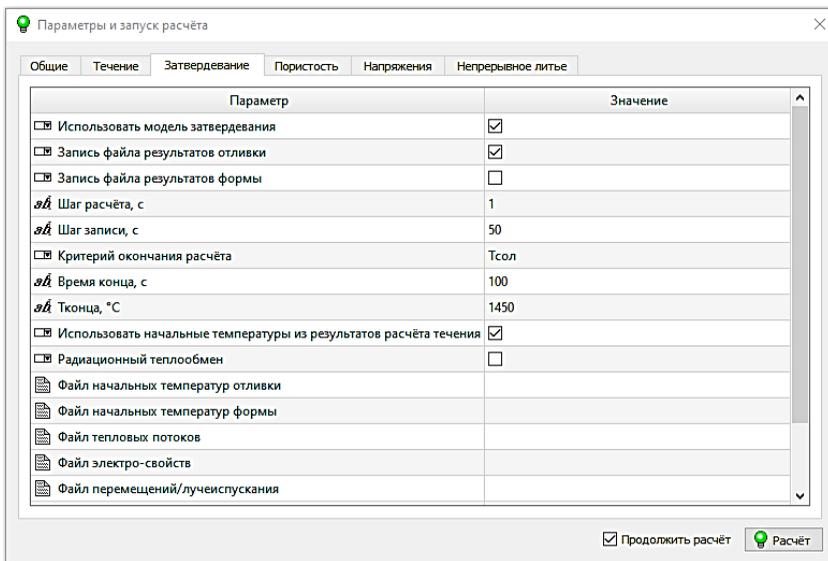


Рисунок 3.12 – Окончание рисунка

Анализ результатов гидродинамических расчетов, полученных с использованием СКМ ЛП ПолигонСофт.

В системе «ПолигонСофт» можно моделировать заполнение литейной формы расплавом. Расчет ведется в модуле «Эйлер-3D», который включен в систему «ПолигонСофт» в качестве процессорного модуля и проводит вычисления при помощи метода конечных разностей. Модуль решает совместно задачи течения расплава и изменения его температуры в результате взаимодействия с формой и окружающей средой. В результате расчета могут быть получены следующие результаты: ход процесса заливки формы расплавом; поле скоростей движущегося расплава; температурное поле расплава и формы; информация о возможных непроливах.

Дополнительно, модуль «Эйлер-3D» можно использовать для оценки работы литниковой системы без учета тела отливки.

На рисунке 3.13 представлен анализ распределения полей скоростей расплава.

Анализ результатов гидродинамического расчета показал, что отливка детали «Корпус наружный» заполняется металлом примерно в течение 30 секунд. Вся технологическая система оболочковая форма-металл заполняется примерно в течение 60 секунд, что совпадает с производственным значением. Таким образом, это свидетельствует об адекватности используемого математического аппарата и достоверности результатов моделирования.

Характер заполнения оболочковой формы расплавленным металлом и распределение тепловых потоков в технологической системе в различные моменты времени представлен на рисунке 3.14.

Падение температуры расплавленного металла в процессе заполнения отливки детали составляет примерно 30 °С (за 60 сек.): с $T=1500^{\circ}\text{C}$ в начале процесса заполнения до $T=1470^{\circ}\text{C}$ в конце процесса слива металла. Это говорит о достаточно интенсивном остывании металла за столь короткий промежуток времени.

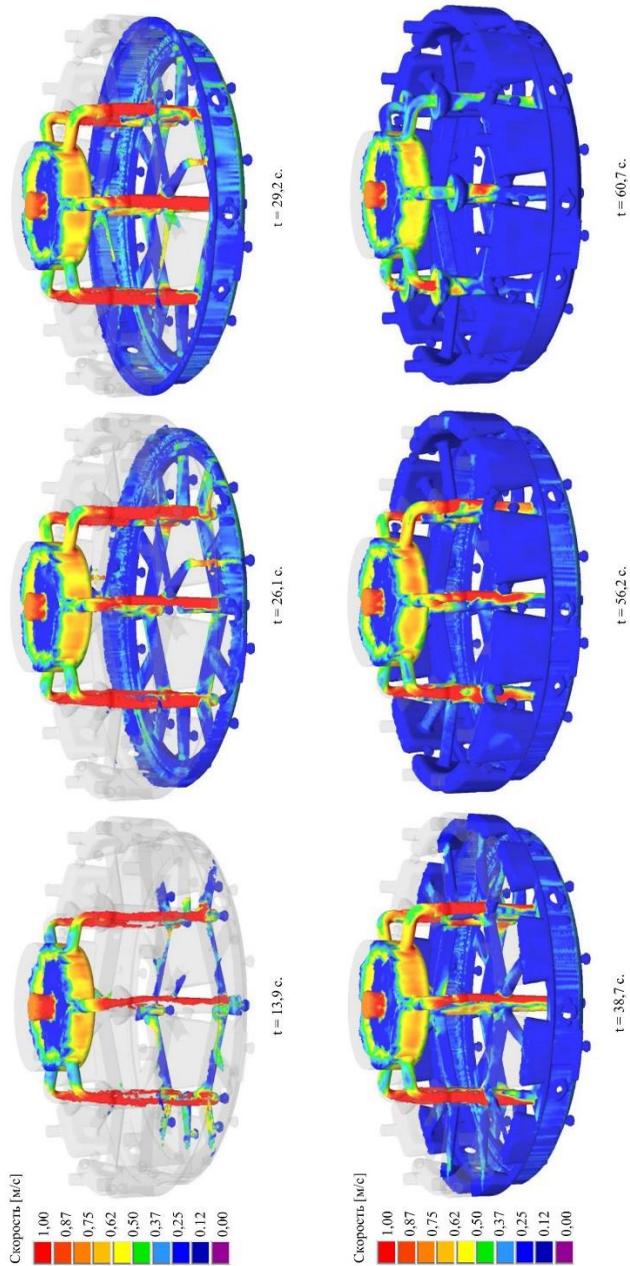
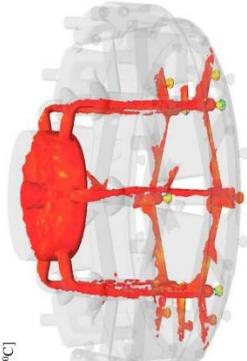
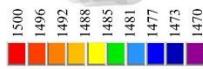
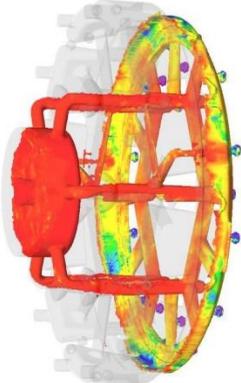


Рисунок 3.13 – Анализ распределения полей скоростей расплава

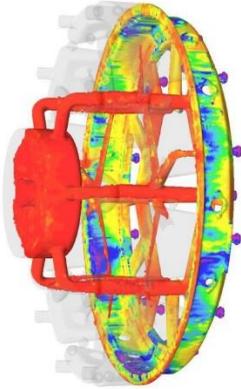
Температура [°C]



$t = 13.9$ c.

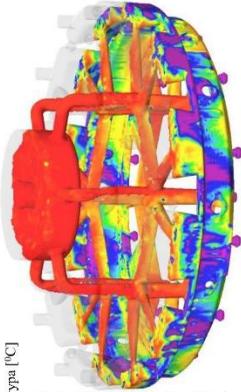


$t = 26.1$ c.

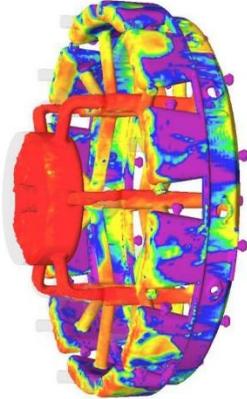


$t = 29.2$ c.

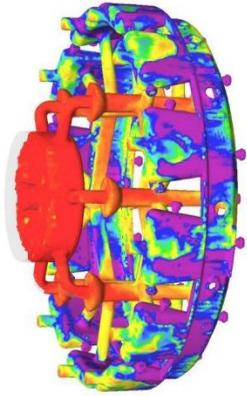
Температура [°C]



$t = 38.7$ c.



$t = 56.2$ c.



$t = 60.7$ c.

Рисунок 3.14 – Характер заполнения оболочковой формы расплавленным металлом в различные моменты времени

Целесообразно для снижения интенсивности остывания металла при заливке:

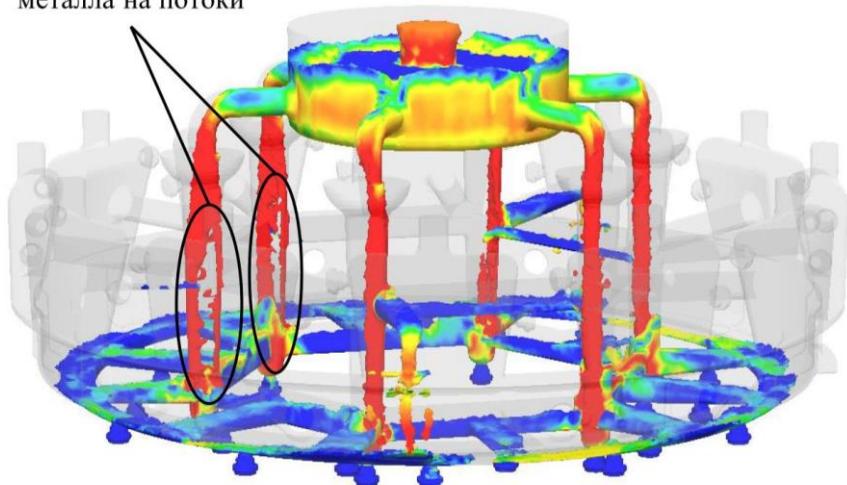
- увеличить температуру и продолжительность прогрева опоки с оболочковой формой перед заливкой;
- снизить температурные потери при транспортировке формы из прокалочной печи в заливочную камеру литейной установки за счет сокращения времени нахождения горячей формы на открытом воздухе (согласно технологическому процессу сократить время с 30 минут до 10-12 минут);
- повысить эффективность теплоизоляции литниково-питающей системы из муллитокремнеземистого войлока за счет увеличения количества его слоев.

Все это позволит сократить величину падения температуры прогрева оболочковой формы (падение температуры составляет примерно 280 0С: с 980 0С в прокалочной печи до 700 0С в заливочной камере) и препятствовать интенсивному тепловыделению в окружающую среду печного пространства при заливке.

На рисунке 3.15 представлен анализ характера поведения расплава металла в элементах литниково-питающей системы и в отливке детали «Корпус наружный». Видно, что начиная с момента времени 20,0 секунд в нескольких центральных питателях происходит разделение струи металла на потоки. Момент времени 25,6 секунд показывает неэффективность конструкции литниково-питающей системы – заполнение литейного блока частично осуществляется через верхний ярус питателей в связи с торможением потока металла в нижних питателях из-за их недостаточного проходного сечения.

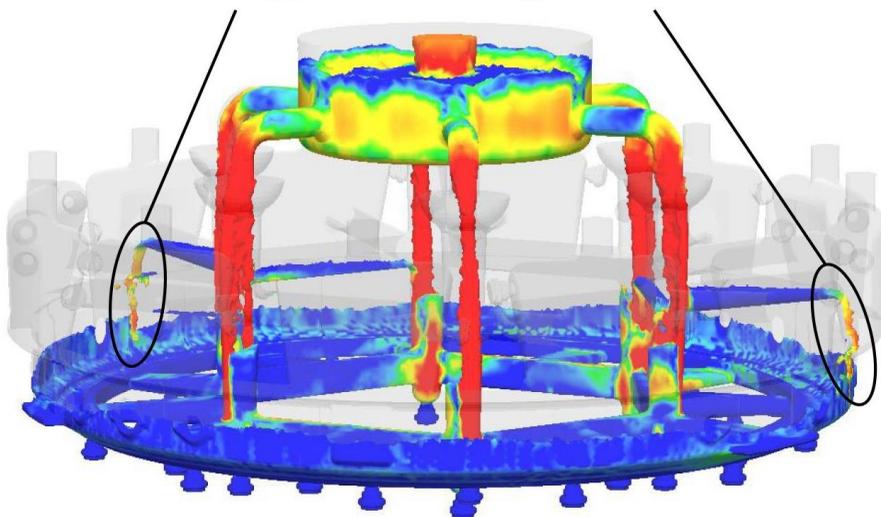
Данный характер поведения металла свидетельствует о неправильно подобранной скорости заливки металла. В начальный момент времени (~ до 30 секунд) необходимо осуществлять заливку, по возможности, с максимальной скоростью (угол наклона тигля

разделение струи
металла на потоки



$t = 20,0 \text{ с.}$

неэффективность конструкции ЛПС



$t = 25,6 \text{ с.}$

Рисунок 3.15 – Анализ характера поведения расплава металла

должен быть максимален), чтобы обеспечить скорость порядка 0,9–1,0 м/с. Это позволит избежать разрывов струи в металле и ее каплевидный характер заполнения. Затем, примерно с 30 до 45 секунд необходимо уменьшить угол наклона тигля, тем самым снизив скорость заливки до 0,8 – 0,9 м/с, чтобы обеспечить заполнение основного объема отливки детали через нижний ярус питателей. Верхний ярус при этом будет работать как выпоры. Вдобавок ко всему, желательно увеличить проходное сечение нижних питателей в местах подвода расплава к отливке. Это позволит ускорить процесс заполнения отливки детали и придать более спокойный и равномерный характер течения расплава.

Анализ результатов тепловых расчетов, полученных с использованием СКМ ЛП ПолигонСофт.

Модуль «Фурье-3D» является процессорным модулем СКМ ЛП «ПолигонСофт». Программа предназначена для проведения совместного расчета кристаллизации и остывания отливки с учетом теплообмена с элементами формы и окружающей средой, а также прогноза образования усадочных раковин, макро- и микропористости.

В результате расчета можно получить возможность анализировать процесс кристаллизации и остывания отливки, изменения температуры в форме, образование усадочных дефектов.

Анализ характера изменения температурного поля в литейном блоке в различные моменты времени показал, что температурные поля в литейном блоке имеют равномерный и направленный характер: от нижней части отливки к верхней части литниково-питающей системы с одновременным распределением температур от внутренних поверхностей к наружным. Температурный фронт представляет собой набор однородных горизонтальных областей перпендикулярных вектору гравитации, последовательно сменяющих друг друга в направлении, противоположном вектору течения расплава. Благодаря наличию теплоизоляции литниково-питающей системы из мул-

литокремнеземистого войлока удалось снизить скорость и интенсивность теплопередачи расплава с окружающей средой печного пространства.

Анализ результатов образования тепловых изолированных узлов в литейном блоке в различные моменты времени показал, что можно прогнозировать появления мелкой рыхлоты, усадочных дефектов и, как следствие, микропористости. Появление значительных по объему тепловых узлов в центральных питателях и прибылях литниково-питающей системы не оказывает существенного влияния на отливку. В целом процесс кристаллизации протекает относительно равномерно и направленно.

Глава 4. ОПИСАНИЕ ПРОЦЕССА ИЗГОТОВЛЕНИЯ ОПЫТНОГО ОБРАЗЦА КРУПНОГАБАРИТНОЙ ТОНКОСТЕННОЙ ОТЛИВКИ ДЕТАЛИ, ОТЛИЧАЮЩЕЙСЯ ПОВЫШЕННОЙ РАЗМЕРНОЙ ТОЧНОСТЬЮ

Технологический процесс изготовления опытного образца крупногабаритной тонкостенной отливки детали начинается с этапа подготовки управляющих программ для печати. Последовательность процесса выращивания выглядит следующим образом:

- печать пробных образцов для определения оптимальных параметров печати и проверки собираемости элементов модели;
- контроль выращенных образцов, для определения коэффициента усадки;
- компенсация усадки в программе слайсере или в исходной геометрии изделия;
- выращивание изделий группами, с учетом рабочего времени.

После выращивания пробных образцов было установлено, что линейная усадка на некоторых частях составила 0,1–0,3 мм, что было учтено в геометрии модели изделия. Процесс измерения представлен на рисунке 4.1. Выращивание опытных образцов позволило установить примерную длительность изготовления отливки детали и возможные способы для увеличения скорости печати, при сохранении качества. Например, при увеличении скорости печати до 220 % от исходной появляются дефекты, связанные с недоэкструзией на некоторых участках. С целью получения высокого качества поверхности скорость увеличивалась на отдельных участках только до 190 % от исходной. Отдельные элементы ЛПС могут выращиваться с большими скоростями, в основном это пустотелые изделия, для пе-

части которых не нужно создавать материал поддержки. На рисунке 4.2 представлен канал, соединяющий стояки и имеющий элемент для крепления к нему питателя. Данный канал выращивается с материалом поддержки до середины, далее материал поддержки не нужен. Поэтому нижняя часть выращивается со скоростью 100 – 135 % относительно номинальной, а при выращивании верхней части скорость можно увеличить до 190 % относительно номинальной. На рисунке 4.3 так же показан канал, соединяющий стояки, однако в нем отсутствуют переходы в питатель, поэтому скорость его печати на всей длине, кроме первых слоев составляет 190 % относительно номинальной.



Рисунок 4.1 – Процесс измерения геометрических размеров



Рисунок 4.2 – Канал, соединяющий стояки, с переходом в питатель

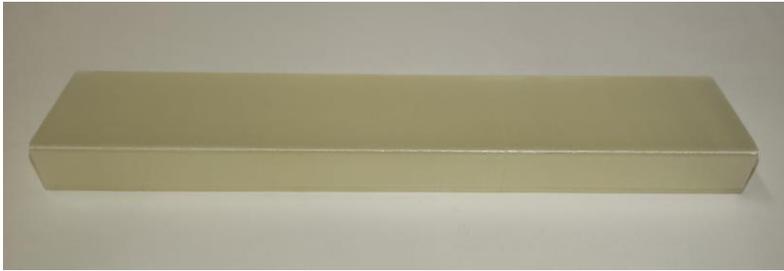


Рисунок 4.3 – Канал, соединяющий стояки, без перехода в питатель

Для уменьшения количества операций снятия изделия с платформы построения и последующей подготовки принтера к печати, исходя из потребности очистки платформы построения от остатков материала поддержек, группировка части деталей осуществлялась таким образом, чтобы перезапуск принтера происходил раз в день (а по возможности реже) с попаданием периодов окончания печати в рабочее время. Подобный подход позволил уменьшить простой оборудования и увеличить время изготовления всех изделий. На рисунках 4.4 и 4.5 представлена подобная группировка деталей. На рисунке 4.4 представлены волокна материала от экструдера, тянущиеся от одной части изделия к другой. Они появились из-за отключения функции ретракта (втягивания пластика) на элементах поддерживающих структур для уменьшения времени на данную операцию. Во время функции ретракта происходит втягивания материала внутрь сопла, это необходимо для получения качественной поверхности изделий, но материал поддержки удаляется из-за чего эту функцию на нем применять нет необходимости.

Выращенные детали подверглись постобработке. На рисунке 4.6 представлены напечатанные промывники. На рисунке 4.7 показан стояк с литниковой чашей. На рисунке 4.8 представлена прибель с приклеенными промывниками. На рисунке 4.9 показаны питатели модели отливки.



Рисунок 4.4 – Группировка прибылей для оптимизации печати

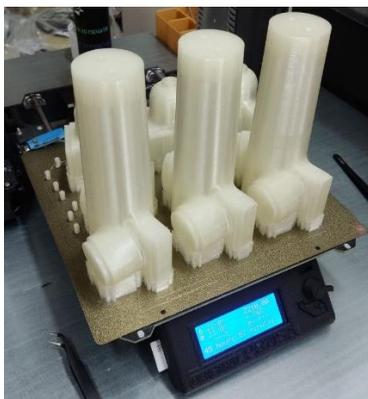


Рисунок 4.5 – Группировка стоячков на одном столе



Рисунок 4.6 – Промывники, напечатанные отдельно от остальных частей ЛПС



Рисунок 4.7 – Стояк с литниковой чашей

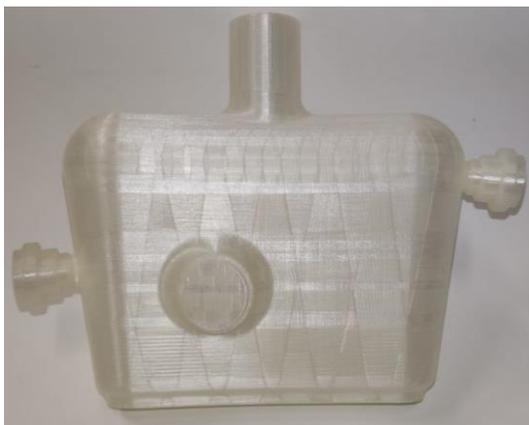


Рисунок 4.8 – Прибыль с приклеенными промывниками

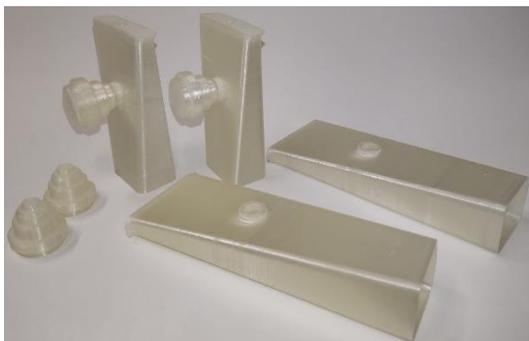


Рисунок 4.9 – Питатели модели отливки

Далее следует этап предварительной сборки элементов ЛПС в единую конструкцию. Процесс предварительной сборки на стапеле показан на рисунке 4.10. Одновременно происходил процесс измерения шероховатости поверхностей (рисунок 4.11), и при необходимости происходила шлифовка частей в сборе.



Рисунок 4.10 – Предварительная сборка элементов ЛПС в единую конструкцию

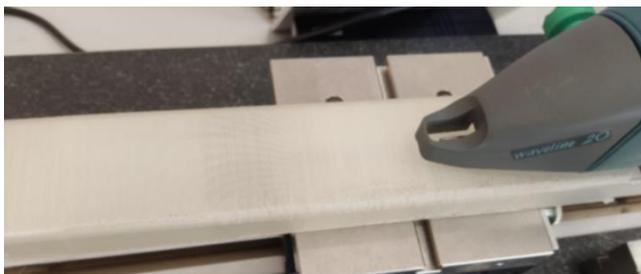


Рисунок 4.11 – Процесс измерения шероховатости поверхности

Измерение шероховатости модели, изготовленной из материала PLA, проводилось с помощью поверенного профилометра HOM-MEL-ETAMIC W55, использующего контактный щуповой метод измерения. Результаты измерения шероховатости представлены на рисунке 4.12 и в таблице 4.1.

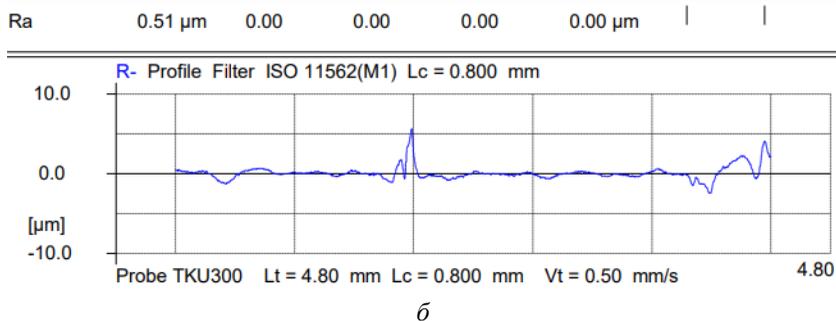
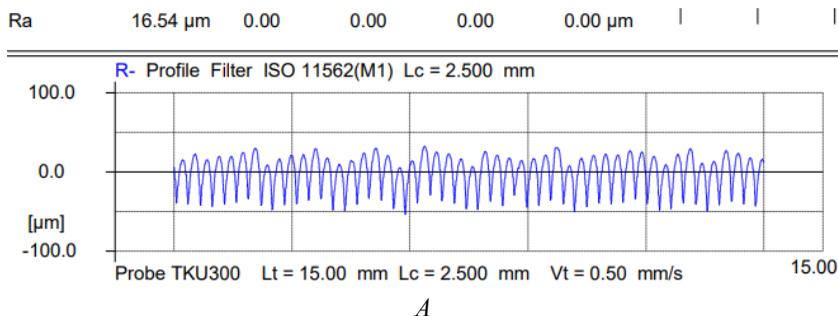


Рисунок 4.12 – Результаты измерений шероховатости секции модели отливки из материала PLA:
a – вдоль направления выращивания;
б – поперек направления выращивания

Таблица 4.1 – Результаты измерения шероховатости поверхности

Направление измерения	Измеряемый параметр	Номер измерения			Среднее значение	Примечание
		1	2	3		
Вдоль направления выращивания	Ra, мкм	16.54	16.75	16.3	16.53	В допуске (Rz ≤ 80)
	Rz, мкм	66.2	67.3	68.5	67.3	
Перпендикулярно направлению выращивания	Ra, мкм	0.51	0.29	0.65	0.48	
	Rz, мкм	2.1	1.16	2.6	1.95	

Заключительным этапом являлся контроль геометрических размеров отливки с ЛПС, который был осуществлен с использованием поверенного штангенциркуля ШЦ 1000-0,1 и 3D сканера Range Vision Pro в соответствии с техническими требованиями (рисунок 4.13). Результаты 3D сканирования сопоставлялись с номинальной геометрией модели отливки для анализа возможных отклонений. Схема измерения отливки детали «Корпус наружный» без литниково-питающей системы представлена на рисунке 4.14, результаты замеров – в таблице 4.2.

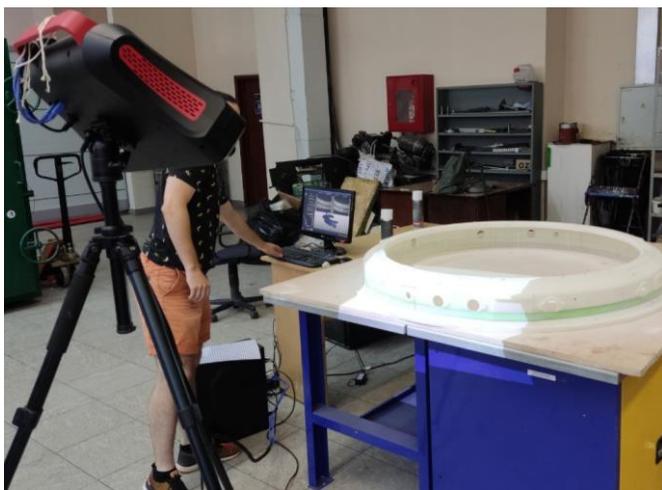


Рисунок 4.13 – Процесс 3D сканирования выращенной модели

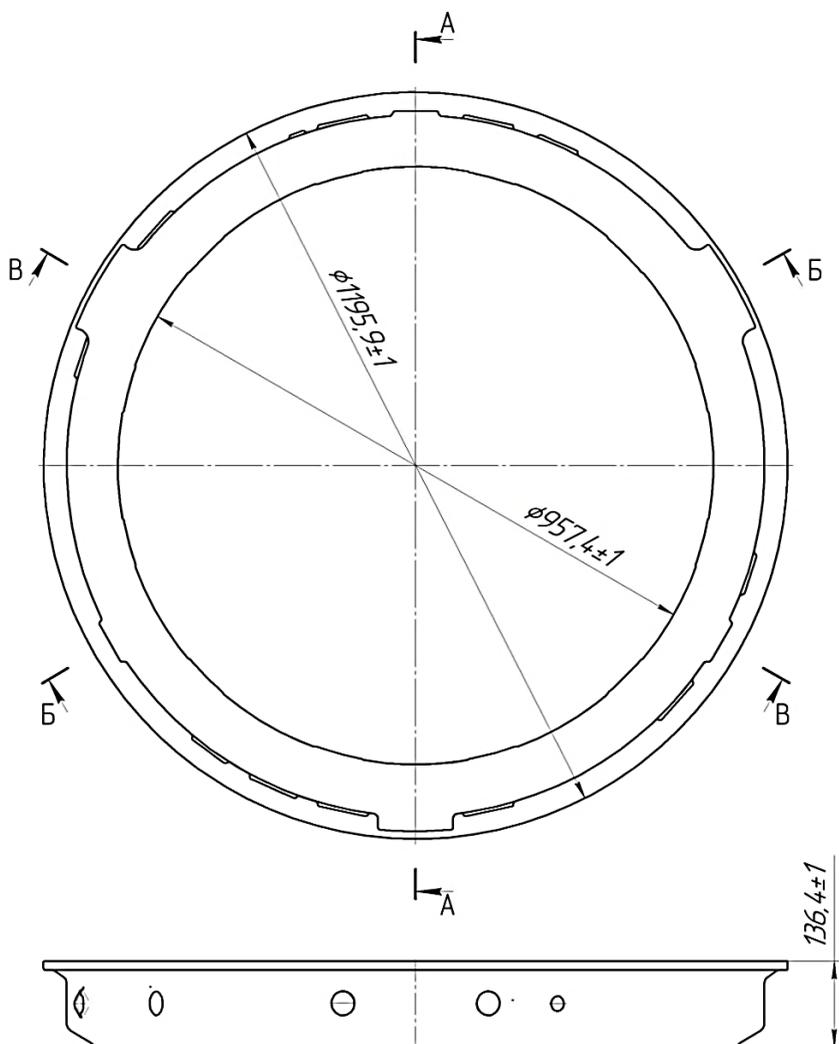


Рисунок 4.14 – Схема измерения отливки детали «Корпус наружный»

Таблица 4.2 – Результаты измерения геометрических размеров

Сечение	Номер измерения			Среднее значение	Примечание
	1	2	3		
$\varnothing 957,4 \pm 1$ (min 956,4 – max 958,4)					
А-А	958,2	958,2	958,3	958,2	В допуске
Б-Б	958,1	958,2	957,9	958,1	
В-В	958,2	957,9	957,6	957,9	
$\varnothing 1195,9 \pm 1$ (min 1194,9 – max 1196,9)					
А-А	1196,0	1195,9	1196,0	1196,0	В допуске
Б-Б	1196,1	1197,0	1195,1	1196,1	
В-В	1195,9	1196,5	1196,4	1196,3	
$136,4 \pm 1$ (min 135,4 – max 137,4)					
А-А	135,9	136,0	136,1	136,0	В допуске
Б-Б	136,0	135,9	136,0	136,0	
В-В	136,2	136,4	136,4	136,3	

В результате проведенного контроля было установлено, что геометрические размеры и шероховатость выжигаемой модели отливки детали «Корпус наружный» с литниково-питающей системой соответствует требованиям технического задания: допуск на отклонение формообразующих поверхностей составлял ± 1 мм, на габаритные размеры модели $\pm 1,2$ мм; допуск на отклонение размеров элементов литниково-питающей системы ± 3 мм; при визуальном контроле на поверхности выжигаемой модели детали отсутствовали наплывы, нецелостности, сколы и трещины, подтёки не полимеризованного материала, остатки не удалённых технологических подержек.

После контроля геометрических параметров отливки детали была осуществлена окончательная сборка изделия. Собранный модель отливки детали «Корпус наружный» показан на рисунке 4.15.

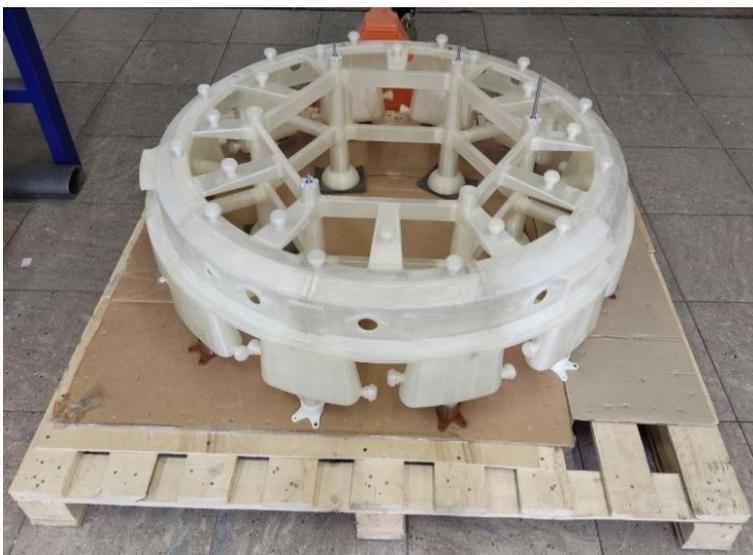


Рисунок 4.15 – Выращенная модель отливки детали «Корпус наружный»

Глава 5. РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ КОНТРОЛЯ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ РАЗМЕРОВ КРУПНОГАБАРИТНЫХ ТОНКОСТЕННЫХ ОТЛИВОК ДЕТАЛЕЙ, БАЗИРУЮЩЕЙСЯ НА ПРИНЦИПАХ РЕВЕРС ИНЖИНИРИНГА (3D СКАНИРОВАНИЯ) И ОБРАТНОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ

Трехмерное сканирование представляет собой технологию перенесения физических параметров объекта в цифровой формат в виде объемной модели. В качестве инструмента использовался 3D сканер Range Vision Pro, принцип действия которого заключается в способности определения расстояния до объекта и преобразования полученных данных в цифровое изображение (трехмерную модель). Сканер определяет координаты точек в пространстве на поверхности обрабатываемого объекта, анализирует их, формирует полигональную цифровую модель.

Существует огромное количество 3D сканеров, которые работают по разным технологиям сканирования.

Лазерная технология. Это технология бесконтактного неразрушающего контроля, которая в цифровом формате фиксирует форму физических объектов с помощью лазерного луча. Лазерные 3D сканеры измеряют мельчайшие детали и фиксируют произвольные формы для быстрого создания высокоточных облаков точек.

Лазерная технология включает в себе следующие методы сканирования:

а) Триангуляционный метод измерения расстояний.

В данном методе происходит измерение расстояния с использованием лазерного модуля и оптического сенсора, которые находятся

на некотором расстоянии и под углом α относительно друг от друга. Схематично принцип действия представлен на рисунке 5.1.

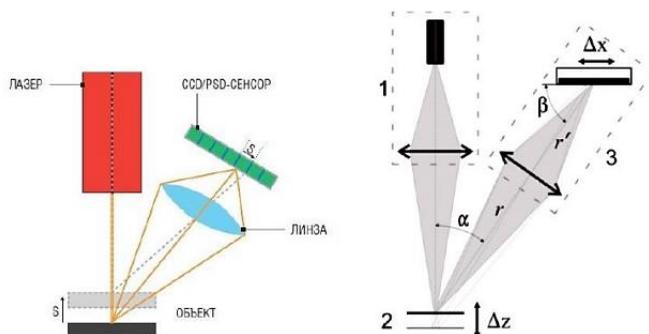


Рисунок 5.1 – Схема измерения расстояния триангуляционным методом

По схеме измерения расстояния (рисунок 5.1) на поверхность объекта подаётся лазерный луч. Затем он отражается от объекта и считывается сенсором, попадая в его поле зрения. После чего измеряется расстояния до объекта. Тем самым в результате одного измерения образуется треугольник в соотношении: «лазер – объект – сенсор».

Следует отметить, что в зависимости от изменения расстояния до объекта также меняется местоположение лазерного следа на нём, что играет ключевую роль в формировании конечного результата сканирования.

Существует математическая зависимость между расстоянием на матрице и расстоянием до объекта, определяемая по формуле 5.1.

$$\Delta z = \frac{r \cdot \sin \varphi}{\sin(\alpha - \varphi)}, \quad (5.1)$$

где r – расстояние до объекта, α – фиксированный угол между лазером и камерой, φ – фазовый сдвиг.

В соответствии с зависимостью 5.1 рассчитывается разность расстояний, которая является искомым калибровочным расстоянием между платформой с закреплённым объектом сканирования, и лазером, испускающим на него луч.

Потенциал метода триангуляции заключается в измерении расстояния не только для одной точки, а до целой группы вертикальных точек. Это достигается за счет использования специального лазерного модуля, фокус которого сосредоточен не в одной точке, а выводится целой вертикальной лазерной линией (рисунок 5.2).

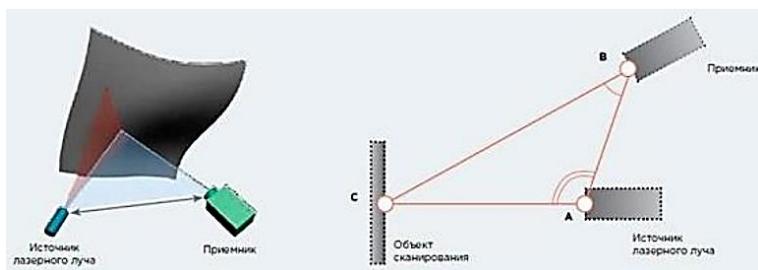


Рисунок 5.2 – Схема измерения лазерной линией расстояния до объекта

Из рисунка 5.2 видно, что при измерении расстояния образуется треугольник с вершинами А (источник лазерного излучения), В (приёмник), С (объект сканирования), расположенные под углами, при изменении которых меняется расположение лазерного фокуса на объекте.

Несмотря на то, что 3D сканеры триангуляционного типа обладают лучшей точностью сканирования, они не способны распознавать дальние объекты, в отличие от сканеров, основанных на измерении времени отклика луча.

б) Времяпролетный метод измерения расстояний.

Данный метод измерения расстояния заключается в измерении времени отклика лазерного луча от поверхности объекта, посред-

ством испускания луча из излучателя, который в результате отражения от измеряемого объекта фиксируется приемником. В данном методе проверяется состояние приемника, путём создания высокой частоты обрабатывающего устройства. На рисунке 5.3 представлен алгоритм измерения расстояния.



Рисунок 5.3 – Схема времяпролетного метода измерения расстояния

Для данной схемы характерна зависимость расстояния от времени. Искомое же расстояние до объекта вычисляется в соответствии с зависимостью 5.2.

$$L = \frac{c \cdot t}{2 \cdot n}, \quad (5.2)$$

где c – скорость света, t – время от момента испускания луча на объект до момента отражения от него и считыванием приемником, n – показатель преломления среды.

На основании с зависимостью 5.2 скорость распространения света в вакууме отличная от скорости распространения фотона света в конкретной среде.

Метод сканирования считается достаточно трудным, т.к. основная сложность вызывается с подсчетом времени отклика лазерного луча на малых расстояниях (менее метра).

в) Фазовый метод измерения расстояний.

Принцип действия данного метода измерения расстояния основан на измерении разности фаз пришедшего в приемник отражённо-

го света от объекта. Многократно измеряется разность фаз для разных модулирующих частот. Затем по полученным значениям измерений в соответствии с зависимостью 5.3 решается уравнение для нахождения расстояния до объекта:

$$D = \frac{c}{2f} \cdot \frac{\varphi}{2\pi}, \quad (5.3)$$

где φ – фазовый сдвиг, c – скорость света, f – модулирующая частота.

Зависимостью 5.3 можно пользоваться только в случае, если расстояние до объекта меньше половины длины волны модулирующего сигнала – $c/2f$. Иначе невозможно посчитать количество периодов волны, число которых укладывается в измеряемое расстояние. В этом случае, у лазера переключают частоту модуляции, после чего процесс измерения возобновляется.

Так как компаратор измеряет разность фаз, а разность в вольтах соответствует разности в амплитудах и в фазе, то в уравнение синусоиды можно поставить текущее значение амплитуды, максимальное значение и найти фазу.

Схема измерения расстояния фазовым методом, приведенная на рисунке 5.4, отражает физический смысл возникновения разности фаз.

По данной схеме определяется искомое расстояние до объекта измерения. По длине волны, испускаемой дальномером, определяется сама точность метода измерения, после чего формируется окончательный результат измерения.

Оптическая технология. Подобная технология позволяет достигать большой скорости сканирования, а также считывать объекты при движении.

Оптическая технология включает в себя следующие методы сканирования:

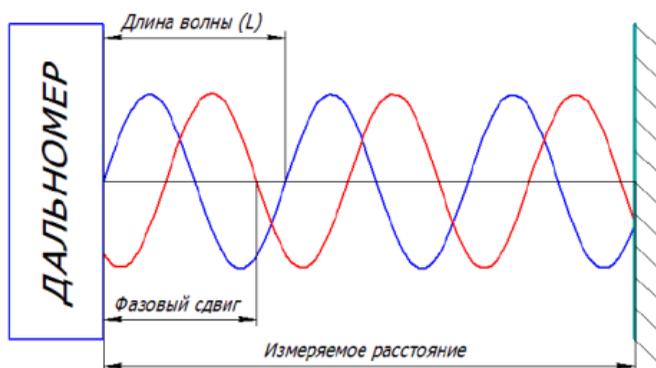


Рисунок 5.4 – Схема измерения расстояния фазовым методом

а) *Метод сканирования структурированным светом.* При данном методе проводится проекция световой сетки в виде «зебры», либо «черно-белых квадратов» на объект. В этот момент камеры начинают фотографировать объект и анализировать деформации на нём. На основе деформаций происходит генерация 3D модели сканируемого объекта. Технически, сетка проецируется на объект с помощью жидкокристаллического проектора, а камера, расположенная чуть в стороне от проектора, фиксирует форму самой сетки и вычисляет расстояние до каждой точки в поле зрения.

Недостатком данной технологии является ограничение по возможности сканирования крупных объектов. Недостаток можно устранить, если разметить объект специальными базовыми точками, которые позволяют сканировать большие объекты по частям с последующей «склежкой» модели.

б) *Стереоскопический метод сканирования.* В сканерах, которые основаны на стереоскопическом методе сканирования, имеются две камеры, повернутые под небольшим углом относительно друг друга. Анализируя разницу между двумя изображениями, строится трехмерная модель. Точность таких сканеров не высока, но зато

позволяет получить цветную трехмерную модель. По разнице в снимках с каждой камеры можно определить расстояние до каждой точки на изображении.

в) *Фотометрический метод сканирования.* У данном методе используется фотограмметрическая съемка, а также в дополнении специальная система меток, позволяющая программе с большой точностью определить с какого ракурса и какая часть объекта была сфотографирована и, как следствие, сделать более точную модель.

Зачастую подобная технология используется при сканировании больших объектов, а также выступает дополнительным атрибутом для повышения точности сканирования.

г) *Метод силуэта.* Заключается в произведении серии снимков и использовании на контрастном фоне контуров из полученных фотографий самого трехмерного объекта. Эти силуэты преобразуют для получения видимой оболочки объекта. При данном методе невозможно сканировать углубления и внутренние полости в объектах.

Точность 3D сканера, как правило, характеризуется уровнем соответствия полученной трехмерной модели реальным характеристикам детали. Данный параметр определяет погрешность 3D сканера или интервал, в пределах которого могут варьироваться результаты сравнения. Точность 3D сканера зависит не только от «железа», то есть от собственных характеристик устройства, но и от ряда других факторов, в частности на точность влияют:

- размер объекта: 3D сканирование крупногабаритных деталей производится по частям, а сшивка увеличивает погрешность;
- правильный выбор объективов;
- правильные настройки сканера;
- правильная подготовка объекта к сканированию;
- субъективные факторы при сканировании: колебания поверхности, освещение.

Один и тот же сканер может выдавать разные значения точности в зависимости от сканируемой детали и квалификации исполнителя. В таблице 5.1 представлено описание технических особенностей 3D сканера. В таблице 5.2 представлено описание параметров, влияющих на точность 3D сканирования.

Влияние температуры на точность.

Эффект теплового расширения уменьшает точность 3D сканирования. В неподготовленном помещении температура может колебаться в пределах 10 и более градусов. При этом размеры деталей в зависимости от материала их исполнения будут меняться в большую или меньшую сторону. Таким образом, для некоторых деталей нет существенной необходимости в точности более 0,1–0,2 мм/метр.

Таблица 5.1 – Описание технических особенностей 3D сканеров

Характеристика	Описание	Зависит от
Разрешающая способность	Наименьшее расстояние между сканируемыми точками в миллиметрах	Обуславливается размерами сканируемой области, характеризующей разрешающей способностью камер и принципом работы сканера. Для повышения точности разрешение сканера должно быть меньше $\frac{1}{2}$ размера самой мелкой исследуемой детали или минимального размера изделия
Детализация	Размер объекта в миллиметрах форму которого может распознать сканер. Стандартное значение для 3D сканера: 1 мм	Сканеры различных производителей имеют различные значения детализации. Ручные сканеры, как правило, имеют меньшее значения детализации по сравнению с фиксированными
Шум	Случайная образующая суммарной ошибки измерения. Может быть	Зависит от нескольких различных факторов. Например, качества поверхности (гладкость/шероховатость, неровности и

	установлена при повторных сканированиях данного объекта в абсолютно тех же условиях путем сравнения с первым результатом	неоднородности поверхности) сканируемого объекта, направления сканирования, расположения камер (относительно объекта и друг друга), освещения объекта и т.д.
Точность	Общая суммированная ошибка измерения	Включает в себя как случайную, так и систематические составляющие

**Таблица 5.2 – Описание параметров,
влияющих на точность 3D сканирования**

Идеальные условия	Условия, вызывающие затруднения	Результат работы в неидеальных условиях
1	2	3
Твердый объект	Деформируемый объект	Части объекта, отсканированные с разных ракурсов искажены. Возникают проблемы при совмещении частей в единое изделие
Статичный объект	Перемещения объекта относительно сканера в процессе сканирования	Любое движение приводит к искажению результата и ухудшению детализации
Светлый объект	Темный объект	Большинство сканеров не сканирует черные объекты, в 3D модели на этих местах будут дыры, требуется их предварительное матирование
Матовый объект	Блестящий или полупрозрачный объект	В 3D модели на этих местах будут дыры, требуется их предварительное матирование
Деталь без отверстий	Изделие с краями листового материала	Край тонкого листа на 3D данных всегда обрывается, не доходя до реальной границы объекта

Окончание табл. 5.2

1	2	3
Гладкий объект	Наличие острых ребер	Острые края немного смягчаются, желательно соблюдать правила взаимного расположения сканера и острых краев
Хорошие геометрические особенности объекта	Вырожденности вдоль одной или нескольких осей	Отдельные фрагменты невозможно качественно совместить, точность без использования маркеров становится неконтролируемой
Объект целиком находится в области сканирования	Большой или длинный объект, требуется сканирование фрагментами	При совмещении фрагментов появляются ошибки
Объект сканируется перпендикулярно к поверхности	Сканируется «под углом»	Снижение значений точности и детализации
Сканер прогрет до рабочей температуры и затем откалиброван	3D сканер не прогрет до приемлемой рабочей температуры	Измерения заведомо будут содержать ошибки
Калибровочное поле измерено при текущей температуре	Сканирование производится в условиях ненормированной температуры	Масштаб результата будет отличаться от реального объекта
Освещение не мешает процессу сканирования	Яркое направленное внешнее освещение	Повышенный уровень шумов в результатах измерения или невозможность работы
Камеры расположены на рекомендованном расстоянии	Камеры сдвинуты для сканирования впадин и внутренних полостей	Повышенный шум в данных
Температура в помещении стабильная	Температура в помещении меняется от внешних погодных условий	Измерение параметров изделия в зависимости от внешней температуры

Точность при совмещении сканов деталей.

Сканируя деталь с разных ракурсов, появляется сложность в обработке результатов сканирования, поскольку возникают погрешности при совмещении различных фрагментов. Используется несколько технологий совмещения:

1) совмещения по поверхностным геометрическим отличительным чертам. Точность этой технологии самая высокая, но только если деталь обладает достаточным количеством характерных особенностей. Если деталь целиком помещается в область сканирования, падение точности при совмещении маловероятно. В случае если геометрических особенностей недостаточно (сканирование больших гладких деталей), используются другие технологии совмещения;

2) совмещение по маркерам. Перед процессом сканирования происходит подготовка детали к работе – в произвольном хаотичном порядке равномерно по поверхности наклеиваются маркеры контрастного (по отношению к детали) цвета. Сканер автоматически считывает координаты маркеров и совмещает фрагменты;

3) совмещение по маркерам с использованием фотограмметрической системы. Для крупногабаритных деталей используется технология, при которой координаты маркеров оцениваются заранее с помощью фотограмметрической системы, что обеспечивает высокую точность.

Как правило, для сканирования большинства деталей достаточно точности в 0,1 % от измеряемой длины.

Методика подготовки и контроля геометрических размеров крупногабаритных и тонкостенных отливок деталей состоит из следующих этапов:

1) изначально деталь необходимо очистить от загрязнения до требуемой степени чистоты. Международные стандарты ИСО 8501, 8502, 8503 устанавливают методы оценки состояния поверхности стальных конструкций, стандарт ИСО 8504 дает руководство по ме-

тодам очистки стальных поверхностей с указанием возможностей каждого метода в достижении определенных уровней чистоты поверхности;

2) процесс сканирования разборных механизмов необходимо начинать с собранного состояния. При выполнении сканирования сборочного узла, составной детали или подвижного механизма сначала сканируется штатное положение всех деталей. После этого механизм необходимо разобрать и выполнить оцифровку каждого элемента по отдельности;

3) подвижные элементы объекта перед оцифровкой необходимо зафиксировать. Если в детали присутствуют подвижные элементы, то перед сканированием они должны быть надежно зафиксированы;

4) необходимо учитывать структуру сканируемой детали при нанесении матирующего спрея. Перед нанесением матирующего спрея все поверхности с мелкой пористой структурой целесообразно заклеить;

5) для ускорения процесса снятия маркеров с поверхности крупногабаритных деталей их можно наклеивать на малярный скотч;

6) сканирование тонкостенных деталей с двух сторон можно выполнить с помощью вспомогательной подложки, используя ее для сбора маркеров с противоположных сторон. Метки на базовой подложке могут быть заранее сохранены;

7) на участки со сложной геометрией необходимо наносить больше маркеров. На поверхности объектов, имеющих элементы со сложной геометрией (углы, участки с резкими переходами и пр.), маркеры необходимо наносить в удвоенном количестве;

8) маркеры требуется наносить только на ровные поверхности. Необходимо убедиться в отсутствии изгибов самих маркеров.

9) сканирование геометрии мелких элементов деталей, на которые невозможно нанести маркеры, целесообразно выполнять в спе-

циальном приспособлении, выполненном в виде рамки. Маркеры наносятся на наружные поверхности рамки, а деталь крепится внутри. Опорная сетка маркеров однократно считывается с обеих сторон рамки, сохраняется в отдельном файле и загружается для выполнения новых проектов. Рамка может быть оцифрована с разных позиций;

10) необходимо подбирать правильные условия освещенности;

11) необходимо убедиться, что габариты детали находится в поле зрения 3D-сканера. Перед началом оцифровки на поворотном столе требуется убедиться, что деталь при повороте на 360 градусов не выходит за поле зрения сканера;

12) при сканировании тонкостенных деталей необходимо создавать дополнительную группу для сшивки. Для этого нужно отсканировать поверхность с нанесенными на нее маркерами. Далее поместить деталь на эту поверхность и произвести оцифровку двух его сторон. Маркеры, нанесенные на подложку детали, обеспечивают автоматическую сшивку сканов в используемом программном обеспечении;

13) при сканировании труднодоступных элементов деталей необходимо использовать механические средства измерения. При сканировании глубоких отверстий, узких пазов, канавок, внутренних полостей может отсутствовать техническая доступность сканера к этим областям и, как следствие, отсутствие или недостаточное количество данных. Поэтому при решении задач реверс инжиниринга, для восполнения недостающих данных можно воспользоваться универсальными измерительными инструментами (штангенциркуль и пр.).

Подготовка детали к сканированию.

Требования к сканируемому объекту.

3D сканер анализирует отраженный от поверхности объекта структурированный подсвет, поэтому сканирование должно прово-

даться в помещении без прямого солнечного света, а также пыли и вибраций. Для работы с подобными объектами рекомендуется перед сканированием производить их обработку специальными аэрозольными составами, которые после высыхания оставляют очень тонкий слой белого порошка: HELLING, Проявитель U89, Sherwin D-100, Проявитель ПС-33.

Также существует определенные сложности при сканировании объектов с острыми гранями, с глубокими пазами или отверстиями, тонкостенных элементов детали.

Принцип и методы сканирования.

При съемке одного фрагмента (скана) получается трехмерная модель участка поверхности детали. Для создания полноценной модели детали нужно получить участки поверхностей, в своей совокупности, повторяющие форму детали, т.е. отсканировать деталь с разных ракурсов. Полученные фрагменты программно объединяются по геометрии поверхности, поэтому деталь должна быть жестко закреплена без изменения своей формы за все время сканирования. В противном случае геометрия одного и того же участка поверхности детали на разных сканах может отличаться, и объединить фрагменты в единое целое не получится.

В 3D сканере Range Vision Pro реализовано 3 варианта сканирования, которые отличаются методом совмещения фрагментов:

- сканирование без использования маркеров,
- сканирование с использованием маркеров (меток),
- сканирование на поворотном столе.

Этапы подготовки детали:

- очистка детали;
- нанесение матирующего спрея. На предварительно очищенную поверхность наносят мелкодисперсный белый матирующий спрей. После сканирования спрей можно смыть водой, а остатки в труднодоступных местах снять спиртом;

– нанесение маркеров. Для наилучшей автоматической сшивки отдельных сканов на деталь наносятся маркеры – черные точки на клейкой основе, которые после сканирования легко снимаются и не оставляют следов;

– выбор зоны сканирования и настройка сканера.

Определение правильного расстояния до объекта.

Необходимо расположить деталь перед сканером таким образом, чтобы она была жестко закреплена и не двигалась во время сканирования. Необходимо определить правильное расстояние до детали при помощи проецируемого креста. Если крест совпадает с синей разметкой на камерах – значит выбрано правильное расстояние. В противном случае – расстояние до детали больше или меньше требуемого и результат сканирования может быть неудовлетворительным.

В процессе настройки, переноски или калибровки не рекомендуется брать за передний профиль сканера, где установлены камеры. Малое изменение положения может привести к разориентированию.

Если деталь не помещается целиком в область сканирования, нельзя отдалять сканер. Отсканируйте деталь в нескольких положениях, например, верхнюю и нижнюю части по отдельности, а затем необходимо объединить отсканированные части.

Определение области сканирования.

Сканер проектирует 3D модель только в пределах ограниченной области сканирования (желтая область, изображенная на рисунке 5.5). Область сканирования ограничена ближней и дальней плоскостью по оси Z (глубина) при сканировании без поворотного стола, а также диаметром и высотой цилиндра при сканировании на поворотном столе. Область сканирования задается в меню «Отсечение». При открытии диалога опций плоскости и цилиндр отображаются на виде 3D модели.

При сканировании на поворотном столе доступна функция «Пересчитать», которая позволяет отсечь уже сделанные сканы текущим значением поверхностей отсечения.

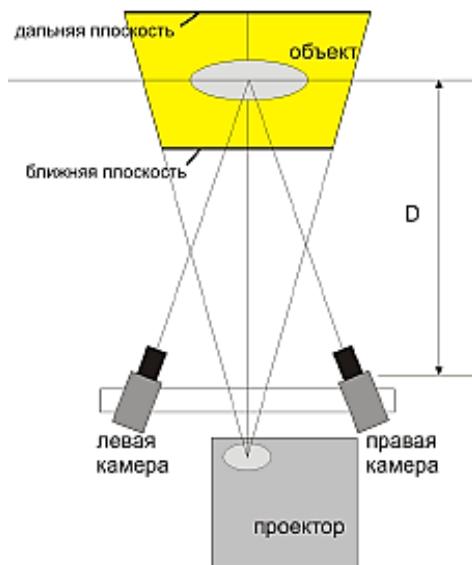


Рисунок 5.5 – Определение области сканирования

Настройка выдержки камер.

Расположив деталь на заданном расстоянии, необходимо включить режим подсвета «Линии и полосы». Регулируя экспозицию камер в панели инструментов, необходимо добиться максимального значения экспозиции, при котором не появляются красные точки на изображениях линий. Области изображения, не принадлежащие сканируемой детали, не имеют значения.

Выбор разрешения камер.

При необходимости использования повышенной скорости сканирования с меньшей детализацией в меню «Настройки оборудования» → «Камеры» (рисунок 5.6) имеется возможность

понижить разрешение камер. Чем ниже разрешение камер, тем быстрее будет процесс сканирования и тем хуже будет детализация объекта.

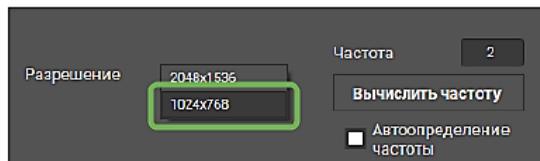


Рисунок 5.6 – Настройка разрешения камер

Запуск и остановка сканирования.

Запустить процесс сканирования можно кнопкой «Начать сканирование» в верхней панели инструментов. Для того, чтобы новые сканы добавлялись сразу в желаемую группу в дереве проекта необходимо активировать опцию «Добавить к выбранной группе».

Удаление и восстановление сканов.

В программе доступно удаление сканов в корзину и удаление сканов с диска. После удаления в корзину объекты могут быть восстановлены с помощью функции «Менеджер проекта», располагающейся под деревом проекта.

В менеджере проекта отображены все объекты, относящиеся к проекту, в том числе и удаленные в корзину. При выборе дополнительных сканов или при удалении в корзину имеющихся будет показано количество памяти, требуемое для загрузки объектов, или количество памяти, которое освободится при выгрузке.

Функция «Удалить с диска» удаляет без возможности восстановления. Обе функции удаления могут быть вызваны из контекстного меню при нажатии ПКМ на сканах в дереве.

Также, с помощью функции «Исходная геометрия» в контекстном меню можно сбросить обработку скана и загрузить его в первоначальном виде (рисунок 5.7). Функция «Исходная геомет-

рия» возвращает скан в положение, которое он занимал после сканирования.

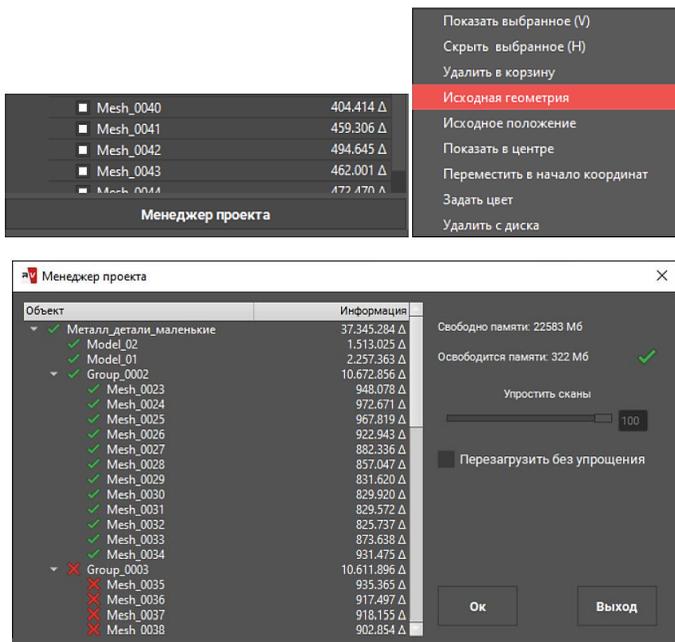


Рисунок 5.7 – Функция сброса обработки скана

Сканирование без маркеров.

В данном режиме сканирования не используются вспомогательные средства, однако полученные фрагменты не объединены, и для их совмещения потребуются больше времени при обработке данных сканирования.

Данный метод используется для сканирования фрагментов крупногабаритных деталей, на поверхности которых не представляется возможным наклеить маркеры.

Сканирование с использованием маркеров.

Данный метод сканирования более удобен, чем сканирование без маркеров. Его суть заключается в том, что на объект или вспо-

могательную поверхность наносятся специальные круглые метки (маркеры).

Помимо построения поверхности детали, в этом режиме сканер находит нанесенные метки, определяет размер и рассчитывает их координаты. Если на каждом следующем скане достаточно смежных меток с предыдущих, новый фрагмент автоматически устанавливается в нужное положение. Таким образом, все фрагменты автоматически образуют трехмерную модель детали, упрощая дальнейшую обработку данных сканирования и ускоряя процесс получения 3D модели (рисунок 5.3).

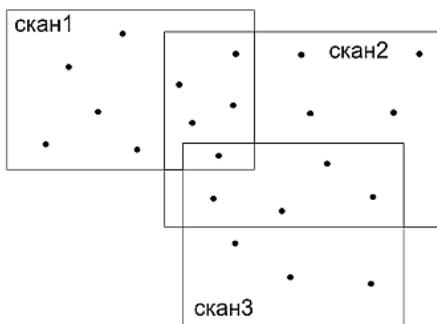


Рисунок 5.8 – Процесс сканирования с использованием маркеров

Найденные метки образуют опорную сеть. Можно заранее создать опорную сеть маркеров, а затем отсканировать деталь. При этом каждый скан будет подшиваться к опорной сети, а не к предыдущему скану, без необходимости перекрытия между ними. Из этого следует, что можно наклеивать на деталь меньшее количество маркеров.

При наклеивании маркеров на деталь желательно выбирать плоские участки. В этом случае в полученной 3D модели можно будет вырезать участок с меткой и аккуратно заполнить образовавшуюся пустоту (рисунок 5.9).

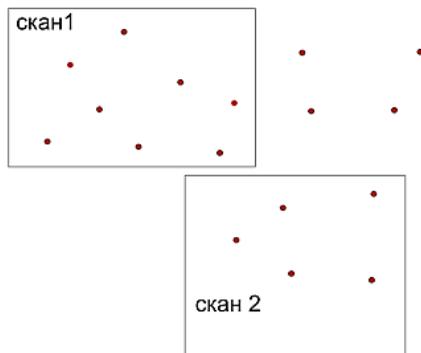


Рисунок 5.9 – Оптимальный вариант наклеивания маркеров

Алгоритм процесса сканирования:

- необходимо наклеить маркеры на деталь или вспомогательную поверхность;
- необходимо подготовить деталь для сканирования;
- опорную сеть 3D точек необходимо загрузить (если уже создана) или создать;
- необходимо определить правильное расстояние до объекта;
- необходимо настроить выдержку камер;
- запустить процесс сканирования. Необходимо отсканировать деталь со всех требуемых сторон, визуально следя за правильностью совмещения сканов в области просмотра модели.

Совмещение сканов.

Для построения трехмерной модели фрагменты, образующие в своей совокупности поверхность детали, должны быть максимально совмещены. Совмещение происходит по общей уникальной геометрии (рельефу) поверхности детали. Выполнить сшивку плоских поверхностей проблематично, так как на поверхности нет общих точек для совмещения сканов.

При сканировании с маркерами модель выглядит целостной, однако точности совмещения фрагментов этими методами недоста-

точно для построения единой модели. В случае сканирования без маркеров фрагменты полностью разрознены.

Функции регистрации слоев (сканов, фрагментов) используются для их совмещения перед построением единой модели и находятся в меню «Совмещение». На рисунке 5.10 представлена схема совмещения сканов для получения единой модели детали.

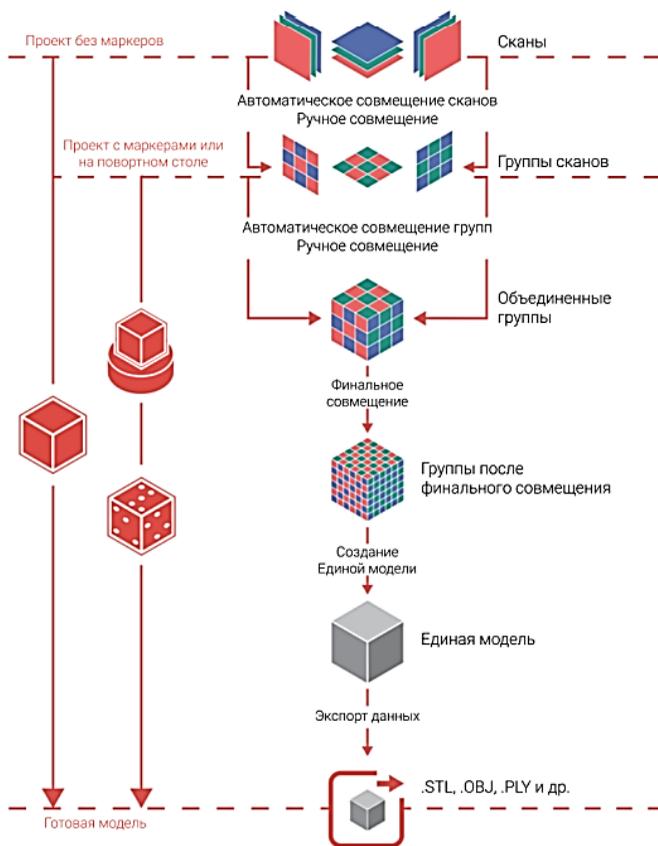


Рисунок 5.10 – Схема совмещения сканов

Автоматическое совмещение сканов используется для объединения группы разрозненных, произвольно расположенных в про-

странстве сканов. Такие сканы образуются при сканировании без использования поворотного стола или маркеров.

Для совмещения необходимо выбрать в дереве группу (папку), содержащую набор подшиваемых сканов, и активировать функцию «Автоматическое совмещение» (рисунок 5.11).

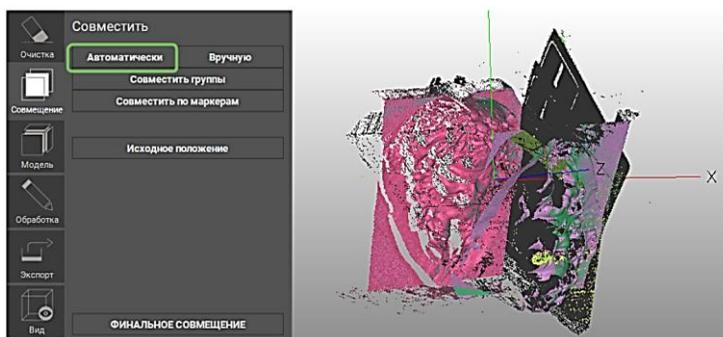


Рисунок 5.11 – Автоматическое совмещение сканов

В процессе совмещения программа анализирует форму поверхности детали и последовательно пытается совместить сканы друг с другом.

Для ручного совмещения, в нижней части экрана, вручную, с помощью мыши при зажатой клавише *Shift*, установите фрагменты в положение, в котором они должны располагаться и нажмите *Enter*.

Создание единой модели.

Построение из группы совмещенных сканов единой модели – это финальная операция по обработке данных сканирования. Создавать единую модель можно только по предварительно совмещенным сканам.

На рисунке 5.12 представлена блок-схема разработанной методики контроля геометрических размеров крупногабаритных тонкостенных отливок деталей, базирующейся на принципах реверс инжиниринга (3D сканирования) и обратного проектирования.

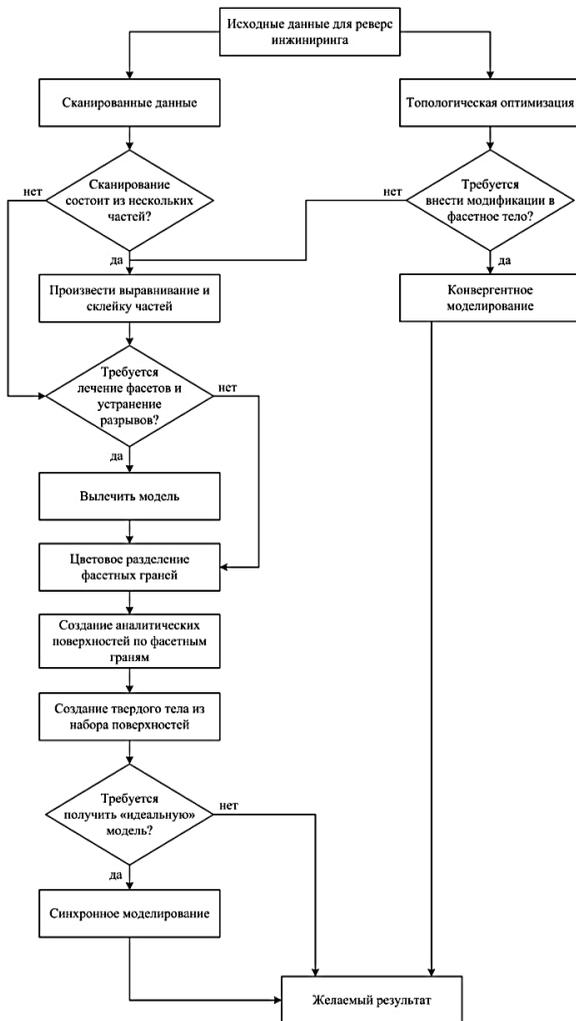


Рисунок 5.12 – Укрупненная блок-схема методики контроля геометрических размеров крупногабаритных тонкостенных отливок деталей

Условно процесс реверс инжиниринга крупногабаритных тонкостенных отливок деталей можно разделить на несколько этапов:

- импортрование данных. Это могут быть фасетные тела из STL-файлов или файлов с облаками точек;
- совмещение и склейка фасетных тел. Данная процедура производится в том случае, если сканирование выполнялось с разных сторон по отдельности;
- анализ и исправление ошибок фасетной геометрии. Выполнение этих операций зависит от качества данных и для большинства задач по реверс инжинирингу может не проводиться;
- размещение и центрирование фасетного тела относительно абсолютной системы координат;
- получение сечений и/или цветовое выделение граней в зависимости от особенностей конструкции фасетного тела;
- создание модели по фасетному телу (используя полученные сечения или «обтягивая» поверхностями фасетные грани с последующей сшивкой);
- анализ точности полученной модели. Проводится с целью выявления и устранения недопустимых погрешностей в полученной модели по сравнению с фасетным телом;
- создание «идеализированной» модели. Данная процедура необходима в тех случаях, когда восстановленную реверс инжинирингом модель планируется в дальнейшем изготавливать.

Апробацию разработанная методика контроля геометрических размеров крупногабаритных тонкостенных отливок деталей, базирующаяся на принципах реверс инжиниринга (3D сканирования) и обратного проектирования была проведена в лаборатории аддитивных технологий при измерении геометрических размеров отливки детали «Корпус наружный», изготовленной по технологии 3D печати из выжигаемого материала PLA. Результаты контроля представлены ранее в разделе 4 (см. рисунок 4.13 и 4.14), а также в таблице 4.2 [11 – 14].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе выполнения проекта были получены следующие результаты:

- разработан и апробирован алгоритм проектирования электронных моделей отливок (на примере деталей «Корпус наружный») с адаптированной конструкцией под технологические возможности и ограничения промышленных 3D принтеров;
- разработан достоверный цифровой двойник технологического процесса литья крупногабаритных и тонкостенных отливок деталей, полностью основанный на использовании отечественного программного обеспечения и отечественных баз данных материалов и сплавов;
- разработана и апробирована методика оптимизации конструкций литниково-питающих систем отливок крупногабаритных и тонкостенных деталей, адаптированная под технологические возможности и ограничения промышленных 3D принтеров и производственное оборудование промышленных предприятий;
- изготовлен на основании разработанных алгоритмов и методик опытный образец крупногабаритной тонкостенной отливки деталей «Корпус наружный», отличающийся повышенной размерной точностью;
- разработана и апробирована методика контроля геометрических размеров крупногабаритных тонкостенных отливок деталей, базирующаяся на принципах реверс инжиниринга (3D сканирования) и обратного проектирования;
- модернизирован технологический процесс изготовления крупногабаритных тонкостенных корпусных деталей.

Значимость представленных результатов для развития научной тематики заключается в создании нового конструкторско-технологического центра компетенций (не имеющего аналогов в Самарской области) по изготовлению крупногабаритных и тонкостенных деталей двигателестроения без разделения модели на части с помощью технологий 3D печати и, как следствие, развитие нового научного направления «реверс инжиниринг» (обратное проектирование) на основе высокоточных технологий 3D сканирования. Существующие на сегодняшний день технологии и подходы основаны (в силу технологических ограничений) на разделении крупногабаритных конструкций деталей на составные части с последующей их сборкой в единое изделие, что значительно сдерживает конструкторско-технологическое совершенствование модификаций двигателей.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Адлер, Ю.П. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий / Ю.П. Адлер. – Москва : Наука, 1976. – 280 с.
2. ГОСТ 34370-2017 Пластмассы. Определение механических свойств при растяжении. Часть 1. Общие принципы. – Введ. 2018-10-01. – Москва : Стандартиформ, 2018. – 26 с.
3. ГОСТ 33693-2015 Пластмассы. Образцы для испытания. – Введ. 2017-01-01. – Москва : Стандартиформ, 2016. – 21 с.
4. ГОСТ 4650-2014 Пластмассы Методы определения водопоглощения. – Введ. 2015-03-01. – Москва : Стандартиформ, 2014. – 20 с.
5. Сысоева, В.В. Алгоритмы оптимизации топологии силовых конструкций / В.В. Сысоева, В.В. Чедрик // Ученые записки ЦАГИ. – 2011. – Т. 42, № 2. – С. 91–102.
6. Бендсо, М. Построение оптимальных топологий при проектировании конструкций с использованием метода гомогенизации / М.П. Бендсо, Н. Кичучи // Компьютерные методы в прикладной механике и технике. – 1988. – 71 (2). – С. 197–224.
7. Монастырский, В.П. Развитие методов моделирования процессов затвердевания отливок с направленной и равноосной структурой: дис. ... доктора техн. наук: 05.16.04 / Монастырский Валерий Петрович. – Москва, 2014. – 300 с.
8. Дубровская, А.С. Численное моделирование процесса изготовления отливок деталей газотурбинных двигателей методом точного литья: дис. ... канд. техн. наук: 05.13.18 / Дубровская Александра Сергеевна. – Пермь, 2015. – 152 с.

9. Хаймович, И.Н. Математическое моделирование материалов и процессов / И.Н. Хаймович, Е.Г. Демьяненко. – Самара: Изд-во СГАУ, 2015. – 82 с.

10. Тушинский, Л.И. Методы исследования материалов / Л.И. Тушинский, А.В. Плохов, А.О. Токарев. – Москва : Мир, 2004. – 384 с.

11. Евстигнеев, М.И. Технология производства двигателей летательных аппаратов / М.И. Евстигнеев, А.В. Подзей, А.М. Сулима. – Москва : Машиностроение, 1982. – 260 с.

12. Сулима, А.М. Основы технологии производства газотурбинных двигателей / А.М. Сулима, А.А. Носков, Г.З. Серебренников. – Москва : Машиностроение, 1996. – 480 с.

13. Безъязычный, В.Ф. Автоматизация технологии изготовления газотурбинных авиационных двигателей / В.Ф. Безъязычный, В.И. Крылов, В.А. Полетаев. – Москва : Машиностроение, 2005. – 556 с.

14. Шкленник, Я.И. Литье по выплавляемым моделям / Я.И. Шкленник, В.А. Озеров. – Москва : Машиностроение, 1984. – 408 с.

Научное издание

*Вдовин Роман Александрович,
Балякин Андрей Владимирович,
Гончаров Евгений Вячеславович*

**СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ
ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ КРУПНОГАБАРИТНЫХ
ОТЛИВОК ДЕТАЛЕЙ ГТД**

Монография

Редакционно-издательская обработка Л.Р. Дмитриенко

Подписано в печать 27.12.2022. Формат 60x84 1/16.

Бумага офсетная. Печ. л. 7,0.

Тираж 25 экз. Заказ .

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

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