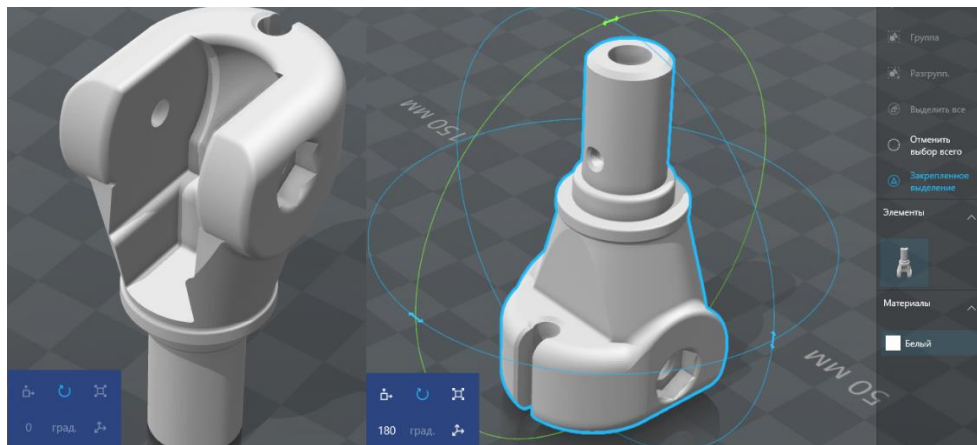


Е.И. Елисейкин, Д.И. Агашин, О.Н.Калачев

ПРИМЕНЕНИЕ БЫСТРОГО ПРОТОТИПИРОВАНИЯ В МАШИНОСТРОИТЕЛЬНОМ ПРОИЗВОДСТВЕ



Ярославль
2024

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования
«Ярославский государственный технический университет»

Е.И. Елисейкин, Д.И. Агашин, О.Н.Калачев

**ПРИМЕНЕНИЕ БЫСТРОГО
ПРОТОТИПИРОВАНИЯ
В МАШИНОСТРОИТЕЛЬНОМ
ПРОИЗВОДСТВЕ**

*Рекомендовано научно-методическим советом университета
в качестве учебного пособия*

Ярославль
Издательство ЯГТУ
2024

УДК 621.9.06
ББК 34.5
Е51

Е51 Елисейкин, Е.И. Применение быстрого прототипирования в машиностроительном производстве / Е.И. Елисейкин, Д.И. Агашин, О.Н.Калачев. – Ярославль: Изд-во ЯГТУ, 2024. - 80 с.

ISBN 978-5-9914-1056-4

Содержит анализ применения аддитивных технологий в обслуживании и ремонте железнодорожного подвижного состава с практическими примерами внедрения в условиях производства Ярославского ЭРЗ им. Б.П. Бещева – филиала АО «Желдорреммаш», описание методики 3D-сканирования изделий на оптических 3D-сканерах RangeVision, описание методики печати на 3D-принтере .stl-файлов, созданных в САD-системах: конвертация векторного файла, загрузка в программу «слайсер», настройка параметров печати, загрузка файла с G-кодом в принтер и собственно печать.

Предназначено для студентов бакалавриата и магистрантов направления «Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных производств», профиль подготовки «Компьютерно-интегрированное машиностроение» по дисциплинам «Цифровое прототипирование в машиностроении» и «Быстрое прототипирование функциональных моделей», а также специалистов сервисных и ремонтных производств.

Может использоваться при обучении студентов других машиностроительных направлений цифровому прототипированию с использованием САD/САМ-систем.

Ил. 77. Библиогр. 32.

УДК 621.9.06
ББК 34.5
Е51

Рецензенты: совет Ярославского филиала Петербургского государственного университета путей сообщения Императора Александра I; А.В. Комиссаров, канд. техн. наук, начальник управления ИТ ОАО «АГАТ».

ISBN 978-5-9914-1056-4

Редактор Юрасова О.А.

План 2024

Подписано в печать 17.09.2024
Ярославский государственный технический университет
150023 Ярославль, Московский пр., 88

© Ярославский государственный технический университет, 2024

Содержание

Введение.....	4
1. Аддитивные технологии в промышленности.....	5
1.1. Виды и описание аддитивных технологий.....	5
1.2. Центры и лаборатории АТ на ж.д. транспорте.....	10
2. Анализ потребности СЛД и Заводов в АТ.....	20
2.1. Запчасти подвижного состава.....	21
2.2. Запчасти технологического оборудования.....	26
2.3. Модельная оснастка.....	29
2.4. Технологическая оснастка.....	33
3. Выводы по применению АТ на ж.д. транспорте.....	36
4. Методика 3D-сканирования на оптическом 3D-сканере.....	37
4.1. Сборка и подключение 3D-сканера, подготовка объекта сканирования.....	38
4.2. Предварительная настройка 3D-сканера.....	39
4.3. Полная калибровка 3D-сканера.....	41
4.4. Быстрая калибровка 3D-сканера.....	41
4.5. Сканирование на поворотном столе.....	41
4.6. Сканирование с маркерами.....	42
4.7. Обработка mesh-сетки с автозамещением.....	42
4.8. Обработка mesh-сетки с ручным совмещением.....	42
4.9. Проверка .stl-файла в Geomagic Design X.....	42
5. Методика цифровой подготовки .stl-файла к FDM/FFF-печати.....	43
5.1. Конвертация 3D-модели в формат .stl в AutoCAD.....	43
5.2. Конвертация 3D-модели в формат .stl в SketchUp Pro.....	44
5.3. Конвертация 3D-модели в формат .stl во Fusion 360.....	45
5.4. Конвертация 3D-модели в формат .stl в Inventor Pro.....	45
5.5. Модуль подготовки к 3D-печати в Inventor Pro.....	46
5.6. Полигональность поверхностей .stl-файла.....	48
5.7. Быстрый просмотр .stl-файла.....	48
5.8. Повышение полигональности .stl-файла.....	49
5.9. Ремонт .stl-файла в Autodesk Netfabb и Microsoft 3D Tools Repair.....	50
5.10. Настройка параметров печати в слайсере.....	53
5.11. Рекомендации по выбору параметров печати.....	59
Список использованных источников.....	61
Приложение – Каталог запчастей электровозов, технологического оборудования цехов, модельной оснастки и приспособлений, печатаемых на Ярославском ЭРЗ	

Введение

Аддитивное производство – процесс создания трехмерных объектов практически любой геометрической формы на основе их цифровых моделей. Концепция 3D-печати основана на построении объекта наносимыми слоями в последовательности с 3D-моделью. Первые технологии аддитивного производства были разработаны в конце 1980-х годов и получили распространение в 1990-х годах силами американских компаний 3DSystems и Stratasys. Уже в настоящий момент, в связи с истечением срока действия патентов компаний, появились большие сообщества, как частных производителей принтеров с открытым исходным кодом, так и крупных организаций. Возможность создания изделий сложной геометрии и управление их физико-механическими свойствами благодаря использованию высокотехнологичных материалов открыло перед 3D-печатью дорогу из сферы дизайна и макетирования в промышленность и науку.

3D-печать отвечает и потребностям транспортной отрасли экономики, в которой наиболее важно внедрение наиболее прогрессивных решений с целью поддержания подвижного состава в эксплуатации, сокращении издержек на обслуживание и ремонт, а также в разработке нового технологического оборудования. Показательным примером является повсеместное открытие западными локомотивными компаниями (операторами) в подконтрольных депо обслуживания электропоездов участков аддитивного производства, как запасных пластиковых деталей вагонов, так и приспособлений. Благодаря печати «на месте», компаниями достигнуто уменьшение времени поставки деталей на 95 %.

В данных депо и в целом, процесс изготовления новых видов запасных деталей посредством 3D-печати, как правило, заключается в трех этапах – разработке 3D-модели по конструкторской документации (КД) с цифровой подготовкой .stl/.obj/.3MF-файла на печать, самой печати детали и ее постобработке. В случае отсутствия КД, используется реверс-инжиниринг – разработка 3D-модели и КД по оригиналу детали. Быстрым инструментом реверс-инжиниринга является 3D-сканирование для получения заготовки – «облака точек» с дальнейшим его преобразованием в 3D-модель и файл для подготовки к печати. Сам производственный цикл начинается с предпечатной подготовки 3D-модели. Файл в формате .stl/.obj/.3MF нарезается программным обеспечением (ПО) на слои (слайсинг) и ориентируется наиболее подходящим образом на рабочем столе 3D-принтера. При необходимости генерируются поддержки, необходимые для печати нависающих элементов. Некоторые устройства позволяют использовать двуэкструдерную печать разными пластиками во время одного производственного цикла. Например, возможна печать изделия из ABS, но с поддержками из растворимого PVA, что позволяет легко удалять структуры уже по завершению печати.

Отметим, что на этапе подготовки необходимо применение специальных средств в САПР или модулей для работы с файлом, чтобы напечатать деталь согласно требованиям КД. Такими Компаниями, как Stratasys, Intamsys, 3DSystems, CreatBOT и т.п., выпускающими промышленные установки и принтеры, предоставляется лицензированное ПО с расширенными инструментами для доработки файла – «ремонта», установки поддержек, расчета напряжений. Однако

необходимое ПО является дорогостоящим и несовместимым с упрощенными принтерами, применяемыми на ряде ремонтных производств России. Следовательно, для данных производств актуален выбор из открытого доступа тех слайсеров, которые имеют наибольший функционал.

Поэтому целью данного учебного пособия является формулирование рекомендаций по изготовлению с применением 3D-печати и 3D-сканирования разрабатываемых новых или ремонтируемых существующих изделий на примере отрасли железнодорожного транспорта: прототипов узлов и дефицитных запчастей локомотивов, нестандартных приспособлений, модельной и технологической оснастки. Для этого в пособии приведены:

- основные виды современных аддитивных технологий;
- аддитивные технологии в ремонте локомотивов зарубежном и в России;
- анализ номенклатуры дефицитных деталей локомотивов, технологического оборудования цехов, и проблем их изготовления;
- проблемы изготовления и ремонта модельной и технологической оснастки, используемой в ремонте локомотивов, их решение с помощью аддитивных технологий;
- методика сканирования изделий на оптических 3D-сканерах RangeVision с конвертацией «скана» в файл формата .stl, цифровой подготовки файла и его слайсинга.

1. АДДИТИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В ПРОМЫШЛЕННОСТИ

1.1. Описание и виды аддитивных технологий

Распоряжением Правительства РФ от 17 августа 2017 года № 1756-р на период до 2030 г. утверждена стратегия развития российского транспортного машиностроения [1, 2]. Для железнодорожного машиностроения, как одной из ключевых отраслей экономики, важно внедрение наиболее прогрессивных решений с целью поддержания подвижного состава в эксплуатации, сокращении издержек на ТОиР, а также в разработке нового станочного и испытательного оборудования. В зависимости от сценария перспективного экономического развития России, объемы перевозок грузов ж.д. транспортом по сети ОАО «РЖД» прогнозируются в размерах от 1,6 млрд. т до почти 1,8 млрд. т. на 2025 г. В настоящее время средний износ парка локомотивов ОАО «РЖД» составляет 68,4 %, средний возраст превышает 27 лет [3].

Полная и быстрая замена парка тягового подвижного состава не представляется возможной, поэтому остро стоит вопрос квалифицированного выполнения ТОиР, и связанная с ними задача бесперебойного обеспечения СЛД и Заводов запчастями [3]. Однако в настоящий момент для СЛД и заводов России существенной проблемой является отсутствие запчастей и повышенный срок их поставки по рыночным, технологическим и организационным причинам. Кризис 2022 г. оказал сильное влияние на промышленность и, как следствие, изменил все логистические цепочки, что привело к падению рынка запчастей для ж.д. транспорта [4]. Нельзя исключать и невозможность изготовления ряда деталей силами самих ремонтных

площадок. В качестве решения, отвечающего потребностям, предложено использовать аддитивные технологии (АТ).

АТ (3D-печать) – это получение изделий из металла или полимеров послойным наращиванием на специальном оборудовании с ЧПУ, что противоположно традиционному (субтрактивному) производству (рис. 1) [5]. За последние 20 лет печать прошла развитие от макетирования до промышленного оборудования в транспортном машиностроении. По данным агентства Wohlers Associates за 2022 г. (рис. 2) 3D-печать в мировой промышленности наиболее применяется в готовых изделиях (33,7 %) и разработке прототипов (24,4 %) (рис. 3) [6, 7].

Традиционное производство



Аддитивное производство



Рис. 1. Субтрактивное и аддитивное производство [5]

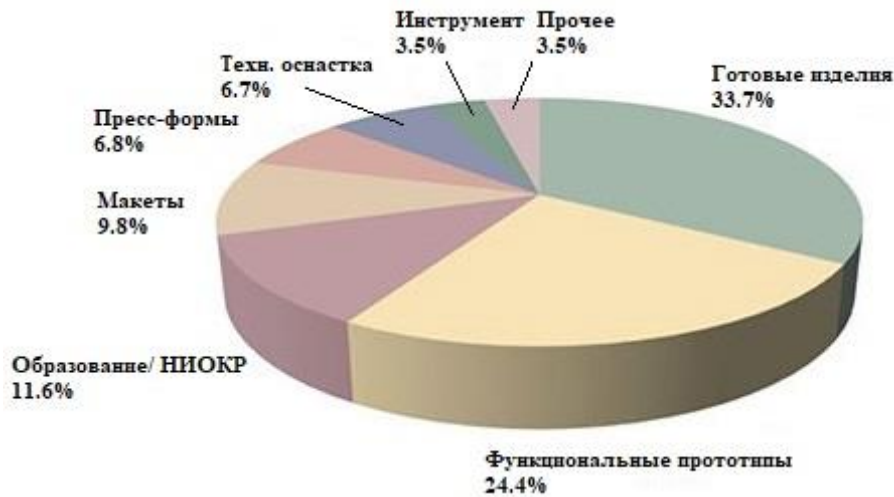


Рис. 2. Распределение 3D-печати в мировой промышленности [6]

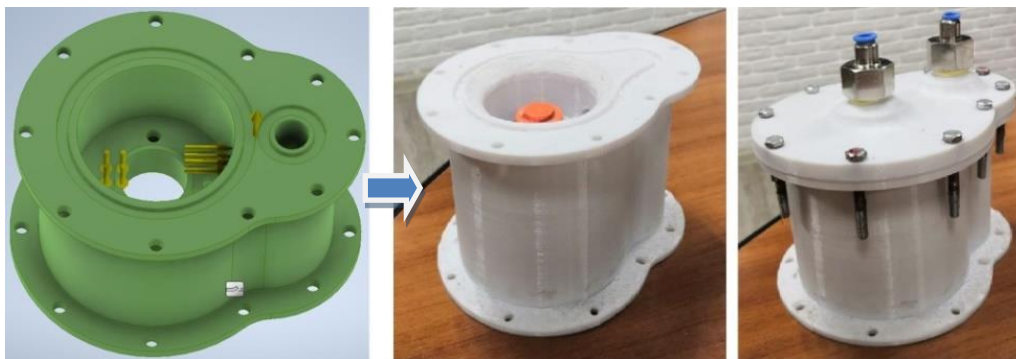


Рис. 3. Прототип нового пневморедуктора локомотива, разработанный и напечатанный по технологии FDM/ FFF в ИрГУПС, г. Иркутск [7]

Согласно ISO/ASTM 52900 2021 существует несколько технологий 3D-печати, каждая из которых изготавливает изделия из различных материалов и имеет разную точность построения изделий (табл. 1) [8, 9, 10].

Таблица 1. Характеристики технологий 3D-печати [10]

Технология	Допуск на печать	Область печати, мм	Наличие поддержек	Толщина слоя, мкм
FDM/ FFF	Для настольных принтеров $\pm 0,5\%$ (нижний предел $\pm 0,5$ мм), для установок $\pm 0,15\%$ (нижний предел $\pm 0,2$ мм)	Для настольных принтеров - 200 x 200 x 200, для установок - до 900 x 600 x 900. Для строительных принтеров с экструзией бетона размер области печати может превышать 10-20 метров	В зависимости от геометрии изделия (растворимые поддержки при наличии двойного экструдера)	50-400 (наиболее - 200)
SLA/ DLP/ CLIP	Для настольных принтеров $\pm 0,5\%$ (нижний предел $\pm 0,10$ мм), для установок $\pm 0,15\%$ (нижний предел $\pm 0,05$ мм)	Для настольных принтеров - 145 x 145 x 175, для установок - до 1500 x 750 x 500	Всегда требуются (удаляются вручную)	25-100 (наиболее - 50)
SLS	$\pm 0,3\%$ (нижний предел $\pm 0,3$ мм)	300 x 300 x 300 (до 750 x 550 x 550)	Всегда требуются (удаляются механообработкой)	80-120 (наиболее - 100)
PolyJet/ MJM	$\pm 0,1\%$ (нижний предел $\pm 0,05$ мм)	380 x 250 x 200 (до 1000 x 800 x 500)	Всегда требуются (растворимые)	16-30 (наиболее - 16)
3DP/ BJ	$\pm 0,2$ мм ($\pm 0,3$ мм для печати гипсом и песком)	400 x 250 x 250 (до 1800 x 1000 x 700)	Не требуются	100
DMLS/ SLM	$\pm 0,1$ мм	250 x 150 x 150 (до 500 x 280 x 360)	Всегда требуются (удаляются механообработкой)	30-50

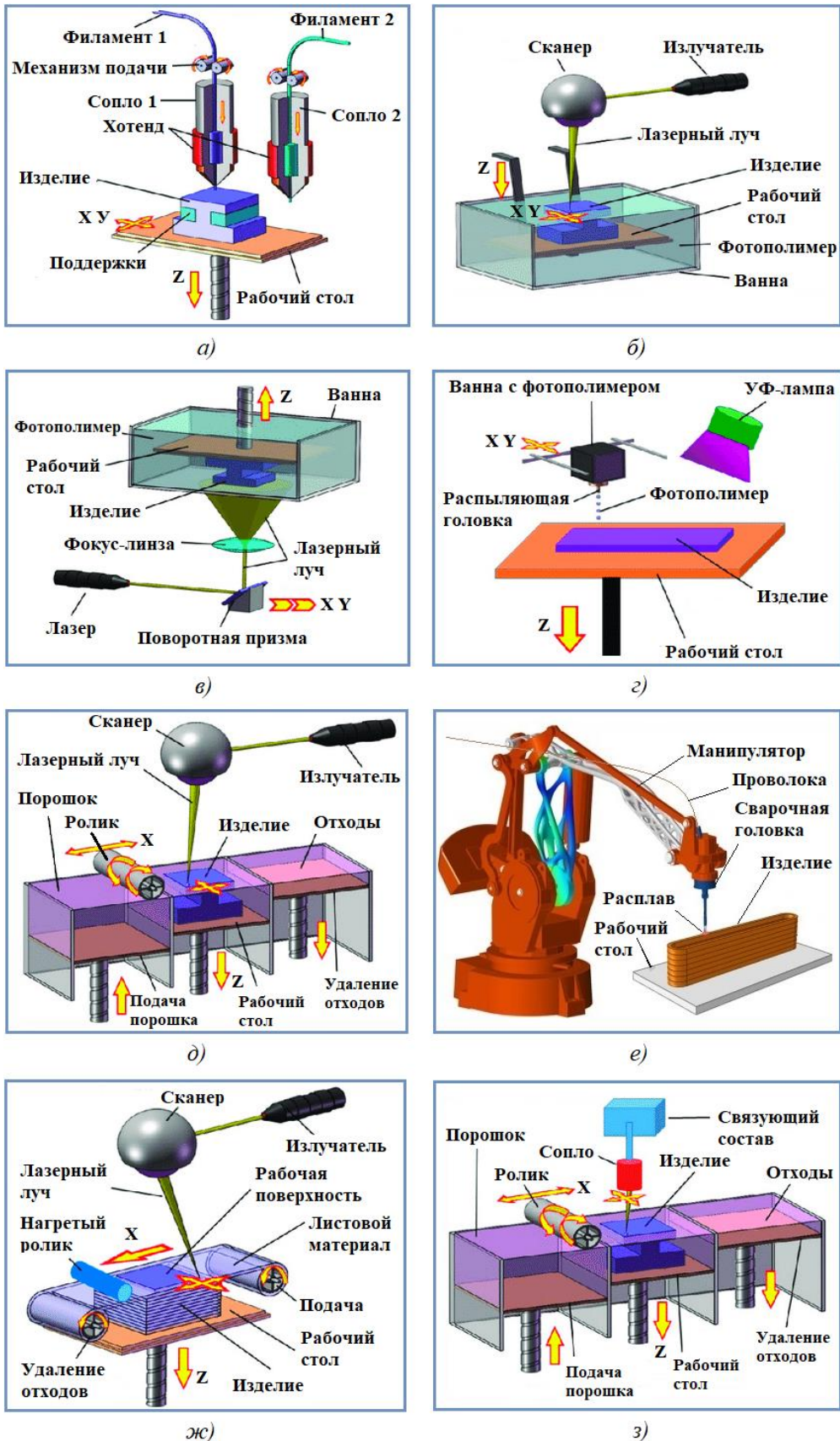


Рис. 4. Основные технологии 3D-печати:

а) – FDM/ FFF; б) – SLA; в) – DLP;

г) – PolyJet/ MJM; д) – SLS; е) – WAAM; ж) – LOM; з) – 3DP/ BJ [9]

Fused Deposition Modelling/ Fused Filament Fabrication (FDM/ FFF) – послойное наплавление расплава термопластика (рис. 4, *a*). Впервые технологию FDM в конце XX века предложил и запатентовал С. Скотт Крамп. В 1989 году под его руководством была основана компания Stratasys, выпустившая первую промышленную FDM-установку. После истечения срока действия патента в 2008 году, FDM-печать получила широкое распространение и вдохновила многих последователей на модернизацию и упрощение (технология – «аналог» – FFF и открытый проект самосборного принтера «RepRap»). FDM/ FFF является одной из наиболее доступных технологий печати. Процесс осуществляется подачей нити материала (филамента) через нагретое сопло экструдера принтера. Принтер, согласно управляющей программы, наносит расплав на нагреваемую платформу (рабочий стол), формируя изделие. Для печати на настольных бытовых принтерах (Creality, Prusa, Wanhao и т.д.) обычно применяются филаменты диаметром 1,75 мм, а в установках (Stratasys, Ultimaker, Intamsys) – 2,85 мм. В настоящий момент в России существуют более 7 основных производителей филаментов: REC, Bestfilament, Aniso-print, Kremen, StarPlast, Filamentarno и FDPlast.

Как и оборудование для других технологий 3D-печати, FDM/ FFF-принтеры имеют недостатки, влияющие на качество и точность изделий. Для упрощения конструкций и удешевления стоимости, в настольных принтерах, в отличие от установок, отсутствуют дополнительные средства, которыми повышается качество печати (активная термокамера с подачей нагретого воздуха, вакуумный рабочий стол без необходимости адгезионного покрытия, экструдер для тугоплавких и гибких филаментов). Это приводит к отлипанию основания изделия от стола, деформациям, расслоениям поверхностей при печати термостойкими филаментами с повышенной усадкой, и, как следствие, к ограничениям по применению материалов.

Stereolithography (Стереолитография) – общее название, обозначающее технологии отверждения фотополимерных смол и восков на их основе УФ-излучателем, лазером, ЖК-экраном в емкости (в ванне) или на рабочем столе, изолированных от сторонних источников света. В настоящий момент фотополимерная 3D-печать представлена тремя основными категориями процессов (рис. 4, *б, в, г*):

- SLA/ LCD/ DLP/ CLIP – рабочий стол, касаясь поверхности фотополимера в ванне, перемещается по оси Z относительно неподвижного излучателя с поворотной призмой, отверждающих новые слои изделия. Излучатель может быть смонтирован под прозрачным дном ванны (LSD/ DLP/ CLIP) или над ней (SLA). Наиболее доступными являются настольные DLP- и LSD-принтеры, поскольку их конструкция максимально упрощена заменой дорогостоящего лазерного модуля, применяемого в SLA-принтерах, ЖК-экраном и комплектующими производства Китая;

- MOVINGLight – головка с УФ-излучателем перемещается по осям XY, а рабочий стол относительно неё погружается по оси Z в ванну на толщину нового слоя. Разработана и запатентована французским холдингом Prodways Group;

- PolyJet и Multi-jet Modelling (MJM) – печатная головка с массивом сопел/ УФ-излучателем для распыления и отверждения фотополимера перемещается по осям XY, а рабочий стол - по оси Z. Эти технологии позволяют наносить на одно изделие разные материалы - например, фотополимерный модельный воск поверх

смолы, что требуется при печати растворимых поддержек. Как и FDM, PolyJet также разработана Stratasys и реализована в установках серии Objet.

Все изделия из фотополимеров после печати подвергаются очистке от остатков смолы в изопропанол/ дихлорэтане с принудительной вентиляцией, ручному удалению или растворению поддержек и окончательной полимеризации в отдельной от принтера/ установки УФ-камере в течение 1-2 часов.

Selective Laser Sintering (SLS) и смежные Selective Laser Melting (SLM), Electron Beam Melting (EBM), Direct Metal Laser Sintering (DMLS) – выборочное плавление полимерных или металлопорошков в среде инертного газа или вакууме (рис. 4, д). За счет системы шпателей и роликов установки, порошок наносится и разравнивается на каждый предыдущий слой в закрытой области печати. Далее электронный/ лазерный луч спекает порошок в заданной точке. По завершению печати газ удаляется, излишки порошка отсасываются обратно в бак установки, а изделие с поддержками механически срезается с рабочего стола и подвергается обработке.

В противоположной SLS по устройству технологии Direct Energy Deposition (DED) – в наплавке, расплав металла наносится на напечатанные слои комбинированной головкой, совмещающей электронный или лазерный излучатель, форсунку для подачи инертного газа, сопло для распыления порошка/ сварочный электрод. Соответственно, по подаче материала DED-печать разделяют на DED-P от англ. «powder» - порошок и DED-W от англ. «wire» – проволока. К DED-W относится Wire Arc Additive Manufacturing (WAAM) – наплавка изделия сварочной головкой, перемещаемой манипулятором с ЧПУ (рис. 4, е). Построение происходит внутри камеры с инертным газом на неподвижном, либо на 4-х осевом поворотном рабочем столе, в дополнение к манипулятору.

Laminated object manufacturing (LOM) – склеивание или спаивание слоев листового материала - бумаги, пластика или фольги (рис. 4, ж), вырезаемых по контуру изделия лазером/ лезвием/ иглой, с автоматическим удалением отходов и подачей нового листа.

3Dprinting (3DP) и Binder Jetting (BJ) – склеивание материала впрыском связующего состава (рис. 4, з). Аналогично технологии SLS, материал в виде порошка (гипс, песок, полиамид и т.д.) подается шпателем в область печати и утрамбовывается роликом. Распыляющая головка с массивом сопел наносит связующий состав на порошок по контуру каждого нового слоя до завершения печати изделия. В качестве связующего применяют водорастворимые клеи и двухкомпонентные смолы. Последние используются в установках производства ExOne и Robotech для печати песчаных литейных форм по «green»-технологии, аналогичных формам из холодно-твердеющих смесей (ХТС). По завершению печати, излишки порошка удаляются, изделие извлекается из установки, очищается кистью и обдувкой сжатым воздухом, а для окончательной полимеризации клея проходит сушку в печи при температуре 60-70 °С.

Более подробное описание технологий 3D-печати приведены в книгах Редвуда В., Шёффера Ф., Гаррета Б. [11], Дж. Пруши [12], Гибсона И., Розена Д., Стакера Б. [13].

1.2. Центры и лаборатории АТ на ж.д. транспорте

В России стандартизацией АТ занимается специальный технический комитет (ТК 182) при НИЦ «Курчатовский институт» [14]. Им разработана нормативная документация: ГОСТ Р 57558-2017/ISO/ASTM 52900:2015 «Аддитивные технологические процессы. Принципы. Часть 1. Термины и определения» [15], проекты государственных стандартов: «Материалы для аддитивных технологических процессов. Виды дефектов» и «Аддитивные технологии. Подтверждение качества и свойств металлических изделий». Данная документация является основополагающей в работе государственных и частных центров аддитивных технологий (ЦАТ) – предприятий, оказывающих услуги НИОКР, НИР и опытного производства на возмездной основе.

Согласно стратегии развития АТ в России к 2030 году запланировано создание около 180 новых ЦАТ, около десяти из них – госкорпорацией «Росатом». ЦАТ могут оснащаться схожим оборудованием, но с разными рабочими параметрами и материалами печати. Как показано на рис. 5 (слева), где П11, П21, ..., ПМ1 – принтеры разных типов, а по горизонтали их количество; К1, К2, ..., КL – клиенты с заказами по проектам (Пр1, Пр2, ...) [16]. Кроме того, объемы производства и ассортимент продукции различных центров могут варьироваться в зависимости от конкретного запроса клиентов. На рис. 5 (справа) представлены возможные варианты взаимодействия ЦАТ с клиентами: 1) работа в режиме полученного заказа; 2) совместная работа над решениями при проектировании продукта; 3) проектная группа по разработке «сложных» продуктов [16].

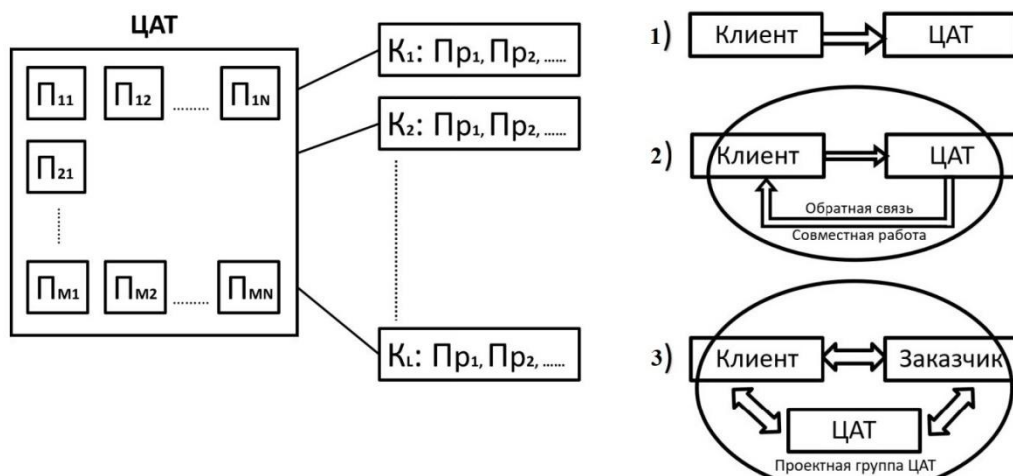


Рис. 5. Структура ЦАТ и варианты взаимодействия с клиентами [16]

Например, для СЛД и Заводов, входящих в АО «Трансмашхолдинг» (ТМХ), услуги печати запчастей и реверс-инжиниринга оказывают два ЦАТ:

- ЦАТ компании ООО «Рэйл Альянс» в Москве. Оснащен оборудованием: оптическими 3D-сканерами Artec Eva и Artec Spider, FDM/ FFF-принтерами Raise3D Pro2, фотополимерными ЖК-принтерами Uniz Slash Plus, вакуумной литьевой машиной HVC-2. В 2023 году ЦАТ совместно с компанией ООО «2050.АТ» впервые в России разработан цифровой каталог 3D-моделей запчастей локомотивов (рис. 6) [17];



Рис. 6. Запасные панели электровоза серии ЭП1М, напечатанные ЦАТ ООО «Рэйл Альянс» из полифениленсульфида (PPS) на принтерах Raise3D Pro2 [17]

- ООО «Центр прототипирования и аддитивных технологий» (ООО «ЦПАТ») в г. Жуковский. Оснащен оборудованием: станком с ЧПУ DMG MORI 50 ecoline, SLM-установкой 280-2.0, FDM/FFF-принтерами Anycubic Kobra, прецизионной оптической измерительной системой ATOS Capsule 12M, прибором контроля дисперсности порошков для печати CAMSIZER X2.

Помимо данных ЦАТ отметим работу участков самостоятельной FDM/FFF-печати пластиковых запчастей локомотивов, организованных в 2019 году на Ярославском ЭРЗ и Оренбургском ЛРЗ – филиалах АО «Желдорреммаш» для нужд собственного производства [3, 18, 19]. Оба участка оборудованы бытовыми принтерами: Ярославский ЭРЗ – Creality Ender 5 Plus и самодельным Mini3D, Оренбургский ЛРЗ – тремя «дельта-принтерами» Anycubic Kossel Plus. Ввиду «open-build»-конструкции принтеров, заводами используются бюджетные пластики PLA+ и PETG (табл. 2), не требующие термокамеры, как на Raise3D Pro2, печатающем термостойкими материалами с повышенной усадкой. Малогабаритные детали (тумблеры, кнопки и т.п.) печатаются из PETG, а габаритные панели и корпуса – из PLA+. Чтобы предварительно разработать 3D-модель детали, ее оригинал очищается от грязи и пыли, покрывается тонким слоем матовой белой эмали и сканируется на оптическом 3D-сканере с доработкой «скана» в САПР (рис. 7) [3]. Номенклатура изделий, печатаемых данными заводами, постоянно расширяется, а в 2024 году организация участка по печати запчастей запланирована на ЭРЗ Ростова-на-Дону.

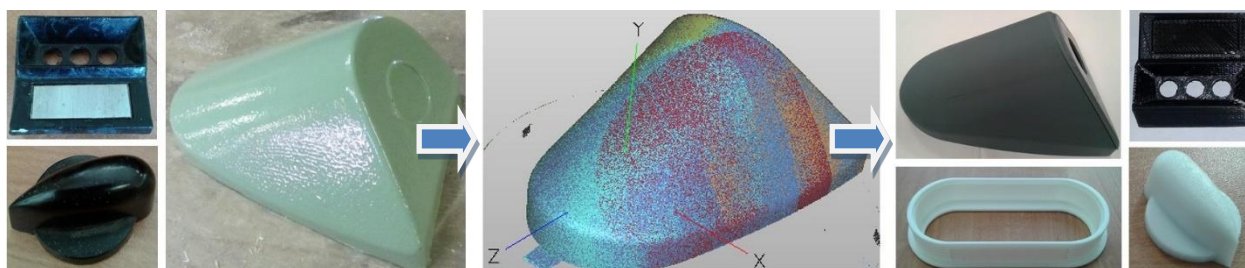


Рис. 7. 3D-сканирование и печать запчастей на Ярославском ЭРЗ [3, 18]

В периметре ТМХ на строительных заводах (ОАО «ТВЗ», АО «Метровагонмаш») работают собственные лаборатории для прототипирования новых узлов вагонов, в том числе, для изготовления их макетов в уменьшенном масштабе.

Макеты, как собранная тележка, кузов и салон пассажирского вагона (рис. 8) получают спеканием ABS-порошка на SLS-установке иностранного производства [20]. Как отмечает ТМХ, оператор «3D-станка» является возможной профессией ближайшего будущего, поскольку в планах компании расширить применение печати в производстве. Специалисту потребуется: знание основ АТ и устройства нового оборудования, умение разрабатывать 3D-модели в САПР, навыки работы с прикладным ПО для печати деталей. Уже запущен проект по внесению в «Атлас новых профессий» дополнительных данных о компетенциях и профессиях будущего в отрасли тяжелого машиностроения [21].

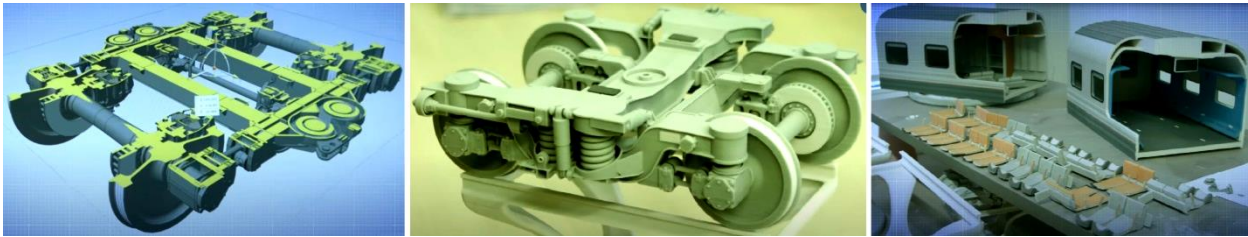


Рис. 8. Макеты, напечатанные по технологии SLS на ОАО «ТВЗ» [20]



Рис. 9. Макеты оптимизированных деталей ДВС, напечатанные на ООО «УДМЗ»

Печать макетов также применяется входящем в АО «СТМ» Уральским Двигель-Моторным Зааводом (ООО «УДМЗ») при разработке новых ДВС – в том числе (рис. 9) для газотепловоза ГТЭМ1. Большинство макетов печатаются на FDM/FFF-принтере SoloPrint, либо на SLA-установках. Завод также осваивает внедрение в литье тонкостенных отливок технологии QuickCast, которая заключается в SLA-печати модели с ячеистой структурой под оболочкой, для экономии материала и снижения зольности при выжигании (рис. 10).



Рис. 10. Изготовление отливки по QuickCast-модели с сетчатой структурой TetraShell

Среди зарубежных ЦАТ на ж.д. транспорте наиболее показательный пример – центр FDM/FFF-печати запчастей пассажирских вагонов и приспособлений для их обслуживания (рис. 11, 12), созданный подразделением Siemens Mobility AG в цифровом СЛД электропоездов серии RRX в г. Дортмунде, Германия. Изначально, ЦАТ оснащался установкой Stratasys Fortus 450mc, а впоследствии, Fortus 900mc. В обеих установках для печати запчастей применяется полиэфиримид (PEI) Ultem 1010/ 9085, соответствующий европейскому стандарту пожарной безопасности № EN45545-2 и стандарту США № NFPA 130. Характеристики Ultem и PPS, а также других типов материалов для FDM/FFF-печати представлены в табл. 2.

Таблица 2. Характеристики термопластиков для FDM/FFF-печати

Материал	t экструдера принтера, °C	t рабочего стола платформы	Плотность, г/см ³	t деформации и при нагреве, °C	Индекс текучести расплава (г/10 минут)	Предел прочности, МПа	Относитель нос удлинение при разрыве	Прочность на изгиб, МПа	Модуль упругости при изгибе	Ударная прочность по Изоду (Пчр/ м²)
ULTE M	380-450	90-150	1,3	152	10 (380°C/ 5 кг)	100	40	170	3500	7
PPS	380-450	90-150	1,3	152	10 (380°C/ 5 кг)	90	35	160	3300	8
PLA	190-220	60-80	1,25	56	5 (190°C/2,16 кг)	65	8	97	3600	4
PLA+	190-220	60-80	1,25	52	4 (190°C/2,16 кг)	65	12	75	2102	8,5
ABS	220-260	90-110	1,04	78	12 (220°C/10 кг)	43	22	66	2348	19
ABS+	220-260	90-110	1,06	73	15 (220°C/10 кг)	40	30	68	2443	42
ABS MAX	220-260	90-110	1,05	85	60 (220°C/10 кг)	45	30	58	2400	48
ASA	220-260	90-110	1	54	10-15 (220°C/10 кг)	50	30	35	2300	19
HIPS	220-260	90-110	1,05	80	3 (200°C/5 кг)	27	55	39	2280	11
PETG	190-220	60-80	1,23	64	6,6 (230°C/2,16 кг)	49	280	60	1170	7,6
PVA	190-220	60-80	1,25	-	-	22	360	-	-	-
PVA+	190-220	60-80	1,14	-	-	26	190	-	-	-

Smooth	190-220	60-80	-	64	4-6 (190°C/2,16 кг)	46	273	71	2799	4
Wood	190-220	60-80	0,7	45	7 (190°C/2,16 кг)	45	17	57	2017	9,3
Bambo o	190-220	60-80	1,2	48	6-14 (190°C/2,16 кг)	28	10	35	2000	4
Color Change	190-220	60-80	1,24	58	10 (190°C/2,16 кг)	65	5	97	3600	4
Bronze	190-220	60-80	1,27	50	62 (190°C/2,16 кг)	66	16	106	4442	4
Copper	190-220	60-80	2,46	52	20 (190°C/2,16 кг)	40	4	64	4954	4
Al-fill	190-220	60-80	1,48	52	8 (190°C/2,16 кг)	45	5	74	4885	4
Steel	190-220	60-80	2,46	52	14 (190°C/2,16 кг)	45	5	63	4452	5
PA	190-220	80-90	1,12	50	5 (230°C/2,16 кг)	57	196	57	1495	15
PA-CF	230-260	80-90	1,24	120	6 (250°C/5 кг)	85	16	98	2300	15,5
PA-GF	230-260	80-90	1,35	120	7 (250°C/5 кг)	101	17	160	4300	8
PC	230-260	80-90	1,12	80	5 (230°C/2,16 кг)	57	196	57	1495	15
Flex	230-260	Без нагрева	1,12	-	-	52	500	-	-	-
TPE	210-240	Без нагрева	1,14	-	-	32	420	-	-	-
TPU- 98A	210-240	Без нагрева	1,15	-	-	49	520	-	-	-
PCL	70-100	≤40	1,16	45	0,5 (70°C/2,16 кг)	18	>800	13	345	Не ломается
Silk- PLA	190-220	60-80	1,43	67	25	58	300	75	4000	4
Twinkl ing	190-220	60-80	1,41	67	25	58	-	70	2100	4

Благодаря печати, время поставки запчастей было уменьшено на 95 %, что ускорило готовность электропоездов к эксплуатации [22]. По итогам работы за 6 лет Siemens полностью собрана крупная база данных печатных запчастей. Также внедрено приложение «Easy Spares Marketplace» для внутренней работы сотрудников депо, содержащее 3D-модели и спецификации по каждой детали/ узлу. В 2020 году аналогичные участки организованы подразделением Siemens Mobility Russia в Москве и в Санкт-Петербурге в цифровых депо, обслуживающие электропоезда «Сапсан» и «Ласточка» [23].



Рис. 11. ЦАТ Siemens Mobility и запчасти вагонов из Ultem, напечатанные на его базе




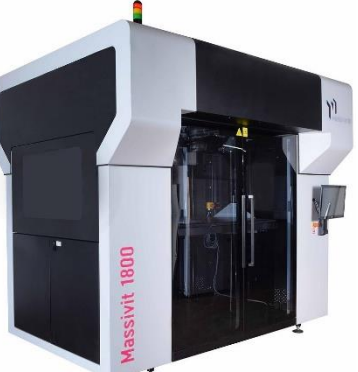





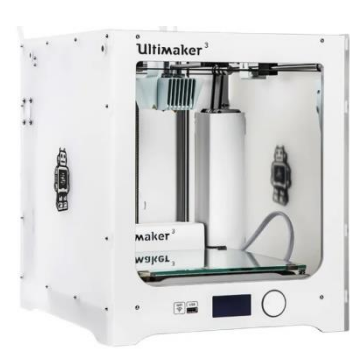
Рис. 12. Сочленения из Ultem в рамке перемещения тележек

Помимо Siemens Mobility, в пятерке западных локомотивных компаний, лидеров по использованию АТ, находятся Deutsche Bahn (DB), Alstom, Bombardier и Angel Trains. В ЦАТ трех последних компаний также работают на установках серии Fortus (табл. 3), а номенклатура печати схожа с Siemens Mobility.

Таблица 3. Оборудование для FDM/ FFF-печати, применяемое на ж.д. транспорте

ЦАТ/ СЛД/ Завод	Общий вид	Наименование и характеристики	Материалы
<p>Siemens Mobility, Baltic3D (по 1 единице)</p> <p>Моторвагонные цифровые депо Подмосковная и СПб-Московское (по 1 единице)</p>		<p>Stratasys Fortus 450mc</p> <ul style="list-style-type: none"> - Область печати, мм: 406 x 355 x 406; - Термокамера: в наличии; - Нагрев стола: отсутствует; - Покрытие стола: вакуумный стол с PEI-пленкой; - Автокалибровка стола: в наличии; - Количество экструдеров: 2; - Кинематическая схема: H-bot; - Управление: ЖК-экран; - Подача пластика: Direct; - Производитель: Stratasys, США 	<p>Ultem, PEEK, ABS, TPU,</p> <p>HIPS (для растворимых поддержек), PVA</p>

<p>Deutsche Bahn, Baltic3D (по 1 единице)</p>		<p>BigRep One V.3</p> <ul style="list-style-type: none"> - Область печати, мм: 1005 x 1005 x 1005; - Термокамера: отсутствует; - Нагрев стола: в наличии; - Покрытие стола: PEI-пленка; - Автокалибровка стола: в наличии; - Количество экструдеров: 1-2; - Кинематическая схема: H-bot; - Управление: ЖК-экран; - Подача пластика: Direct; - Производитель: BigRep, Германия 	
<p>CAF Digital & Design Solutions (1 единица)</p>		<p>Super Discovery Hybrid</p> <ul style="list-style-type: none"> - Область печати, мм: 1300 x 2500 x 1000; - Термокамера: отсутствует; - Нагрев стола: в наличии (до 175°C); - Покрытие стола: нанесение клея; - Автокалибровка стола: в наличии; - Количество экструдеров: 1; - Кинематическая схема: H-bot; - Управление: консольное; - Подача гранул пластика: шнековая; - Производитель: CNC Barcenas, Испания 	<p>PPS, ABS, PET/ PETG, PLA, TPU, Flex, HIPS, PVA, стекло- и уг- ленаполнен- ные пластики</p>
<p>ЦАТ при ООО «Рэйл Альянс» (10 единиц)</p>		<p>Raise3D Pro2</p> <ul style="list-style-type: none"> - Область печати, мм: 305 x 305 x 300; - Термокамера: в наличии; - Нагрев стола: в наличии; - Покрытие стола: пленка «BuildTak» на гибком магнитном основании; - Автокалибровка стола: в наличии; - Количество экструдеров: 2; - Кинематическая схема: Core-XY; - Управление: ЖК-экран; - Подача пластика: Direct; - Производитель: Raise3D, США 	
<p>ЦАТ (Хаб) Alstom в г. Барсело- на (1 единица)</p>		<p>Massivit 1800</p> <ul style="list-style-type: none"> - Область печати, мм: 1200 x 1500 x 1800; - Термокамера: не требуется; - Нагрев стола: не требуется; - Покрытие стола: боросиликатное стекло; - Автокалибровка стола: в наличии; - Количество экструдеров: 1; - Кинематическая схема: H-bot; - Управление: консольное; - Подача пластика: струйная; - Производитель: Massivit, Израиль 	<p><i>Технология 3D-печати GDP (нанесе- ние фотопо- лимерного геля Dimen- gel)</i></p>

<p>ООО «ЦПАТ» (4 единицы)</p>		<p>Anycubic Kobra Pro</p> <ul style="list-style-type: none"> - Область печати, мм: 220 x 250 x 220; - Термокамера: отсутствует; - Нагрев стола: в наличии; - Покрытие стола: «Ultrabase» или «BuildTak»; - Автокалибровка стола: в наличии; - Количество экструдеров: 1; - Кинематическая схема: XZ-head; - Управление: ЖК-экран; - Подача пластика: Bowden; - Производитель: Anycubic, КНДР 	
<p>Ярославский ЭРЗ - филиал АО «Желдорремаш» (1 единица)</p>		<p>Creality Ender 5 Plus</p> <ul style="list-style-type: none"> - Область печати, мм: 350 x 350 x 400; - Термокамера: отсутствует; - Нагрев стола: в наличии; - Покрытие стола: «Ultrabase»; - Автокалибровка стола: в наличии; - Количество экструдеров: 1; - Кинематическая схема: Core XY; - Управление: ЖК-экран; - Подача пластика: Bowden; - Производитель: Creality Shenzhen Technology, КНДР 	<p>ABS, PET/ PETG, PLA, PVA,</p>
<p>Оренбургский ЛРЗ - филиал АО «Желдорремаш» (3 единицы)</p>		<p>Anycubic Kossel Plus</p> <ul style="list-style-type: none"> - Область печати, мм: 230 x 300; - Термокамера: отсутствует; - Нагрев стола: в наличии; - Покрытие стола: пленка «BuildTak»; - Автокалибровка стола: в наличии (калибруется печатная головка относительно стола); - Количество экструдеров: 1; - Кинематическая схема: Delta; - Управление: тумблерное; - Подача пластика: Bowden; - Производитель: Anycubic, КНДР 	<p>стекло- и уг- ленаполнен- ные пластики</p>
<p>СЛД Волхов ООО «ЛокоТех-Сер- вис» (1 единица)</p>		<p>Ultimaker 3 Extended</p> <ul style="list-style-type: none"> - Область печати, мм: 215 x 215 x 200; - Термокамера: отсутствует; - Нагрев стола: в наличии; - Покрытие стола: закаленное стекло; - Автокалибровка стола: отсутствует; - Количество экструдеров: 1-2; - Кинематическая схема: H-bot; - Управление: тумблерное; - Подача пластика: Bowden; - Производитель: Ultimaker Geldermalsen, Нидерланды 	

<p>СЛД Агрыз-Южный ООО «ЛокоТех-Сервис» (1 единица)</p>		<p>Wanhao Duplicator i3 Plus</p> <ul style="list-style-type: none"> - Область печати, мм: 200 x 200 x 180; - Термокамера: отсутствует; - Нагрев стола: в наличии; - Покрытие стола: пленка «BuildTak»; - Автокалибровка стола: отсутствует; - Количество экструдеров: 1; - Кинематическая схема: XZ-head; - Управление: ЖК-экран; - Подача пластика: Direct; - Производитель: Wanhao Precision Casting, КНДР; 	
<p>СЛД Печора ООО «ЛокоТех-Сервис» (3 единицы)</p>		<p>Prusa i3 MK3S</p> <ul style="list-style-type: none"> - Область печати, мм: 250 x 210 x 210; - Термокамера: отсутствует; - Нагрев стола: в наличии; - Покрытие стола: пленка «BuildTak»; - Автокалибровка стола: в наличии; - Количество экструдеров: 1; - Кинематическая схема: XZ-head; - Управление: тумблерное; - Подача пластика: Direct; - Производитель: Prusa Research, Чехия 	<p>Аналогично предыдущим настольным принтерам + TPU и Flex за счет Direct-подачи</p>
<p>ООО «УДМЗ» (1 единица)</p>		<p>SoloPrint</p> <ul style="list-style-type: none"> - Область печати, мм: 200 x 200 x 200; - Термокамера: отсутствует; - Нагрев стола: в наличии; - Покрытие стола: закаленное стекло; - Автокалибровка стола: отсутствует; - Количество экструдеров: 1; - Кинематическая схема: H-bot; - Управление: тумблерное; - Подача пластика: Direct; - Производитель: холдинг «Ленполиграфмаш», Россия 	

При этом центры Bombardier и Alstom печатают запчасти не только для электропоездов, но и к обслуживаемым трамваям. Из них наиболее габаритные детали – передний обтекатель (бампер), подфарники, корпуса камер наружного наблюдения. После печати детали отделяют от рабочего стола установки, промывают от растворимых поддержек в ультразвуковой ванне, шлифуют и окрашивают. Материалом печати также являются термопластики серий Ultem/ PEEK за исключением деталей с электроизолирующими характеристиками (например, клеммники) (рис. 13). В этом случае применяется огнестойкий PC/ABS FR на основе смеси поликарбоната и ABS.



Рис. 13. Примеры печати запчастей вагонов от:

а) – Alstom - изоляторы из PC/ABS FR;

б) – Bombardier - воздуховод крышевого оборудования из Ultem 9085

Опыт DB необходимо рассмотреть отдельно по причинам: 1) это первая компания, с октября 2015 г., внедряющая печать в ремонте локомотивов и вагонов, 2) на момент 2024 г. использует в производстве почти все ранее описанные технологии печати, 3) за 8 лет сформировала цифровую базу из более чем 15 000 позиций печатных изделий. В отличие от Siemens Mobility DB изначально не создавался собственный ЦАТ, а партии опытных запчастей были заказаны у производителя FDM/ FFF-установок BigRep (см. табл. 3). В первую очередь, требовалось закрыть потребность в единичном количестве пластиковых запчастей для старых серий локомотивов и вагонов, которые отсутствовали на складах. Например, корпус подголовника пассажирского кресла, решетки вентиляции, крючки для одежды. Спустя год, DB под слоганом «Mobility goes additive» (англ. «мобильность стала послойной») запущены два ЦАТ - в Нюремберге и Ноймюнстере, Германия, оснащенные несколькими единицами данных установок. Как и Stratasys Fortus, BigRep имеет кинематическую схему «H-bot», а также двойную печатающую головку для подачи нескольких пластиков, один из которых используется как растворимые поддержки. Главное отличие BigRep от серии Fortus, кроме увеличенной области печати, в открытой рамной конструкции без термокамеры/ термокожуха, а рабочий стол выполнен в виде нагревательных панелей с адгезионным покрытием вместо съемной подложки, что более характерно для бытовых принтеров. Как отмечают в DB, поскольку на момент 2016 года для FDM/ FFF-печати отсутствовал термопластик, отвечающий стандартам пожарной безопасности на ж.д. транспорте Германии, то потребовалась совместная с BigRep разработка нового материала. О его характеристиках со стороны компании не уточняется.

Далее компания расширила парк оборудования ЦАТ установками SLM 280HL от SLM Solutions для порошковой печати ответственных деталей локомотивов. Причем, на установках печатаются как полиамидные запчасти (изоляторы электроаппаратов, рабочее колесо вентилятора холодильника, фиксаторы), так и металлопорошковые аналоги литых (кронштейн форсунки пескоподачи и коробка выводов ТЭД и т.п.) (рис. 14). Замена литья печатью обусловлена со стороны DB тем, что модельная и технологическая оснастка на оригинальную деталь давно утеряна, а возобновление мелкосерийного производства не способно единично поставить запчасть в течение 1-3 суток [24].



Рис. 14. Запчасти локомотивов, напечатанные в ЦАТ DB на SLS-установках [24]

Материал для крупноформатной FDM/ FFF-печати, соответствующий европейским стандартам, потребовался и испанскому производителю ж.д. транспорта CAF. Совместно с компанией SABIC в 2022 году разработан тугоплавкий пластик LNP THERMOCOMP AM DC0041XA51 на основе поликарбоната с 20 % наполнением углеволокна. До этого, с 2016 года ЦАТ CAF Digital&Design Solutions в г. Линарес использовался ABS-пластик для изготовления более чем 2400 малогабаритных запчастей вагонов, как: подстаканники, крышки стеклоочистителей, тумблеры и рамки окон. DC0041XA51 от SABIC впервые был применен для печати на Super Discovery (см. табл. 3) бампера трамвая серии «Urbos» для депо в г. Сарагоса, с целью сокращения затрат на единичное изготовление запчастей на 50 %. Главным отличием Discovery от другого оборудования является экструдер со шнековой подачей материала, для чего в установке предусмотрены гранулятор и сушильный бак. После успешной эксплуатации бампера, ЦАТ CAF освоил поставку габаритных печатных запчастей не только в Испании, но и в сервисные депо Англии, Австралии и Мексики [25].

В данных ЦАТ, лабораториях, участках и в целом, освоение изготовления новых видов запчастей посредством FDM/ FFF-печати, как правило, заключается в трех этапах: 1) разработка 3D-модели по конструкторской документации (КД); 2) цифровая подготовка .stl/.3MF-файла на печать; 3) печать детали и её постобработка. В случае отсутствия КД, используется **реверс-инжиниринг** (разработка 3D-модели и чертежей по оригиналу изделия). Быстрым инструментом реверс-инжиниринга является 3D-сканирование для получения заготовки – «облака точек» с дальнейшим его преобразованием в твердотельную 3D-модель и файл для подготовки к печати. На этапе подготовки необходимо применение специальных средств в САПР или модулей для работы с файлом. Производителями установок, как Stratasys и Intamsys, предоставляется лицензированное ПО (слайсеры) с расширенным пакетом инструментов для доработки файла – «ремонта» поверхностей, выборочной установки поддержек и повышения полигональности [26].

Из представленных примеров следует, что FDM/ FFF, наряду с порошковой и фотополимерной печатью является наиболее применяемой Западными локомотивными компаниями при ремонте ТПС, вагонов и электропоездов. Однако использование 3D-печати сервисными и ремонтными компаниями России (АО «ТМХ», АО «СТМ» и др.) на 2024 г. остается еще на стадии инициатив и

заводских/ внутридеповских проектов, реализуемых отдельными сотрудниками, но с положительными результатами. Принимая во внимание, внедрение печати в СЛД и на Заводах России целесообразно и важно, учитывая опыт и экономический эффект, полученные за рубежом.

2. АНАЛИЗ ПОТРЕБНОСТИ СЛД И ЗАВОДОВ В АТ

Чтобы рассмотреть целесообразность внедрения 3D-печати при ТОиР локомотивов в России, обратимся к специфике производств:

- заводов АО «Желдорремаш». Электровозоремонтных: Ярославский ЭРЗ, Ростовский-на-Дону ЭРЗ, Челябинский ЭРЗ, Улан-Удэнский ЛВРЗ. Тепловозоремонтных: Астраханский ТРЗ, Оренбургский ЛРЗ, Воронежский ТРЗ, Уссурийский ЛРЗ;

- 86 СЛД ООО «ЛокоТех-Сервис», расположенных по 13 филиалам: Восточно-Сибирский, Дальневосточный, Забайкальский, Западно-Сибирский, Западный, Красноярский, Московский, Свердловский, Северный, Северо-Западный, Северо-Кавказский, Приволжский, Южный.

2.1. Запчасти подвижного состава

На примере Ярославского ЭРЗ, выполняющего СР и КР пассажирских электровозов серии ЧС, ЭП1, ЭП1М и ЭП2К, а также изготовление маневрового теплового вагона серии ТЭМ31М, определены категории дефицитных запчастей (рис. 15, 16):

- требуются в единичном количестве (до 80-100 единиц), но ежеквартально. Зачастую сняты с производства заводом-изготовителем, либо выпускаются поставщиками по повышенной стоимости. Некоторые запчасти иностранного производства («ISGEV», «Harting») не поставляются в условиях санкций, даже с учётом параллельного импорта;

- приобретаемые от определенного количества, превышающего потребность Завода, что приводит к пересортице на складе;

- требуются в количестве до 10 единиц в полугодие/ в год;

- поставляются с повышенными затратами времени;

- выпускается целый узел под замену, когда изношена только одна его деталь. Например, привод стеклоочистителя лобового стекла кабины машиниста, в котором наиболее изнашиваемой является пластиковая ведомая шестерня;

- нельзя восставить до требований КД. Согласно технологической инструкции АО «Желдорремаш» № 2351.25000.00055Р поврежденные стеклопластиковые изделия не подлежат ремонту и заменяются, если: а) повреждение нарушило конструкционные качества или общую геометрию; б) размеры трещин превышают допустимые габариты; в) произошел сквозной разлом; г) произошел отрыв элементов сложной формы, влияющий на надежность конструкции; д) габаритные размеры изделия не соответствуют КД.

Общие причины дефицита запчастей:

- могут отсутствовать в нормах расхода;

- изготовление отложено до закупки и наладки/ ремонта оборудования;

- изготовление возможно только после получения новой оснастки или пресс-форм, заказанных в Инструментальном цехе. В среднем, суммарный период разработки и изготовления пресс-формы на малогабаритную деталь составляет от 6 месяцев до года, а стоимость превышает 400 тыс. руб.



Рис. 15. Малогабаритные детали локомотивов:

а) – масляная пробка ТЭД; б) – тумблер электроаппарата; в) – заглушка розетки; г) – крышка сигнализатора давления

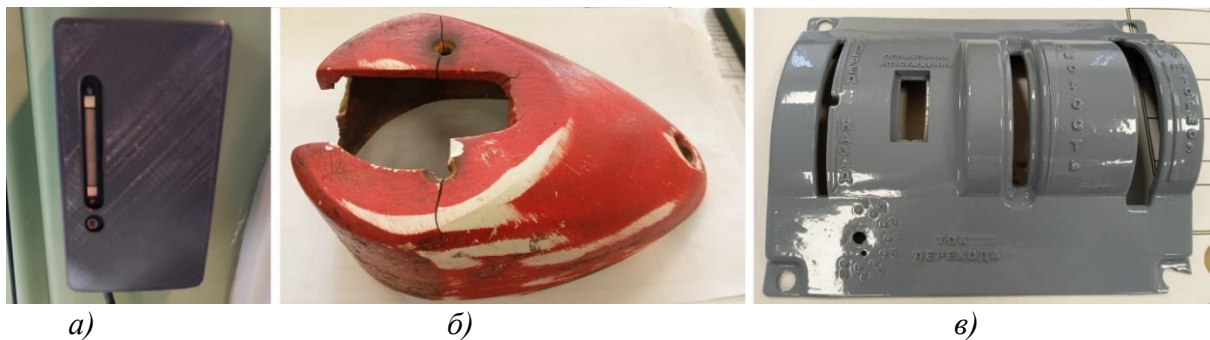


Рис. 16. Стеклопластиковые детали кабины машиниста электровозов серии ЭП1М и ЭП2К:

а) – кожух ТСКБМ-П; б) – обтекатель зеркала заднего вида; в) крышка контроллера

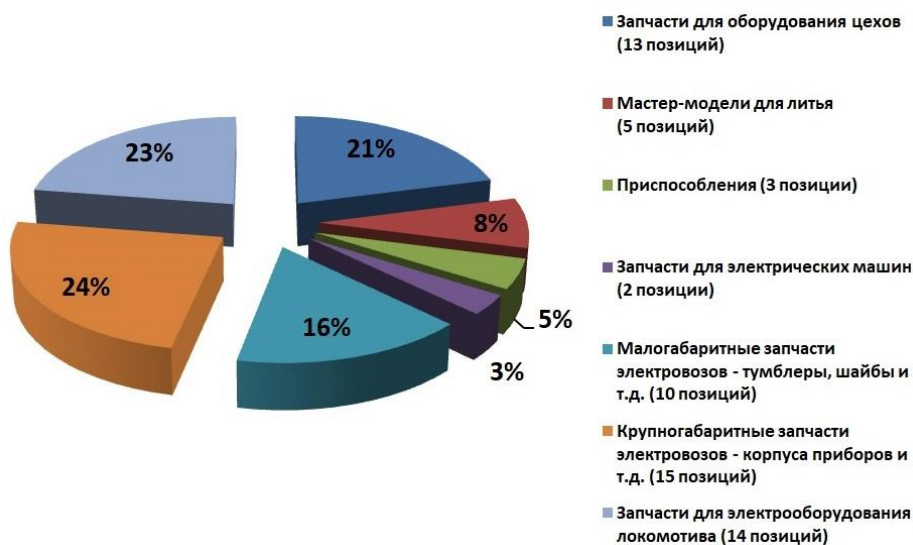


Рис. 17. Распределение применения 3D-печати на Ярославском ЭРЗ за 2019-2024 гг.

Категории определены по итогам анализа потребности Ярославского ЭРЗ в печати деталей за период 2019-2024 гг. (рис. 17), по каталогу, представленному в Приложении. В 2023 г. суммарная потребность завода в деталях по каталогу составила 893 единицы.

К данным категориям относятся и дефицитные запчасти для моторвагонного подвижного состава. Так, АО «Московский ЛРЗ», выполняющий ремонт электропоездов, предоставил образцы потребных пластиковых деталей пассажирских вагонов (рис. 18), не изготавливаемых в условиях завода: облицовка измерительных приборов, фурнитура салона, колодка № 305.243 воздухораспределителя № 305.

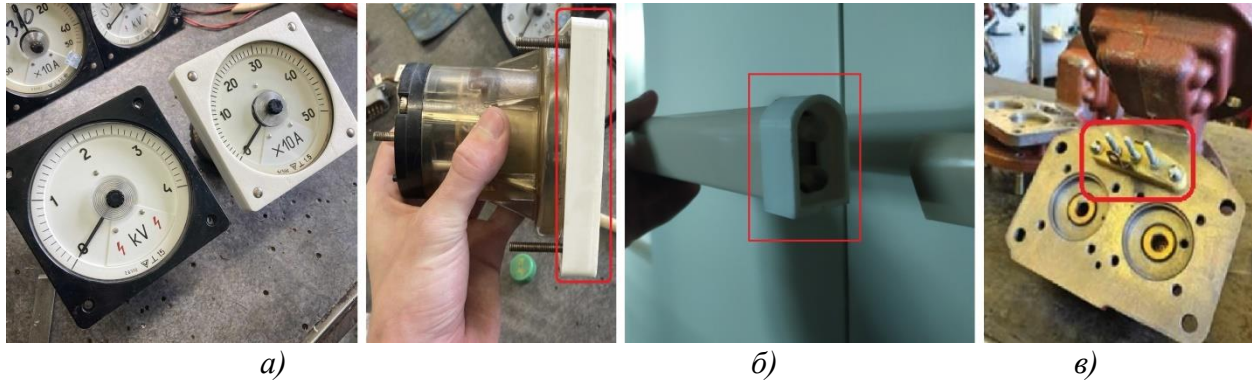


Рис. 18. Дефицитные запчасти вагонов:

а) – облицовка измерительных приборов;
б) – проставок поручня; *в)* – колодка воздухораспределителя № 305

Наиболее остро дефицит запчастей наблюдается в СЛД и ПТОЛ, сервисных участках/ отделениях по следующим причинам:

- задержки поставок, отсутствие запчастей в продаже, что приводит к «донорству» - негласной перестановке деталей с одного локомотива на другой;
- ремонт целого узла или агрегата осуществляется сторонней организацией по гарантийному договору, даже в том случае, когда необходимо заменить одну деталь, что приводит к потерям времени на транспортировку. Среди подобных деталей – рабочие колеса установки кондиционирования воздуха СКВ-4,5-БТ-25 тепловозов серии 2ТЭ25КМ (рис. 19), которые при поломке лопастей или ступицы не заменяются в условиях СЛД. Как показал пример ДВ (рис. 14), печать запасных вентиляторов не является проблемой, а в 2021 г. вентиляторы аналогичной конструкции напечатаны из ABS-пластика на Stratasys Fortus 450mc в ЦАТ Baltic3D, г. Рига по заказу оператора Latvian Railways. Однако информация об испытаниях напечатанных колес отсутствует [27];

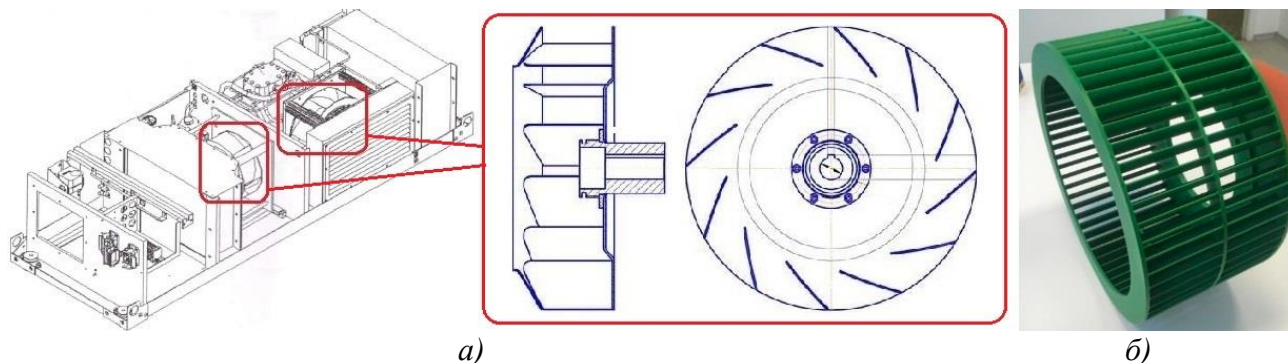


Рис. 19. Вентиляторные колеса:

- а)* – установки кондиционирования воздуха СКВ-4,5-БТ-25;
- б)* – напечатанные ЦАТ Baltic3D для Latvian Railways [27]

- единичное или мелкосерийное изготовление, непосредственно силами СЛД (литье/ обработка), может быть невыгодно относительно трудозатрат. Производство изделий из резины, стеклопластика или литьем полиамида требует организации специальных оснащенных участков, разработки и изготовления силиконовых форм и матриц (рис. 20), пресс-форм и закладных элементов, наличия штата квалифицированных конструкторов. Это касается изготовления запчастей разных размеров и формы – от пробки слива масла ТЭД (материал: полиамид), так и корпусов приборов в кабине машиниста (материал: стеклопластик или огнестойкий ABS-пластик). В настоящий момент только в некоторых СЛД функционируют участки по литью полиамидных деталей на прессах типа ЛПГ-63 (рис. 21, 22) и вулканизации резины (рис. 23). К тому же часть ранее имевшейся оснастки может быть утеряна, а новая не изготавливается;

- отсутствие технологического оборудования, ремонтного персонала.



Рис. 20. Матрицы для стеклопластиковых панелей кабины электровоза серии ЭП1М

Например, в СЛД номенклатура литых запчастей электровозов серии ВЛ80в/и, ограничена только ранее освоенными 16-20 позициями, каждая из которых не превышает 15 отливок в месяц (табл. 4), за исключением втулок люточного подвешивания кузова электровоза (рис. 24) или гаек контроллера ЭКГ-8Ж.

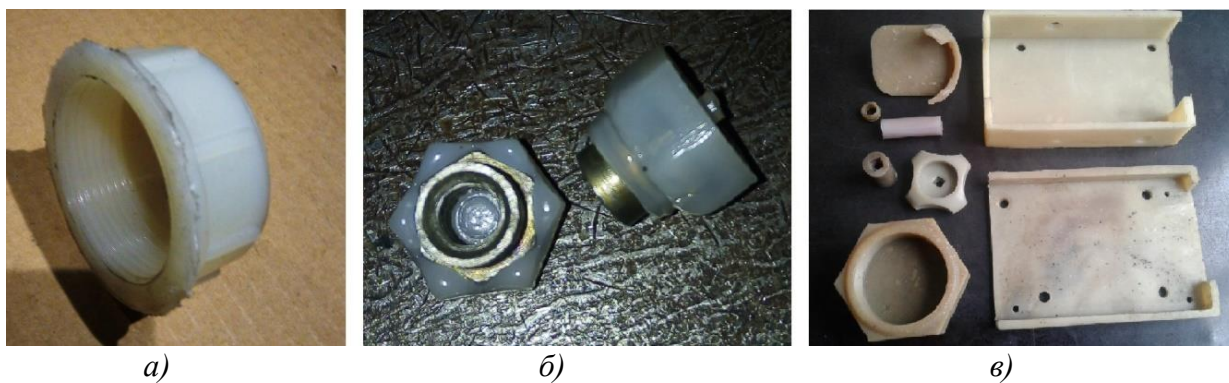


Рис. 21. Запчасти электровозов, отлитые из полиамида в СЛД:
а) – крышка горловины аккумулятора; *б)* – гайка контроллера;
в) – пробка КЗП и фурнитура кабины машиниста

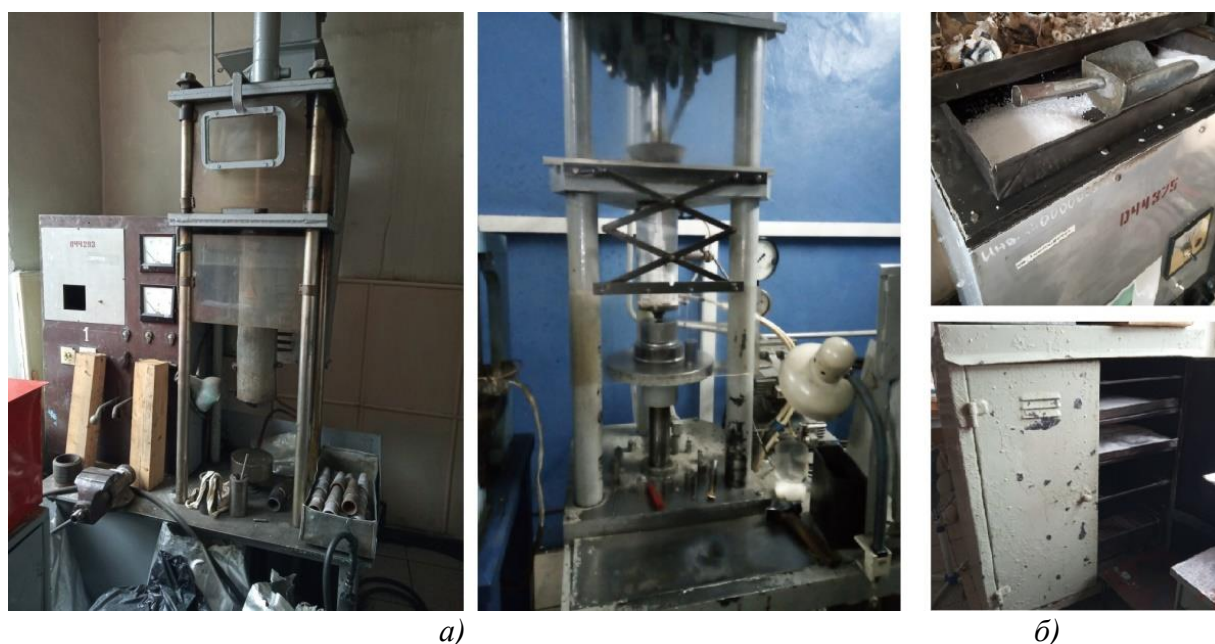


Рис. 22. Оборудование для литья, сушки и хранения полиамида в СЛД:
а) – прессы ЛПП; *б)* – нагревательный стол и термошкаф



Рис. 23. Пресс-форма в СЛД для вулканизации резиновых втулок



Рис. 24. Пресс-форма в СЛД для литья заготовки полиамидной втулки люлечного подвешивания кузова электровоза серии ВЛ-80с

Таблица 4. Номенклатура полиамидных отливок в СЛД

№	Наименование изделия	Потребность в месяц, ед.
1	Болт крепления солнцезащитного козырька	15
2	Корпус телефонной трубки радиосвязи	10
3	Держатель телефонной трубки радиосвязи	10
4	Крышка вентиляционного патрубка	10
5	Изолятор проходной Р/ст.	10
6	Защитный кожух блокировочного устройства ПВУ	5
7	Втулка люлечного подвешивания кузова	35
8	Катушка скоростемера	10
9	Раструб огнетушителя	10
10	Розетка электровозная	15
11	Пробка кожуха зубчатой передачи (КЗП)	17
12	Шарик запорного окна	15
13	Шарик фиксатора ручного тормоза	15
14	Гайка контроллера ЭКГ-8Ж	45
15	Крышка горловины аккумуляторной батареи	10
16	Корпус переносной лампы	15

Процесс изготовления ответственной детали, как втулка люлечного подвешивания, трудоемок и включает операции:

- подготовку полиамида ПА160 (сушка, загрузка в пресс и расплавление);
- сборку, преднагрев пресс-формы в печи, смазывание, установку на пресс;
- заливку и отверждение полиамида в пресс-форме, извлечение отливки;
- охлаждение отливки, ручное удаление облоя с литником;
- визуальный контроль отливок на наличие трещин, расслоений и непроливов;
- кипячение отливок в воде при температуре 90 °С для снятия напряжений;
- токарную обработку отливок для удаления каверн.

2.2. Запчасти технологического оборудования

Поддержание технологического оборудования в работоспособном состоянии – неотъемлемая потребность СЛД и заводов. Рассмотрев на примере Ярославского ЭРЗ отказы узлов оборудования цехов (мостовых кранов и тельферов, испытательных станций, вытяжек и т.п.), выделим категории запчастей (табл. 5) для ремонта:

- остовы катушек, используемых в электрооборудовании, в том числе в пультах управления и электромагнитных тормозах двигателей лебедок (рис. 25).



Рис. 25. Демонтаж поврежденной катушки с электродвигателя лебедки тельфера ТЭ-0,5

Наиболее востребованная категория, обусловленная частым разрушением катушек при демонтаже с узлов (для замены при пробое изоляции) или при последующей перемотке на станке/ оплавлении в процессе запекания компаунда в печи. Новые остовы на ремонтном участке изготавливаются с повышенной трудоемкостью – склеиванием элементов, предварительно вырезанных из текстолита или 2-х слоев электрокартона. По этой причине и не формируется запас остовов каждого типа - требуемое количество изготавливается по поступлению неисправных катушек, что приводит к дополнительным потерям времени (свыше 8 часов) и простоем оборудования. В 2024 г. потребность завода в каждом типе остовов - до 15 единиц в месяц;

- детали электродвигателей: лапки крепления станины, крышки клеммных коробок, кожухи и вентиляторы охлаждения, пластиковые щеткодержатели. При отказе эксплуатируемого на заводе более 20-30 лет станка или тельфера из-за износа щеткодержателей приводного двигателя, требуется его оперативный ремонт во избежание простоя. Возникает проблема поиска запасных щеткодержателей, которые более не выпускаются сторонними производителями, а заводом не могут быть изготовлены ввиду отсутствия пресс-форм. Невозможность приобретения запчастей электродвигателей также приводит к их накоплению на ремонтном участке, а зачастую – вынужденной покупке новых с разборкой и перестановкой деталей.

- зубчатые колеса, муфты, втулки и шайбы. Например, при износе привода штатива лазерного измерителя, применяемого для контроля геометрии рамы тепловоза ТЭМ31М, замене подлежал весь штатив, поскольку отдельно валик и рукоять привода не приобрести, а ручная фиксация лазерной головки не обеспечивает позиционирования. Другая проблема – невозможность восстановления исходной сломанной детали путем склеивания или наплавки пластика/ металла, как

шестерен с изношенными зубьями или корродированного рабочего колеса насоса для заправки аккумуляторов электролитом.

Таблица 5. Номенклатура дефицитных запчастей цехового оборудования

Наименование детали	Материал оригинала	Применяемость	Фотографии
Остовы катушек	Пресс-масса АГ	Станция испытания электровозов, Электроаппаратный цех, Электромашинный цех - катушечное отделение	
Лапка крепления электродвигателя	Алюминий	Вентиляционное и насосное оборудование цехов	
Кожухи охлаждения электродвигателей	Сталь		
Крышки клеммных коробок электродвигателей	Алюминий, пластик		
Вентиляторы охлаждения электродвигателей	Полиамид		
Комплект щеткодержателей электропривода суппорта станка 2А636Ф1	Пресс-масса АГ	Колесный цех (растачивание бандажей)	

Комплект щеткодержателей электродвигателя лебедки тельфера	Пресс-масса АГ	Кузнечный цех (перемещение заготовок)	
Привод уровня головки лазерного измерителя BOSCH	Пластик ABS	Контроль геометрии рамы маневрового тепловоза серии ТЭМ31М	
Шайба направляющей термопресса		Аппаратный цех (печать табличек на оборудование локомотива)	
Втулка Переключателя пульта тельфера	Полиамид	Кузнечный цех (перемещение заготовок)	
Шестерни привода валов плоттера		Аппаратный цех (прокатка листового материала)	
Центробежный насос прокачки электролита	Чугун, сталь	Аккумуляторный участок	
Пробка бензобака вилочного погрузчика	Полиэтилен	Склад	

В процессе самостоятельного изготовления запчастей методом FDM/ FFF-печати установлено, что доступным материалом, отвечающим требованиям к износостойкости, электроизоляции является PETG (рис. 26). Также печать PETG не

требует термокамеры/ нагрева стола, а детали не имеют расслоений (в отличие от ABS) и могут быть обработаны режущим инструментом, например, нарезание резьбы на хвостовиках щеткодержателей.



Рис. 26. Запчасти цехового оборудования Ярославского ЭРЗ, напечатанные из PETG

2.3. Модельная оснастка

При освоении заводами новых видов ремонта локомотивов или выпуске освоённой продукции, помимо пластикового литья, запчасти получают и литьем цветных металлов на пресс-автоматах, в формы из ХТС, а также чугуна в песчано-глинистые полуформы в парных опоках. Основная номенклатура чугунного литья на заводах АО «Желдорремаш» – это тормозные колодки, заготовки запчастей пневматического оборудования и компрессоров КТ-6,7, электропневматических вентилях серии ВВ-32, 34. Для форм из ХТС (рис. 27, а) и песчано-глинистых полуформ общим является наличие моделей, литниковой системы, подмодельных плит для их монтажа, изготовление которых требует повышенных трудозатрат и привлечения квалифицированных модельщиков. Ввиду непопулярности профессии и трудности работы, на локомотиворемонтных предприятиях наблюдается нехватка модельщиков. В СЛД же литье металла представлено только центробежной заливкой сталебаббита вкладышей моторно-осевых подшипников, за некоторым исключением.

В литейном производстве заводов АО «Желдорремаш» новая модельная оснастка, изготавливается, в основном, вручную, поэтапно: 1) вырезание мастер-моделей из дерева твердых пород, склеивание, пропитка НЦ-лаком, окрашивание и сушка (рис. 27, б); 2) получение заготовок металлических моделей – снятие по деревянным мастер-моделям песчано-глинистых полуформ и заливка в них алюминия; 3) механообработка и полировка отливки, монтаж на фанерной или металлической подмодельной плите. При этом алюминиевые модели взамен деревянных требуются в массовом литье малогабаритных заготовок (рис. 27, в), либо тормозных колодок, когда важен ресурс оснастки. Модели на отливки, как корпуса пневмоцилиндров, потребность в которых не превышает 200 единиц в месяц, изначально изготавливают деревянными. Фрезерная обработка на станке с ЧПУ применяется только в том случае, когда требуется оперативно изготовить оснастку с множеством небольших элементов, например, отливку локомотивной таблички (рис. 28). После ЧПУ, с кромок модели вручную удаляются заусенцы.

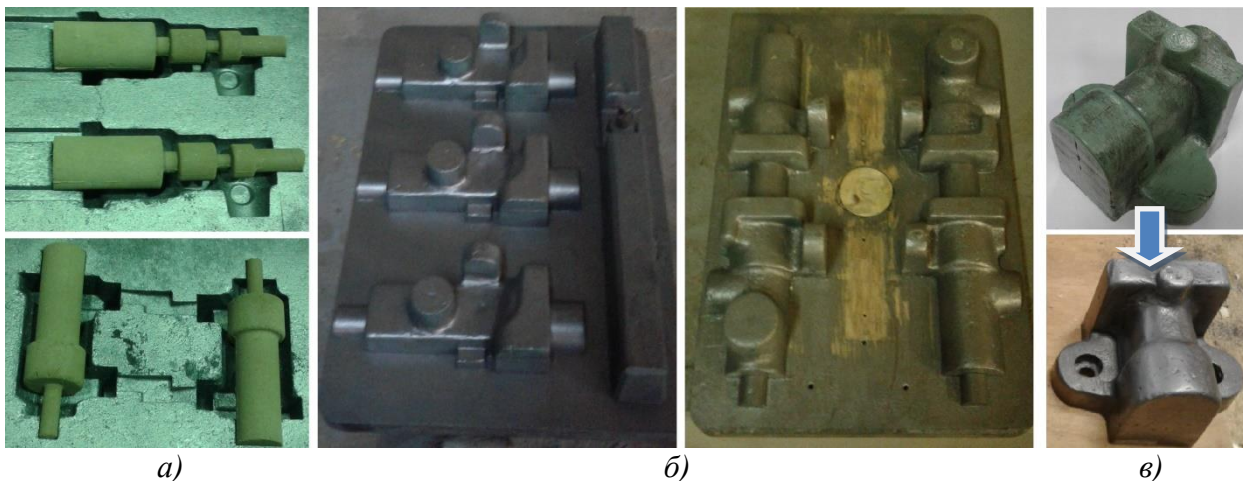


Рис. 27. Оснастка для литья на Ярославском ЭРЗ:
 а) – стержни из ХТС; б) – деревянные модели пневмоцилиндров;
 в) – алюминиевая модель корпуса вентиля ВВ (снизу)



Рис. 28. Модель таблички тепловоза серии ТЭМ31М и готовая алюминиевая отливка

Среди недостатков ручного изготовления модельной оснастки:

- организация специального участка, оснащенного деревообрабатывающим оборудованием, заготовка материала. Поиск квалифицированного модельщика;
- при копировании моделей требуется оборудование для плавки металла;
- поэлементное изготовление. Потери времени на резку и подгонку элементов, их склеивание, шпатлевание, окрашивание с промежуточной сушкой;
- низкий ресурс и гигроскопичность, что приводит к регулярному ремонту оснастки. Основные причины повреждений – удары на набивочной машине, контакт с песком и разделительной смесью из керосина с графитом, нарушение условий хранения, попадание брызг расплава металла (рис. 29). Чаще всего разрушению подвергаются тонкие выступающие части моделей (разъемы и острые кромки), деревянные шипы для спаривания, плохо склеенные элементы и т.д. Модели и ящики приходят в негодность также из-за потери отъемных частей и износа лакокрасочного покрытия;
- повышенные трудозатраты (от 8 часов до 2 недель) с учетом размеров, сложности геометрии оснастки и текущей загрузки модельщика.



Рис. 29. Повреждения деревянных моделей в процессе эксплуатации

Стойкость деревянных моделей по практическим данным составляет при формовке вручную до 100, а при машинной формовке – до 1000 съемов. Однако при бережном отношении количество съемов может быть повышено до 1500. Срок службы оснастки зависит, прежде всего, от класса прочности, сорта и породы дерева, из которого оснастка изготовлена, а также от бережного отношения к ней формовщика и стерженщика во время эксплуатации. Продолжительное хранение в непригодных и сырых помещениях, небрежная транспортировка снижают срок службы модельного комплекта. Необходимо соблюдать следующие основные правила работы с моделями:

- предохранять поверхности от повреждений, очищать от грязи, не ударять металлическими предметами, не допускать наколов душником при вентиляции формы;
- предохранять модель от действия влаги, не оставлять в формовочной смеси.

В зависимости от объема, работы по ремонту модельной оснастки подразделяются на три вида: мелкий, средний и крупный. При мелком исправляются мелкие повреждения путем заделки выбоин, замены изношенных спаривающих шипов, восстановления кромок, шпатлевания трещин. При среднем и крупном производят замену и крепление отдельных частей (фланцев, ребер и др.), а все размеры модели проверяют на соответствие КД.

Ремонт и изготовление модельной оснастки на Ярославском ЭРЗ, для снижения трудоемкости, с 2019 г. выполняется путем FDM/FFF-печати пластиком PLA, PETG и ABS (рис. 30, 31) по разработанной и согласованной с ОАО «РЖД» технологической инструкции. После, поверхности модели, в зависимости от пластика, обрабатываются ацетоном (для ABS)/ дихлорэтаном (PLA) и грунтуются. При этом внутреннее заполнение модели материалом не превышает 40 %, без потери ее прочности. Так, за счет внедрения печати достигнуто уменьшение затрат времени с 24 ч. до 8 ч. на изготовление каждой модели [22]. Меньшее время может быть получено литьем модели из полиуретана в силиконовую форму, снятую по напечатанному оригиналу, поскольку полимеризация полиуретана занимает от 0,5 ч. до 4,8 ч.



Рис. 30. PLA-модель отливки крышки цилиндра компрессора КТ-6,7

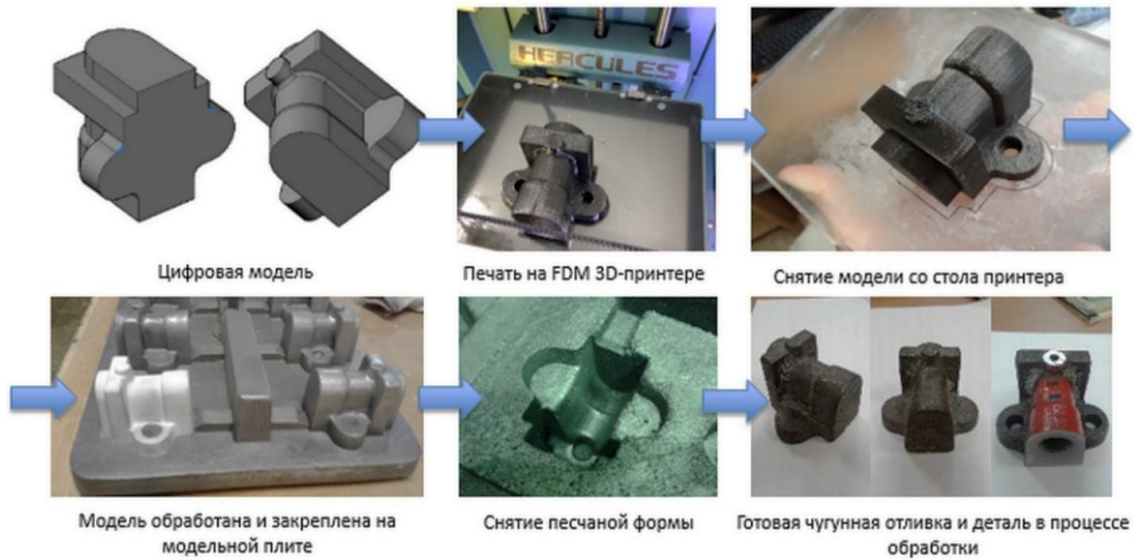


Рис. 31. Применение напечатанных моделей в литье чугуна на Ярославском ЭРЗ [22]

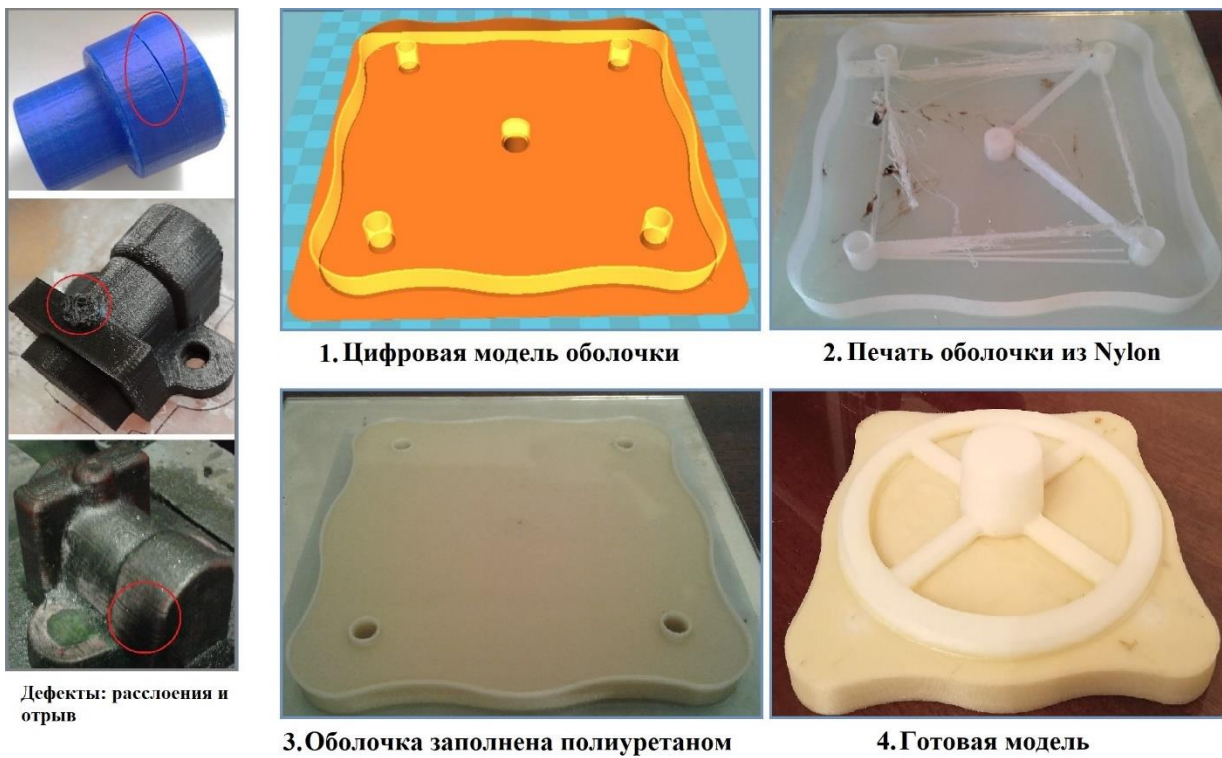


Рис. 32. Комбинированный способ изготовления моделей [28]

Напечатанные модели, как и изготовленные из дерева, подвергаются износу в эксплуатации (рис. 32). Простым путем повышения ресурса является замена материала печати. Как отмечено, при печати моделей на FDM/ FFF-принтерах, применяется PETG с усадкой 0,7 %, а свыше - PLA (0,5 %). Использование термо- и износостойкого Nylon затруднено, что обусловлено его усадкой до 2,5 %, приводящей к деформации. Проблема актуальна и при печати изделий с внутренним заполнением до 30 %. Основной способ уменьшения деформации – равномерный прогрев горячим воздухом нанесенных слоев пластика в термокамере, что отсутствует в бытовых принтерах. Поэтому целесообразно изучить возможность печати моделей из Nylon без термокамеры на разных FDM/ FFF-принтерах. Для данной цели специалистами АО «Желдорремаш» в 2022 г. разработан комбинированный способ изготовления с этапами (см. рис. 32) [28]:

- разработка 3D-модели печатаемой оболочки с учетом литейных уклонов и радиусов, усадки Nylon, а также «нависающих» поверхностей;
- сушка Nylon при температуре 80 °С в термошкафу или «драйбоксе» во избежание брызг и нитей пластика между частями оболочки;
- нанесение на рабочий стол принтера подложки из PLA толщиной 0,2-0,5 мм. Выполняется на двухэкструдером принтере или на одноэкструдерном, но с последующей сменой PLA на Nylon. Подложка также необходима для выравнивания поверхности стола. Возможно и применение адгезивов, как аэрозольных клеев или «3D-лака»;

печать на PLA-подложке оболочки модели из Nylon с толщиной стенок 0,8-2 мм, в зависимости от габаритных размеров, наличия литейных радиусов и уклонов. Параметры печати приведены в табл. 6.

Таблица 6. Параметры печати подложки и оболочки [28]

Материал	h печати первого слоя, мм	h печати основных слоев, мм	V печати первого слоя, мм/с	V печати основных слоев, мм/с	t печати, °С	S стенки, мм
PLA	0,1	0,1	50	70	190-215	0,8
Nylon		0,25	30	60	240-250	2

Допускаются поддержки под «нависающими» поверхностями оболочки (расположенные к столу на 90°). Необходимо отключить обдув слоев холодным воздухом для снижения скорости усадки пластика;

- подготовка компонентов полиуретана: нагрев до комнатной температуры, перемешивание в емкостях до однородного состояния;
- снятие Nylon-оболочки со стола, отделение подложки, удаление поддержек из полости с заливкой компаундом – для дополнительного склеивания слоев и повышения прочности модели. Для снижения расхода компаунда, до 85 % объема оболочки перед заливкой возможно заполнить вспененным полистиролом. Также в компаунд может добавляться наполнитель: стеклосфера, рубленое стекловолокно, металлопорошок. Для предотвращения появления газовых каверн при саморазогреве полиуретана до ~90 °С, блоки полистирола покрываются компаундом с промежуточной сушкой;

- заливка полиуретана. Контроль геометрии после полимеризации. Монтаж отдельно напечатанных элементов, при необходимости (рис. 32, поз. 4).

2.4. Технологическая оснастка

Кроме мастер-моделей для литья, на заводах и в СЛД регулярно требуется ремонт или изготовление новой технологической оснастки и нестандартных приспособлений. На Ярославском ЭРЗ среди изношенной оснастки находились более 150 единиц устаревших стальных форм для изолировки катушек электропневматических вентилях (рис. 33).



Рис. 33. Изношенная форма изолировки катушек электропневматических вентилях [29, 30]

В процессе эксплуатации формы загрязнялись разделителем, подвергались коррозии, деформировались при ударной выбивке катушек, что затрудняло их повторную сборку и снижало герметичность. Выбивка катушек также приводила к их повреждениям: отрыву контактов, а при недостаточной лубрикации катушка приклеивалась к стенкам [29, 30].



а) б)
Рис. 34. Гибкие формы для изолировки катушек:
а) Из 2к-силикона; б) Из Flex [29, 30]

Для быстрого извлечения катушек и уменьшения брака, на Заводе изготавливались новые опытные формы из гибких материалов (рис. 34): а) литьем двухкомпонентного силикона по напечатанной имитации изолированной катушки, б) печатью пластиком Flex [29, 30]. Характеристики Flex представлены в табл. 2. Наилучший результат достигнут по применению силиконовых форм ввиду требуемой гибкости. Также формы, отлитые из силикона, не требуют обязательного нанесения разделителя. Отметим, что для печати гибкими материалами, как TPU и Flex, необходим не только экструдер, выполненный по схеме Direct (шаговый двигатель подачи материала размещен на печатающей головке), а конструкция самой

головки должна обеспечивать отсутствие зазоров для отсутствия проталкивания пластика между шестерней, прижимным роликом и «колдендом» (рис. 35, а, б). В ином случае происходят намотка пластика на вал двигателя и перегрев. Экструдер по схеме Bowden с двигателем на раме принтера (рис. 35, в), подходит только для использования жестких пластиков, так как TPU и Flex затормаживаются внутри PTFE-трубки – подача материала нарушается.

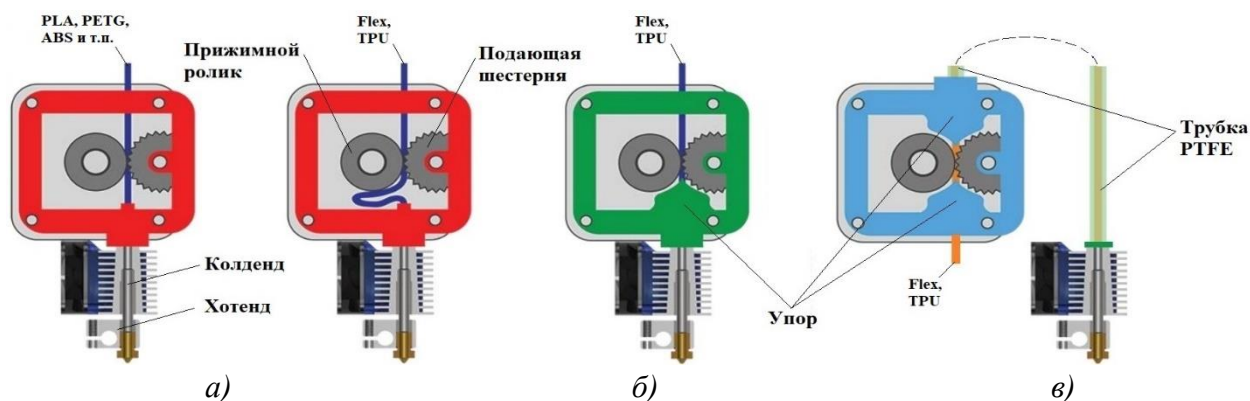


Рис. 35. Подача пластика:

а) проталкивание на «Direct»; б) без дефектов; в) на «Bowden»

Простая силиконовая форма изготавливается следующим образом (табл. 7, рис. 36).

Таблица 7. Инструмент и материалы для изготовления силиконовой формы

№	Категория и наименование
Приборы, инструмент, приспособления	
1	Нож канцелярский ГОСТ Р 51015-97
2	Стаканы мерные для ЛКМ 0,4 л., лопатка для размешивания ЛКМ
Средства измерения	
1	Весы электронные, часы электромеханические ГОСТ 27752-88Е
Средства индивидуальной защиты	
1	Халат х/б, перчатки резиновые, рукавицы
Материалы	
1	Компаунд силиконовый КЛСЕ или Kremen Mold 30, Alcorsil 325 или аналогичные
2	Клей БФ-2, БФ-4 ГОСТ 12172-74
3	Картон электроизоляционный ГОСТ 2824-86
4	Изопропиловый спирт ГОСТ 9805-84
5	Пластелин скульптурный безсульфидный Луч или аналогичный

Подготовим модель отливки изделия: заполним пластилином отверстия и пазы, не требующие попадания силикона. Очистим модель от грязи изопропиловым спиртом.

Вырежем из электрокартона толщиной 2-3 мм дно и четыре стенки опалубки, превышающие размеры модели на 10 мм с каждой ее стороны. Разместим и точно зафиксируем клеем модель в центре дна емкости. Приклеим стенки ко дну,

промажем все стыки клеем. Подготовим основу и отвердитель силикона, перемешаем компоненты в исходной таре. Подготовим две емкости для ЛКМ. В них отмерим на электронных весах объем отвердителя и основы. Далее смешаем компоненты в течение 3 мин до однородности. Расслоение силикона, посторонние включения не допускаются. Зальем опалубку и модель силиконом (время полимеризации см. от производителя на исходной таре). Примечание: для экономии материала допускается заполнять до 1/2 объема опалубки с моделью отходами силикона той же серии (рис. 36, слева) перед заливкой новой смеси. Также в процессе полимеризации целесообразно использовать вибростол.

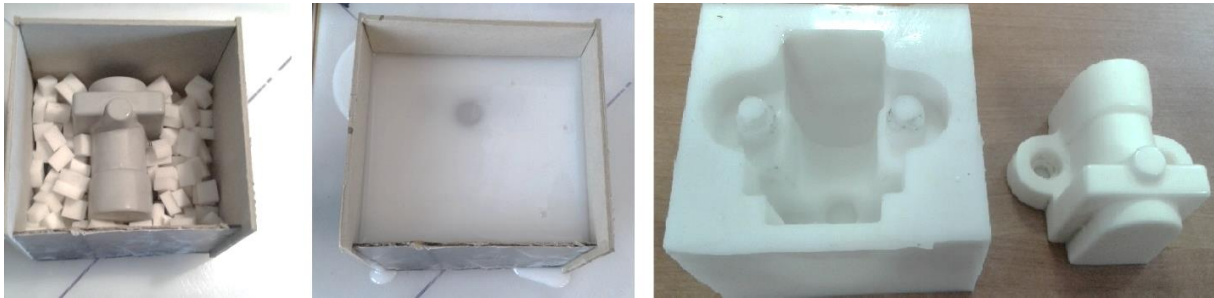


Рис. 36. Изготовление простой силиконовой формы

Отделим силиконовую форму с моделью из опалубки, извлечем модель. Для упрощения извлечения допускается нанесение зигзагообразного разреза на боковой стенке формы (форма с разрезом стягивается резиновой лентой). Осмотрим внутренние поверхности формы: не допускаются каверны, загрязнения, расслоения компаунда.

Жесткие пластики для печати, как ABS, PLA и PETG, напротив, целесообразно использовать при изготовлении нестандартных приспособлений взамен металлических, особенно, в условиях ограниченного времени на слесарные работы. Печать позволяет упростить геометрию деталей или объединить несколько в одну, но без дополнительных операций, как гибка или фрезерование. Это касается и пластинчатых элементов, когда требуется изготовить, например, стойку крепления датчика (рис. 37), кондуктор-шаблон или штамп для гибки малогабаритных деталей из тонколистовых металлов.



Рис. 37. Стойка датчика частоты вращения ТЭД, напечатанная из PLA

3. ВЫВОДЫ ПО ПРИМЕНЕНИЮ АТ НА Ж.Д. ТРАНСПОРТЕ

Рассмотрев изложенный материал, отметим, что применение технологий 3D-печати, как перспективных, стало не только одним из средств освоения изготовления и ремонта новых серий локомотивов, но и ритмичного выпуска уже освоенных. Такие технологии, как FDM/ FFF «переросли» использование из сугубо в целях прототипирования в сторону функциональных изделий для литейных и сборочных производств, в том числе, благодаря повышению доступности самого оборудования и ПО к нему за последние два десятилетия. Однако на данный момент, помимо принтеров, печать включает в себя целый комплекс средств, необходимых для задачи свойств изделия и, при необходимости, его доработки: 3D-сканеров для оцифровки оригинала, САПР для обработки «облака точек» и разработки твердотельной 3D-модели, слайсеров с инструментами для предпечатной подготовки и «нарезания» .stl-файла на слои.

Для работы с данными средствами в следующем разделе приводится обобщающая методика 3D-сканирования и подготовки 3D-моделей на FDM/ FFF-печать с этапами:

- пошаговое 3D-сканирование оригинала с получением .stl-файла. Для данной задачи выбраны оптические 3D-сканеры производства RangeVision – одного из наиболее распространенных отечественных производителей оборудования данной категории;
- конвертация 3D-модели в .stl-файл в распространенных САПР;
- настройка полигональности для точной печати модели принтером;
- «ремонт» поверхностей .stl-файла с применением доступного ПО NetFabb и онлайн-инструмента Microsoft 3DTools Repair;
- загрузка .stl-файла в слайсер. Настройка основных параметров печати. В методике намеренно использована устаревшая версия слайсера Cura 15.04.6, поскольку для ознакомления с параметрами печати ее интерфейс является наиболее наглядным.

4. МЕТОДИКА 3D-СКАНИРОВАНИЯ НА ОПТИЧЕСКОМ 3D-СКАНЕРЕ

В настоящем разделе приведены рекомендации по сканированию изделий на оптических 3D-сканерах RangeVision PRO/ PRO2M/ Spectrum в трех рабочих зонах сканирования, мм: 50-100, 150-500, 400-1000, с применением поворотного стола и без. Перечень оборудования и ПО, необходимого для работы, приведен в табл. 8.

Таблица 8. Оборудование, ПО, инструмент и материалы для 3D-сканирования

№	Категория и наименование
Оборудование и ПО	
1	Блок с проектором 3D-сканера RangeVision PRO/ PRO2M/ Spectrum
2	Штатив треножный с шаровой головой Benro A1573FS2PRO (или другой аналогичной модели)
3	ПК Gigabyte Brix GB-BR17-8550 (или аналогичный, не менее: IntelCore i7-8550U CPU 1.8 GHz; Windows 10; Service Pack 3), клавиатура, мышь, монитор

4	USB-хаб Носо HB1 (или другой аналогичной модели)
5	USB-носитель с лицензионным ключом, Руководством «Настройка и калибровка PRO», Инструкцией «ScanCenterNG Сканирование и обработка»
6	ПО RangeVision ScanCenter 2.0 (или последующей версии) на USB-носителе
7	ПО КОМПАС-3D 2013/ Portable (или последующей версии)
8	ПО Ultimaker Cura 15.4.6 или 15.4.6 RU
9	ПО Geomagic Design X 2018 (или последующей версии)
10	Поворотный стол RangeVision PRO/ PRO2M/ Spectrum
11	Комплект цифровых камер <i>S</i> с крышками
12	Комплект цифровых камер <i>M</i> с крышками
13	Комплект цифровых камер <i>L</i> с крышками
14	Комплект синих светофильтров
15	Комплект объективов <i>S</i>
16	Комплект объективов <i>M</i>
17	Комплект объективов <i>L</i>
18	Калибровочное поле <i>S</i>
19	Объединенные калибровочные поля <i>M</i> и <i>L</i>
20	Поле <i>Для оценки оси</i>
21	Подставка для калибровочных полей <i>M</i> и <i>L</i>
22	Подставка для полей <i>S</i> и <i>Для оценки оси</i>
23	Кабель питания оптической головки с проекционным блоком
24	Устройство питания поворотного стола
25	Устройство питания USB-концентратора
26	Устройство питания ПК
27	USB-кабель поворотного стола
28	Комплект USB-кабелей проекционного блока
29	Сетевой фильтр для ПК
30	Транспортировочный кейс
Средства измерения	
1	Рулетка измерительная РЗП2К ГОСТ 7502-98
2	Штангенциркуль ШЦ-I-125-0,1 ГОСТ 166
3	Часы электромеханические ГОСТ 27752-88Е
Средства индивидуальной защиты	
1	Респиратор ШБ-1 «Лепесток» ГОСТ 12.4.028-76
Материалы	
1	Спрей матирующий Helling 3D (или аналогичный матирующий спрей)

2	Комплект листов маркеров
3	Изопропиловый спирт ГОСТ 9805-84
4	Салфетка техническая РСТУССР1430-71
5	Клей-карандаш полимерный ГОСТ 30535-97

4.1. Сборка и подключение 3D-сканера, подготовка объекта сканирования

Подготовим рабочее место для размещения 3D-сканера и ПК. Убедимся, что на рабочем месте отсутствуют масляные и пылевые загрязнения. При наличии загрязнений выполним влажную уборку рабочего места.

Проверим комплектность оборудования 3D-сканера в соответствии с табл. 8 и осмотрим его внешний вид. Для осмотра камер и линзы проектора требуется снять переднюю крышку проекционного блока (далее – блок).

Не допускаются: повреждения и загрязнения на разъемах, поверхностях оборудования и калибровочных полей, царапины на линзах, демонтированные детали. Загрязнения на оборудовании, отключенном от сети, следует удалять технической салфеткой с изопропиловым спиртом.

Разместим ПК и оборудование на рабочем месте, установим штатив в вертикальном положении на ровной поверхности. Блок устанавливается на штативе и фиксируется в горизонтальном положении при помощи рукоятки.

Данные операции выполняются двумя пользователями. Колебания штатива с блоком не допускаются. Устранение колебаний следует выполнять регулировкой длины ног штатива.

Снимем защитный колпачок с объектива проектора, крышки с гнезд крепления камер. Аккуратно установим комплект камер «S», «M» или «L», избегая прикосновений к линзам.

Не используемые камеры закроем крышками «R-Right» (правая) и «L-Left» (левая) и отложим в транспортировочный кейс. Примечание: для объектов с размерами 50-150 мм следует использовать камеры «S», для 150-500 мм – «M», для 400-1000 мм – «L» (рис. 38 и табл. 9).

При выполнении сканирования в цехе или при солнечном свете, на камеры обязательно устанавливаются синие светофильтры.

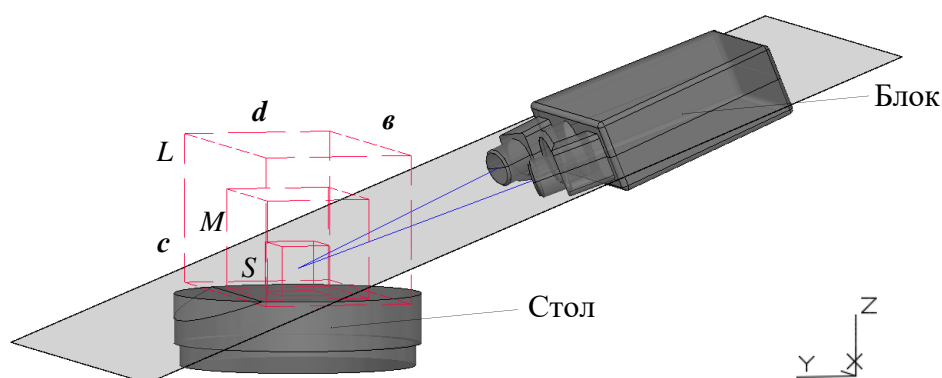


Рис. 38. Схема рабочих зон сканирования

Таблица 9. Параметры рабочих зон сканирования

Зона сканирования	<i>L</i>	<i>M</i>	<i>S</i>
<i>b</i> , мм	550	320	140
<i>c</i> , мм	340	210	90
<i>d</i> , мм	360	200	80

Далее подключаем ПК и оборудование к USB-хабу и сети. Включим камеры и подсветку проектора клавишей питания на верхней панели блока. Замена камер на блоке, подключенном к питанию, не допускается. При подключении к сети запускается вентилятор охлаждения блока, поворотный стол (далее – стол) совершает оборот на 30°.

Объект сканирования необходимо предварительно очистить от ржавчины и пыли, обезжирить. Если на объекте имеются зеркальные, металлические, окрашенные в темные цвета поверхности, то их следует покрыть матирующим спреем, без подтеков. Примечание: на ровные поверхности объектов с размерами свыше 1000 мм, требуется нанести маркеры с расстоянием 30-60 мм. Перед наклеиванием маркера, на оборотную сторону наносится клей. Допускается наклеивание маркеров поверх матирующего слоя. Использование поврежденных маркеров не допускается. По завершению сканирования, очистим объект от клея и матирующего слоя технической салфеткой со спиртом.

4.2. Предварительная настройка 3D-сканера

Убедимся, что вблизи рабочего места отсутствуют источники вибраций и ударов (движение транспорта и персонала, работа стороннего оборудования). Подключим к ПК лицензионный ключ. Проверим наличие на Рабочем столе ПО ScanCenter 2.0 (далее – SC), файлов Руководства «*Настройка и калибровка PRO*» и Инструкции «*ScanCenterNG Сканирование и обработка*». При их отсутствии, выполним установку с USB-носителя.

Запустим SC. Убедимся, что в меню SC все позиции оборудования (проектор и т.д.) подключены – выделены белым цветом. В меню откроем вкладку «*Настройки оборудования*». В окне «*Проектор*» укажем «*Способ отрисовки*» – «*GDI*». Проверим соответствие остальных значений в окнах указанным (см. с. 4-7 Инструкции «*ScanCenterNG Сканирование и обработка*»). В окне «*Калибровка*» запустим «*Настройка сканера на новую зону*» и выберем нужную зону сканирования. Одновременно следует отслеживать температуру прогрева камер до 45,5 °С в левом верхнем углу меню SC, которое при комнатной температуре составляет 0,5 ч. Температура нагрева камер измеряется самим 3D-сканером и выводится на экран ПК.

В центре стола на подставке разместим калибровочное поле (далее – поле), соответствующее камерам. Поле разместим во втором пазе подставки. В меню SC в окне «*Откалибровать*» выберем «*Добавить новое поле*» и введем значения, указанные на поле. Углепластик указывается материалом поля. Нажимаем «*Далее*».

Убедимся, что в SC появилось окно «*Шаг 1/1*» с освещаемым полем и синей сеткой. Установим «рабочее» расстояние от блока до поля путем перемещения

штатива с блоком относительно стола с полем до расположения меток по периметру и центру поля внутри четырех ячеек сетки.

Далее снимем переднюю крышку блока и настроим яркость каждой камеры вращением кольца с фиксирующим винтом на объективе. Наличие пересвета (красных линий и пятен на изображениях поля), разной яркости камер не допускается. После настройки камер зафиксируем кольца.

Настроим фокус проектора вращением кольца на корпусе. Изображение поля должно быть резким и без размытых линий (см. с. 18 Руководства «*Настройка и калибровка PRO*»).

По завершению настройки, зафиксируем кольцо винтом. Ослабим крепежные винты корпусов камер. Установим положение камер и блока в соответствии с рис. 39 и табл. 10. Перемещение блока или стола с полем не допускаются. По выполнению совмещения зафиксируем каждую камеру правым/ левым винтом, в зависимости от требуемого поворота камеры.

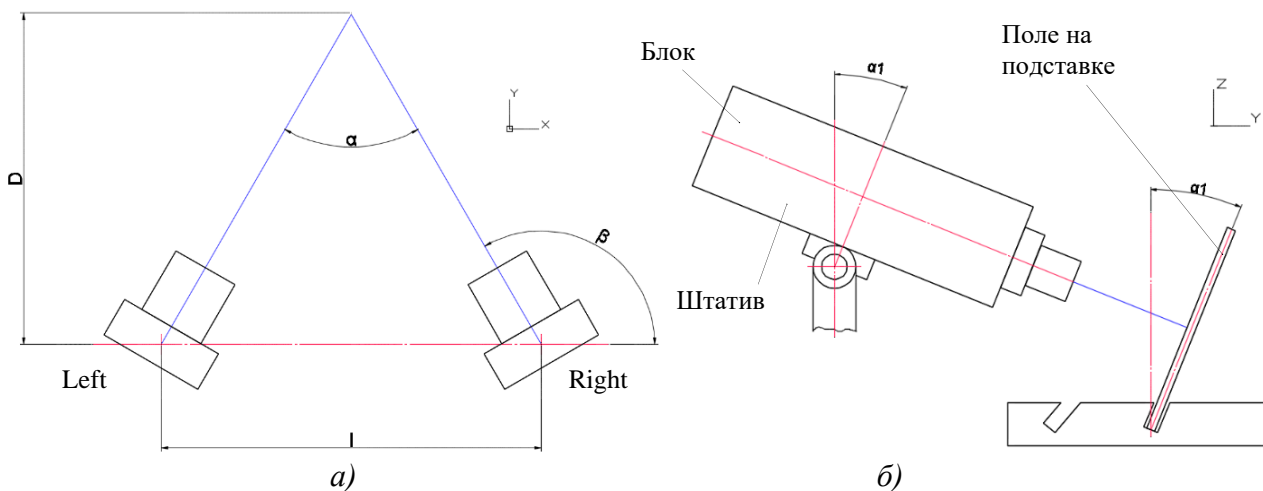


Рис. 39. Настройка положения камер:
а) в плоскости XY; б) в плоскости ZY

Таблица 10. Параметры положения камер 3D-сканера

Зона сканирования	L	M	S
β , град		108,4	
α , град		36,8	
α_1 , град		22	
D , мм	900	520	350
l , мм	300	173	116

Внизу экрана выберем черный подсвет проектора. Настроим «*Выдержку*» до появления всех ярко-белых меток поля без пересвета. Установим переднюю крышку блока. По завершению сканирования, отключим камеры, подсветку проектора клавишей на верхней панели блока. Также от питания отключим блок.

4.3. Полная калибровка 3D-сканера

В окне «Шаг 1/ 11» нажмем «Снять» с переходом в окно «Шаг 2/ 11» при успешном сканировании меток на поле. При появлении сообщения о ненайденных метках, повторим операции, указанные в п.п.4.2.

Далее выполним шаги 2-11 в соответствии с указаниями на экране SC. После завершения шагов следует оценить результат калибровки. Не допускается значение $\geq 0,1$. При $\geq 0,1$ следует повторно выполнить предыдущие операции из данного пункта до получения значения $< 0,1$. Выберем «Перейти к оценке оси». На столе установим поле «Для оценки оси» с подставкой. Настроим значение «Выдержки» до устранения пересвета на поле. Допускается несовпадение поля с синим крестом в центре экрана.

Нажмем «Оценить ось» с последующим вращением стола. Не допускается наличие вибраций при калибровке и оценке оси. В завершение нажимаем «Перейти к сканированию» при успешной оценке оси. При неудовлетворительном результате, сообщаемом SC, следует переместить поле на столе дальше/ ближе к блоку и нажать «Повторить оценку оси».

4.4. Быстрая калибровка 3D-сканера

Разместим на столе требуемое поле. В меню SC выберем «Уточнить текущую калибровку». При необходимости, выполнить настройку расстояния между блоком и полем согласно операции, указанных в п.п.4.2. Завершим три шага калибровки. При необходимости, повторная калибровка выполняется согласно п.п.6.3. Выполним оценку оси согласно п.п.4.3. Нажмем «Перейти к сканированию» при успешной оценке оси.

4.5. Сканирование на поворотном столе

Выберем новый проект «На поворотном столе» в меню SC/ в окне после оценки оси. Разместим в центре стола подготовленный объект в положении, в котором возможно сканирование наибольшего количества поверхностей.

Введем имя и путь сохранения файла проекта. Пропустим оценку оси и укажем «Нет» в «Упрощении». Выберем «Проект с текстурой» при сканировании с синими светофильтрами, нажмем «Продолжить». В «Подсвете проектора» выберем «Удалять фон при сканировании» и «Крест». Удалим пересвет на объекте регулированием «Выдержки». В «Столике» укажем «Сканов на оборот – 12» и «Задержка перед сканом – 500». В «Проекторе» укажем «Яркость линий – 255», «Яркость полос – 150».

Нажмем «Начать сканирование» и контролируем последовательное отображение mesh-сетки объекта на экране. Хаотичное расположение сеток на экране, непрерывное движение стола, перемещение объекта/ блока со штативом в процессе сканирования не допускаются. Примечание: при хаотичном расположении сеток, нажмем «Остановить сканирование», выделим и удалим строку «Group_». Переместим объект ближе/ дальше от блока с повторением сканирования до получения группы сеток, образующих объект.

4.6. Сканирование с маркерами

Расположим подготовленный объект с маркерами, на очищенной поверхности/ опорах, напротив штатива с блоком. В меню SC выберем проект «С маркерами». Укажем в поле «Маркеры» черный цвет, диаметр – 5 мм, расстояние между маркерами. Нажмем «Создать опорную сеть».

Выберем подсвет проектора «Крест», установим положение штатива с блоком до совмещения на экране синего креста с объектом. Настроим «Выдержку» до удаления пересвета и появления ярко-белой подложки маркера. Нажмем «Начать сканирование». Перемещаем объект в новое положение и повторяем сканирование до получения группы mesh-сеток, образующих объект, аналогично примечанию п.п.4.5. Объединение mesh-сеток также выполняется согласно п.п.4.5.

4.7. Обработка mesh-сетки с автосовмещением

Удалим не используемые mesh-сетки (повторяющиеся сетки, опора) выделением и удалением строк «Mesh_». Откроем меню в левом верхнем углу экрана и нажмем «Сохранить проект». После откроем вкладку «Обработка» вверху экрана и выберем «Совмещение». Требуется нажать «Автоматически» и «Финальное совмещение». При совмещении $\geq 0,1$ мм изменим положение объекта и выполним повторное сканирование.

Откроем вкладку «Модель». Выберем метод построения и установим уровень детализации «Выше». В поле «Опции» укажем «Удалить границы сканов» и «Заполнить пустоты» для заполнения пропусков в mesh-сетке. Далее выберем строку «Group_» и нажмем «Строить модель». Проверим наличие строки «Model_» после построения.

В завершение откроем «Экспорт», выберем строку «Model_» и формат экспорта – **.stl**, нажмем «Экспортировать». Проверим наличие **.stl-файла** в папке и закроем SC.

4.8. Обработка mesh-сетки с ручным совмещением

Откроем вкладку «Обработка», выберем «Совмещение» и «Вручную». Убедимся, что в ПО отображается два экрана для mesh-сеток. Вручную выделим требуемую строку «Mesh_» отдельно для каждого экрана и нажмем «Enter». Укажем 2-3 точки совмещения в требуемых местах обеих сеток и нажмем «Enter». Убедимся, что сетки объединены в требуемом положении. При отличном положении нажмем «Сбросить точки».

Выберем «Очистку». Нажмем «Удалить шум» в «Автоматическом выделении». Укажем размер удаляемых объектов (10) и нажмем «Удалить». При необходимости, удалим не требуемые фрагменты сеток инструментом «Лассо» в «Ручном выделении». Построение и экспорт модели в **.stl-файл** выполняется в соответствии с п.п.4.7.

4.9. Проверка .stl-файла в Geomagic Design X

Установим на ПК и запустим Geomagic Design X. Нажмем «Импорт файла» в верхнем левом углу ПО и выберем .stl-файл. Откроем вкладку «Многоугольники», запустим «Мастер лечения» и нажмем «ОК». Убедимся, что выполнена обработка

файла. Откроем вкладку «Отделка поверхности» и выберем «Авто поверхность». Укажем «Сетка – Механическое», «Допуск – 0,0724». Нажмем «Следующий этап» и «ОК» по завершению поверхностей. Для завершения работы нажмем «Экспорт файла» и выберем форматы экспорта .iges (.igs)/ .step (.stp). Закроем окно Geomagic Design X.

5. МЕТОДИКА ЦИФРОВОЙ ПОДГОТОВКИ .STL-ФАЙЛА К FDM/FFF-ПЕЧАТИ

Первым шагом в подготовке 3D-модели к печати является перенос файла из расширения редактора в формат для работы с 3D-принтерами – .stl. Рассмотрим операцию на примере популярных САПР: AutoCAD, Fusion 360, Inventor, SketchUp Pro.

5.1. Конвертация 3D-модели в формат .stl в AutoCAD

Выделим левой кнопкой мыши 3D-модель, открытую в рабочей области редактора. Далее, не отменяя выделение, в строке команд введем «_stl». В появившемся списке необходимо выбрать «STLOUT», обычно занимающую верхнюю позицию (рис. 40). Затем клавишей «Enter» подтверждаем команду, завершающуюся захватом модели системой и предложением подтвердить создание .stl-файла. Необходимо нажать «Y/<Д>». При этом автоматически снимается выделение модели. После выполнения команды открывается окно сохранения файла с выбором удобной для работы папки (рис. 40, справа).

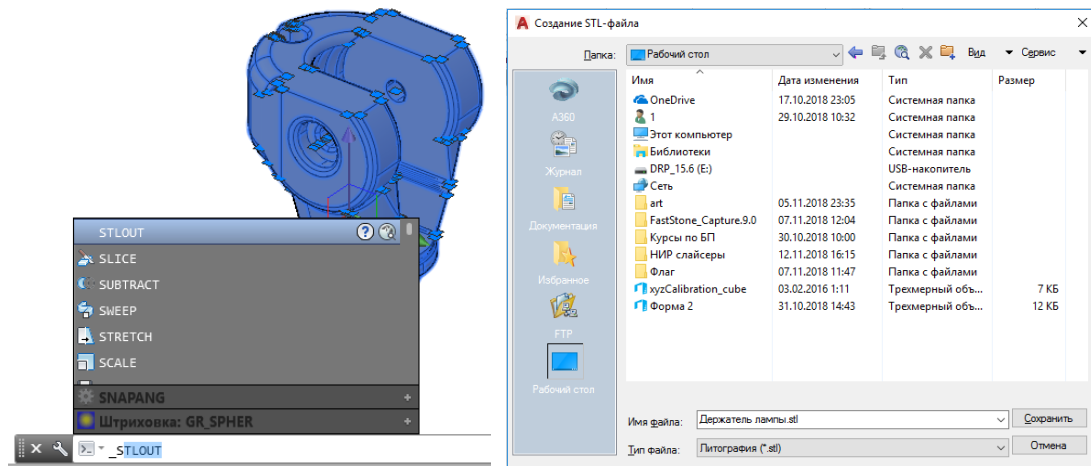


Рис. 40. Ввод команды «STLOUT» в AutoCAD

Экспорт в формат .stl можно осуществить и другим способом. В верхнем меню AutoCAD выбираем функцию «Экспорт» (рис. 41), а затем указываем «Другие форматы». Открывается окно «Экспорт данных», в нижней части которого находится «Тип файла». В этом разделе находим формат «Литография (*.stl)», после чего сохраняем модель в .stl.

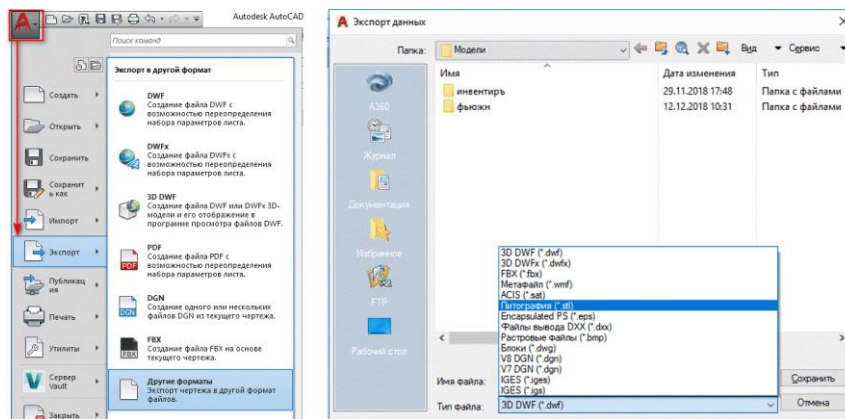


Рис. 41. Использование функции «Экспорт»

5.2. Конвертация 3D-модели в формат .stl в SketchUp Pro

SketchUp Pro позволяет создавать относительно простые объекты, что удобно при разработке моделей деталей с геометрией, состоящей из примитивов. Версия программы Pro поставляется вместе с двумя дополнительными компонентами – LayOut и Style Builder. LayOut является приложением для оформления документации на основе моделей из SketchUp. Style Builder – это редактор для настройки эффектов в стилях SketchUp Pro.

Для экспорта в .stl из SketchUp необходимо скачать специальный плагин, перед загрузкой которого требуется регистрация на сайте. Скачанные файлы плагина копируем в корневую папку SketchUp. Для установки расширения запускаем SketchUp, в верхнем меню выбираем вкладку «Окно» (рис. 42, слева) и нажимаем «Диспетчер расширений». В открывшемся диалоговом окне выбираем «STL Import & Export», нажимаем «Установить расширение» (рис. 42, справа), указываем путь до скаченного плагина и нажимаем «Открыть». В окне соглашаемся на вопрос, хотим ли установить расширение. После сообщения об установке плагина, в верхнем меню программы, во вкладке «Файл» должна появиться функция «Export Stl». Выделяем левой кнопкой мыши всю модель и нажимаем «Export Stl». В окне «STL Export Options» указываем «Millimeters» в строке размерности модели «Export unit» и структуру кода «Binary» в «File format». После активации «Export» открывается окно, в котором сохраняем полученный .stl файл (рис. 43).

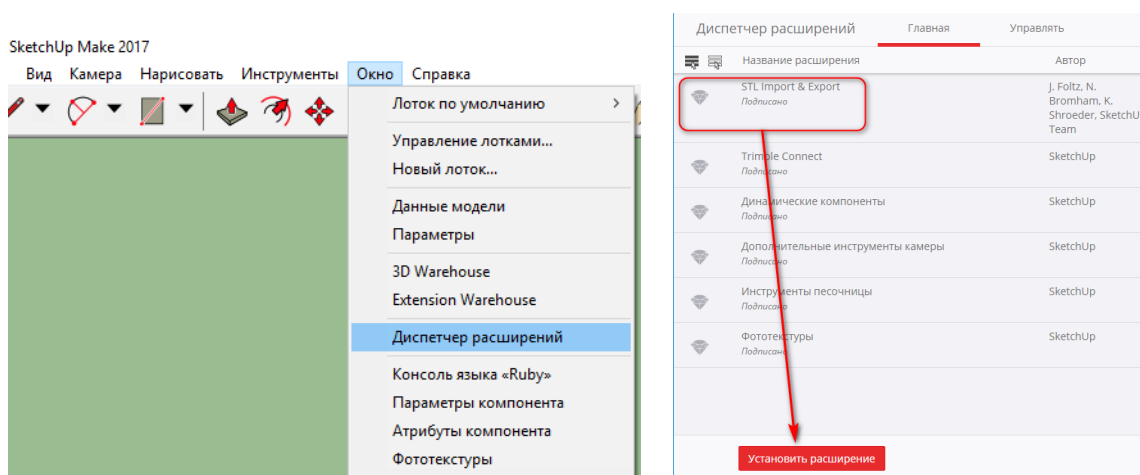


Рис. 42. Выбор Диспетчера расширений и установка расширения STL в SketchUp Pro

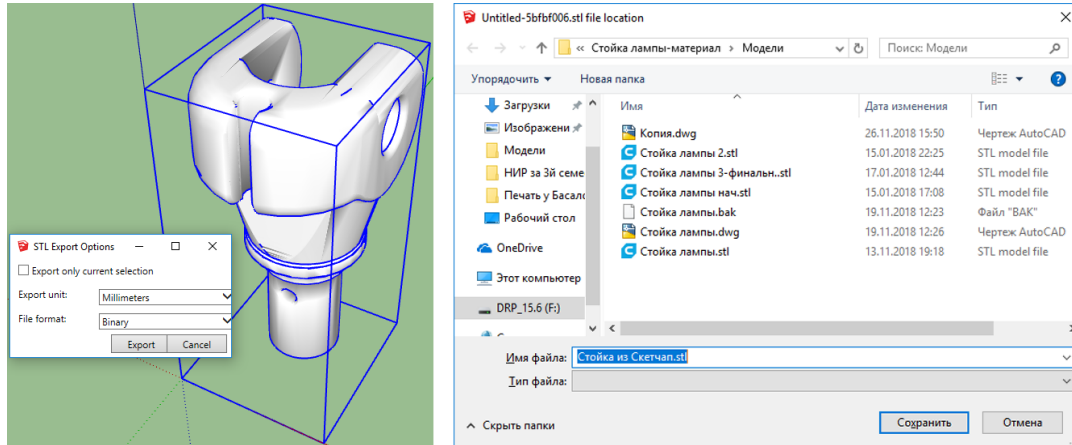


Рис. 43. Окно параметров конвертации и сохранение файла

5.3. Конвертация 3D-модели в формат .stl во Fusion 360

Autodesk Fusion 360 – облачная CAD/CAM система. Чтобы экспортировать модель, созданную во Fusion 360, в формат .stl, во вкладке «File» выбираем пункт «3D Print» (рис. 44). Этот пункт также есть и во вкладке «Make». Далее появляется меню, в котором находится включенная функция «Send to Print Utility» для прямой отправки модели в Autodesk Meshmixer (если имеется необходимость работы непосредственно с самим файлом .stl) или напрямую в слайсеры. В случае простого сохранения снимаем флажок с функции и выделяем деталь левой кнопкой мыши. При этом часть меню, связанная с Meshmixer, отключается, активируется клавиша «OK» (рис. 45, слева). Нажимаем ее и сохраняем файл в окне «Save STL» (рис. 45, справа).



Рис. 44. Пункт «3D Print» во вкладке «File» и функция «Send to Print Utility»

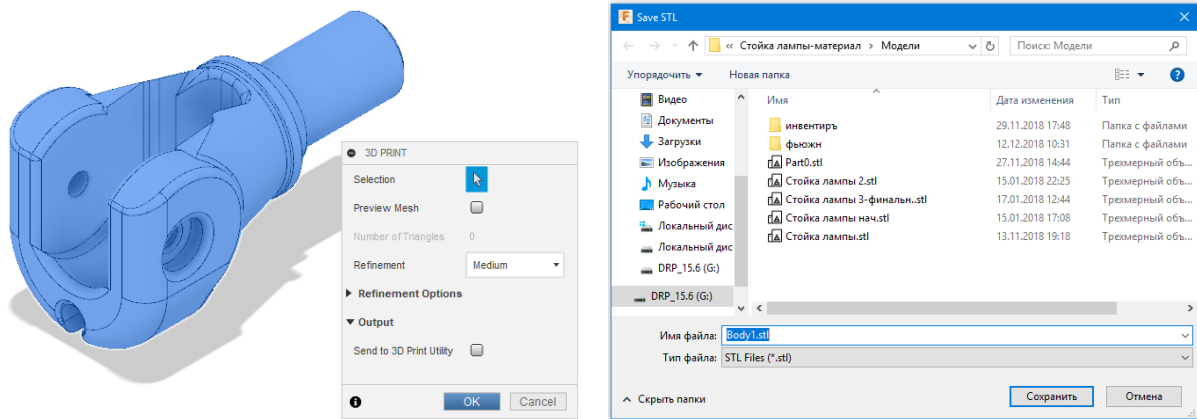


Рис. 45. Отключение функции «Send to Print Utility» и сохранение файла

5.4. Конвертация 3D-модели в формат .stl в Inventor Pro

Чтобы экспортировать в формат .stl модель, созданную в Inventor Pro (рис. 46), необходимо на *Панели вкладок* выбрать вкладку «Среды», на которой находится иконка «3D-печать». После нажатия иконки модель попадает в пространство модуля подготовки к печати (рис. 47), где расположена на виртуальном столе принтера. В правом углу панели инструментов нажимаем «STL» и сохраняем файл в формате .stl в появившемся окне.

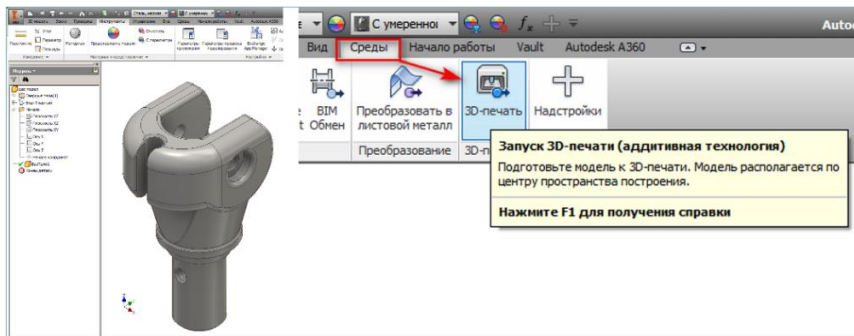


Рис. 46. Модель в среде Inventor Pro и модуль 3D-печати во вкладке «Среды»

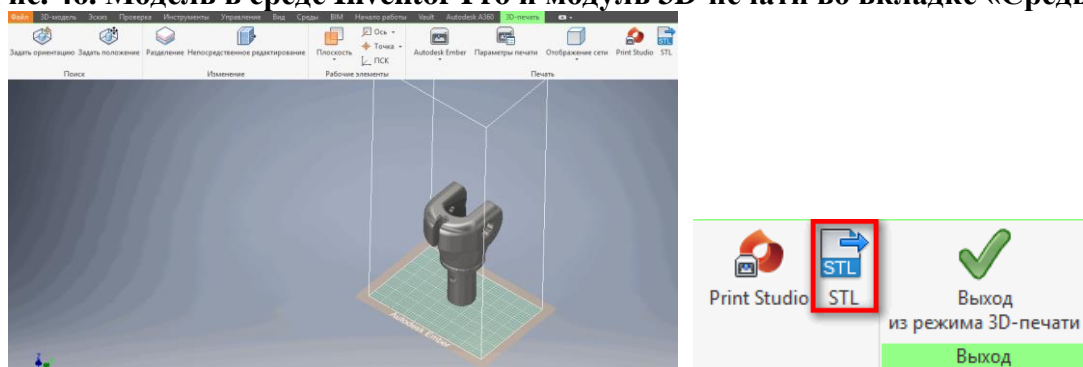


Рис. 47. Модель в модуле подготовки к 3D-печати и иконка сохранения в формат .stl

5.5. Модуль подготовки к 3D-печати в Inventor Pro

Рассмотрим подробнее модуль подготовки к 3D-печати в Inventor Pro. (рис. 48). В целом, он представлен ограниченным набором функций, среди которых команды для управления положением модели на плоскости или по грани (рис. 49),

«Разделение» .stl-файла на отдельные блоки, если размеры модели превышают габариты области печати.

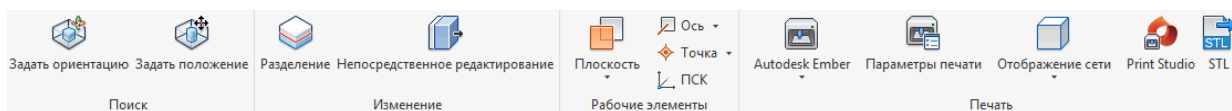


Рис. 48. Панель инструментов в разделе 3D-печати в Inventor Pro

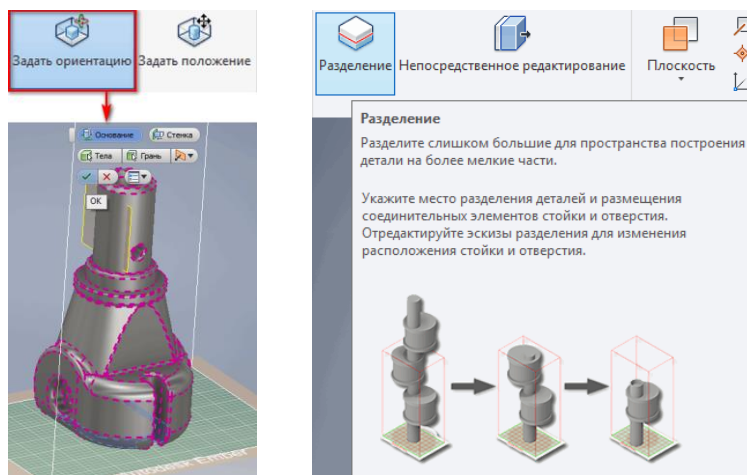


Рис. 49. Управление положением и команда разделения .stl-файла на блоки

С помощью функции «Непосредственное редактирование» редактируется масштаб и поворот на определенный угол (рис. 50, слева). Функция выбора принтера помогает настроить область печати под оборудование, которое уже имеется в библиотеке Inventor. Стоит отметить, что количество добавленных производителей, как FDM/FFF-, так и DLP-, SLA-принтеров очень ограничено и представлено только «брендовыми» компаниями, без возможности установить собственные параметры, например, под RepRap-принтер.



Рис. 50. Выбор направления поворота и библиотека моделей принтеров

При конвертации файла в формат .stl, для повышения полигональности модели также обратимся к функции «Параметры печати» (рис. 51).

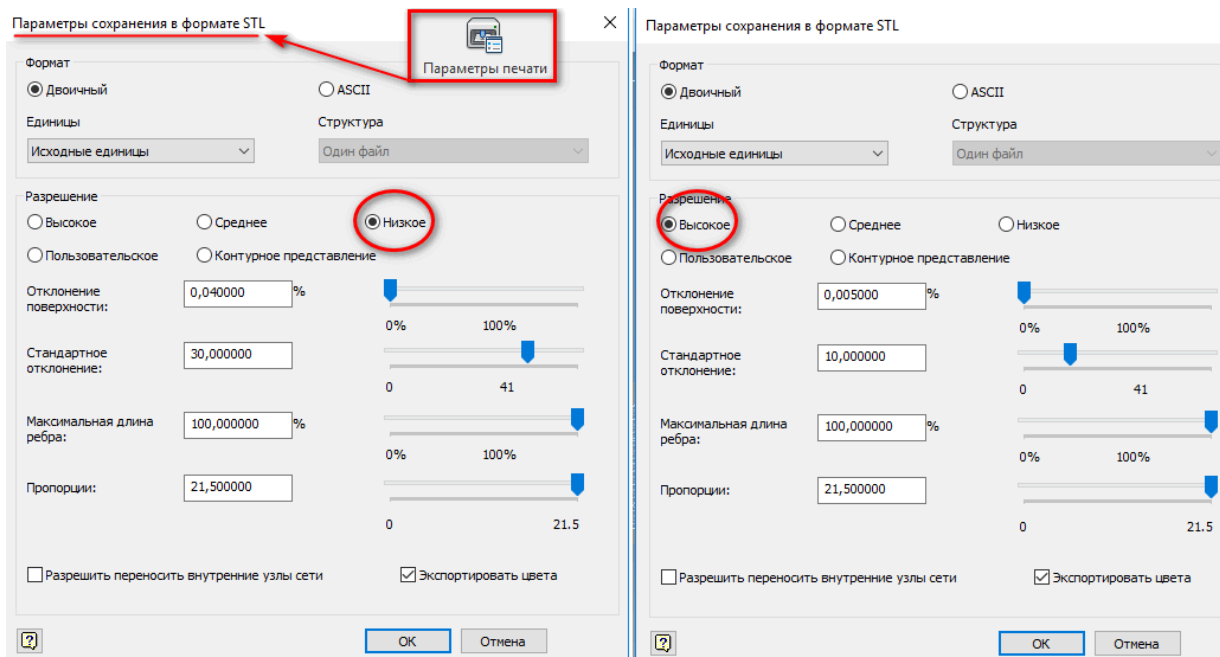


Рис. 51. Окно «Параметры сохранения в формате STL»

В ней задается формат и структура кода - двоичный или ASCII (при выборе последнего отключается экспорт цвета), а также разрешение (высокое, среднее и низкое).

Самостоятельно настроить разрешение можно, включив «*Пользовательское*». Чтобы отобразить или скрыть сетку треугольников, воспользуемся «*Отображение сетки*» и «*Ребра сетки*» (рис. 52). Так отслеживается изменение полигональности после предыдущей функции.

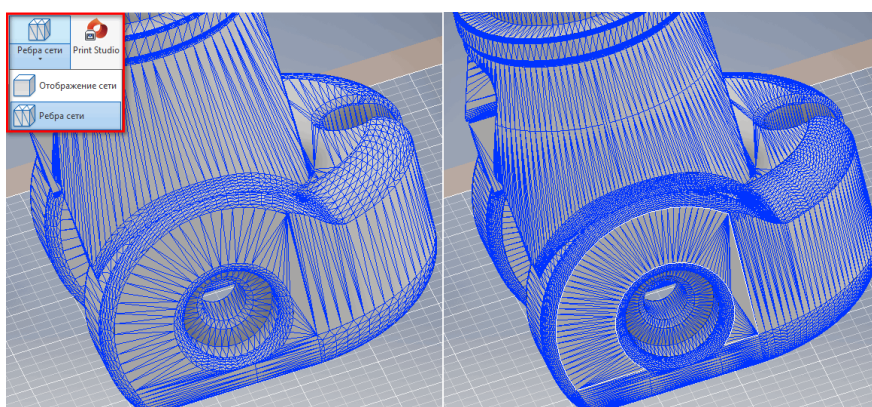


Рис. 52. Отображение полигональной сетки при среднем и высоком разрешении

5.6. Полигональность поверхностей .stl-файла

Следующий шаг – настройка «сглаживания» поверхностей модели. Возвращаясь к рис. 52, стоит обратить внимание на покрытие некоторых поверхностей дополнительными гранями и углами. Суть явления заключается в моменте, в котором выбранные для конвертации в формат .stl файлы выражаются в виде треугольников (полигонов), описывающих объект. Чем меньше размер полигонов, тем

поверхность более гладкая. Однако повышение числа треугольников увеличивает размер файла, и наоборот.

На рис. 53 изображены высокополигональные модели (справа) и низкополигональные (слева). В данном примере размер файла средней сферы является большим, а правая имеет меньший размер. В целом задачей конструктора является поиск компромисса между качеством детали и размером ее модели.

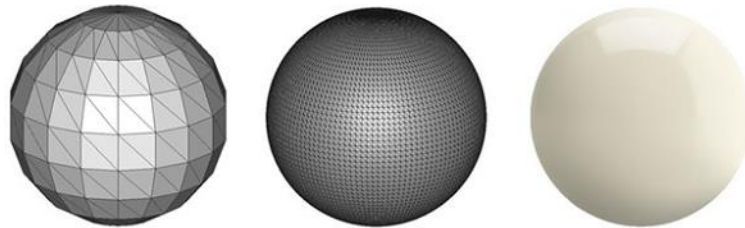


Рис. 53. Повышение полигональности объекта

Во многих САПР предлагается определить максимальное отклонение файла. Этот допуск определяется как максимальное расстояние между первоначальной формой и сеткой .stl экспорта. Рекомендуется выбирать допуск 0,01 мм. Экспорт с допуском менее 0,01 мм не целесообразен, так как многие модели принтеров не могут печатать точнее указанного уровня детализации. При экспорте файла с допуском больше, чем 0,01 мм треугольники видимы при печати.

5.7. Быстрый просмотр .stl-файла

Чтобы быстро оценить полигональность .stl-файла используем одно из доступных средств для просмотра – 3D Builder, скачиваемый из раздела «Приложения» Microsoft Store. После запуска 3D Builder.exe, в меню с основными разделами для добавления .stl файла нажимаем «Открыть», через который происходит переход в окно загрузки. Программа поддерживает работу с различными форматами: .stl, .obj, .mix и собственный формат Microsoft – .3MF. После нажатия «Загрузить объект» и выбора файла, переходим в рабочую область. Здесь при помощи инструментов внизу области можно управлять текущим положением, изменять масштаб детали (рис. 54).

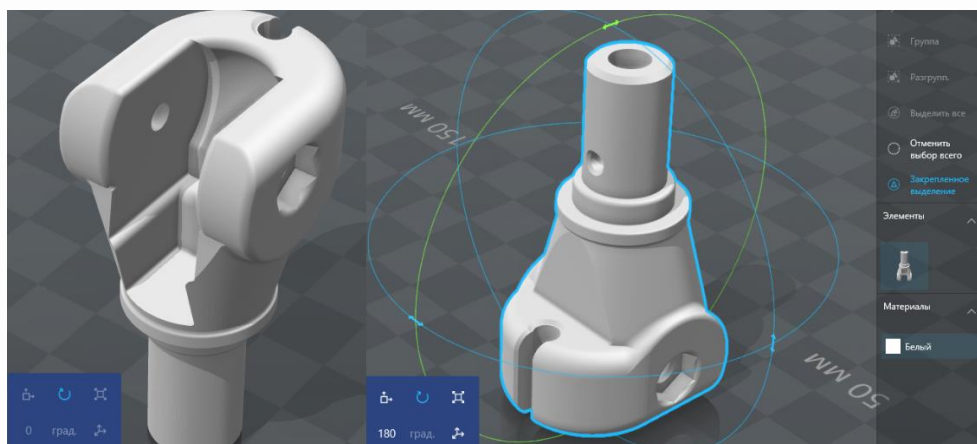


Рис. 54. Рабочая область 3D Builder

Помимо 3D Builder можно воспользоваться другим ПО – ModuleWorks STL View. После скачивания программы запускаем иконку STLView.exe. Загружаем .stl-файл через «Load Model» > «Add Model», либо перетаскиваем его в рабочее пространство. Рядом с «Load Model» расположены еще 2 вкладки – «Options» и «View» (рис. 55). В первой можно изменить цвет пространства, убрать сетку и посмотреть модель в различных видах, в том числе в виде массива треугольников (Wireframe). «Smooth Shading» показывает объект полигональным или более гладким (рис. 55, справа), но сохранить сглаживание нельзя.

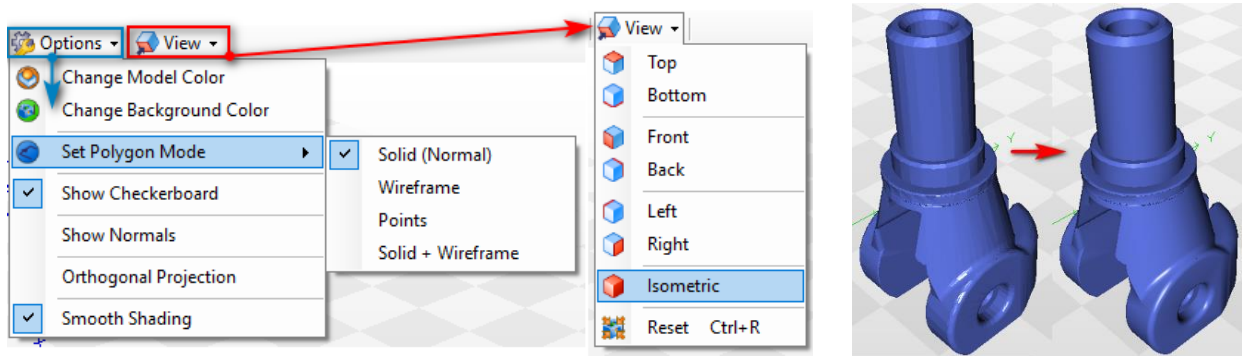


Рис. 55. Вкладки «Options» и «View» и работа функции «Smooth Shading»

Просмотр .stl-файла дает представление о необходимости увеличения количества полигонов, чтобы повысить качество печати детали. Для этого вернемся в САПР.

5.8. Повышение полигональности .stl-файла

Для повышения полигональности в AutoCAD правой кнопкой мыши вызовем меню, в котором находится вкладка «Параметры». Как показано на рис. 56, находим раздел «Экранное разрешение» с функциями «Сглаживание дуг и окружностей», «Число сегментов в дугах полилиний», «Сглаживание визуализированных объектов» и «Число образующих в поверхностях». Вводим значения, повышающие количество полигонов, с учетом диапазона минимума и максимума, сообщаемого системой. Нажимаем «Ок». Для отображения на модели изменений переключаем визуальный стиль, например, с концептуального на 2D-каркас. Далее модель конвертируется в .stl-файл, следуя ранее приведенной методике. Полученный файл просматриваем в 3D Builder или STL View.

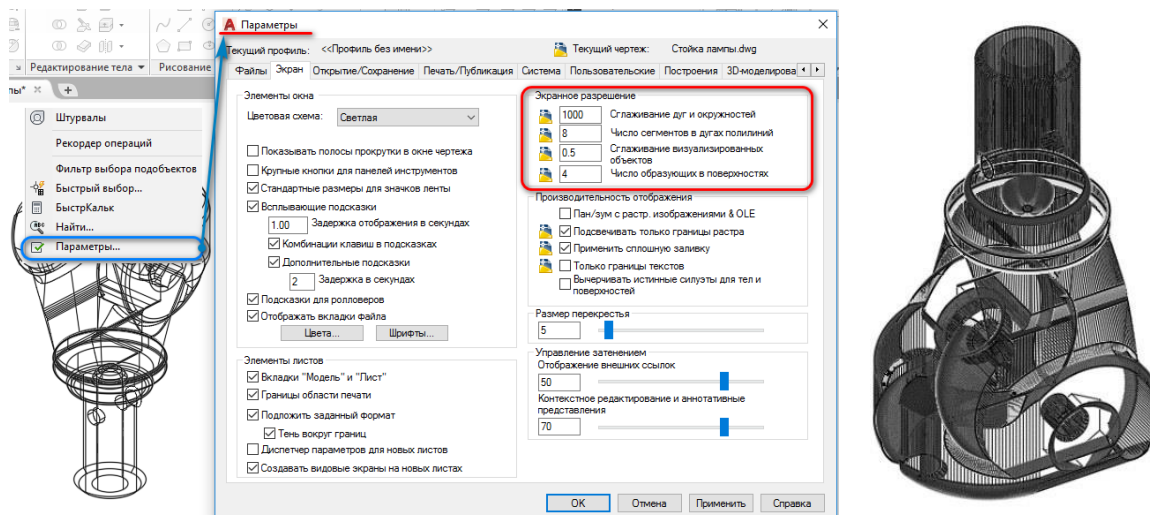


Рис. 56. Раздел «Параметры» и модель с увеличенным количеством полигонов

Для повышения полигональности в Inventor Pro используем модуль подготовки к 3D-печати, в частности, его функцию «*Параметры печати*». Выполним сохранение .stl-файлов с разными разрешениями и проверим результаты в 3D Builder или STL View. Аналогичным образом повышение полигональности выполняется во Fusion 360. Заходим во вкладку «*Make*» и выбираем пункт «*3D Print*». В строке «*Refinement*» (*Разрешение*) выбираем качество конвертации в .stl: «*Low*», «*Medium*», «*High*» (рис. 57).

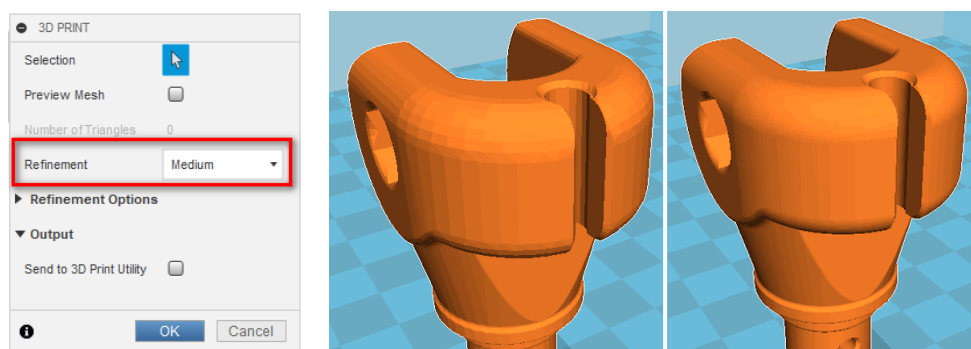


Рис. 57. Выбор разрешения .stl- файла в разделе «3D Print»

5.9. Ремонт .stl-файла в Autodesk Netfabb и Microsoft 3D Tools Repair

Перед загрузкой модели в слайсер необходимо выполнить ее проверку и «ремонт». Это важно, ведь модель, которая выглядит замкнутой, может иметь дефекты: отсутствие полигонов в разных местах или заполнение отверстий поверхностями, способными испортить результат печати. В основном, дефекты в файле появляются при конвертации из САПР. Для их устранения воспользуемся Autodesk Netfabb и Microsoft 3D Tools Repair.

В начале работы с Autodesk Netfabb, чтобы загрузить .stl-файл в рабочую область, в меню «*File*» нужно выбрать «*Open Project*» и в подменю нажать «*Open*». В процессе загрузки Netfabb автоматически запускает предварительный анализ, чтобы определить возможные ошибки при печати. Из них: лишние отверстия, открытые края, треугольники с ориентацией наизнанку. Если программа находит

ошибки в модели, то сигнализирует в правом углу экрана. Кроме того, не полностью рассчитывается объем модели (рис. 58).

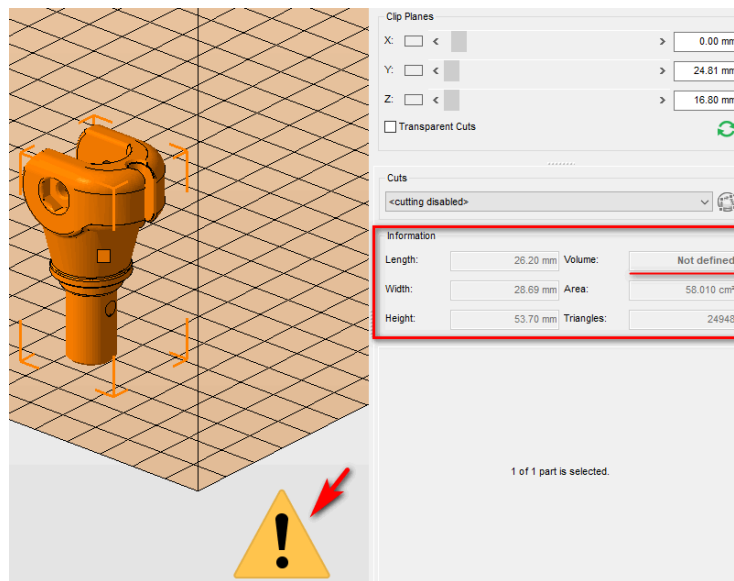


Рис. 58. Неполный расчет объема программой

Выполним более тщательную проверку. На верхней панели инструментов нажмем «New Analysis». В меню выбираем опцию «Standard Analysis», где на появившейся информационной панели справа будут указаны зоны дефектов и общая характеристика. Чтобы отобразить все зоны на модели, на инфо-панели нажимаем «Repair» (рис. 59). Для запуска автоматического ремонта, на панели вкладок нажимаем «Repair», а затем «Automatic Repair», после которой начнется процесс исправления файла. Далее выбираем опцию «Default» для установки значений по умолчанию (рис. 60, слева) и «Execute». Исправление ошибок может занять некоторое время. Как показано на рис. 60, справа, после исправления модель показана полностью замкнутой.

	X	Y	Z	
Minimum:	-1.14	24.81	16.80	
Maximum:	25.06	53.50	70.50	
Size:	26.20	28.69	53.70	
Volume:	---		Area: 58.0096 cm ²	
Points:	14467	Edges:	39680	
Triangles:	24948	Shells:	25	
Holes:	212	Bad Edges:	0	
Boundary Edges:	4516	Boundary Length:	2103.48 mm	
Flipped Triangles:	0			
Surface is closed: No				
Surface is orientable: Yes				
Edges/Point	Min: 2.00	Max: 38.00	Ø: 5.49	Dev: 1.23
Triangles/Edge	1.00	2.00	1.89	0.32
Triangle Quality	0.00	1.00	0.53	0.25
Edge Length	0.00	18.51	0.81	1.94

Рис. 59. Информация о модели и зонах дефектов

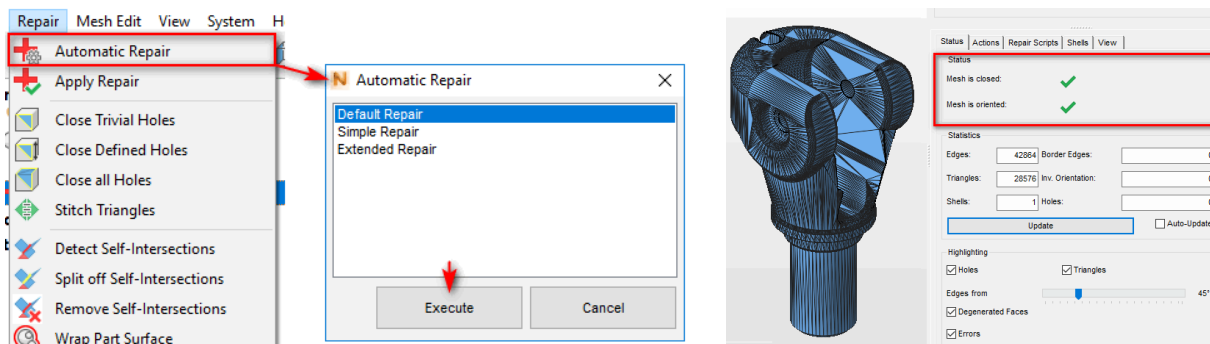


Рис. 60. Запуск автоматического ремонта и полностью замкнутая модель

Восстановление считается полностью завершенным после применения изменений к источнику. Нажимаем на «*Apply Repairs*» во вкладке «*Repair*». В результате программа предлагает удалить или сохранить исходную модель до исправлений. Нажимаем «*Remove old Part*». После удаления модели с дефектами, в рабочей области появляется новая модель другого цвета (рис. 61). Кроме того, полностью рассчитывается объем. Сохраняем .stl-файл с помощью «*Export Project to STL*» и завершаем работу Autodesk Netfabb.

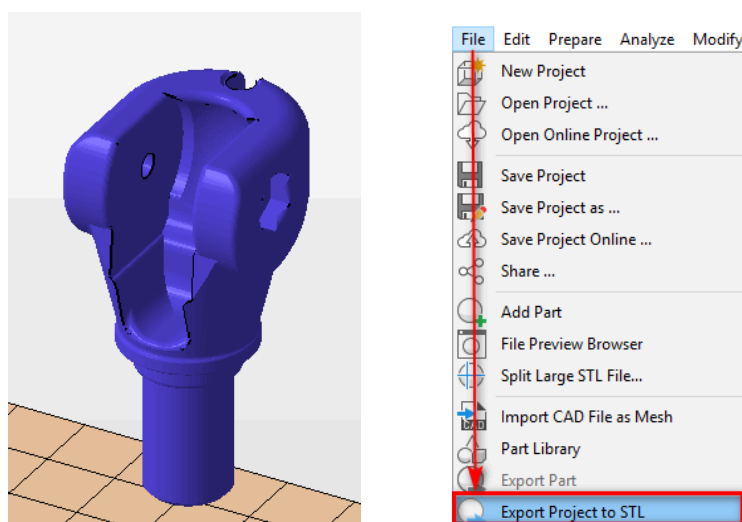


Рис. 61. Исправленная модель и ее сохранение в .stl-файл

3D Tools Repair – это онлайн-ресурс для ремонта .stl-файлов с простой геометрией. Данная программа разработана в рамках поддержки Microsoft пользователей принтеров, которые начинают осваивать печать и либо моделируют небольшие объекты, либо используют готовые файлы. Чтобы воспользоваться данным ресурсом, необходимо зайти на официальный сайт и создать профиль. После регистрации на сайте появляется возможность загрузить модель, автоматически произвести ремонт и сохранить на ПК полученный файл в формате .3MF (рис. 62). Отметим, что максимальный размер файла не должен превышать 100 Мб, а время ремонта может занимать до десятков минут. Чтобы сконвертировать файл из формата .3MF в .stl, вновь запускаем 3D Builder, загружаем файл и нажимаем «*Импорт модели*». Во вкладке «*Файл*» выбираем «*Сохранить как*» и сохраняем, как показано на рис. 63.

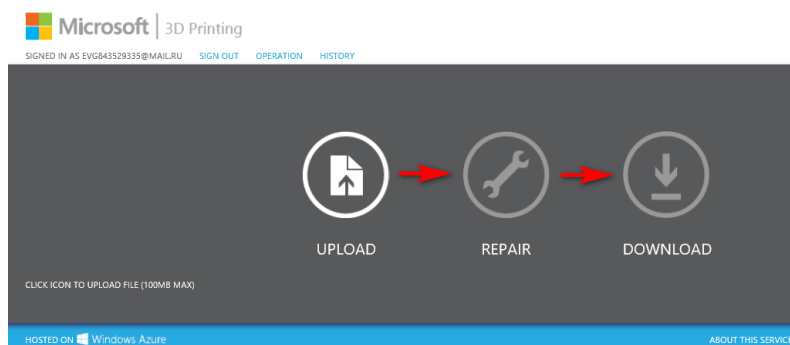


Рис. 62. Рабочее окно 3D Tools Repair

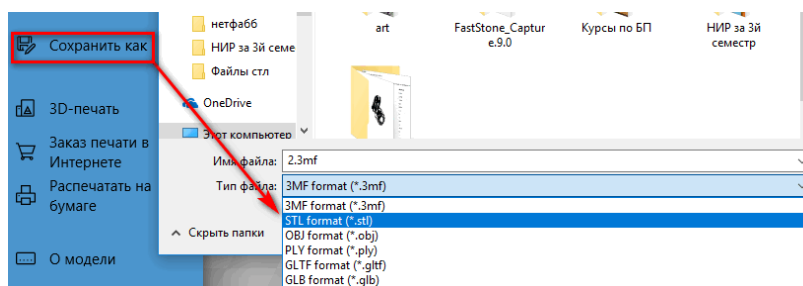


Рис. 63. Конвертация в формат .stl в 3D Builder

Итак, этап подготовки .stl-файла в части работы с геометрией, полигонами, ремонта поверхностей, завершен. Однако перед началом печати необходимо настроить параметры и режимы в слайсере, о чем пойдет речь далее.

5.10. Настройка параметров печати в слайсере

Слайсеры предназначены для обработки .stl-файлов – нарезания на отдельные слои и получения УП. От корректности нарезки зависят характеристики изделия: соответствие геометрии, шероховатость поверхностей, подверженность деформации в процессе печати. Слайсеры серии Cura – одни из наиболее популярных и доступных, которые отличаются простотой использования и в то же время обладают одним из наиболее универсальных наборов инструментов, что и объясняет их популярность. Подготовка .stl-файла во многом автоматизирована, что позволяет уменьшить деформации и повысить детализацию печати.

Для установки слайсера на ПК необходимо посетить сайт компании-разработчика Ultimaker. В разделе «*Products*» выберем «*CuraSoftware*» и «*View all versions*», а затем ищем в списке требуемую платформу и версию ПО. Например, это Windows и базовая версия 15.04.6.

При скачивании сайт предложит заполнить анкету, которую пропускаем. После установки и запуска слайсера необходимо настроить профиль нового принтера. Возможности программы позволяют сделать несколько одновременно функционирующих профилей под разные модели, что важно для работы с несколькими принтерами сразу.

Настроим Cura под настольный принтер, например, Anycubic i3 Mega. В «*Мастере настройки*» (рис. 64) выбираем «*Другие*» > «*Prusa Mendel i3*» (платформа i3 Mega).

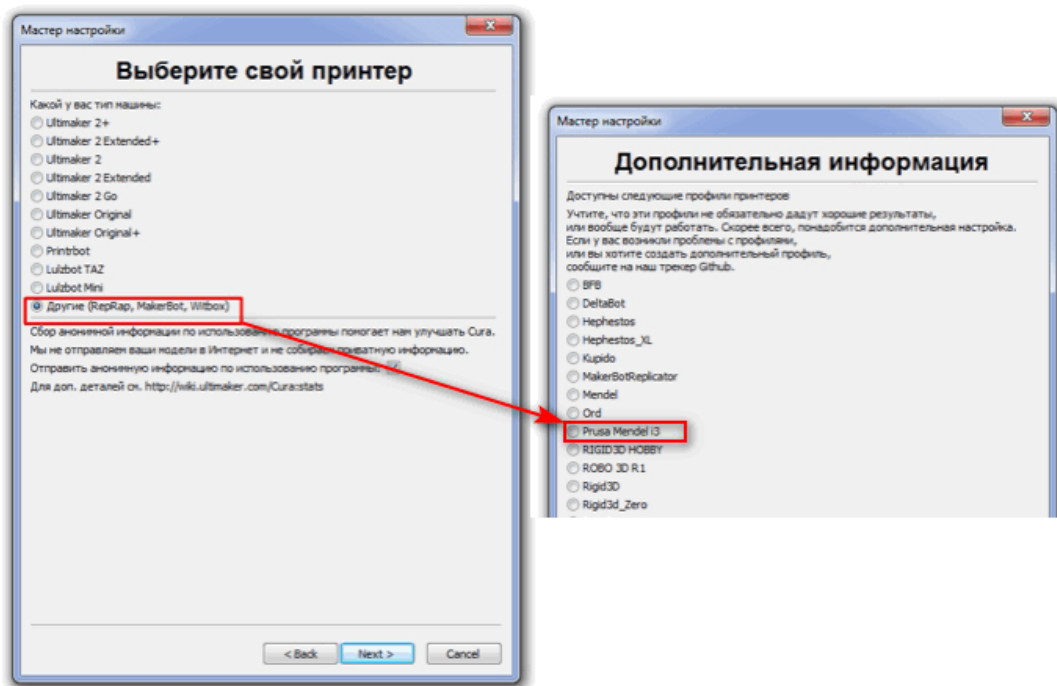


Рис. 64. Выбор платформы принтера

При подключении принтера собственной сборки или из кит-комплекта, нажимаем «Другой» и в новом окне указываем основные настройки. После нажатия «Finish» Cura открывает меню основных настроек и рабочую область, в которой по умолчанию уже находится какая-либо модель. Для удаления выделим ее левой кнопкой мыши, а правой вызовем меню с командой «Удалить объект» (рис. 65, слева). На верхней панели вкладок открываем «Принтер», где если уже созданы несколько профилей, выберем нужный и перейдем в раздел «Настройки принтера» (рис. 65, справа).

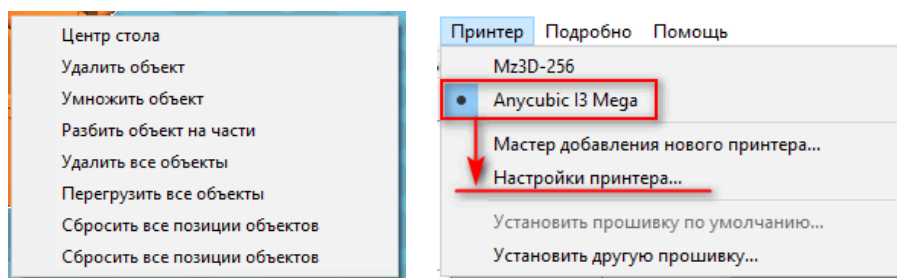


Рис. 65. Удаление ненужной модели и переход во вкладку «Принтер»

В этом разделе можно настроить следующие базовые параметры (рис. 66) [31, 32]:

- количество шагов двигателя на 1 мм выдавливаемой нити;
- размеры области печати;
- количество экструдеров (до 5 единиц);
- рабочий стол с подогревом или без;
- для дельта-принтеров можно выбрать 0 в центре платформы;

- форма рабочего стола (прямоугольный или окружность);
 - тип используемого gcode (Marlin/Sprinter, Volumetric, UltiGCode, MakerBot);
 - размер печатной головки (для печати несколько деталей по очереди);
 - номер порта и скорость соединения для подключения принтера к ПК;
- Значения, изображенные на рис. 66, введены исходя из рекомендаций в инструкции по эксплуатации конкретной модели принтера.

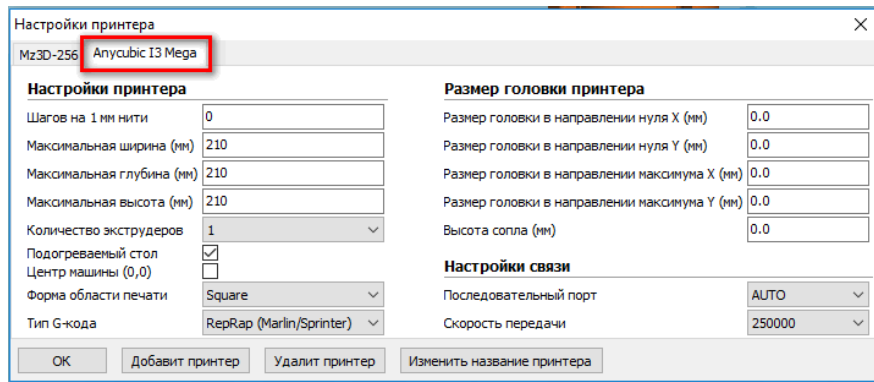


Рис. 66. Окно базовых настроек принтера

При первом запуске Cura по умолчанию могут открыться быстрые настройки, где доступны тип материала, наличие поддержек, прилипание к столу и три разрешения печати, автоматически настраиваемые самим слайсером (рис. 67):

- *high* – повышенное качество и время печати;
- *normal* – более быстрый вариант при удовлетворительном качестве печати;
- *fast* – уменьшенное время печати с наиболее низким качеством.

Для перехода в полный набор настроек требуется открыть «*Подробно*» и выбрать «*Переключиться на...*». Теперь рассмотрим две вкладки параметров печати.

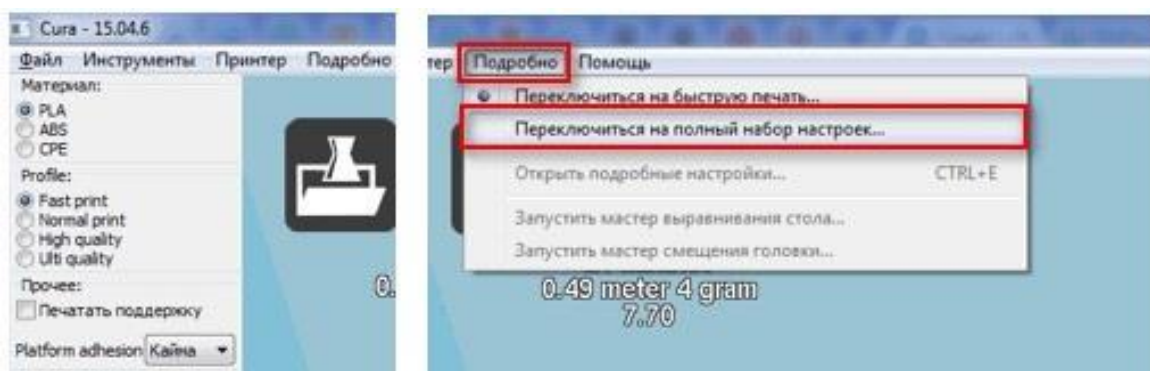


Рис. 67. Переход к полному набору настроек

Вкладка основных параметров содержит [31, 32]:

- «*Высота слоя*» (мм). Определяет высоту каждого наносимого слоя пластика. Большинство бытовых принтеров показывают отличный результат при высоте до 0,6 мм;
- «*Толщина стенки*» (мм). Чем выше значение, тем прочнее деталь;
- «*Включить откат*» – обязательная к использованию функция, включающая втягивание пластика над теми местами, где не производится печать;
- «*Заполнение модели*». «*Толщина Низ/Верх*» (мм) – это толщина основания и крышки изделия. От выбора параметра «*Плотность заполнения*», %, зависит, какой будет деталь – например, со сплошным внутренним заполнением (80-100 %) или полый (0 %);
- «*Скорость и температура*» напрямую влияют на качество поверхностей. В зависимости от конструкции принтера, удовлетворительные результаты достигаются при скорости 50-80 мм/с, а более точные данные получают опытным путем;
- для печати деталей со сложной геометрией поверхностей иногда требуется использование поддержек. В параметре «*Тип поддержки*» можно либо отказаться от поддержек при выборе «*Нет*» (рис. 68, слева) или установить только под нависающими элементами – «*От поверхности*» или во всей детали;
- «*Тип прилипания к столу*» определяется в зависимости от требуемой адгезии к рабочему столу. Для предотвращения отлипания изделия выберем «*Кайма*». Количество линий каймы выбирается из контекстного меню по клавише справа (рис. 68, справа);
- при печати пластиком с повышенной усадкой, а также необходимости выравнивания рабочего стола, рекомендуется создать дополнительную прослойку между столом и деталью с помощью функции «*Подложка*» (рис. 69);
- диаметр нити указывается равным диаметру прутка – например, 1,75 мм.

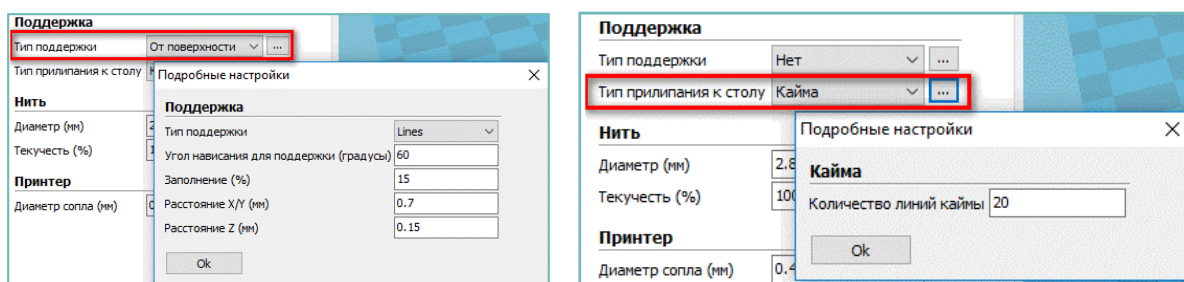


Рис. 68. Окна настроек поддержек и каймы

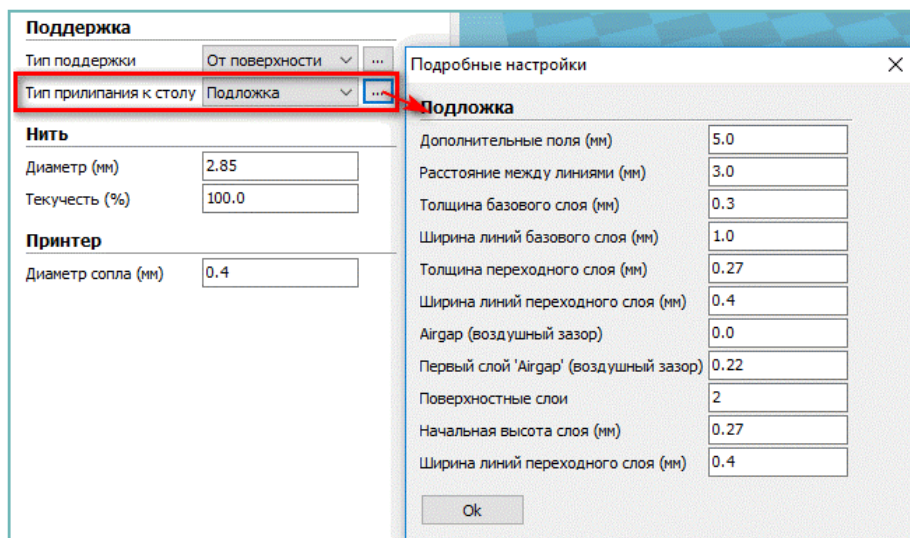


Рис. 69. Окно настроек подложки

Вкладка продвинутых настроек содержит [31, 32]:

- «Откат» со «Скоростью» (мм/с) и «Расстоянием» (мм). Для большинства настольных принтеров они определены по умолчанию 40 мм/с и 4,5 мм, соответственно;
 - высоту первого слоя, от которой зависит статичность положения модели на столе – чем толще слой, тем лучше адгезия. Оптимальным значением является 0,3 мм;
 - «Ширина линий переходного слоя» (мм) определяет экструзию первого слоя;
 - «Обрезать объект снизу на» (мм) позволит срезать деталь в сцеплении ее основания с рабочим столом или подложкой;
 - «Скорость перемещения» (мм/с) – движение печатающей головки вне зоны печати детали, которое рекомендуется выбрать равной скорости печати самой детали, во избежание вибраций при резком ускорении головки и подвижного рабочего стола;
 - «Скорость печати первого слоя» (мм/с) зависит печати основания детали, и значение 20-40 мм/с считается оптимальным для большинства настольных принтеров;
 - «Скорость заполнения» (мм/с) регулирует печать структур внутри детали. При 0,0 мм/с она будет равной скорости печати остальных частей детали;
 - «Скорость печати внутренней границы» (мм/с) и «Скорость печати внешней границы» (мм/с) регулируют скорость печати внешней и внутренней оболочек.
 - «Охлаждение» – охлаждения слоев пластика, кроме слоев основания детали. При использовании пластиков с повышенной усадкой обдув отключается, чтобы избежать расслоений. Для PLA и PETG обдув необходим для снижения брызг и нитей пластика.

Рядом с данными вкладками расположен раздел «Start/End-GCode» с отображением УП для загрузки в принтер, автоматически сгенерированной слайсером

по внесенным параметрам (рис. 70). Начало и окончание УП обозначается «start.gcode» и «end.gcode».

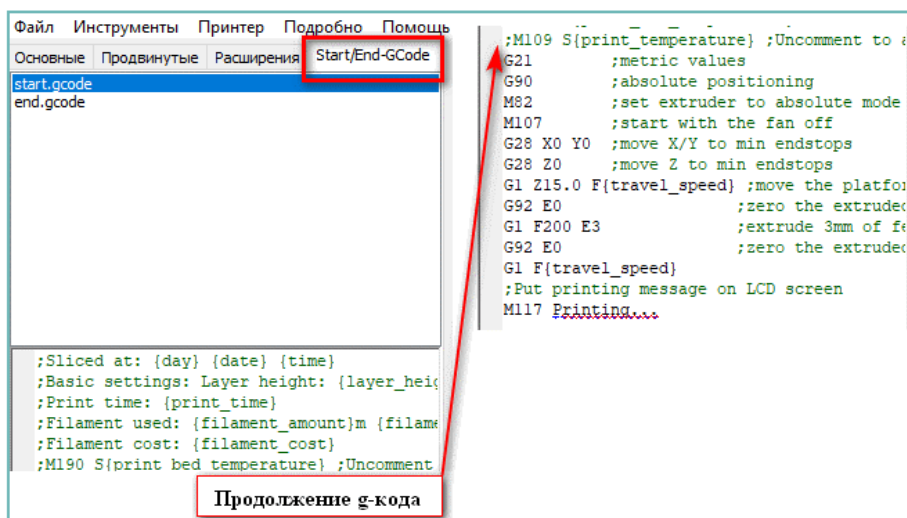


Рис. 70. Фрагмент сгенерированной слайсером УП для загрузки в принтер

Загружаем подготовленный .stl-файл в слайсер одним из трех способов: а) открыть «Файл» и выбрать «Загрузить файл модели...»; б) воспользоваться иконкой в левом верхнем углу области; в) перенести файл в виртуальную область, имитирующую рабочий стол. Во всех трех случаях деталь появляется в центре области печати, но может быть перемещена в требуемое место захватом левой кнопкой мыши.

После загрузки файл может иметь положение, при котором печать невозможна без поддержек, что отрицательно влияет на шероховатость поверхностей. Проверим, указав «От поверхности» в «Тип поддержки» и добавив кайму. В правом верхнем углу области нажимаем на иконку «Виды» и выбираем последнюю команду с обозначением слоев. В этом режиме траектория подвода и отвода печатающей головки обозначена синим цветом, а деталь отображается с каймой и установленными поддержками (рис. 71, 72). Показано, что нижняя часть детали и крепежные отверстия строятся поверх поддержек.

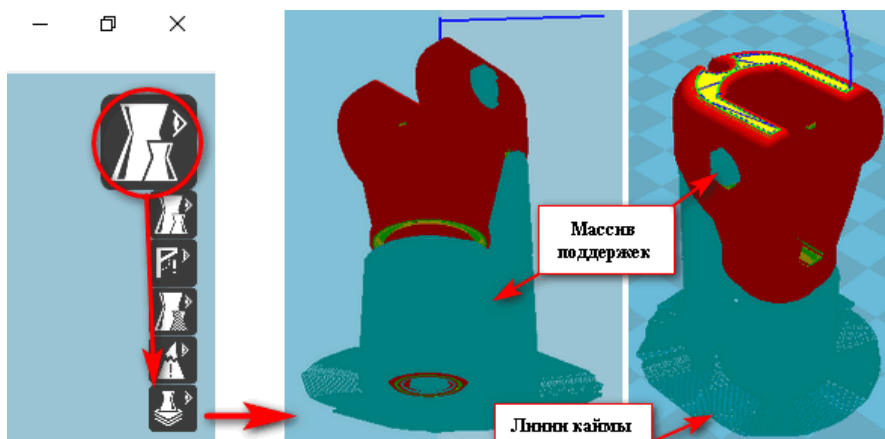


Рис. 71. Переход к симуляции построения слоев

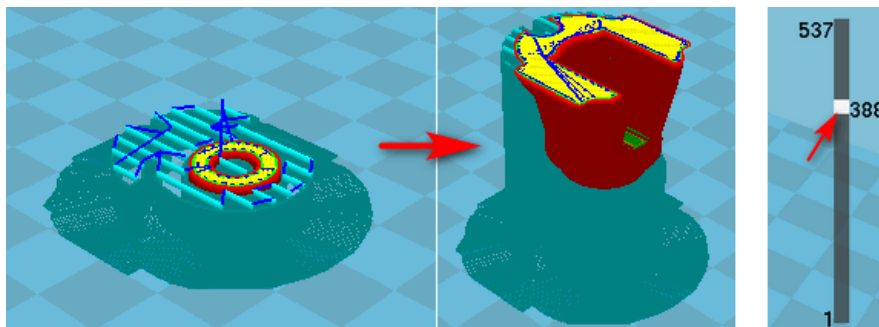


Рис. 72. Симуляция построения слоев через движение флажка

Изменим положение детали с помощью функции поворота внизу области. Если функция не активна, то выделим деталь левой кнопкой мыши. При нажатии на иконку поворота деталь оказывается внутри системы плоскостей (рис. 73, слева). Захватывая одну из плоскостей, вращаем деталь на нужный угол. Повторно установим поддержки и кайму и проверим результат через визуализацию (рис. 73, справа). Теперь поддержки размещены только внутри детали. Перед запуском печати введем все требуемые значения параметров. Скорость печати и перемещений укажем одинаковой. После ввода, слайсером отобразятся ориентировочное общее время печати в часах, расход материала в метрах и граммах (рис. 74, слева) [31].

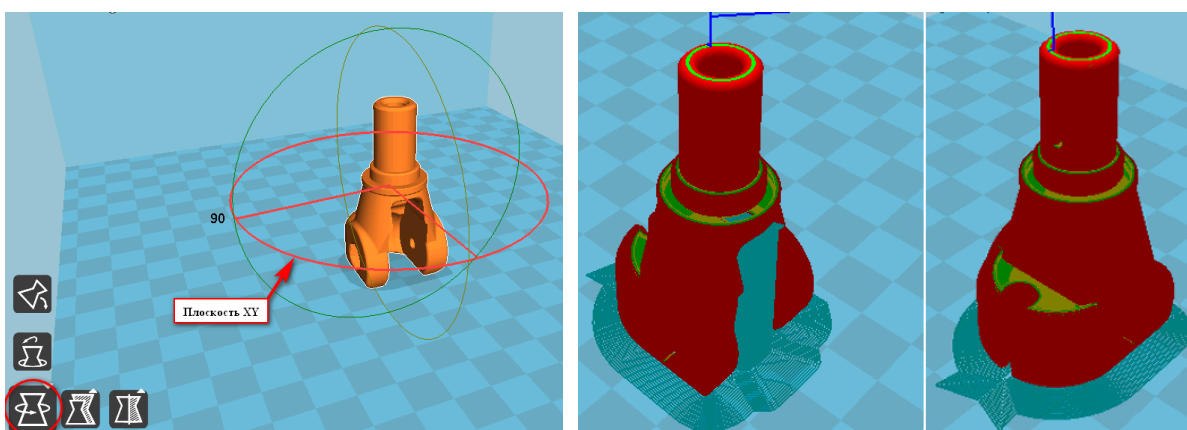


Рис. 73. Изменение положения детали для снижения количества поддержек

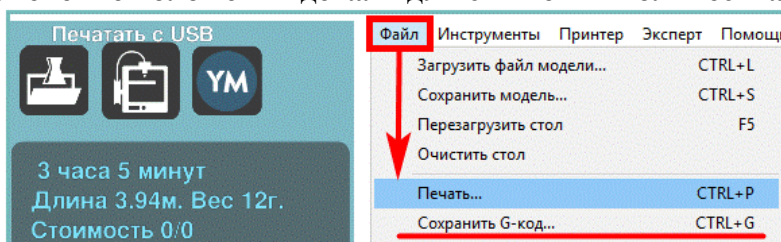


Рис. 74. Данные о печати и варианты загрузки УП через USB-порт на SD-карту

Подготовка к печати заканчивается отправкой УП в принтер при помощи иконки «Печатать с USB» или функции «Печать» во вкладке «Файл» (рис. 74, справа). В случае отключения COM-порта появится значок SD-карты, через который на карту сохраняется сгенерированная УП. Ее также можно сохранить через функцию «Сохранить G-код». Если USB-соединение с принтером настроено правильно, то откроется окно «Печать COM...» (рис. 75). Активируется клавиша

«Печатать» для подтверждения запуска. По мере выполнения печати в окне за-полняется нижняя шкала [31].

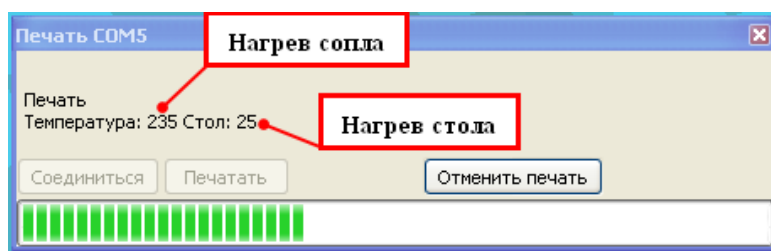


Рис. 75. Окно запуска печати через USB-порт [31]

5.11. Рекомендации по выбору параметров печати

Каждый пользователь принтеров сталкивается с необходимостью печати деталей с различными габаритными размерами и требованиями к качеству поверхностей. Использовать только одни значения параметров печати не представляется возможным, а необходимые подбираются под каждую деталь индивидуально. Значения температуры, ранее приведенные в табл. 2, оказывают непосредственное влияние на результат, но требуется учитывать и «Диаметр отверстия сопла», «Высоту слоя», «Скорость печати». По требованию к качеству изготовления, детали можно разделить на две категории [26]:

- повышенной точности. К ним относятся детали малых размеров (до 40x40x40 мм) и имеющие большое количество выступающих элементов: тумблеры, зубчатые колеса, упоры. Также в эту категорию входят модели для литья, которые не подразумевают постобработку. Данные изделия целесообразно печатать из ABS, PETG и Nylon, по причине лучшего воспроизведения ими малых элементов, по сравнению с PLA. Так, используется сопло экструдера с отверстием 0,3-0,5 мм, а высота слоя выбирается ~ 0,06-0,2 мм. Детали, подвергаемые нагрузке, рекомендуется печатать с заполнением 90 % (при 100 % возможна переэкструзия). Остальные параметры подобраны опытным путем в (рис. 76) в процессе внедрения печати на Ярославском ЭРЗ;

- детали с размерами более 100x100x100 мм, выполняющие декоративную, крепежную или защитную функции (облицовочные панели, пластины и корпуса приборов). Подобные изделия могут подвергаться постобработке, что допускает большую шероховатость поверхности, но меньшее время печати. Выбирается сопло с отверстием 0,8 мм, высота слоя от 0,15 мм, а % заполнения – согласно требованиям к прочности (рис. 77). Отметим, что примеры по настройке печати не являются универсальными для всех видов деталей и типов пластиков от различных производителей, но могут использоваться в качестве ориентира [26].

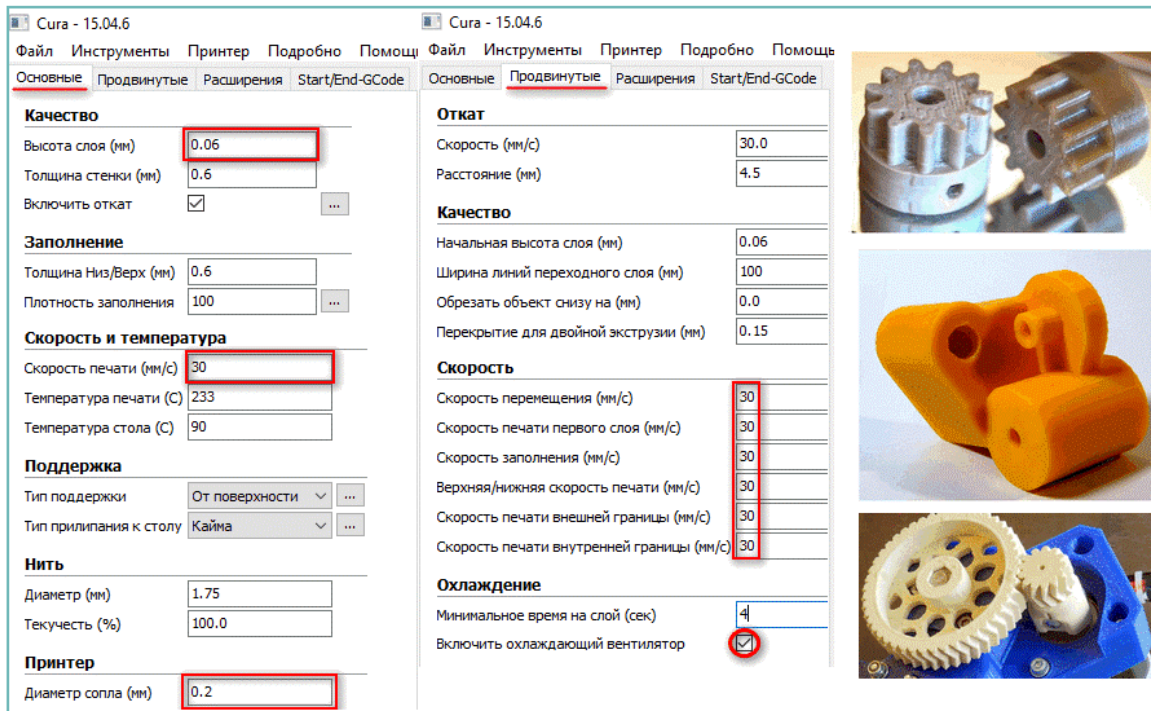


Рис. 76. Параметры печати для малогабаритных деталей повышенной точности [26]

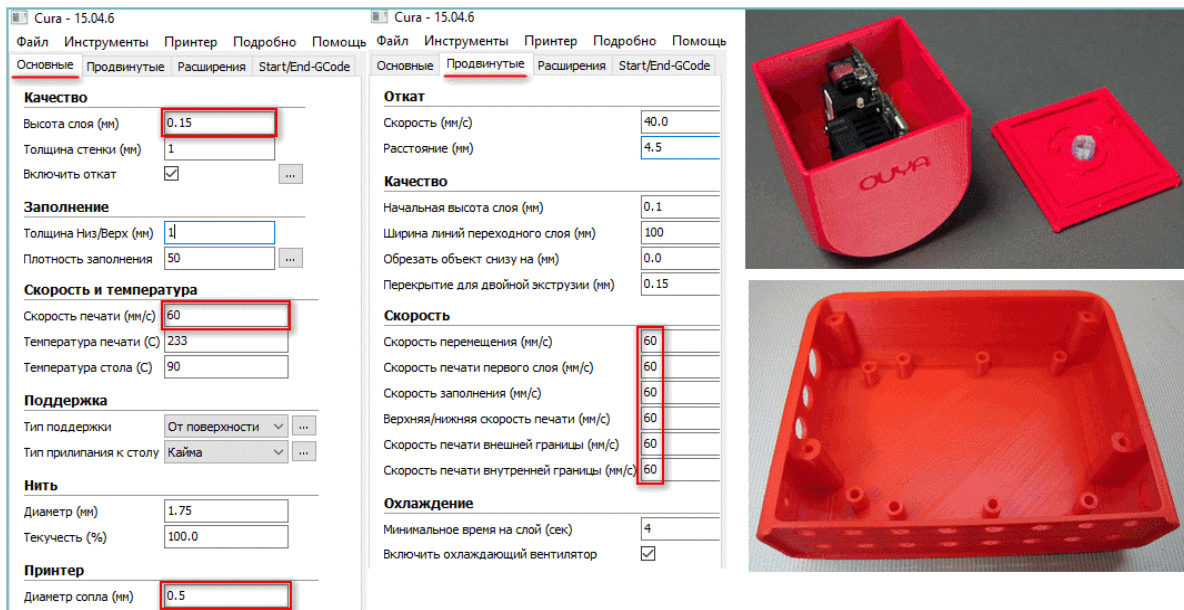


Рис. 77. Параметры печати для корпусов приборов и пластинчатых деталей [26]

Список использованных источников

1. **Рафиков, Р.Х.** Об импортозамещении компонентов локомотивов / Р.Х. Рафиков, С.А. Горюнов, Г.А. Гелашвили, М.А. Сивов // Компьютерно-интегрированные технологии в машиностроении: проблемы и перспективы: 26 мая 2022 г., Ярославль: сб. материалов Всероссийской научно-практической конференции. – Ярославль: Изд-во ЯГТУ, 2022. – 123 с. – 1 CD-ROM. – Текст: электронный. – С. 104.
2. Распоряжение Правительства РФ от 17 августа 2017 г. № 1756-р.– URL: <https://www.garant.ru/prod-ucts/ipo/prime/doc/71646240/?ysclid=1f477xd7pc425251975>.
3. **Рафиков, Р.Х.** Изготовление деталей и узлов тягового подвижного состава с применением технологий 3D-печати в условиях сервисных и локомотиворемонтных предприятий / Р.Х. Рафиков, Е.И. Елисейкин, В.А. Изотов, М.В. Канищев, Г.А. Гелашвили // Транспорт: проблемы, идеи, перспективы : сб. тр. LXXXI Всерос. научно-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых. – СПб.: ПГУПС, 2021. – С. 38-42.
4. От падения к росту. Тренды металлургического и литейного рынка России 2022-2023 годов. – URL: <https://www.sltgroup.ru/articles/ot-padeniya-k-rostu-trendy-metallurgicheskogo-i-liteynogo-rynka-rossii-2022-2023-godov/?ysclid=1f4d01-ayjz671227565>.
5. Новиков, С.В., Рамазанов К.Н. Аддитивные технологии: состояние и перспективы : учебное пособие [Электронный ресурс] / С.В. Новиков, К.Н. Рамазанов. –Уфа: УГАТУ, 2022. – С. 16.
6. Wohlers Associates, powered by ASTM International, and America Makers to Offer Design for Additive Manufacturing Course. – URL: <https://newsroom.astm.org/wohlers-associates-powered-astm-international-and-america-makes-offer-design-additive-manufacturing>.
7. **Осипов, Д.В.** Применение методов конечных элементов при изготовлении изделий при помощи аддитивных технологий / Д.В. Осипов, П.Ю. Иванов, А.С. Ковшин, В.В. Пахомов // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2022. – № 4 (76). – С. 162-172. – DOI 10.26731/1813-9108.2022.4-(76).162-172.
8. ISO/ASTM 52900-2021 Additive manufacturing - General principles - Fundamentals and vocabulary. – URL: <https://cdn.standards.iteh.ai/samples/74514/57d795-b6267a427899d7b351598bece2/ISO-ASTM-52900-2021.pdf>.
9. **Ху, Y.** The boom in 3d-printed sensor technology. Sensors / Y. Xu, X. Wu, X. Guo, B. Kong, M. Zhang, X. Qian, S. Mi, W. Sun. – Basel, Switzerland. – 2017. – 17(5): 1166. DOI: 10.3390/317051166.
10. Технологии 3D-печати. Что выбрать 3D печать металлом или 3D-печать пластиком? Технологии 3D принтеров FDM VS SLA VS SLM. – URL: <https://3dtool.ru/stati/tehnologii-3d-pechat-hto-vybrat-3d-pechat-metallom-ili-3d-pechat-plastikom-tehnologii-3d-printer/>.
11. Redwood, B. The 3D printing hand-book: Technologies, desing and applications / B. Redwood, F. Schöffner, B. Garret. – Amsterdam: 3D Hubs B.V., 2017. – 301 p.

12. **Гибсон, Я.** Технологии аддитивного производства. Трёхмерная печать, быстрое прототипирование и прямое цифровое производство / Я. Гибсон., Д. Розен, Б. Стакер. – М.: ТЕХНОСФЕРА, 2016.
13. Утвержденные стандарты в области аддитивных технологий – URL: <https://viam.ru/uproject>.
14. ГОСТ Р 57558-2017/ISO/ASTM 52900:2015. Аддитивные технологические процессы. Базовые принципы. Часть 1. Термины и определения. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200146332/titles>.
15. **Абрамов, И.В.** Центры аддитивных технологий - драйверы цифровой трансформации экономики / И.В. Абрамов, В.И. Абрамов // Вопросы инновационной экономики. – 2022. – Т. 12, № 3. – С. 1325-1344. – DOI: 10.18334/vines.12.3.115107. С. 1328-1336.
16. 3D печать запасных частей. Инновационная система аддитивного производства. – URL: https://railall.ru/parts_unbx/.
17. На Ярославском электровагоноремонтном заводе им. Б.П. Бещева запущен проект по освоению технологии 3D-печати. – URL: <https://ltps.data-linecentre.ru/about/branches/1545/?info=newsdetail&newsid=3520>.
18. Технолог Оренбургского ЛРЗ стал победителем II Всероссийского конкурса «3D-технологии: будущее российских локомотивов». – URL: <https://erz.datalinecentre.ru/about/branches/1540/?info=newsdetail&newsid=3686>.
19. 3D-технологии в транспортном машиностроении: опыт «Трансмашхолдинга». URL: https://www.youtube.com/watch?v=_Ap3r4nJyHQ.
20. ТМХ-Медиа. Профессии на вес золота. – URL: <https://tmholding.ru/media/article/8012.html>.
21. **Елисейкин, Е.И.** Используя технологию 3D-печати / Е.И. Елисейкин, В.А. Изотов, Р.Х. Рафиков // Железнодорожный транспорт. – 2022. – № 8. С. 51-55.
22. Электропоезда «Сапсан» будут ремонтировать с использованием 3D-печатных запчастей. – URL: <https://3dtoday.ru/blogs/news3dtoday/elektropoezda-sapsan-budut-remontirovat-s-ispolzovaniem-3d-pechatnykh-zapchastey>.
23. 3D 3D-Druck auf der Schiene Verfügbarkeitssteigerung durch gedruckte Ersatzteile AM-Symposium Hannover Messe. – URL: <https://docplayer.org/56201396-3d-druck-auf-der-schiene-verfuegbarkeitssteigerung-durch-gedruckte-ersatzteile-am-symposium-hannover-messe.html>.
24. Application Spotlight: 3D Printing in the Rail Industry. – URL: <https://amfg.ai/2019/10/15/application-spotlight-3d-printing-in-the-rail-industry/>.
25. **Елисейкин, Е.И.** Повышение эффективности КТПП за счет использования быстрого прототипирования: диссертация магистранта 15.04.05. – Ярославль, 2019. – С. 9. URL: https://studylib.ru/doc/6300553/povyshenie-e-ffektivnosti-ktpp-zaschet-ispol_zovaniya-bystro
26. Baltic3D customer applications range from transportation and aerospace URL: <https://www.baltic3d.eu/case-studies>.
27. **Елисейкин, Е.И.** Комбинированный способ изготовления модельной оснастки / Е.И. Елисейкин, В.А. Изотов // Заготовительные производства в машиностроении. – 2023. – Т. 21, № 4. – С. 147-150. – DOI: 10.36652/1684-1107-2023-21-4-147-150.

28. **Елисейкин, Е.И.** Изготовление технологической оснастки в локомотиворемонтном производстве с применением FDM/ FFF 3D-печати / Е.И. Елисейкин, В.А. Изотов // I Международной научно-практической конференции «Наука 1520 ВНИИЖТ: Загляни за горизонт»: сб. докладов / под ред. О. Н. Римской. – М.: АО "ВНИИЖТ", 2021. – С. 101-103.

29. **Елисейкин, Е.И.** Изготовление нестандартных приспособлений в локомотиворемонтном производстве с применением FDM/ FFF 3D-печати / Е.И. Елисейкин, Р.Х. Рафиков, В.А. Изотов, В.Ф. Бойцов // Машиностроительные технологические системы : сб. трудов Международной научно-технической конференции / под редакцией В.А. Лебедева ; Донской государственной технической университет. – Текст: электронный. – Ростов-на-Дону: ДГТУ, 2022. – 503 с. – URL: <https://ntb.donstu.ru/content/2022282>. – ЭБС ДГТУ. – Загл. с экрана. С. 69-72.



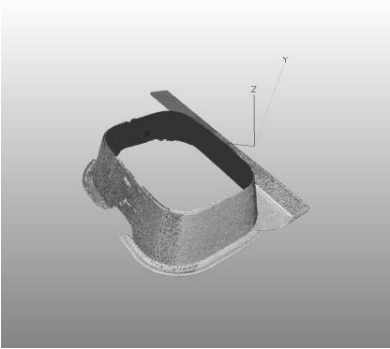
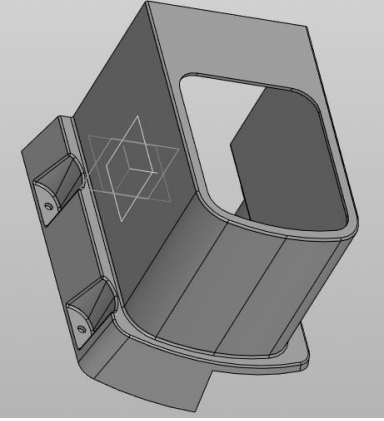
30. Быстрое прототипирование с использованием 3D-принтера Mz3d-256 / Сост.: О.Н.Калачев., Е.И.Елисейкин – Ярославль: Издат. дом ЯГТУ, 2019. – 30 с.

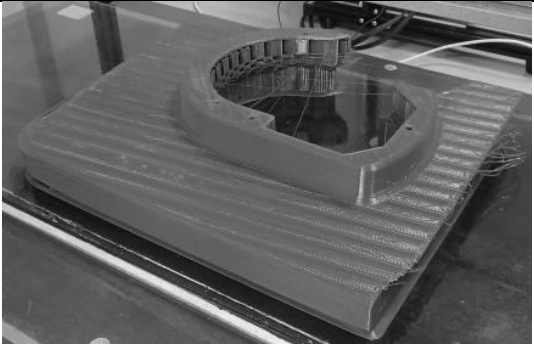


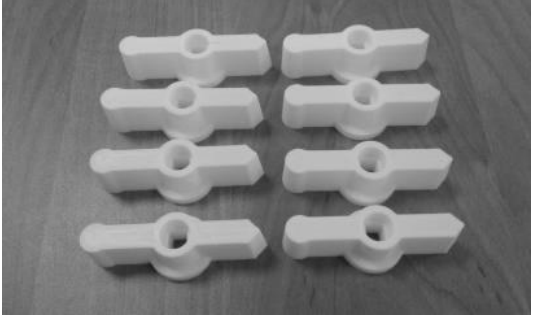

31. **Елисейкин, Е.И.** Влияние особенностей подготовки цифровой модели на качество поверхностей изделия в FDM 3D-печати / Е.И. Елисейкин, О.Н. Калачев // Всероссийский научно-практический семинар с международным участием «Актуальные проблемы автоматизации и энергосбережения в ТЭК России»: сб материалов (Нижевартовск, 6 апреля 2018 года) / отв. ред. А.Ю. Ковалев. Нижевартовск: Изд-во Нижеварт. гос. ун-та, 2018. – 186 с. - С. 120-123.


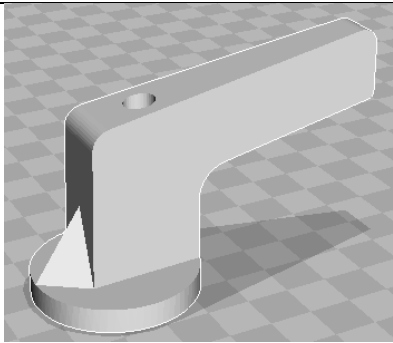
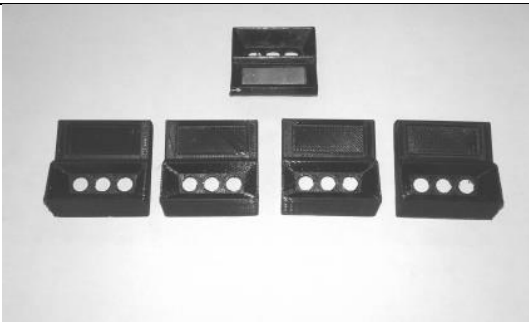


32. **Калачев, О.Н.,** Малашин К.Д., Поздняков И.В., Никитин П.В. Опыт применения аддитивных технологий при реверс-инжиниринге деталей насоса низкого давления // Инновационное станкостроение, технологии и инструмент: материалы I Междунар. науч.-практ. конф., Гомель, 30 нояб. 2023 г. / М-во пром-сти Респ. Беларусь [и др.]; под общ. ред. М.И. Михайлова. – Гомель: ГГТУ им. П.О. Сухого, 2024. – 106 с., С. 90-92.



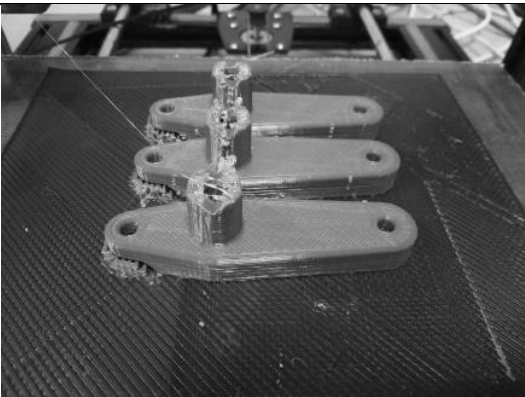
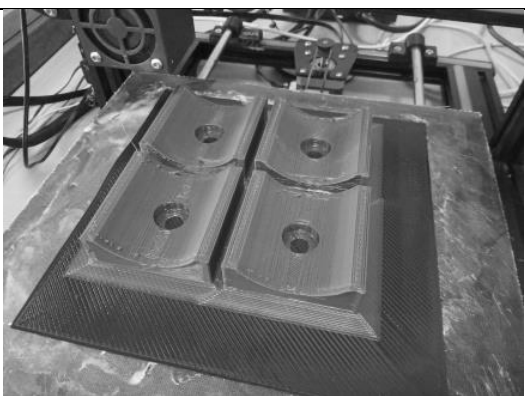
ПРИЛОЖЕНИЕ

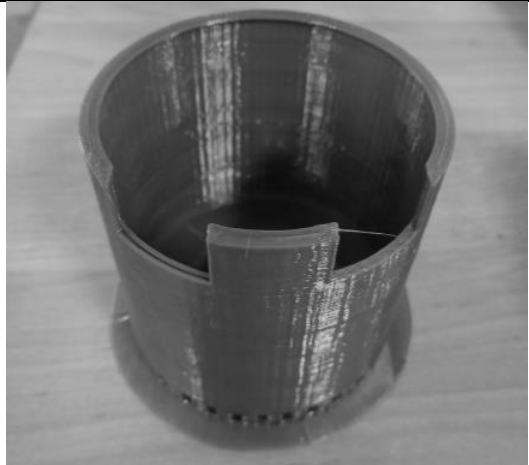
Каталог запчастей электровозов, технологического оборудования цехов, модельной оснастки и приспособлений, печатаемых на Ярославском ЭРЗ


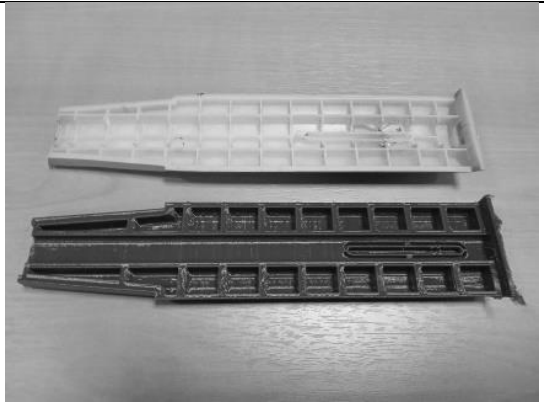
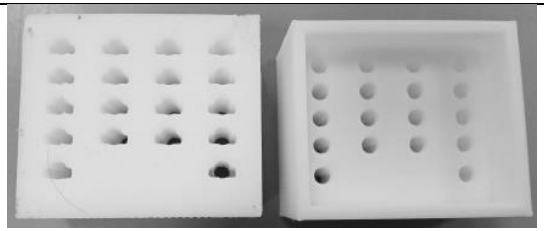
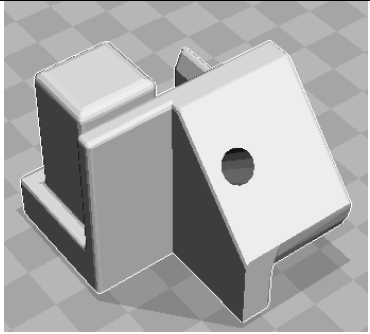
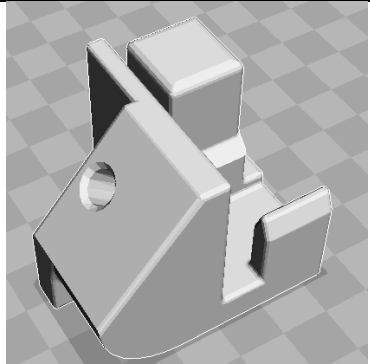
№	Наименование детали/ оснастки	Материал	Фотография
1	Кнопка КММ-31	PETG	
2	Кожух блока приборов	PETG	
3	Рамка окна кабины машиниста	PETG	
4	Кожух вспомогательного крана	PLA, PETG	

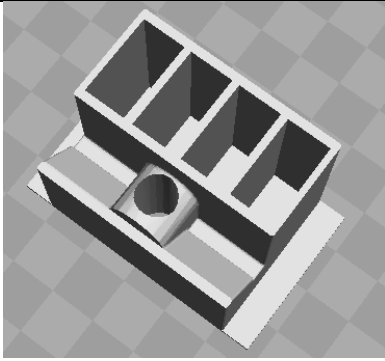



5	Панель съемная	PLA, PETG	
6	Крышка контроллера машиниста	PLA, PETG	
7	Крышка кнопки бдительности	PLA, PETG	
8	Ручка вентиляции кабины машиниста	PETG	
9	Ручка шкафа кабины машиниста	PLA	


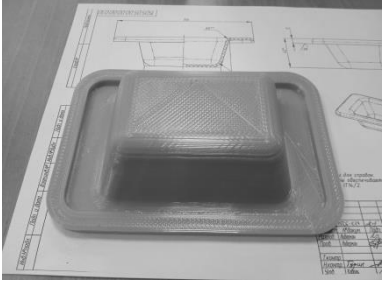

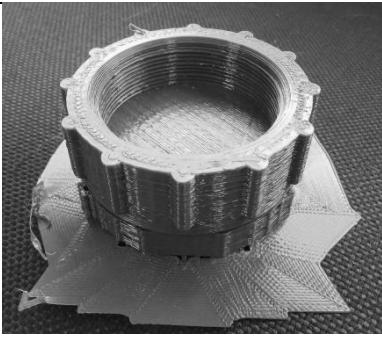

10	Тумблер ВИП-5600	PETG	
11	Тумблер	PLA, PETG	
12	Шайба	PETG	
13	Колпачок	PETG	
14	Рукоять	PETG	

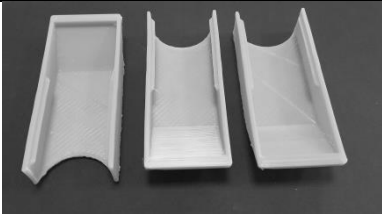
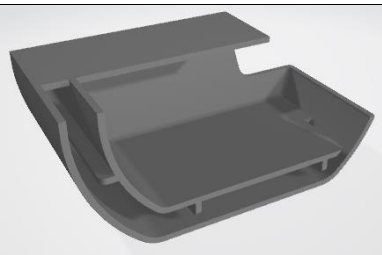
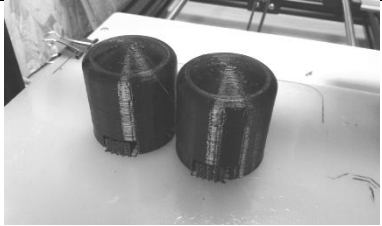



<p>15</p>	<p>Комплект: Распаечная коробка + крышка</p>	<p>PETG</p>	
<p>16</p>	<p>Крышка распаечной коробки (отдельно)</p>	<p>PETG, ABS</p>	
<p>17</p>	<p>Бегунок</p>	<p>PETG</p>	
<p>18</p>	<p>Вкладыш зеркала заднего вида ЭПМ</p>	<p>PETG</p>	

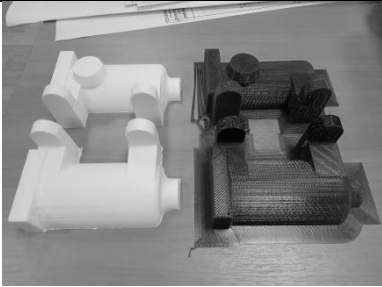
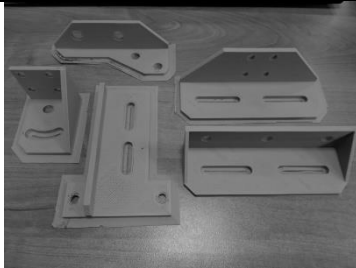


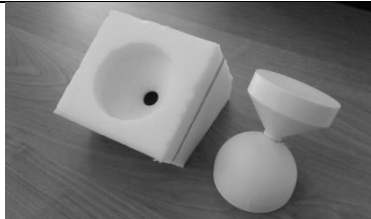


19	Обтекатель кронштейна зеркала ЭПМ	PETG	
20	Колпачок	PETG	
21	Крышка сигнализатора давления 112	PETG	
22	Крышка электроразъема «Хартинг»	PLA	


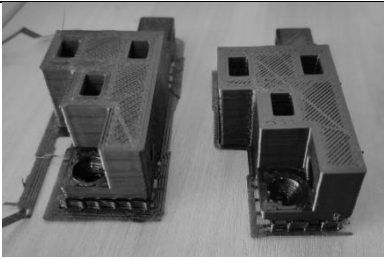


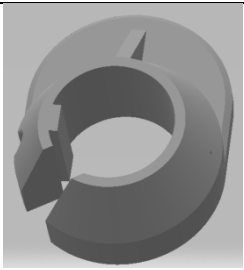
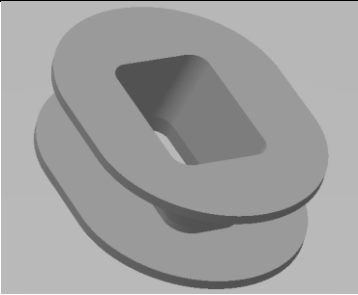
23	Плавник антенны радиостанции	PETG	
24	Накладка на шкаф в кабину машиниста	PETG	
25	Основание колодки ТРПУ-4	PLA	
26	Опора шкафа (левая)	PETG	
27	Опора шкафа (правая)	PETG	

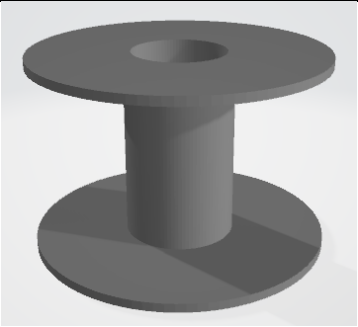

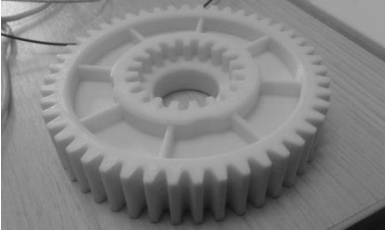
28	Держатель (левый)	PETG	
29	Держатель (правый)	PETG	
30	Пробка подшипникового щита ТЭД	PETG	
31	Крыльчатка вспомогательного электродвигателя серии АЭВ	PETG	
32	Крышка клеммной коробки 316-8	PETG	

33	Клеммная коробка токосъемного устройства	PETG	
34	Крышка маневровой кнопки	PETG	
35	Упор трубки радиостанции	PETG	
36	Пробка розетки черт. ТЭП60.70.03.172	PETG, PLA	
37	Шайба пружины кронштейна	PETG	

38	Заглушка ручки	PETG	
39	Заглушка механизма подъема шторки	PETG	
40	Головка	PETG	
41	Мастер-модель отливки корпуса электропневм. вентиля	ABS, PETG, PLA	
42	Мастер-модель отливки таблички маневрового тепловоза ТЭМ31М	PLA	
43	Мастер-модель отливки крышки клапана	PLA	

44	Мастер-модель отливки пневматического цилиндра	PLA, PETG	
45	Стойка крепления датчика частоты вращения вала ТЭД	PLA	
46	Мастер-модель изолированной катушки электропневм. вентиля и силиконовая форма для изолировки	PLA, силикон	
47	Комплект: мастер-модели цифр «2», «4», «5» номера локомотива	PETG	
48	Гибкое приспособление для изолировки головок болтов полюсов ТЭД ЭД-118А, Б и его мастер-модель	PLA, силикон	
49	Крыльчатка электродвигателя 1 цехового оборудования	PETG, PLA	
50	Крыльчатка электродвигателя 2 цехового оборудования	PETG	

51	Лапка электродвигателя цехового оборудования	PETG	
52	Щеткодержатель электродвигателя крана тельфера цеха	PETG	
53	Щеткодержатель электродвигателя токарно-карусельного станка	PETG	
54	Регулятор высоты штатива лазерного измерителя BOSCH	PETG	
55	Шайба для направляющей термопресса табличек	PETG	
56	Остов катушки для трансформатора мостового крана	PETG	

57	Остов катушки для пульта испытательной станции	PETG	
58	Фишка тельфера	PETG	
59	Зубчатое колесо 1 привода цехового оборудования	PETG	
60	Зубчатое колесо 2 привода цехового оборудования	PETG	