



ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВА-
ТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«НИЖЕГОРОДСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АРХИТЕКТУРНО-
СТРОИТЕЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

ПРОГРЕССИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ДЕТАЛЕЙ ВЫСОКОЙ СЛОЖНОСТИ

Учебное пособие

Нижний Новгород
2025

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
«Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет»

ПРОГРЕССИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ДЕТАЛЕЙ ВЫСОКОЙ СЛОЖНОСТИ

Утверждено редакционно-издательским советом университета
в качестве учебного пособия

Нижний Новгород
ННГАСУ
2025

УДК 69.002.5:539.4 (075.8)
П 78
ББК 38.6-5

Рецензенты:

А. А. Хлыбов – д-р техн. наук, профессор, зав. кафедрой Материаловедение, технологии металлов и термическая обработка металлов ФГБОУ ВО «НГТУ им. Р.Е. Алексеева»

Л. А. Коневцов – канд. техн. наук, научный сотрудник лаборатории Композиционные материалы ФГБУН «Институт материаловедения» Хабаровского научного центра Дальневосточного отделения Российской академии наук

Пронин, А. И. Прогрессивные технологии изготовления деталей высокой сложности : учебное пособие / А. И. Пронин, В. В. Мыльников, О. Б. Кондрашкин, В. Е. Лыгин ; Министерство образования и науки Российской Федерации, Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет. – Нижний Новгород : ННГАСУ, 2025. – 88 с. – ISBN 978-5-528-00606-2. – Текст : непосредственный.

В учебном пособии представлена методика проведения конструкторско-технологической подготовки производства с применением CAD/CAE/CAM модулей и применена аддитивная технология создания детали на 3D принтере. Представлен алгоритм проектировочного расчета конструкции детали с использованием метода топологической оптимизации. Показан вычислительный эксперимент в задачах динамики и прочности деталей высокой сложности с применением расчетов в CAE-системах. Учебное пособие предназначено для студентов ННГАСУ направления 13.03.01. – «Теплоэнергетика и теплотехника» (программа бакалаврской подготовки) по дисциплине «Динамика и прочность машин» и КнАГТУ направления 15.03.01 – «Машиностроение» (программа бакалаврской подготовки) по дисциплине «Прогрессивные методы обработки поверхностей», «Аддитивные технологии» и направления 15.04.05 – «Машиностроение» очной формы обучения по дисциплине «Прогрессивные технологии изготовления деталей высокой сложности».

ISBN 978-5-528-00606-2

© Коллектив авторов, 2025
© ННГАСУ, 2025

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	5
1. АДДИТИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ.....	6
1.1. Распространение аддитивных технологий в России	6
1.2. Возможности оборудования аддитивного производства.....	8
1.3. Материалы, применяемые в аддитивных технологиях	13
1.4. Аддитивное производство и его отличие от традиционных технологий	14
1.5. Общие выводы о возможностях применения АТ в России	18
2. ТОПОЛОГИЧЕСКАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ ДЕТАЛИ.....	21
«КРОНШТЕЙН»	21
2.1 Исходные данные для перепроектирования.....	22
2.2. Параметры для топологической оптимизации.....	24
2.3. Программные модули для топологической оптимизации	24
2.4. Статический анализ исходной геометрии	25
2.5. Топологическая оптимизация в Solid Edge St10	32
3. РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ДЕТАЛИ «КРОНШТЕЙН»	50
3.1. Подбор оборудования и материала	50
3.2. Подготовка модели в слайсере CURA	57
3.3. Генерация G-кода	69
3.4. Подготовка модели в слайсере CURA	71
4. РАСЧЕТ ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ЦЕЛЕСООБРАЗНОСТИ	75
3D-ПЕЧАТИ	75
4.1. Расчет стоимости изготовления детали методом 3D-печати	75
4.2. Расчет стоимости изготовления детали методом литья.....	79
4.3. Итоговое сравнение экономических затрат.....	80

ЗАКЛЮЧЕНИЕ	82
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК	84

ВВЕДЕНИЕ

Аддитивные технологии (АТ) являются видом передовых технологических инноваций, находящихся в настоящее время в стадии активного внедрения в машиностроении. Основное отличие АТ от традиционных технологий заключается в самом способе производства. Изделие создается путем послойного наращивания материала в нужных местах на основе компьютерной 3D-модели. Если первые аддитивные системы производства работали главным образом с полимерными материалами, то сегодня 3D-принтеры в аддитивном производстве (АП) способны работать не только с полимерами, но и с инженерными пластиками, композитными порошками, различными типами металлов.

3D-печать с использованием различных типов металлов применяется в таких отраслях промышленности, как машиностроение, авиакосмическая и автомобильная, в энергетике, кораблестроении, медицине и т.д. Для машиностроения одним из главных преимуществ использования АТ можно считать создание объектов сложной конфигурации, которые не могут быть изготовлены с помощью традиционных технологий литья, штамповки и т.д.

Металлическую печать выбирают в том случае, когда конструкция детали сложная или получена в результате топологической оптимизации (ТО) конструкции детали, изготавливаемой по традиционной технологии, или это сложное изделие с объединением в единое целое нескольких элементов сборочного узла.

АТ, обеспечивающие новые возможности для конструирования изделий с заданными свойствами и геометрией, получили широкое признание в наиболее передовых отраслях промышленности и странах мира, имеют достаточную базу для развития в РФ и нуждаются в совершенствовании.

вании, распространении, популяризации и изучении. АП применяют там, где высокая стоимость изделия оправдана их уникальными потребительскими свойствами: сложная конструкция изделий с трудностями изготовления традиционными методами; не слишком ответственная область применения; мелкосерийное или единичное производство, как в авиастроении; возможно уменьшение массы изделий и количества деталей конструкции.

Важным моментом внедрения АТ в существующие производства с максимальной эффективностью является оптимизация конструкции производимых деталей с использованием ТО, сетчатых структур, с облегчением конструкции, объединением узлов и сокращением количества деталей, с увеличением жизненного цикла производимой детали при соблюдении всех преимуществ АП.

В данной работе мы рассмотрим возможность внедрения АТ при производстве деталей высокой сложности с использованием методов топологической оптимизации.

1. АДДИТИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

1.1. Распространение аддитивных технологий в России

Изучению АТ посвящены многие исследования. Например, данное понятие подробно представлено в пособии для инженеров А. Зленко [1], где изучены их классификации и описаны сферы применения данного вида методов и инструментов. Ценность данного пособия заключается в том, что специалисты найдут в нем целостные идеи по поводу конкретного применения технологических приемов в той или иной сфере экономики, например, для изготовления отдельных деталей, применяемых на современных машиностроительных производствах.

В работе А.Н. Чемодурова [2] проведен анализ преимуществ и недостатков современных АТ. Автор уделяет особое внимание технологии послойного лазерного сплавления (selective laser melting - SLM), которая нашла широкое применение в зарубежных производствах и не используется в российском серийном производстве.

Следует отметить, что, несмотря на большой объем научной литературы, посвященной применению на практике технологии послойного синтеза, для российского государства сохраняет остроту проблема их применения на отечественных предприятиях. Изучение основных причин, сдерживающих в настоящее время активное внедрение АТ в отечественном авиастроении, широко представлено в работе М.В. Тилинина [3].

Автор исследует все технологии с точки зрения производства именно металлических деталей конструкции воздушных судов, т.е. отрасли, которая активно развивается на протяжении уже продолжительного времени и от уровня которой зависит не только развитие авиастроения российской экономики, но и государственная безопасность Российской Федерации.

Следует оговориться, что в отечественном авиационном двигателестроении есть примеры послойного синтеза опытных образцов готовых изделий – основных элементов газотурбинных двигателей, таких как лопатки и цельные рабочие колёса турбин, камеры сгорания. Однако в производстве самолётов и вертолётов АТ если и применяются, то в основном при изготовлении технологической оснастки для изготовления элементов конструкции со сложной геометрией поверхности – штампов, пресс-форм и т. п.

Примеры же непосредственного послойного синтеза элементов конструкции крайне редки и ограничиваются изготовлением аналогов сварных элементов топливной и гидравлической систем, элементов интерьера и других неотчетливых деталей.

Авторы В.П. Перевертов и др. указывают, что успех любого производства и экономики РФ в целом зависит от ключевых факторов, но прежде всего, это гибкость и скорость внедрения инноваций. В этом смысле «умным» средам принадлежит особая роль: они выполняют функцию каркаса, на который в ближайшем будущем будет крепиться и тем самым обеспечивать новое качество продукции не только сама промышленность, но и транспортная и энергетическая инфраструктура [4].

В целом значительная часть аналитиков сходится во мнении, что технологический и промышленный потенциал внедрения АП в РФ пока недоиспользован. Актуализация этого потенциала, подкрепленного государственной поддержкой, имеет шансы поставить Россию в ряд лидеров по качественным показателям использования, внедрения, а также производства и экспорта передовых АТ, материалов и оборудования.

Аналитики считают, что российский рынок АТ в потенциале по мере общей реиндустриализации, цифровизации и повышения доли промышленности и в первую очередь машиностроения в экономике может стать одним из мировых лидеров как по объемам, так и по технологическому развитию. Однако в настоящий момент сохраняется целый ряд проблем. Так, например, внедрение комплектующих, изготовленных с использованием АТ, сдерживается их несоответствием отраслевым стандартам. Механические свойства отдельных материалов не позволяют использовать их в авиационной промышленности.

1.2. Возможности оборудования аддитивного производства

Развитие АТ в России предполагает, прежде всего, наличие необходимого современного оборудования, удовлетворяющего потребности рыночного спроса на данную продукцию.

Обсуждая оборудование, необходимое для развития АП в России, исследователи сходятся во мнении, что изначально оборудование для АП позволяло изготавливать лишь прототипы изделия. Однако сейчас производятся заготовки и готовые изделия, работающие в конечных узлах и устройствах. На основании этого делается вывод, что дальнейшее развитие должно быть направлено на совершенствование оборудования для обеспечения надёжности и повторяемости свойств изделий, требуемых промышленности.

В настоящее время в России бурно развиваются независимые производители промышленных 3D-принтеров, печатающих металлом, которые за основу взяли технологию SLM [5]. В том числе:

АО «Лазерные системы» разработало 3D-принтер M250 с рабочей площадью построения $250 \times 250 \times 250$ с изменением мощности лазера от 200 до 1000 Вт. Как важная опция заявлено, что принтер проводит вакуумирование металлического порошка перед началом работы. Принтер имеет собственное программное обеспечение (ПО) с системой контроля качества.

В 2020 году для нужд ПАО «Северсталь» был создан 3D-принтер M350 с рабочей камерой построения $350 \times 350 \times 350$ и двумя лазерами с возможностью перекрытия, работающими одновременно. Заявлено, что получена возможность регулировать свойства будущего изделия и выбирать в соответствии с геометрией детали различные технологические режимы печати и сплавы, задаваемые ПО.

AddSol — компания-стартап повторила созданный SLM Solutions малогабаритный 3D-принтер S90 с зоной построения $90 \times 90 \times 90$. Было продано несколько принтеров в образовательные учреждения [6].

3DLAM (ЗАО «Биоград») — компания производит 3D-принтеры по технологии SLM с цилиндрической зоной построения 90 – 100 мм и средний 3D-принтер с цилиндрической зоной построения 150 мм, высотой 220

мм, с программным обеспечением на базе ПО Materialise и Autodesk Netfabb. За счет небольшой стоимости было реализовано одиннадцать 3D-принтеров в частные компании РФ, из них девять с зоной построения 90–100 мм и два с зоной построения 150 мм [7].

3DSLA — компания–производитель 3D-принтеров по технологии SLM с цилиндрической рабочей камерой 170 мм, с программным обеспечением Triangulatica. Машины поставлены для стоматологических клиник. 3D-принтеры больших размеров являются коммерческим предложением [8].

Государственная компания «Лазеры и аппаратура» предлагает 3D-принтеры по технологии SLM и DMD. Разработаны и изготовлены 3D-принтеры с рабочими камерами построения 100×100×200 и 250×250×280. Также компания предлагает 3D-принтеры для наплавки порошковым материалом по технологии DMD с возможными рабочими платформами 400×400×400 и 600×400×400 с трех или пятикоординатной кинематической системой [9].

Компания «ТЭТА» производит оборудование для электронно-лучевой (EBM) наплавки и прямого выращивания в вакууме с использованием проволоки для АП с внутренними размерами вакуумной камеры 2500×2500×2500 мм [10].

Как мы видим, в РФ технология SLM (PBF — Powder Bed Fusion) является доминирующей в производстве металлических 3D-принтеров. Однако по данным Wohlers Report 2021 самым востребованным металлическим 3D-принтером в мире признан принтер HP Metal Jet, использующий «грин-технология» Binder Jetting. Производство подобных принтеров в РФ является сложным процессом по причине отсутствия разработанного связующего материала, который наносится на слой металлического порошка с последующим отверждением.

Мировым лидером по применению титановых сплавов Ti-6AL-4V в 3D-печати для аэрокосмической и медицинской промышленности являются 3D-принтеры GE Arcam, использующие технологию электронно - лучевого плавления металлического порошка в вакууме (EBM). В 2021 году уже более 10 мировых компаний объявили о выпуске порошковых установок по EBM-технологии. В самое ближайшее время ожидается значительный рост продаж за счет удешевления самих устройств и значительных усовершенствований технологии. В РФ технология EBM тоже востребована. В рамках импортозамещения был объявлен тендер на создание 3D-принтера по этой технологии, который выиграла компания–производитель титанового сплава Ti-6AL-4V АО «Композит» госкорпорации «Роскосмос».

Кроме оборудования, производимого компанией «ТЭТА», особо хочется отметить опытную установку EBM-наплавки в вакууме от компании «ТЕКСЕНТ».

Как видим, в производстве авиационно-космической техники проявляется повышенный интерес к применению АТ. Ведущие компании мира проводят широкий круг НИОКР в этой области. Появились промышленные образцы изделий АП, начат серийный выпуск ряда наименований деталей, прогнозируется расширение сферы их эффективного применения. Сдерживающими факторами являются высокие цены на материалы, оборудование, сложная и длительная процедура сертификации продукции.

Лазерная плавка металлов обретает все более важную роль в различных отраслях промышленности за счет более коротких производственных циклов, повышенной экономичности и практически неограниченной свободы дизайна. В то же время все более очевидными становятся и такие преимущества, как возможность изготовления более легких деталей под впечатлением от бионики.

При этом все чаще исследователи рассматривают возможность используемого в АП оборудования для нужд авиастроения. Обычно, когда говорят о серийном производстве, подразумевают количество, измеряемое тысячами или сотнями тысяч единиц.

Однако существует и другое серийное производство, измеряемое десятками или сотнями изделий. Таких изделий зачастую сложной геометрии, из специальных материалов достаточно много в авиационной промышленности, космической индустрии, энергетическом машиностроении, декоративном строительстве и ряде других отраслей.

И именно там возник интерес к АМ-технологиям (Additive Manufacturing), т.е. «непосредственному выращиванию» металлических изделий, в качестве альтернативы традиционным технологическим методам для производства не прототипов или опытных образцов, а вполне товарной продукции. Причем мотивацией здесь является не возможность создать что-то уникальное, с необычными свойствами, а экономическая целесообразность.

При этом стоит отметить важную черту: в ряде случаев при объективных расчетах реальных затрат АТ оказываются менее дорогостоящими, чем традиционные. По мнению главы отдела концептуального и технологического развития компании Airbus Питера Сандера, «в целом, компромиссы в конструкции самолетов недопустимы, особенно если учитывать, что наши аппараты эксплуатируются по тридцать лет. Самый ходовой процесс при создании самолетов – это сварка. Современное авиастроение хорошо знакомо с этой технологией. Разработаны современные технологии, создающие детали необходимой прочности с помощью сварки. Однако, когда на практике дело доходит до применения АП, следует признать, что опыта АП в этом направлении еще недостаточно, и необходимо очень

тщательно изучить все тонкости создания компонентов со сложной внутренней архитектурой».

Таким образом, сама идея использования оборудования, существующего в условиях АП, исследователями не отвергается окончательно, однако это обусловлено небольшим количеством научных исследований, посвященных данному вопросу.

1.3. Материалы, применяемые в аддитивных технологиях

Большое внимание в научной литературе уделено применению нержавеющей и легированной стали, а также современных, отвечающих необходимым требованиям сплавов для более полного удовлетворения потребностей российского производства, в том числе и авиапромышленному производству. Применение в качестве порошковых композиций для «непосредственного выращивания» металлических поверхностей позволяет заранее планировать основные характеристики изделия в соответствии с поставленными на практике задачами.

Основными российскими производителями металлических порошков для АП являются:

- АО «Полема» имеет производство металлических порошков мощностью 3000 тонн в год. На данный момент предприятие выпускает материалы импортных марок: 316L, РН-1, 17–4РН, Inconel 625, 718, 738, НХ, МР-1, а также ряд отечественных сплавов. Так как потребность российских пользователей АП небольшая, качество производимой продукции находится на среднем уровне [11];
- АО «СМК» производит металлические порошки жаропрочных и никелевых сплавов, титановых сплавов в защитной атмосфере. За счет использования в качестве исходного материала электрода, получаемого путем ваку-

умно-индукционной плавки с тонкой фильтрацией металла с последующим вакуумно-дуговым переплавом, фракционный состав гранул и низкое содержание газов обеспечивают высокое качество металлического порошка, но процесс является трудоемким, и, как следствие, цена на металлический порошок является высокой [12];

– АО «Композит» производит металлические порошки в интересах госкорпорации «Роскосмос». Техническое производство порошков жаропрочных, титановых и интерметаллидных сплавов с помощью вращающегося электрода с плазменным нагревом. Данное производство порошков является специализированным для космической промышленности и не используется сторонними организациями, цена на порошки за счет трудозатрат является высокой;

– Также металлические порошки производят ПАО «Русполимет» («Гранком») и АО «ЧМЗ».

При этом к существующим в настоящее время материалам предъявляются особые требования. Необходимо активнее усовершенствовать существующие в настоящее время АМ технологии, а также внедрять новые высокоэффективные технологии производства сплавов и порошков.

1.4. Аддитивное производство и его отличие от традиционных технологий

Когда еще не существовало АТ, а были только субтрактивные, то вопрос геометрии не стоял так остро и решался доступными способами. Топологическая оптимизация (ТО) позволяет изменить стандартную геометрию на геометрию, специально адаптированную под определенную технологию. Это может быть и традиционная технология (например, литье), и аддитивный процесс.

Аддитивное производство меняет способ изготовления деталей. Новые революционные оборудования и процессы быстро продвигают АП из среды прототипа на производственные цеха. Производители, применяющие технологии АП, реализуют проекты, которые невозможно было сделать, используя традиционные методы. Основной причиной является то, что аддитивные методы производства могут обеспечить экономию массы, улучшенную производительность, упрощенную сборку и больший выбор вариантов материалов [13].

Традиционные методы проектирования не используют преимущества таких новых технологий, как АП, а ведь они позволяют снять конструктивные ограничения и открывают новые возможности. Как правило, оптимальная конструкция детали предусматривает сложную, «органическую» геометрию, для создания которой требуется альтернативный подход. С помощью инструментов ТО можно задавать расположение опор и распределение нагрузок по материалу для обеспечения оптимальной формы детали. Данный алгоритм также позволяет уменьшать вес конструкции, импортировать САД-геометрию и выполнять проверочные расчеты оптимизированной конструкции (рис. 1.1). Повышается точность пространственного моделирования деталей из композиционных материалов, деталей, напечатанных на 3D-принтере.

Программное обеспечение для ТО не строит модель объекта с нуля. В него загружается геометрическая модель изделия, ранее изготовленного другим методом. Когда загрузили модель, мы отмечаем места, которые не подлежат изменению, например, крепления. Все остальное, что не попало в эти зоны, но принадлежит детали, является так называемой *design space*, то есть той зоной, где программа может менять геометрию. Затем мы в соответствии со служебным назначением изделия накладываем нагрузки, которые деталь должна выдерживать, то есть создаем силовую схему нагру-

зок. И далее в соответствии с заданными нами параметрами программа начинает создавать новую оптимизированную геометрию. Между неизменными местами для крепления она выстраивает новую модель, а затем анализирует напряжение в каждом сечении — выдерживает его сечение или нет. Если не выдерживает, то программа меняет сечение.



Рис. 1.1. Примеры топологической оптимизации кронштейна, выполнено в Dassault Systemes 3D Experience [14]

Процесс построения новой модели довольно затратный по времени и требует больших вычислительных ресурсов. Этот метод моделирования называется методом конечных элементов. Для каждой точки изделия программа составляет и решает интегральные уравнения, учитывая при этом взаимосвязи между всеми точками. В результате расчета получается новая геометрия. Затем конструктор может изменить что-то в модели, если это необходимо. В итоге получается CAD-модель. Далее для верификации модель загружается в другое программное обеспечение, в котором она про-

ходит финальную проверку на максимальные деформации, напряжения и пр. Затем геометрия утверждается и может быть передана в производство. При этом программное обеспечение умеет оптимизировать геометрию под разные виды производства: литье, штамповку, ковку или под АП.

Топологическая геометрия, как правило, имеет аморфные формы, в ней нет плоских, прямых линий, могут быть сплайны второго порядка. При соблюдении тех же самых свойств и нагрузочных характеристик такое моделирование позволяет уменьшить массу изделия и, следовательно, сократить издержки на производство. Понижение массы изделия при сохранении функционала изделия — это задача номер один в самолетостроении, авиакосмической отрасли, автомобилестроении, а также в будущем, возможно, и в отдельных направлениях строительства.

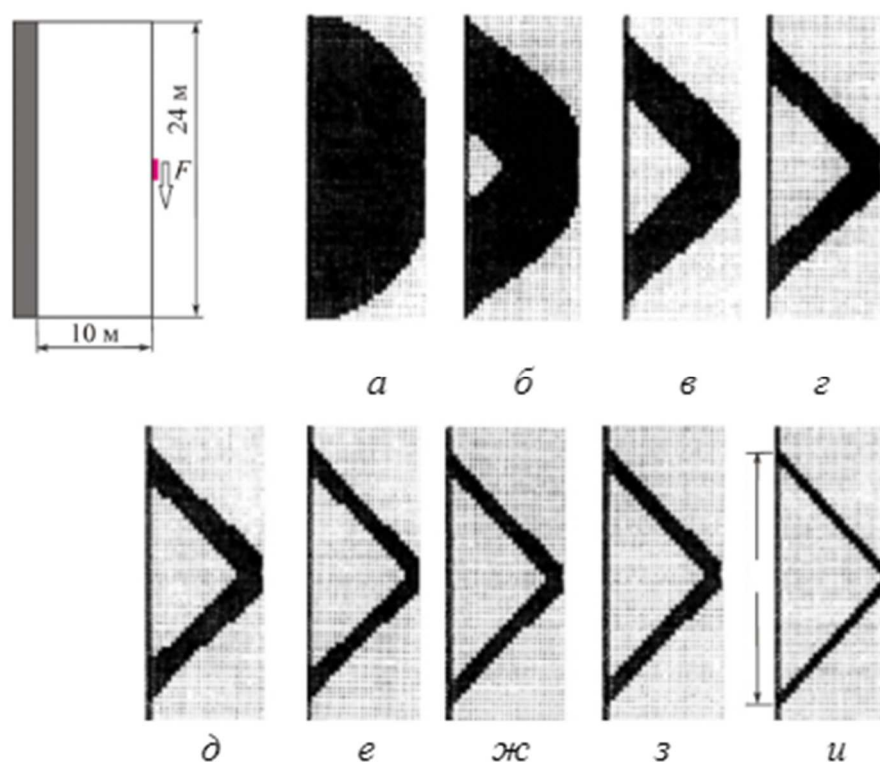


Рис. 1.2. Этапы процесса оптимизации конструкции консольной рамы,
значения R_{Ri}

a - 3%, $б$ - 6%, $в$ - 9%, $г$ - 12%, $д$ - 15%, $е$ - 18%, $ж$ - 21%, $з$ - 24%, $и$ - 30%

Наиболее эффективно применение методов оптимизации топологии непрерывных структур, т.е. при нахождении наилучшего размещения и геометрии пустот внутри области моделирования. Кроме того, этот тип оптимизации может применяться не только для оптимизации натуральных достаточно крупногабаритных конструкций, но и для оптимальной конструкции материалов на микро - и наноуровне [15].

На рис. 1.2 изображен процесс последовательного удаления материала. Видно, как с увеличением порогового отношения удаления R_{Ri} (коэффициент отбраковки) конструкция все более превращается в двухстержневую раму. R_{Ri} последовательно принимает значения от 3% до 30%.

1.5. Общие выводы о возможностях применения АТ в России

АТ, обеспечивающие новые возможности для конструирования изделий с заданными свойствами и геометрией, получили широкое признание в наиболее передовых отраслях промышленности и странах мира, имеют достаточную базу для развития в РФ и нуждаются в совершенствовании, распространении, популяризации и изучении. АП успешно применяется там, где высокие цены изделий оправданы их уникальными потребительскими свойствами: сложная конструкция изделий с невозможностью сделать традиционными методами; не слишком ответственная область применения; мелкосерийное или единичное производство; возможно уменьшение массы изделий и количества деталей конструкции.

Снижение стоимости материалов АП — главная задача при внедрении АТ в энергетическое и тяжелое машиностроение. Новые технологии получения металлических порошков, использование электронных пушек и плазмотронов вместо лазеров — наиболее очевидные направления развития АТ.

Важным моментом внедрения АП в существующие производства с максимальной эффективностью является оптимизация конструкции производимых деталей при соблюдении всех преимуществ АП, с использованием ТО, сетчатых структур, с облегчением конструкции, объединением узлов и сокращением количества деталей, с увеличением жизненного цикла производимой детали. Использование АП для деталей, которые были сконструированы для традиционного производства, является прототипированием и не является эффективным с точки зрения себестоимости продукта. Только детали, сконструированные для АП, могут быть эффективными и экономически обоснованными. Существующие АТ могут быть интегрированы в технологическую подготовку производства, усовершенствованы методами цифрового моделирования, симуляции, использования новых технологий термомодеформационного воздействия на промежуточный и конечный продукт.

Важную роль в повышении качества и эксплуатационных свойств изделий АП должны сыграть методы комплексного статочного и эксплуатационного контроля, сочетающие неразрушающий контроль структуры и статистические методы контроля механических и эксплуатационных свойств.

Далее рассмотрим возможности топологической оптимизации и попробуем достичь данного результата на конкретном примере детали, применяемой в авиастроении.

Вопросы к главе 1

- 1) В каких отраслях промышленности получила распространение 3D –печать с использованием различных типов металлов?
- 2) С какими проблемами сталкивается аддитивное производство при внедрении его на промышленных предприятиях РФ?
- 3) Перечислите производителей 3-D принтеров РФ.
- 4) Какая технология является доминирующей в производстве металлических 3D-принтеров в РФ?
- 5) Какой 3D-принтер, печатающий расплавленным металлическим порошком, является самым востребованным в мире, и какая технология в нем используется?
- 6) Назовите причину сдерживания промышленного выпуска 3D-принтера, использующего «грин-технология» в РФ.
- 7) Перечислите сдерживающие факторы применения АТ в производстве авиационно-космической техники и деталей декоративного строительства.

2. ТОПОЛОГИЧЕСКАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ ДЕТАЛИ «КРОНШТЕЙН»

Процесс проектирования конструкции детали «Кронштейн» проведен с использованием метода ТО в качестве проектировочного расчета.

Топологическая оптимизация [16] – это синтез формы и внутренней структуры изделия с оптимальным распределением материала в заданном ограниченном пространстве (пространстве проектирования) с учетом всех расчетных случаев, а также конструкционных и технологических ограничений.

ТО предполагает изменение параметров объекта и нахождение экстремума целевой функции, зависящей от этих параметров, при заданных ограничениях. ТО конструкций, где значение целевой функции получается из расчетов в САЕ системах, невозможна без использования метода конечных элементов (МКЭ). МКЭ – наиболее распространенный численный метод решения задач механики деформируемого твердого тела, реализованный в таких известных системах инженерного анализа (САЕ системах), как ANSYS, ABAQUS, LS-DYNA, NASTRAN и др. [17 - 21]

МКЭ, реализованный в САЕ системах, позволяет находить решение задач механики деформируемого твердого тела для составных конструкций сложной геометрической формы, подверженных одновременному действию механических, тепловых, электромагнитных и других нагрузок.

Объектом исследования являлась 3D модель детали «Кронштейн». Предмет исследования – конструкция и технология изготовления детали. Построение 3D модели детали осуществляли в системе трехмерного проектирования CAD Siemens NX. ТО и САЕ анализ выполнен в программе SIEMENS Solid Edge ST10 [22]. Основными факторами выбора данного программного продукта стали доступность, наличие всего необходимого

функционала и относительная простота использования, а также возможность работы с форматом. PRT, который использовался в SIEMENS NX при моделировании детали «Кронштейн».

Созданная твердотельная электронная модель изделия экспортируется в программу SIEMENS Solid Edge ST10, где задаются свойства исследуемого материала, прикладываются усилия и условия закрепления согласно схемам испытаний и эксплуатации, задаются условия оптимизации и проводится ТО конструкции изделия, по результатам которой определяется искомый дизайн геометрии изделия или формируется готовая к производству модель детали.

Целевой функцией оптимизации является уменьшение используемого при производстве объёма материала. В качестве ограничения выступает требование сохранения или улучшения прочностных свойств.

2.1 Исходные данные для перепроектирования

Исходная деталь для перепроектирования представляет собой кронштейн системы управления (рис. 2.1).

Способ получения заготовки детали «Кронштейн» – литьё в кокиль. Технология обработки включает в себя механическую обработку основания лапок, отверстий и посадочных мест под качалки и болты. Сложность формы детали обусловлена обеспечением места под ход качалок с необходимыми зазорами, а также разнесением в пространстве относительно друг друга положением качалок.

Масса детали составляет 10 кг. Материал исходной детали – сталь 08Х14Н7МЛ (другое обозначение – ВНЛ-1) по ГОСТ 977-88 [23], который обладает механическими характеристиками при $T=20^{\circ}\text{C}$: предел кратковременной прочности, $\sigma_{\text{в}}=981$ МПа; предел пропорциональности, $\sigma_{\text{T}}=687$

МПа; относительное удлинение при разрыве, $\delta_5 = 10\%$; относительное сужение, $\Psi = 25\%$; ударная вязкость, $KCU = 294 \text{ кДж/м}^2$.

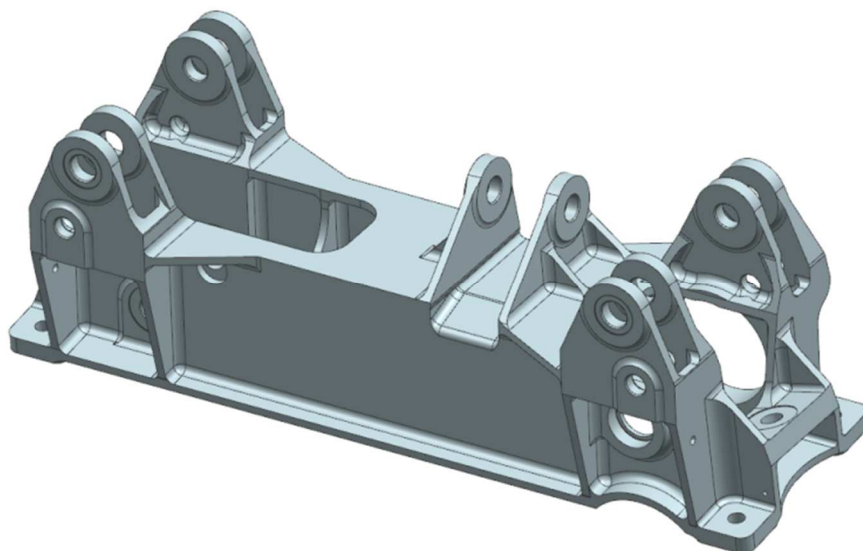


Рис. 2.1 Исходная деталь «Кронштейн»

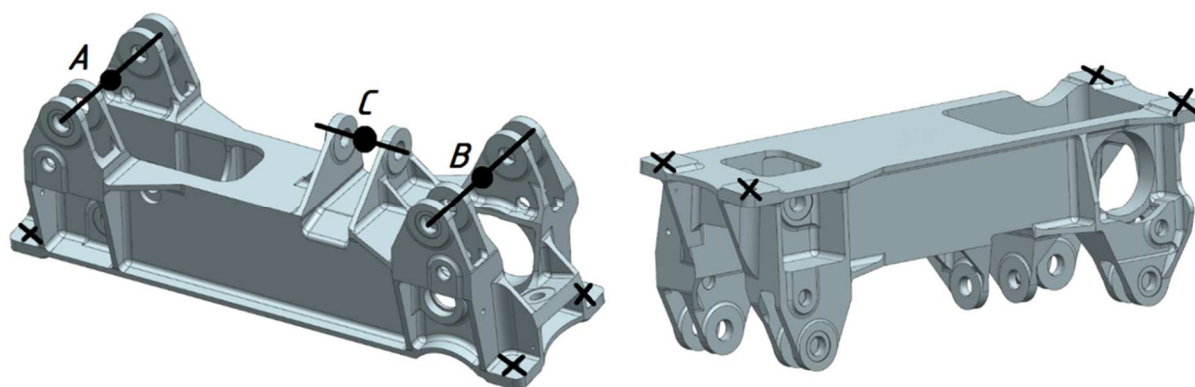


Рис. 2.2. Расчетные случаи нагружения детали, знаком X отмечены крепления кронштейна к стенке

Кронштейн закреплен на четырех болтах и нагружен через вставленные в отверстия проушин болты. Основная нагрузка на кронштейн осуществляется за счет усилий при работе навесного оборудования, установ-

ливаемого на кронштейн. На рис. 2.2 представлены основные расчетные случаи со всеми необходимыми значениями нагрузок. Также в значениях нагрузок были учтены все необходимые коэффициенты запаса.

Всего для расчета использовано три случая нагружения крутящим моментом на выбранных точках: точка А – 12 Н·м ; В – 10 Н·м ; С – 5 Н·м.

2.2. Параметры для топологической оптимизации

Были сформулированы следующие требования для оптимизированной конструкции детали: кронштейн не должен подвергаться разрушению от заданных расчетных нагрузок; для эксплуатационных нагрузок (в 2,5 раза меньше расчетных) кронштейн не должен иметь остаточных деформаций; максимальные линейные перемещения для эксплуатационных нагрузок не должны превышать 1 мм; необходимо сохранить пространство для размещения качалок и тяг.

В качестве используемого материала используется сталь, применяемая в АП – 20MnCr5, с получаемыми в ней механическими характеристиками материала ВНЛ-1. Ближайшим российским аналогом стали 20MnCr5 является сталь 18ХГ по ГОСТ 4543-71 [24], которая обладает следующими механическими свойствами при $T=20^{\circ}\text{C}$: предел кратковременной прочности, $\sigma_b = 880$ МПа; предел пропорциональности, $\sigma_T = 735$ МПа; относительное удлинение при разрыве, $\delta_5 = 10\%$; относительное сужение, $\Psi = 40\%$.

2.3. Программные модули для топологической оптимизации

При проведении процесса топологической оптимизации будет использовано программное обеспечение SIEMENS Solid Edge ST10.

Solid Edge ST10 – наиболее полнофункциональная гибридная 2D/3D САПР, использующая синхронную технологию для ускорения процесса проектирования и редактирования, а также расширенной поддержки повторного использования импортированной геометрии.

Выбор данного программного обеспечения не был обусловлен какими-либо серьезными преимуществами данного ПО для топологической оптимизации. Основными факторами выбора стали доступность, наличие всего необходимого функционала и относительная простота использования, а также возможность работы с форматом PRT, который использовался в SIEMENS NX при моделировании детали «Кронштейн».

2.4. Статический анализ исходной геометрии

Перед началом оптимизации проведем статический анализ с целью выявить области, которые можно подвергнуть топологической оптимизации. Для этого запустим SIEMENS Solid Edge ST10, перейдем во вкладку «Симуляция» и выберем пункт создать анализ (рис. 2.3).

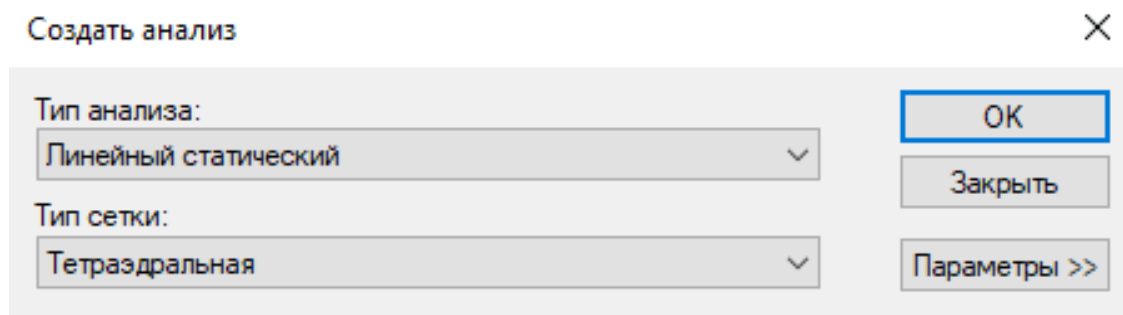


Рис. 2.3. Команда «Создать анализ»

Откроется с окном выбор типа анализа, выбираем линейный статический анализ для симуляции структурного отклика объекта на приложен-

ную нагрузку, не изменяющуюся во времени. Указываем соответствующий тип анализа и тип сетки «тетраэдральная» (рис. 2.3).

Далее зададим область проектирования детали, выбрав пункт «Определить» и кликнув на нашу деталь. Далее нажимаем ENTER, чтобы подтвердить выбранную область (рис. 2.4).

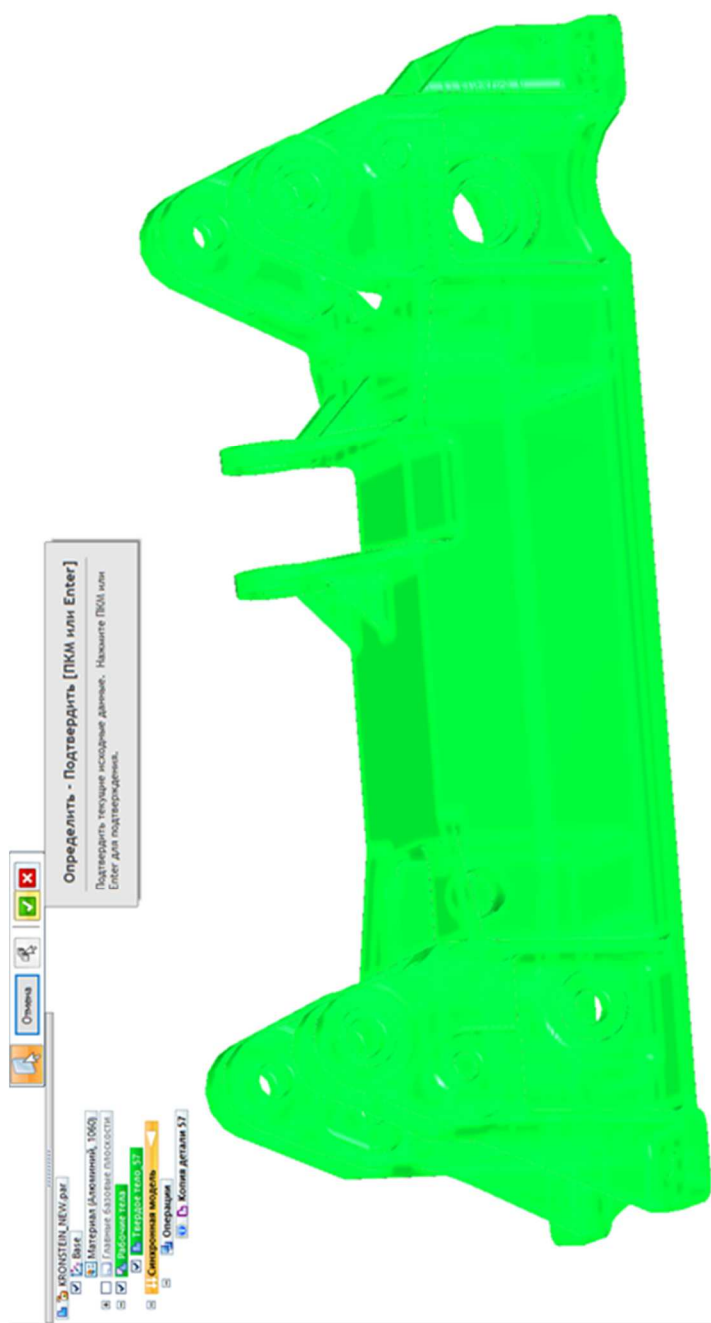


Рис. 2.4. Выбор области проектирования

Далее используем команду «крутящий момент» для каждой из проушин кронштейна, чтобы задать силу вращения для нескольких граней вокруг оси вращения.

Для набора граней А выбрана сила вращений 12 Н*м (рис. 2.5).

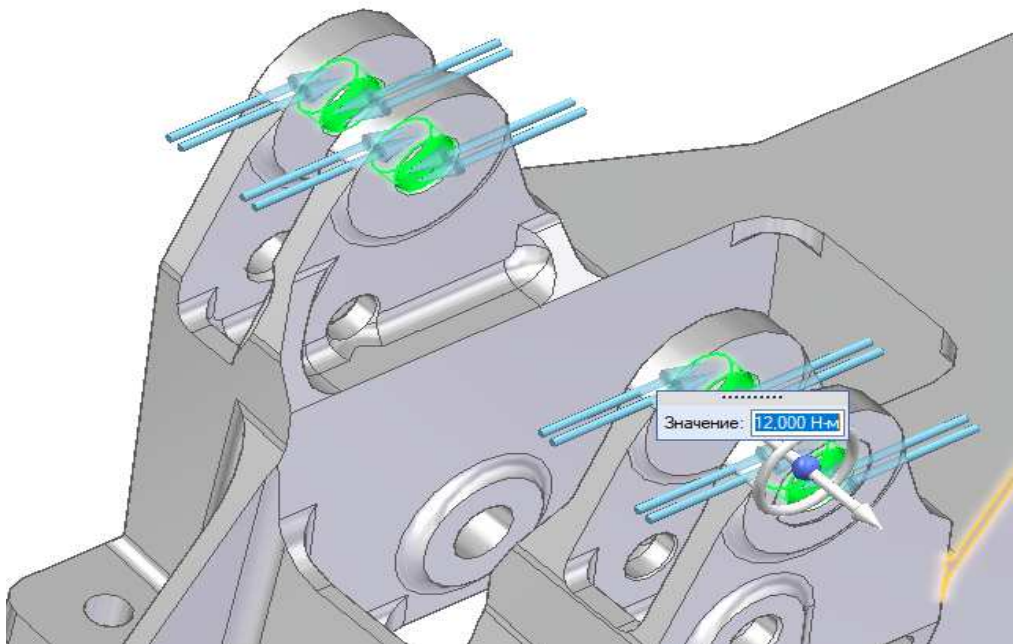


Рис. 2.5. Момент вращения А

Для набора граней В выбрана сила вращений 10 Н*м (рис. 2.6).

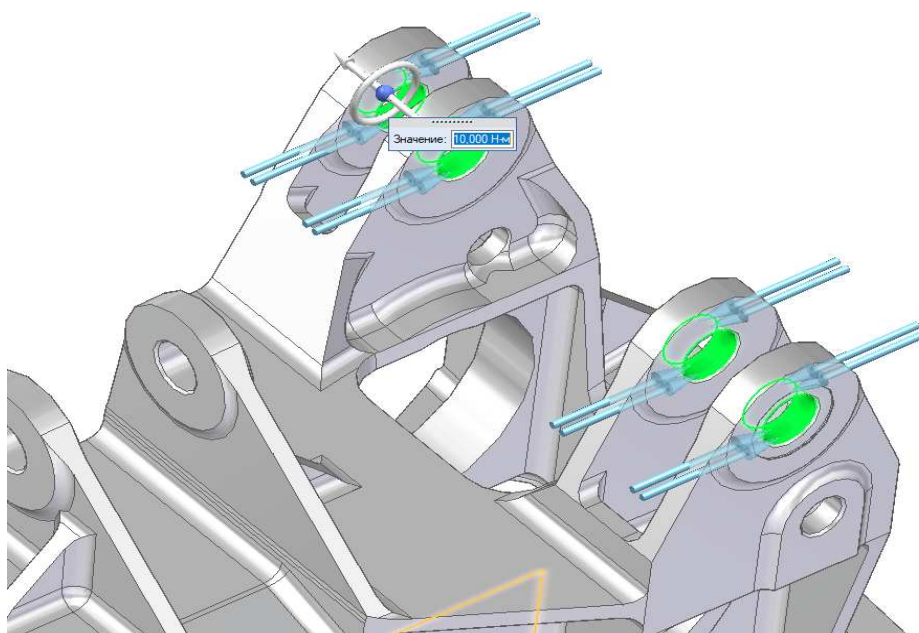


Рис. 2.6. Момент вращения В

Для набора граней С выбрана сила вращений 5 Н*м (рис. 2.7).

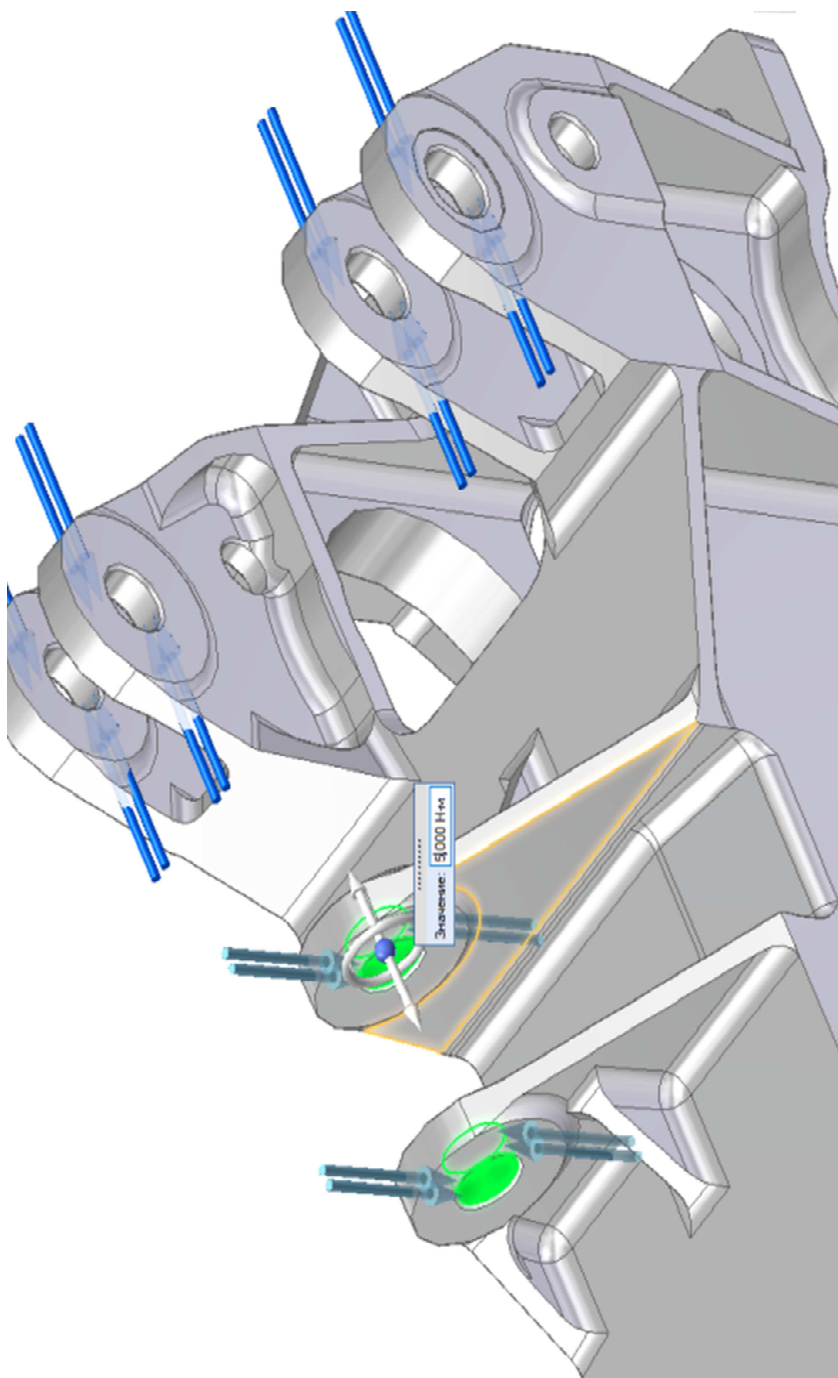


Рис. 2.7. Момент вращения С

Так же используем команду «Сила тяжести», чтобы задать направление действующей на деталь силы тяжести против оси Z. В качестве значе-

ния силы тяжести укажем стандартное значение силы тяжести G , равное 981 см/с^2 (рис. 2.8).

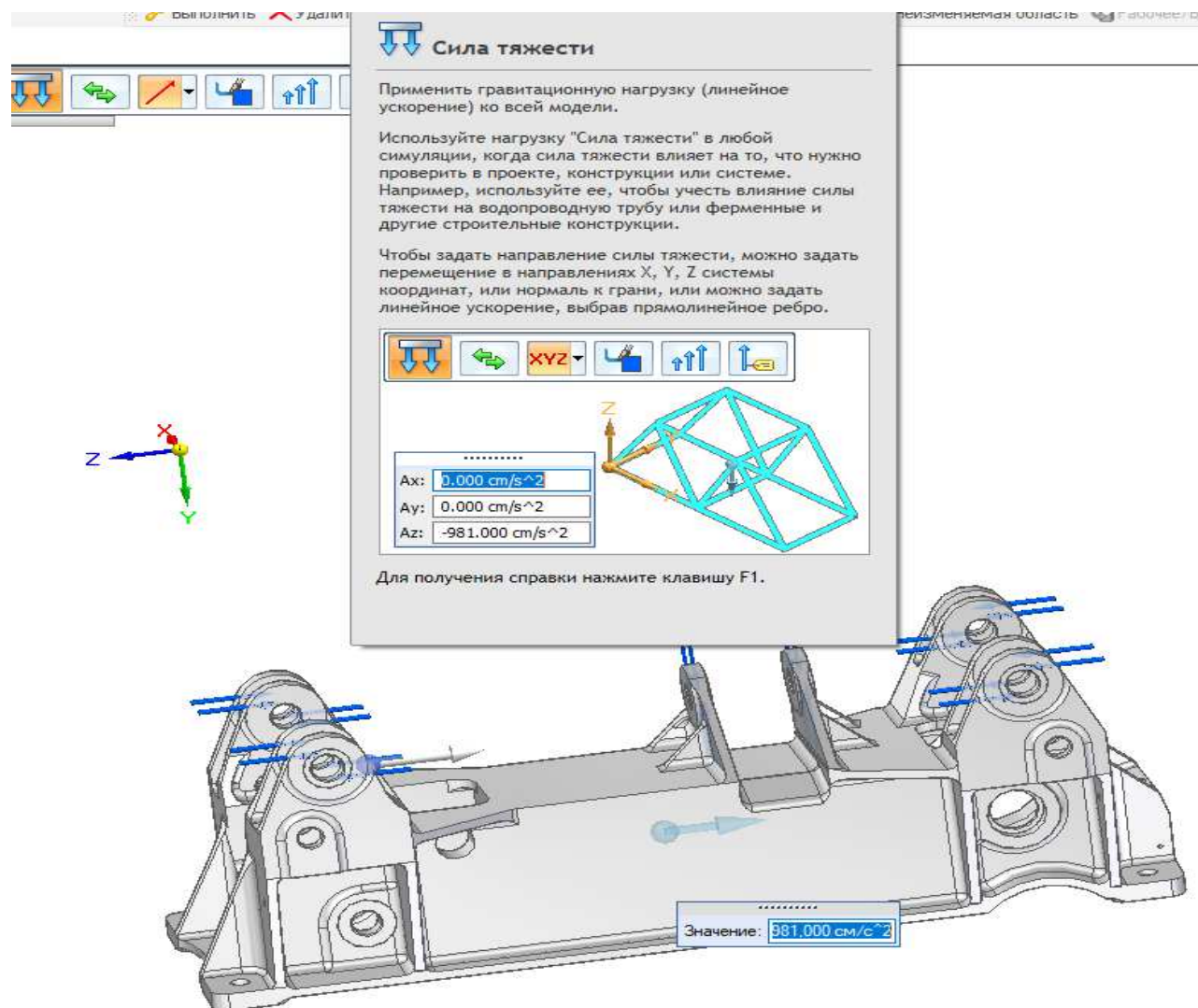


Рис. 2.8. Команда «Сила тяжести» и ее направление

Выполним команду «Запретить перемещение» в местах, где чтобы исключить перемещение или деформацию элементов в процессе анализа, для чего зафиксируем кронштейн в местах, где он крепится к стенке салона самолета (рис. 2.9).

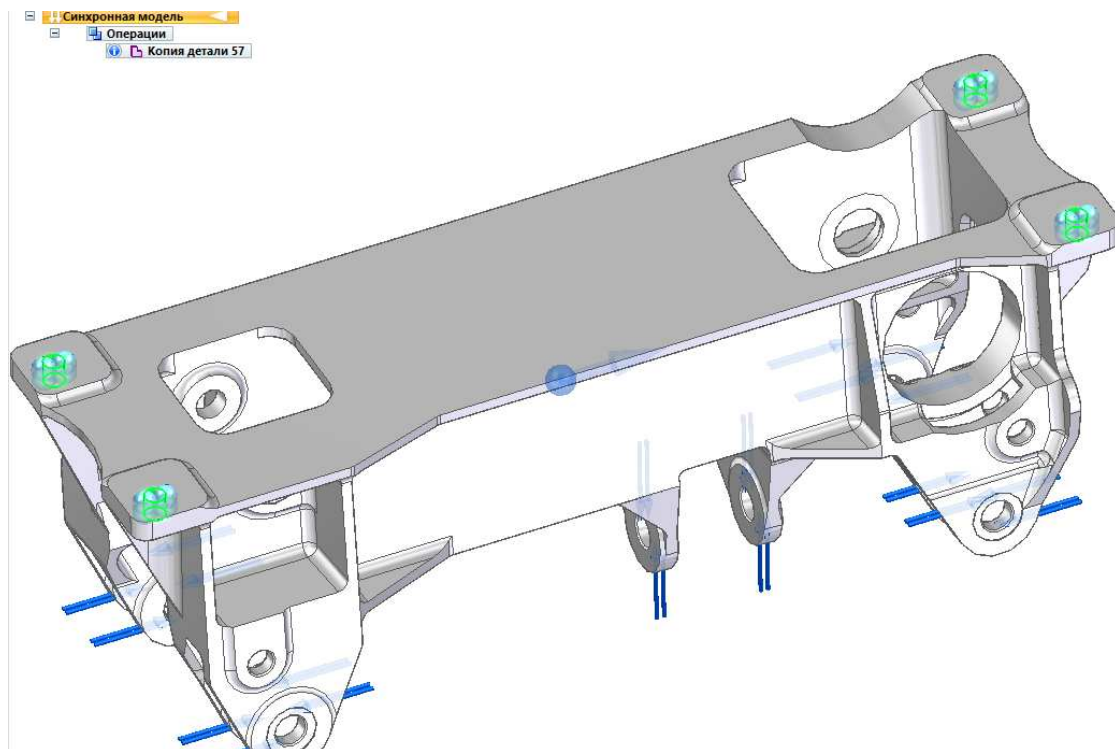


Рис. 2.9. Фиксация кронштейна

Все ограничения заданы; выбираем команду «Решить», после чего запустится решатель NX NASTRAN; решение занимает около 10 минут (рис. 2.10).

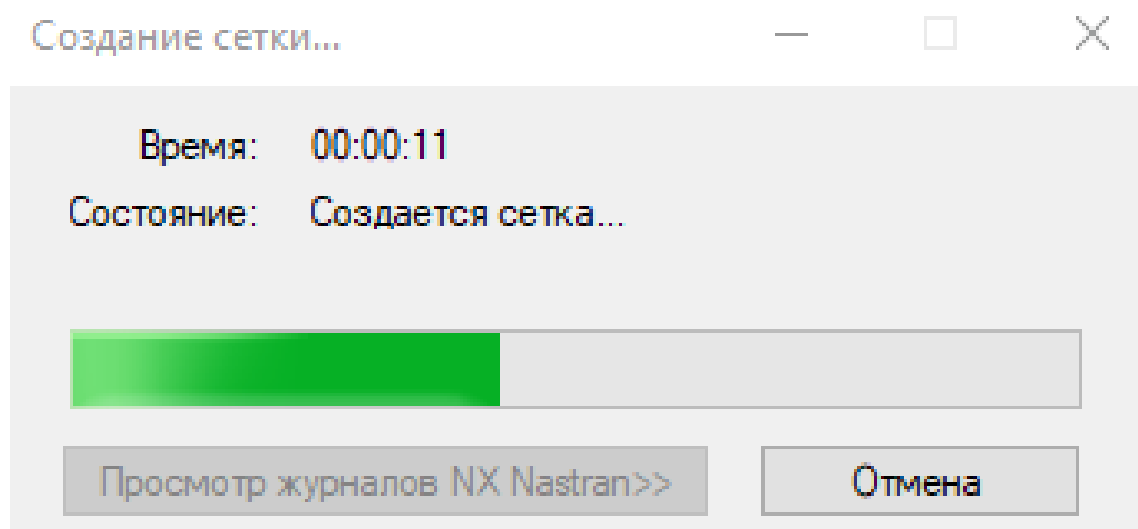


Рис. 2.10. Окно решателя

Результат работы решателя представлен на рис. 2.11. Максимальные перемещения не превышают 1 мм. Для эксплуатационных нагрузок (в 2,5 раза меньше расчетных) кронштейн не должен иметь остаточных деформаций (рис. 2.12).

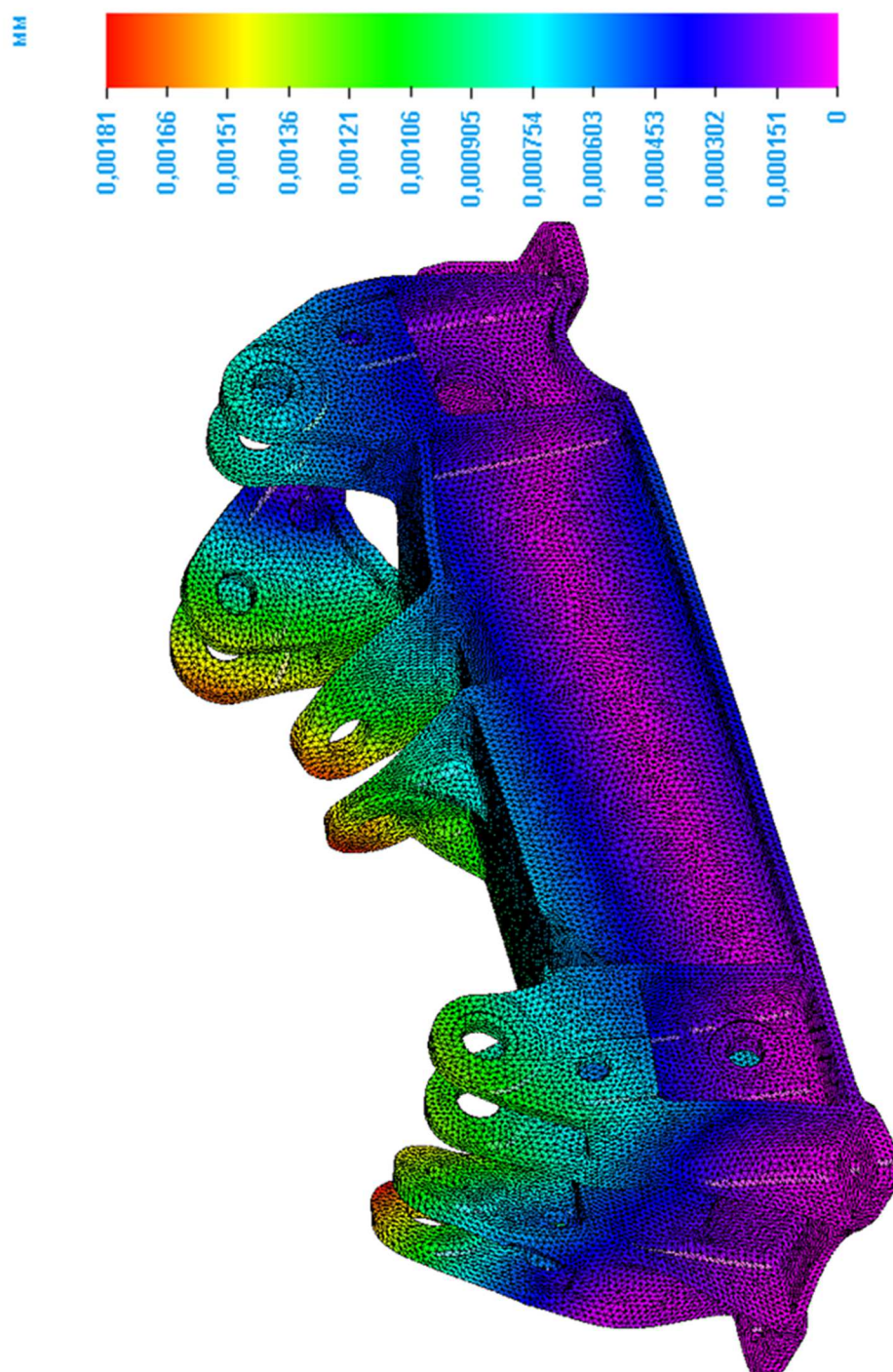


Рис. 2.11. График перемещений

2.5. Топологическая оптимизация в Solid Edge ST10

Для начала работы перейдём во вкладку «Генеративный дизайн» и выберем пункт «Создать генеративный анализ».

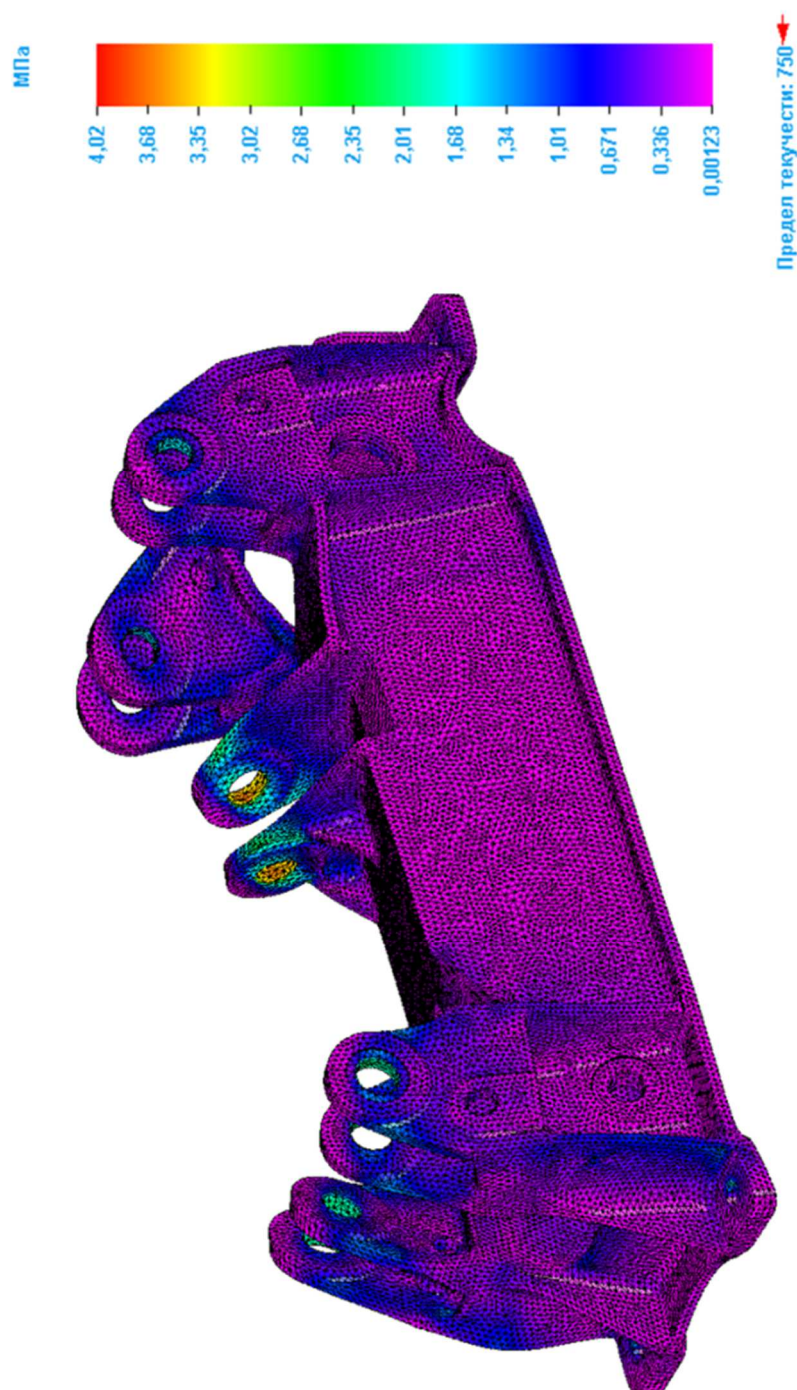


Рис. 2.12. График напряжения по Мизесу

Далее требуется задать материал. Для этого перейдем во вкладку «Таблица материалов». В результате откроется таблица. Посредством поиска из таблицы выбираем нужный материал – 20MnCr5 (рис. 2.13). В открывшейся таблице также указаны подробные характеристики используемого материала.

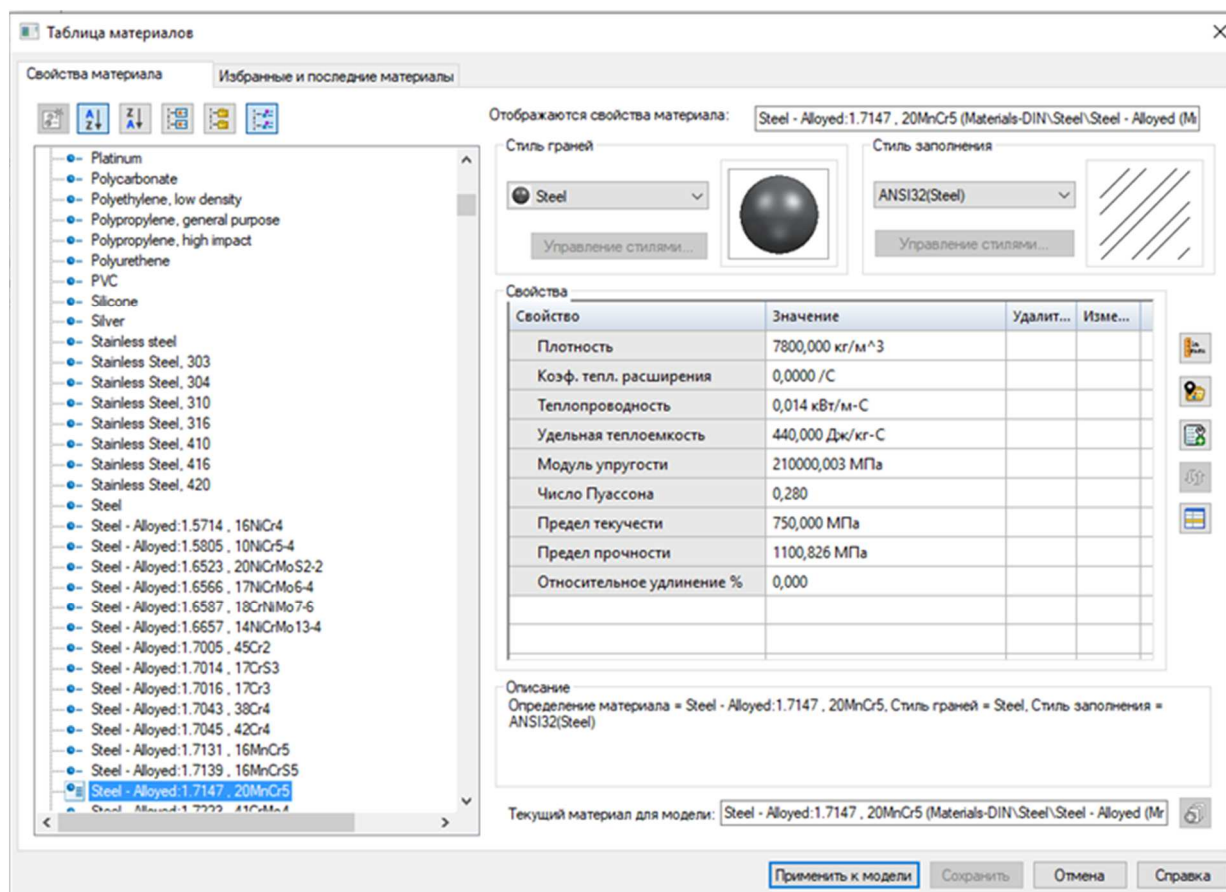


Рис. 2.13. Таблица материалов

Далее требуется задать область проектирования, для чего откроем соответствующую команду во вкладке «Генеративный дизайн». Указываем загруженную деталь и нажимаем на зеленую галочку, либо на клавишу ENTER (рис. 2.14).



Рис. 2.14. Область проектирования

Далее необходимо задать неизменяемые области, то есть области, которые не будут затрагиваться при оптимизации, в первую очередь это касается всех отверстий. Значение смещения для грани или конструктивного элемента задает глубину неизменяемых областей. В этом примере смещение равно 11,5 мм.

В первой области смещения укажем все основные отверстия, которые не нужно оптимизировать. После указания неизменяемых областей, программа построит дополнительные круги, обозначающие границы неизменяемых областей детали (рис. 2.15).

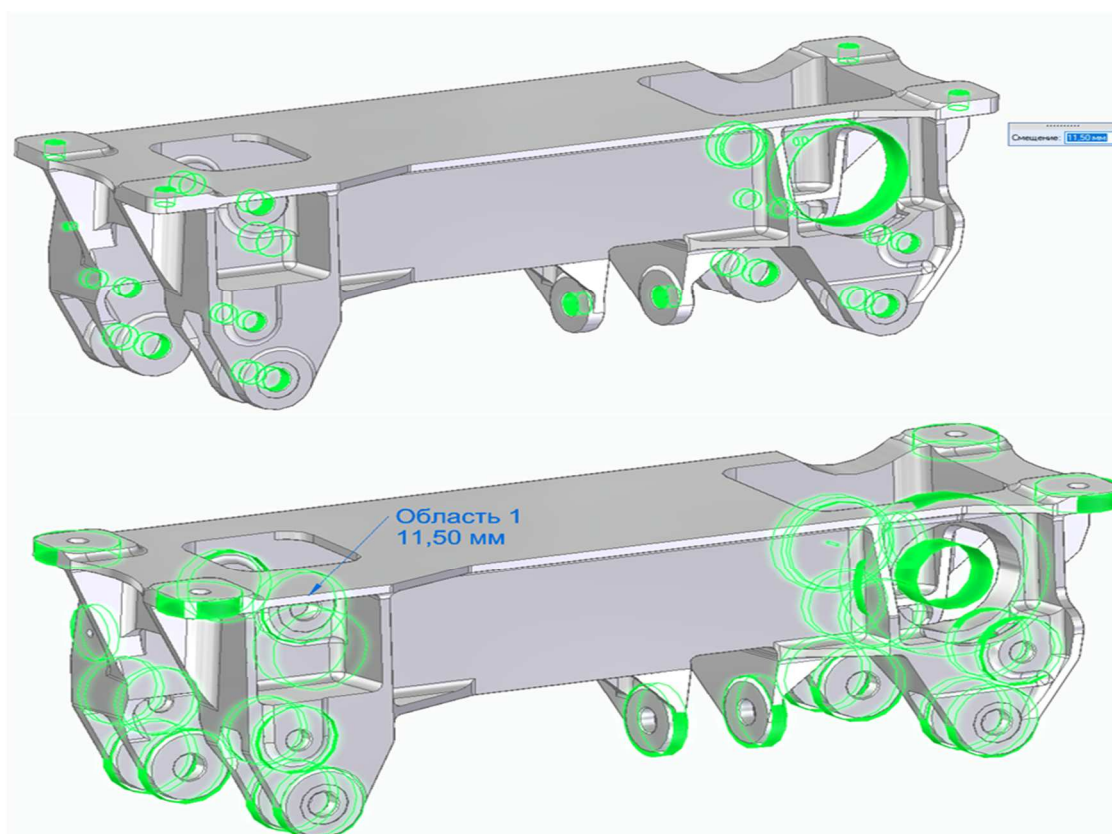


Рис. 2.15. Задание неизменяемой области

Во второй области смещения укажем некоторые поверхности, прилегающие к отверстиям, которые не требуют оптимизации (рис. 2.16).

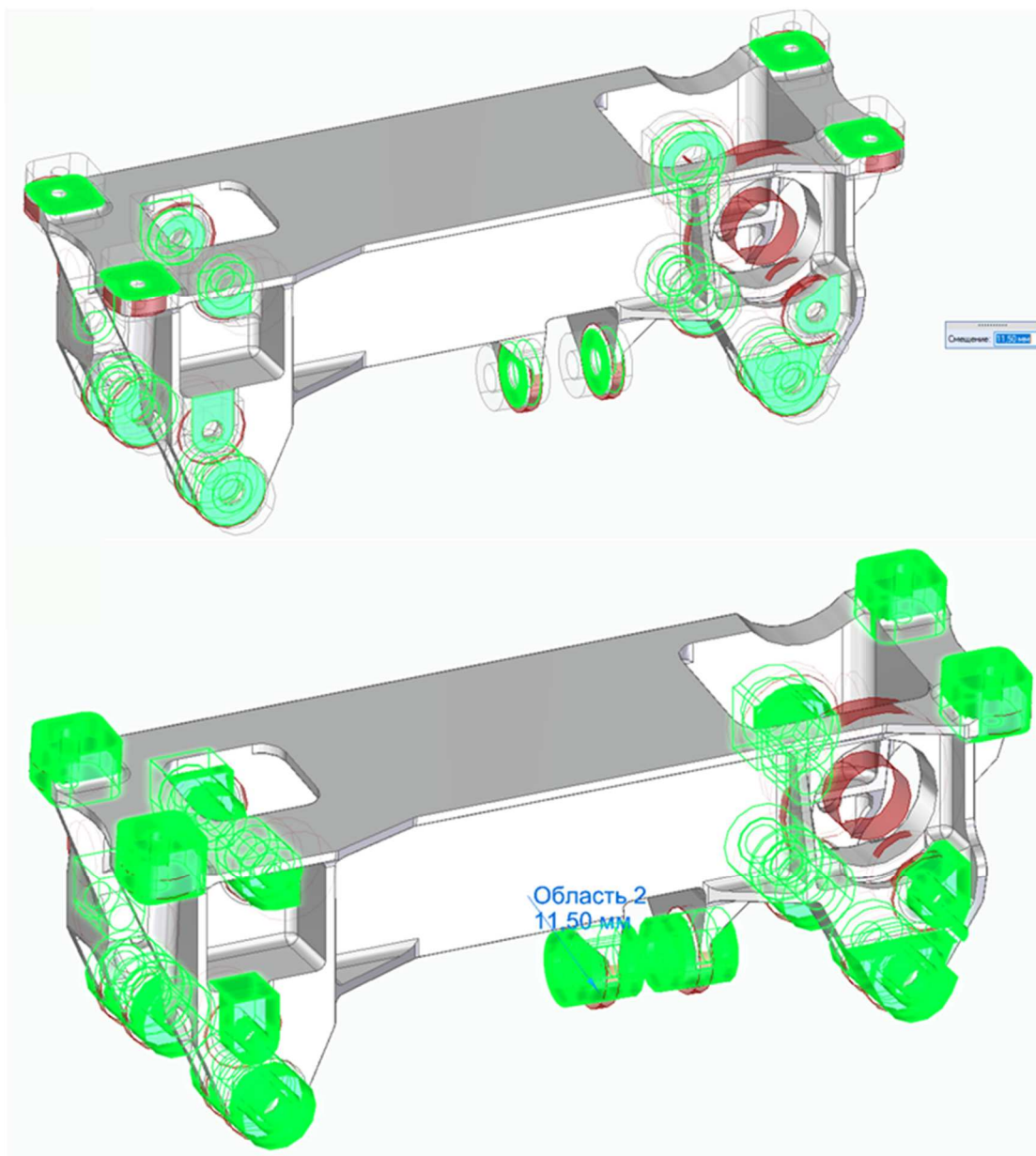


Рис. 2.16. Задание неизменяемой области

Силовые нагрузки можно применить в виде силы, давления или крутящего момента. В этом примере мы применим крутящий момент 12, 10 и 5 Нм, применяемые для цилиндрических отверстий в детали крепления (рис. 2.17). Значение смещения равно 11,5 мм, подобный неизменяемый объем был задан ранее с помощью команды «Неизменяемые области».

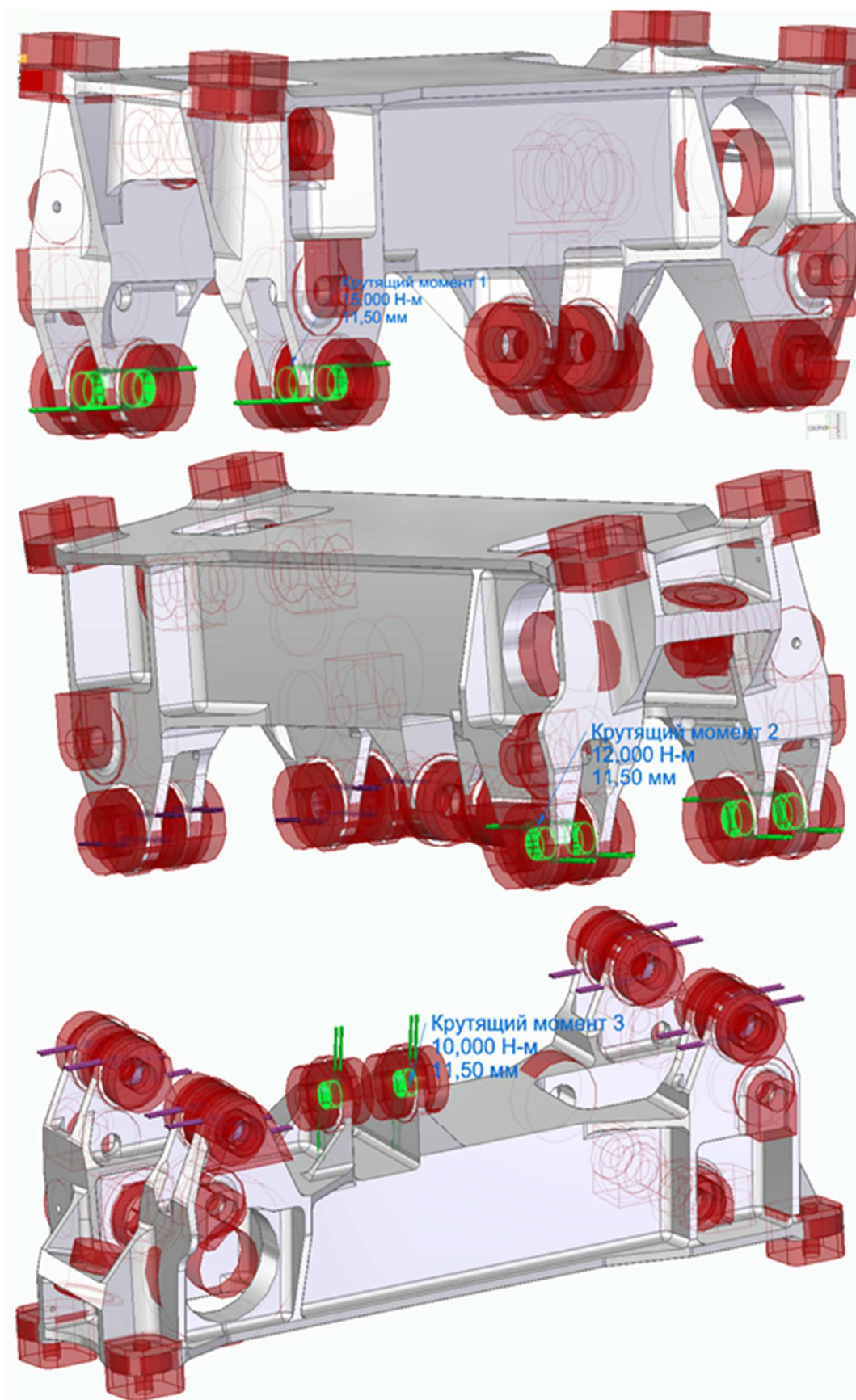


Рис. 2.17. Задание крутящих моментов 15, 12 и 10 Н·м

Помимо основных силовых нагрузок, также нужно применить силу тяжести, направленную против оси Z. Для этого выберем команду «Сила тяжести» (рис. 2.18). При выборе необходимое направление и значение уже указано, поэтому сразу нажимаем клавишу ENTER.

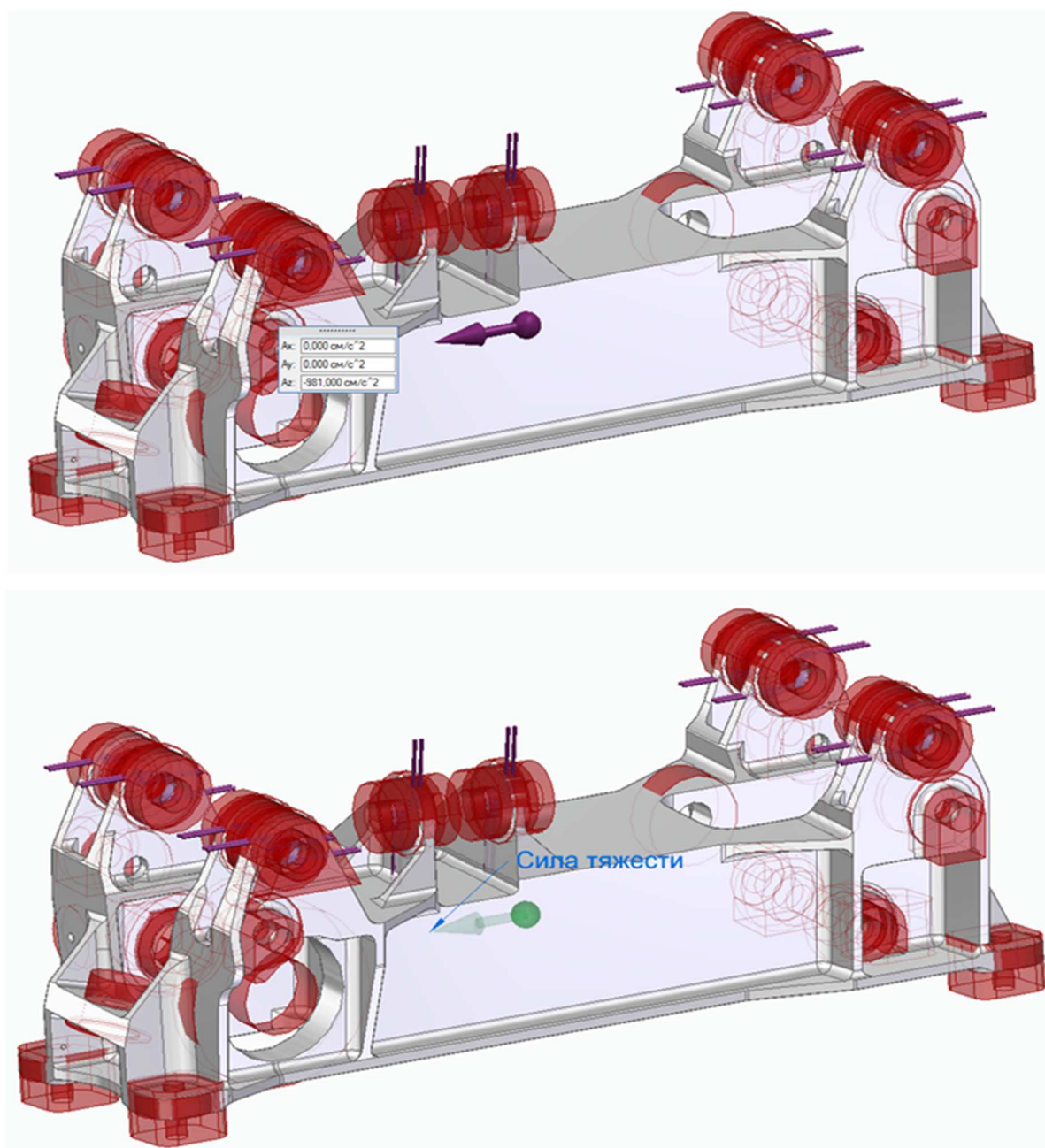


Рис. 2.18. Задание силы тяжести и ее направления

Грани или конструктивные элементы, которые не должны перемещаться, будут ограничены с помощью команд «Зафиксировать» или «Запретить перемещение». В данном случае нам нужно зафиксировать грани цилиндров, в которых будут крепления кронштейна к стенке. Значение смещения указываем 11,5 мм (рис. 2.19).

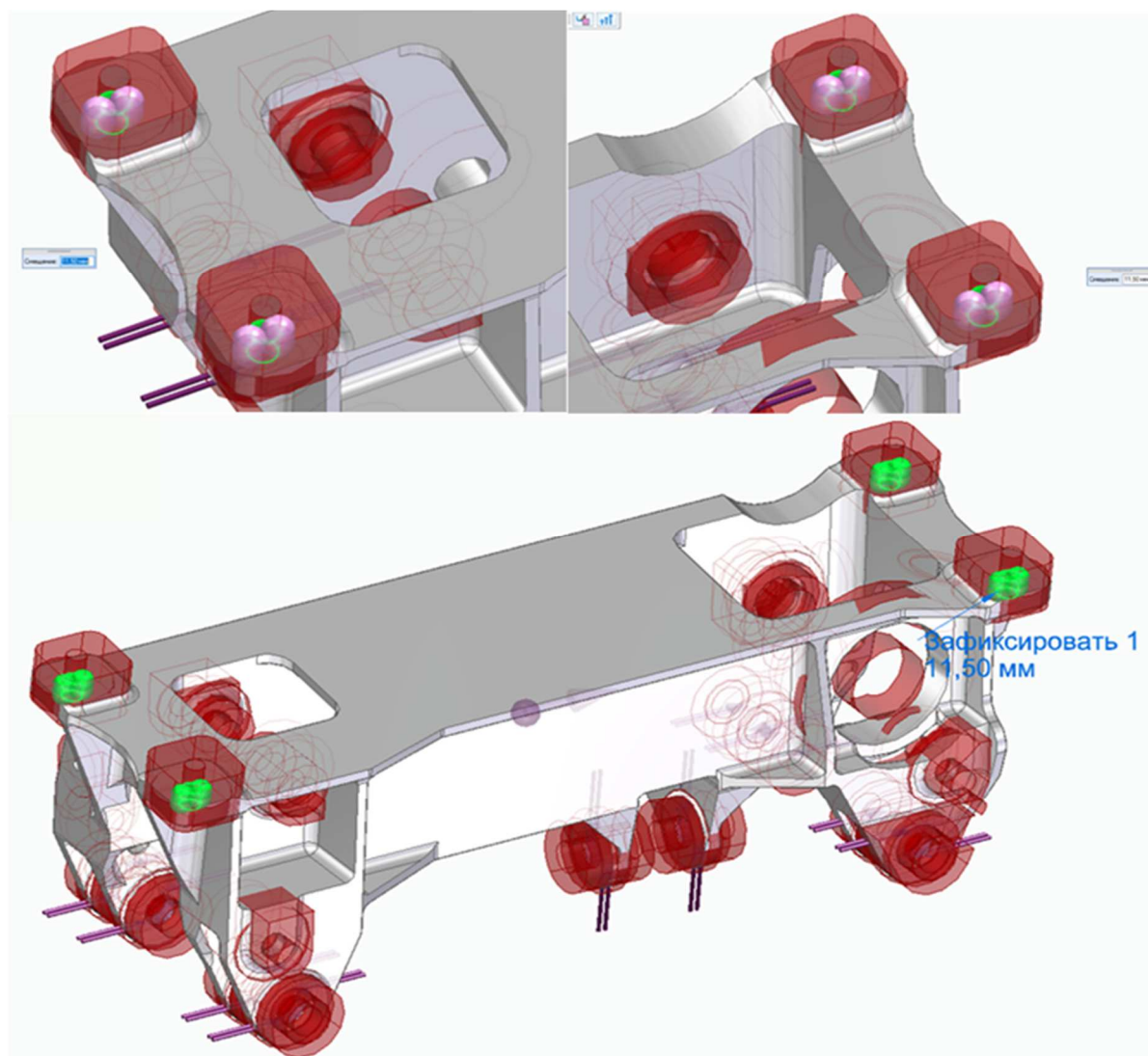


Рис. 2.19. Фиксация кронштейна

Для удаления внутренних полостей и исключения провисания можно использовать команду «Технологические настройки». В данном случае не обязательно задавать эти настройки.

Зададим значение распределения материала для величины «Углубления в теле». Нажимаем кнопку ОК (рис. 2.20).

Выполнить анализ

Качество анализа

Низкое Высокое

Грубая оценка времени анализа: 0 ч., 1 мин., 24 сек.

Уменьшение массы

☒ Процент уменьшения ☐ Использовать коэффициент запаса прочности

20

5% 95%

Исходная масса: Конечная масса:

10,765 кг 8,612 кг

Предел текучести: Запас прочности: Допустимое напряжение:

750,000 МПа / 4,030 = 186,116 МПа

Отображение результатов

☒ Скрыть область проектирования при отображении результатов

Выполнить Закреть Справка

Рис. 2.20. Окно «Технологические настройки»

Теперь можно создать оптимальную деталь с помощью команды «Выполнить». Для параметра «Качество анализа» зададим значение 15 в диапазоне 1-300, где 300 – самое высокое качество. Чем выше качество, тем больше времени требуется для расчета. Для параметра «Уменьшение массы» для начала зададим значение 20%. Для параметра «Запас прочности» оставим значение 4. Значение допустимого напряжения должно быть

равно пределу текучести материала 20MnCr5. После настройки всем параметров выполним команду «Выполнить». (рис. 2.21).

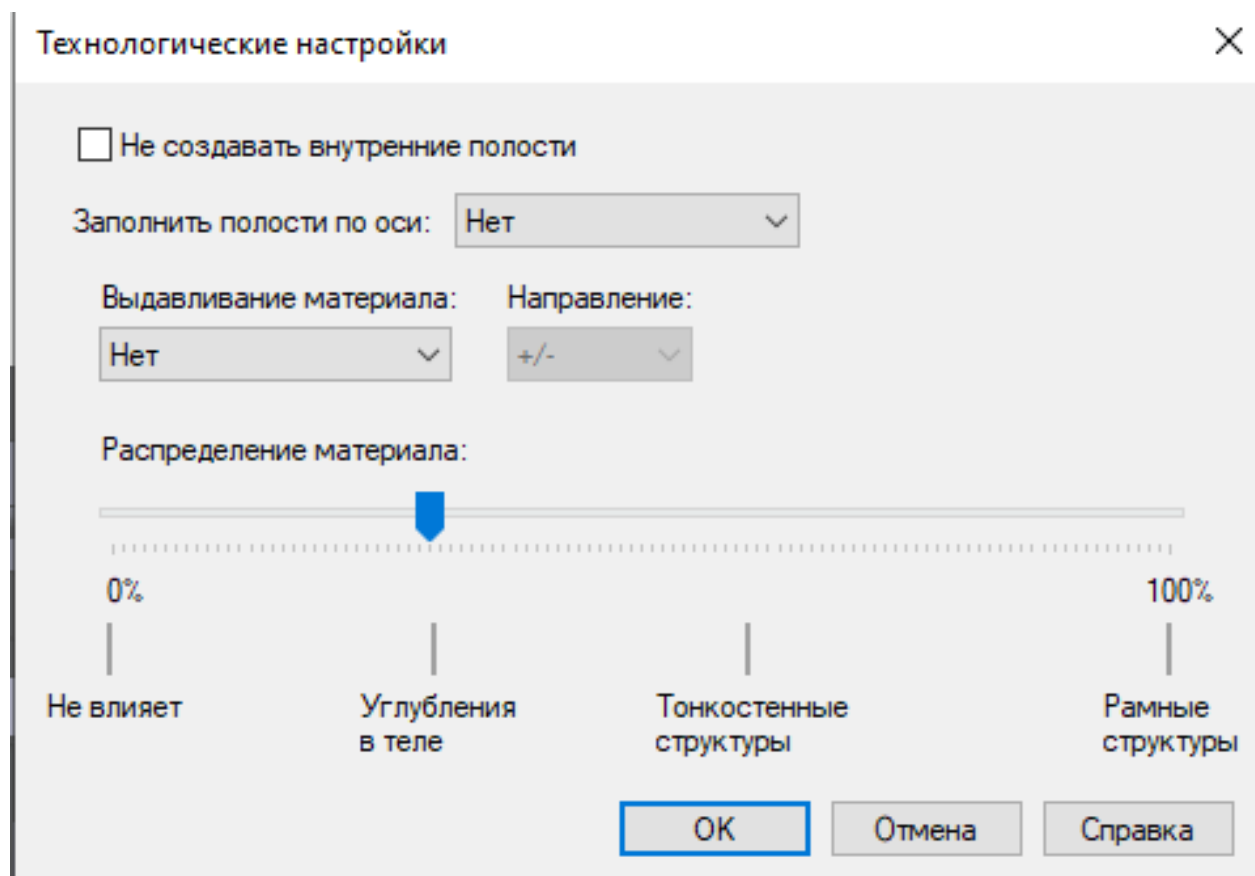


Рис. 2.21. Окно выполнения анализа

Грубая оценка времени показывает время анализа 1 минута 24 секунды, хотя на самом деле из-за сложностей геометрии расчет занимает почти 30 минут.

По прошествии этого времени отобразятся результаты и значения, используемые для анализа. (рис. 2.22).

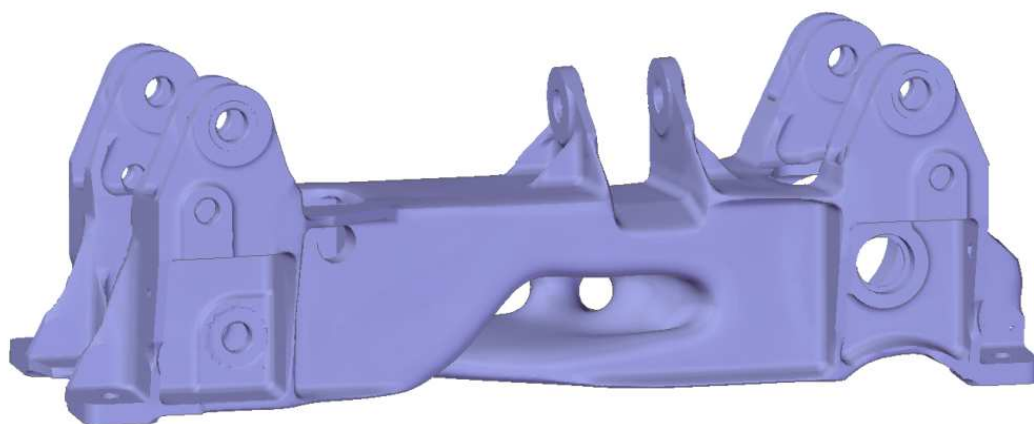


Рис. 2.22. Результат выполнения топологической оптимизация со значением уменьшения массы на 20%

Можно использовать команду «Показать напряжение» для отображения напряжений (рис. 2.23).

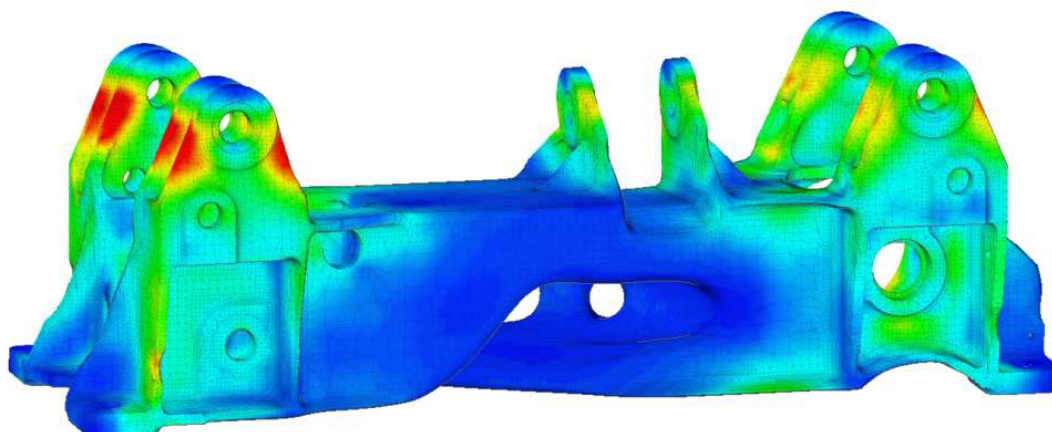


Рис. 2.23. Распределение напряжений в детали со значением уменьшения массы на 20%

Как видно из рисунка, участки, обозначенные в центре детали, обозначенные синим цветом, содержат минимальные напряжения, и это пространство может быть дополнительно оптимизировано.

Попробуем команду «Выполнить» еще раз, только теперь зададим значение уменьшение массы на 40% (рис. 2.24).

Выполнить анализ

Качество анализа

Низкое Высокое

Грубая оценка времени анализа: 0 ч., 1 мин., 24 сек.

Уменьшение массы

☒ Процент уменьшения ☐ Использовать коэффициент запаса прочности

40

5% 95%

Исходная масса: 10,765 кг Конечная масса: 6,459 кг

Предел текучести: 750,000 МПа / Запас прочности: 4,030 = Допустимое напряжение: 186,116 МПа

Отображение результатов

☒ Скрыть область проектирования при отображении результатов

Выполнить Заккрыть Справка

Рис. 2.24. Окно выполнения анализа

Результат оптимизации детали показан на рис. 2.25.

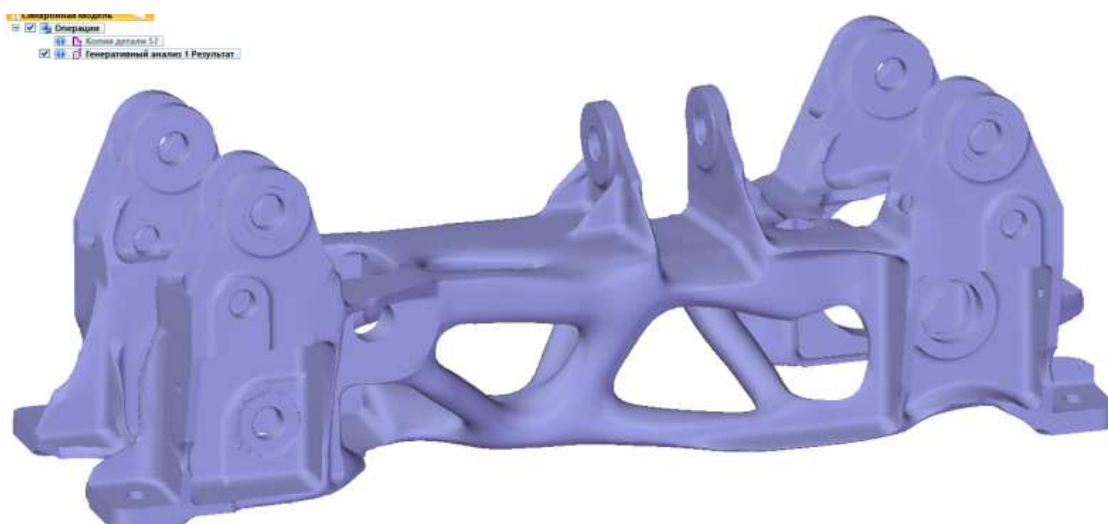


Рис. 2.25. Результат выполнения топологической оптимизация со значением уменьшения массы на 40%

Используем команду «Показать напряжение» для отображения напряжений (рис. 2.26).

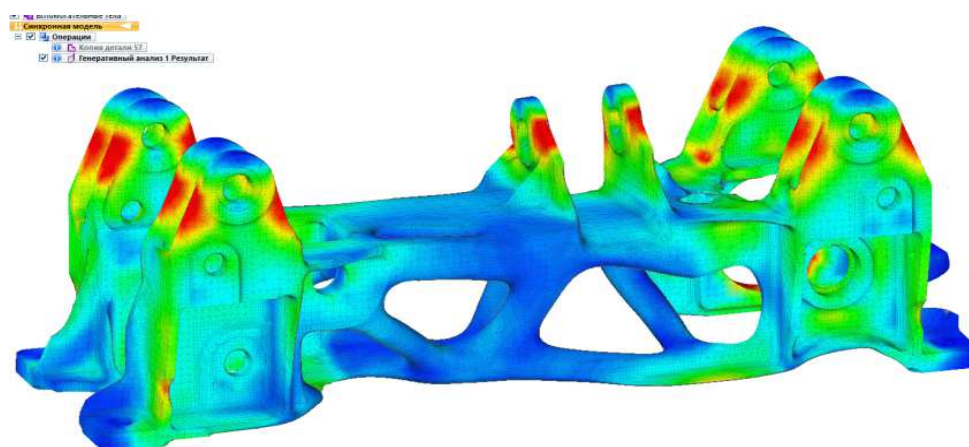


Рисунок 2.26. Распределение напряжений в детали со значением уменьшения массы на 40%

Выполнить анализ

Качество анализа

Низкое Высокое

Грубая оценка времени анализа: 0 ч., 1 мин., 24 сек.

Уменьшение массы

☒ Процент уменьшения ☐ Использовать коэффициент запаса прочности

60

5% 95%

Исходная масса: 10,765 кг Конечная масса: 4,306 кг

Предел текучести: 750,000 МПа / Запас прочности: 4,030 = Допустимое напряжение: 186,116 МПа

Отображение результатов

☒ Скрыть область проектирования при отображении результатов

Выполнить Закрыть Справка

Рис. 2.27. Окно выполнения анализа

Как видим из результатов расчета, синих областей почти нет. Проверим, возможно ли дальнейшее уменьшение массы детали, выставив значение уменьшения массы в 60%, где конечная масса составит уже 4,306 кг (рис. 2.27).

После получасового расчета получаем результат (рис. 2.28).

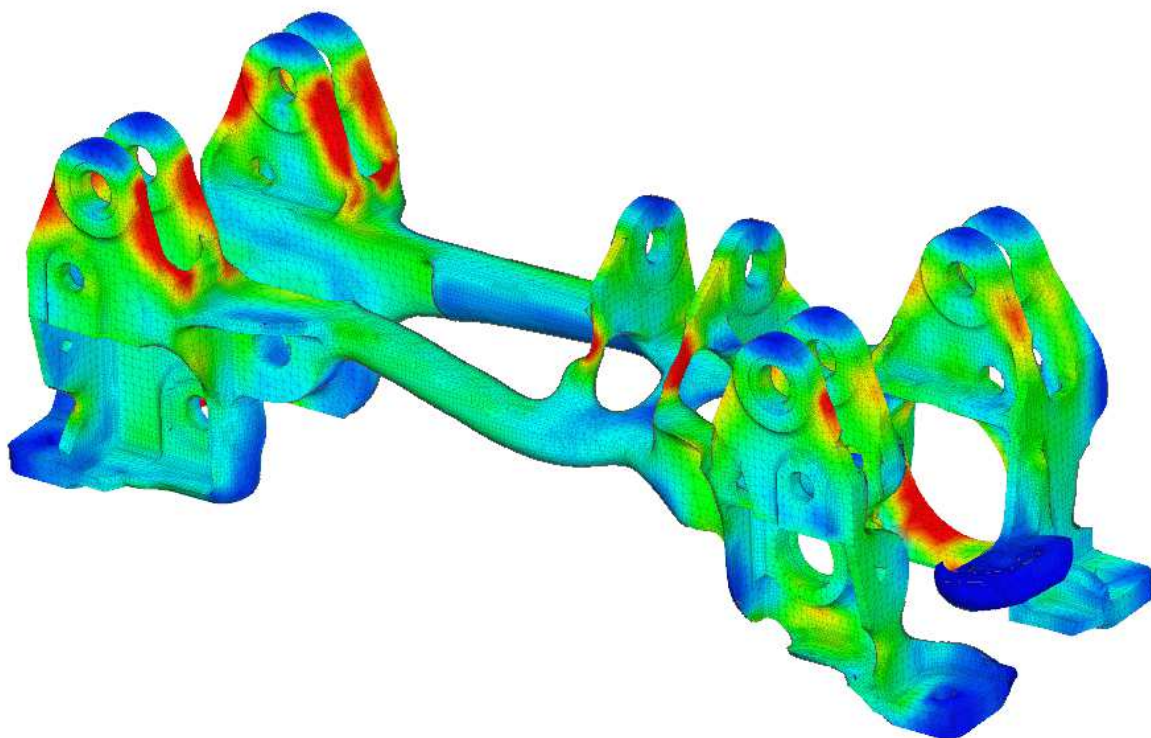


Рис. 2.28. Распределение напряжений в детали со значением уменьшения массы на 60%

В результате расчета обнаружилось, что в некоторых местах кронштейна обнаружались пустоты, а стенки ребер проушин в центральной части кронштейна истончились настолько, что стали концентраторами напряжений и могут легко сломаться.

Попробуем усилить конструкцию кронштейна, добавив дополнительные неизменяемые области с запасов в 5 мм (рис. 2.29).

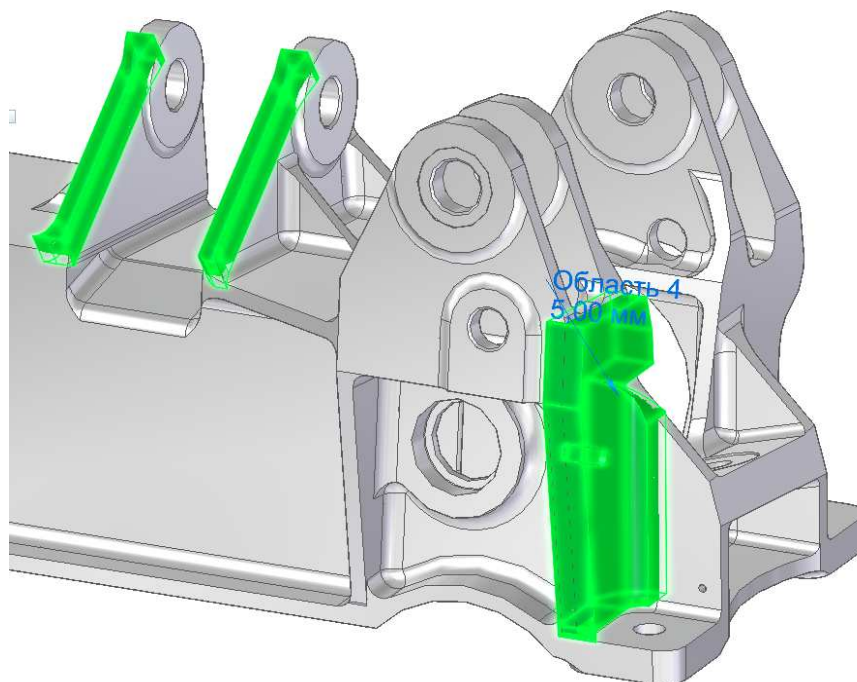


Рис. 2.29. Добавление еще одной неизменяемой области

В результате повторного расчета с параметром уменьшения массы в 60% получаем следующий результат:

Как можно заметить, теперь стенки утолщены и не являются концентраторами напряжения, основные нагрузки сместились в другое место (рис. 2.30).

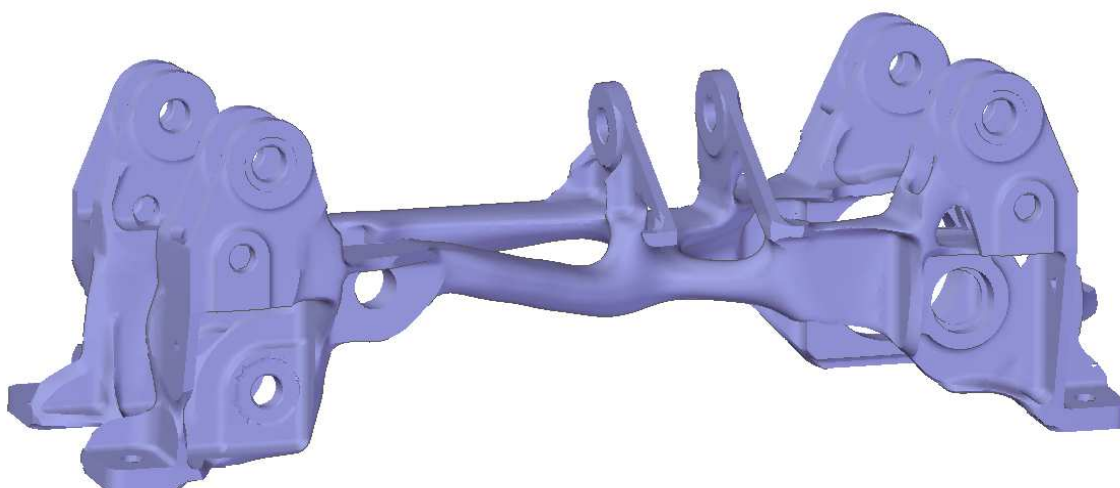


Рис. 2.30. Результат выполнения топологической оптимизация со значением уменьшения массы на 60%

Оптимизация проводилась по критерию достижения максимальной жесткости при целевых параметрах массы. После проведения ряда итераций была получена геометрия, удовлетворяющая исходным требованиям по прочности, максимальным отклонениям и частотам собственных колебаний. Полученная геометрия детали представляет собой пространственную раму из соединённых между собой изогнутых стержней (рис. 2.31).

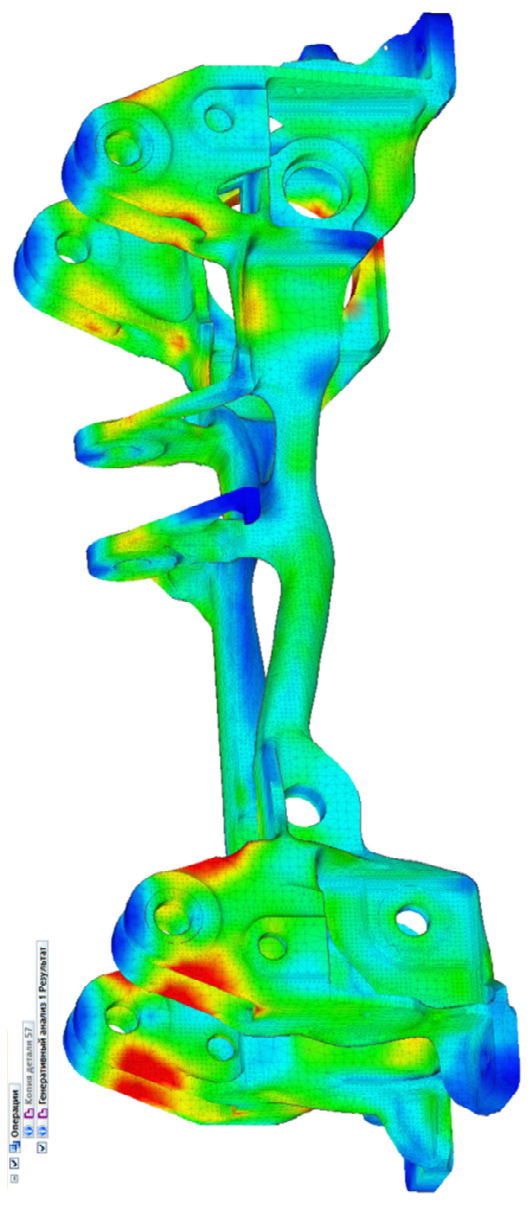


Рис. 2.31. Распределение напряжений в детали после исправления неизменяемых областей

Полученная картина напряжений показывает успешное выполнение исходных требований по прочности. Неравномерное распределение напряжений обусловлено обеспечением необходимых требований по максимизации жёсткости конструкции (рис. 2.32).

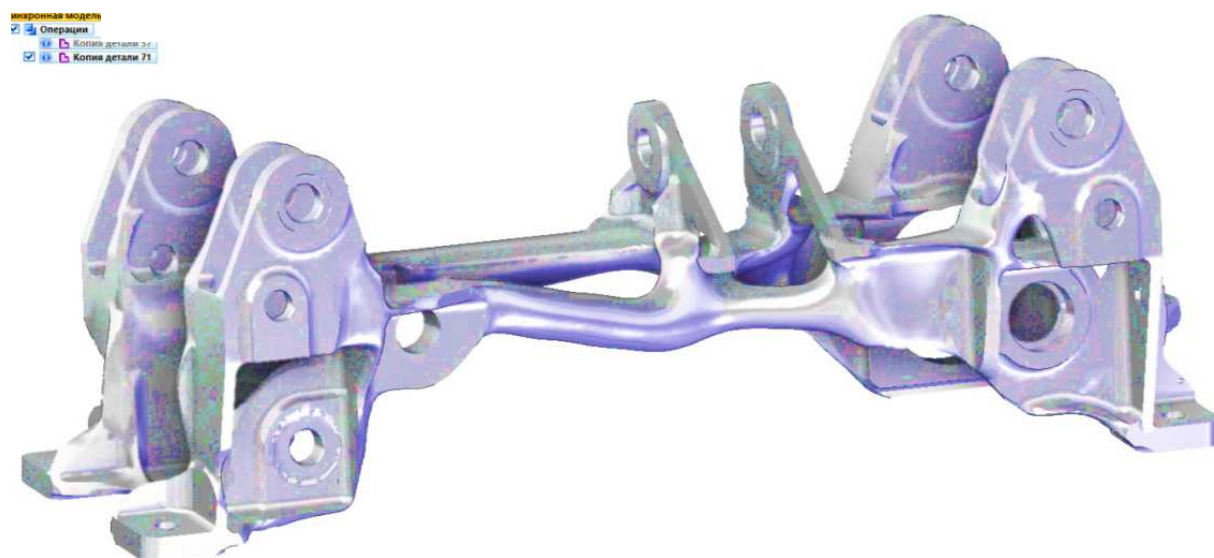


Рис. 2.32. Оптимизированный кронштейн

Максимальные линейные перемещения при этом не превышают 1 мм, что также удовлетворяет исходным требованиям.

Основным результатом топологической оптимизации является снижение массы полученной детали. В данном случае удалось снизить массу на 60 %, которая в итоге составила 4,306 кг. Снижение массы было обеспечено как использованием методов топологической оптимизации, так и использованием материала с ощутимо лучшими характеристиками, чем исходный.

Вопросы к главе 2

- 1) Дайте определение методу топологической оптимизации.
- 2) Что позволяет находить МКЭ, реализуемый в САЕ – системах?
- 3) Перечислите программное обеспечение, в котором выполняется САЕ анализ и топологическая оптимизация.
- 4) Что является целевой функцией оптимизации при топологической оптимизации конструкции изделия?
- 5) Что выступает в качестве ограничений при топологической оптимизации конструкции изделия?
- 6) Какое программное обеспечение использовалось при топологической оптимизации?
- 7) Опишите методику топологической оптимизации конструкции изделия.

3. РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ДЕТАЛИ «КРОНШТЕЙН»

3.1. Подбор оборудования и материала

Рассмотрим технологию изготовления детали «Кронштейн».

Для оптимизированной детали была выбрана технология селективного лазерного сплавления SLM (Selective Laser Melting) – селективное (выборочное) лазерное плавление – новаторская технология изготовления сложных по форме и структуре изделий из металлических порошков по математическим CAD-моделям. Этот процесс заключается в последовательном послойном расплавлении порошкового материала посредством мощного лазерного излучения (рис.3.1).

Процесс печати начинается с разделения цифровой 3D-модели изделия на слои толщиной от 20 до 100 мкм с целью создания 2D-изображения каждого слоя изделия [25]. Отраслевым стандартным форматом является STL- файл. Этот файл поступает в специальное машинное ПО, где происходит анализ информации и ее соизмерение с техническими возможностями машины.

На основе полученных данных запускается производственный цикл построения, состоящий из множества циклов построения отдельных слоев изделия.

Цикл построения слоя состоит из типовых операций:

1. Нанесение слоя порошка заданной толщины (20-100 мкм) на плиту построения, закрепленную на подогреваемой платформе построения;
2. Сканирование лучом лазера сечения слоя изделия;
3. Опускание платформы вглубь колодца построения на величину, соответствующую толщине слоя построения.

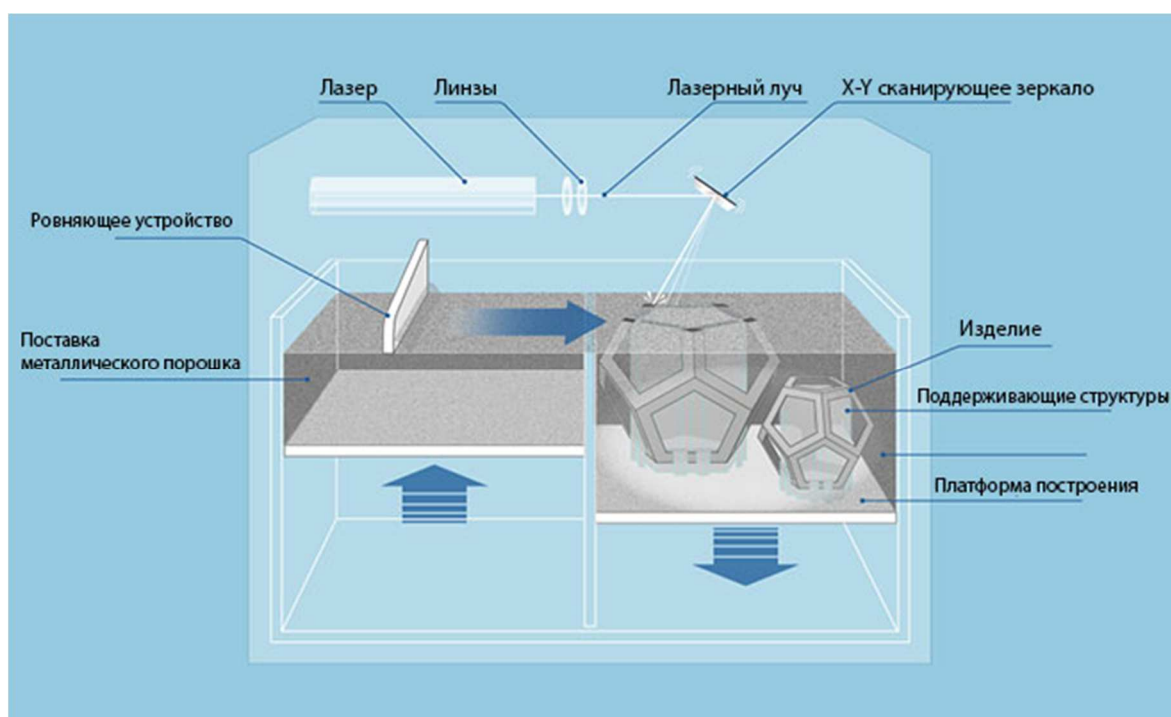


Рис. 3.1. Принцип работы технологии SLM

SLM открывает перед современными производствами широчайшие возможности, так как позволяет создавать металлические изделия высокой точности и плотности, оптимизировать конструкцию и снизить вес производимых деталей. В этом случае способность быстро изготовить уникальную деталь является наиболее очевидной, поскольку не требуется специальной оснастки, и детали могут быть изготовлены за считанные часы.

SLM также является одной из немногих технологий аддитивного производства, используемых в производстве. Поскольку компоненты построены слой за слоем, можно спроектировать внутренние элементы и проходы, которые не могут быть отлиты или иным образом обработаны. Сложные геометрии и сборки с несколькими компонентами могут быть упрощены до меньшего количества деталей с более экономичной сборкой. Технология не требует специальной оснастки, такой как отливки, поэтому удобна для мелкосерийного производства.

В качестве используемого материала используется сталь, применяемая в аддитивном производстве – 20MnCr5. Данная сталь имеет довольно широкое распространение в 3D печати. Сталь 20MnCr5 — это цементируемая сталь с низким содержанием углерода, но с хорошей прокаливаемостью и хорошей износостойкостью за счет высокой твердости поверхности после закалки. Небольшой размер зерна обеспечивает хорошую пластичность и усталостную прочность. Кроме того, для получаемых характеристик материала имеет значение выбор установки для аддитивной печати и режима работы. В данном примере была выбрана установка для лазерного плавления BLT-S400 (рис. 3.2).



Рис.3.2. Промышленный 3D принтер BLT-S400

Основные характеристики принтера представлены в табл. 3.1.

Таблица 3.1

Характеристики 3D принтера BLT-S400

Параметр	Значение
1	2
Технология печати	SLM
Область печати	400 x 250 x 400 мм
Поддерживаемые материалы	Нержавеющие стали, Co-Cr, титановые сплавы, алюминиевые сплавы, никелевые сплавы, медные сплавы, высокопрочные и инструментальные стали
Программное обеспечение	Magics; BP; BLT-Slice Viewer
Подогрев платформы	есть
Подогрев стола, max°C	200
Скорость сканирования	7м/с
1	2
Толщина слоя MAX	100 мкм
Толщина слоя MIN	20 мкм
Мощность лазера	500 Вт
Количество лазеров	2
Качество лазерного луча, M2	<1,1
Рабочий газ	Азот, Аргон
Оптическая система	F-Theta & Scanner system
Области применения:	Авиация и космос, медицина, стоматология, автомобилестроение, энергетика, прототипирование, судостроение, образование
Электропитание	380В, 10 кВт
Вес оборудования	3500 кг
Размер оборудования	2750 x 1160 x 2185 мм
Рекомендуемый размер зоны инсталляции	6800 x 4200 x 3000 мм
Производитель	BLT, Китай

Для изготовления детали из металла планировалось использовать технологию лазерного спекания SLM, однако мы в качестве реального

прототипа используем технологию послойного наплавления FDM, позволяющую печатать обычным пластиком.

Печать методом послойного наложения (FDM) представляет собой процесс АП, который реализовывается благодаря экструзии материалов. В FDM объект строится путем нанесения расплавленного материала по заранее установленному алгоритму слой за слоем (рис. 3.3). Используемые материалы представляют собой термопластичные полимеры и имеют форму нити.

FDM – наиболее широко используемая технология 3D-печати. FDM принтеры в большом многообразии представлены на рынке. В основном это первая технология, с которой сталкиваются люди, когда начинают работать с 3D.

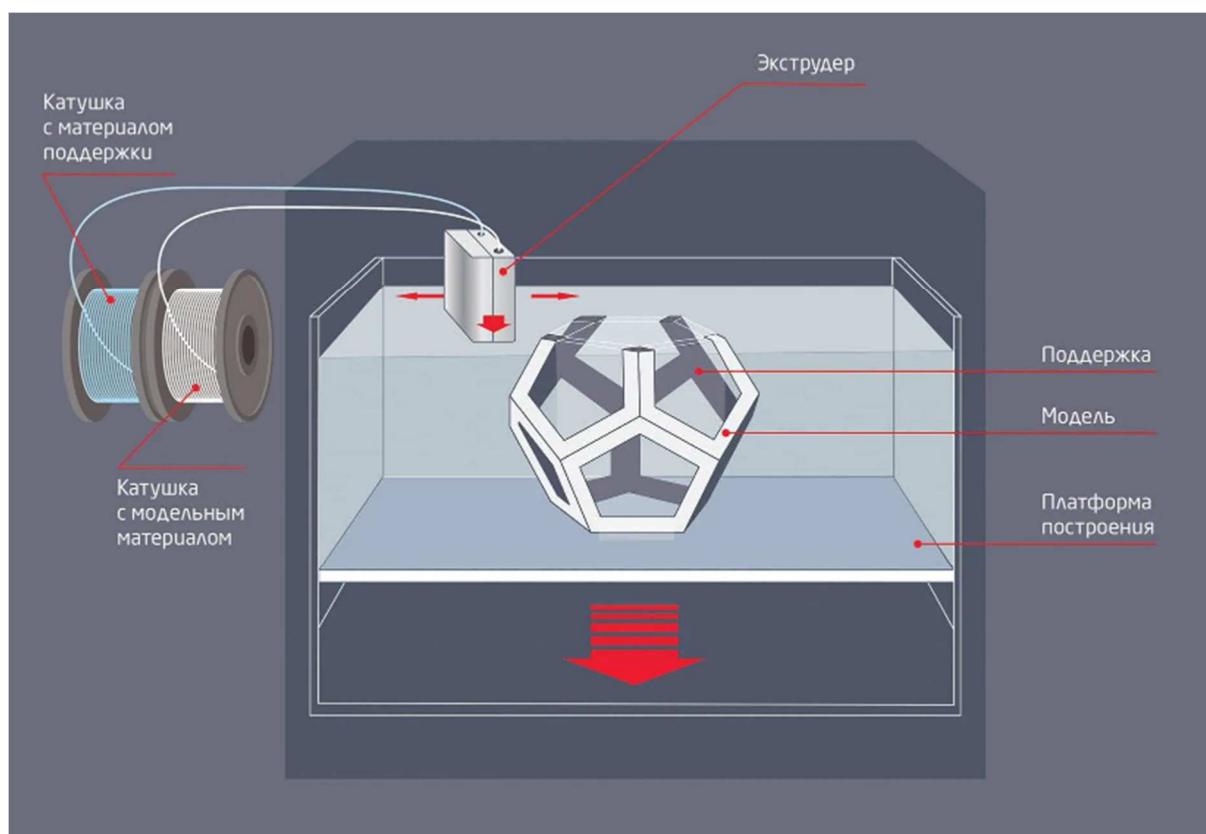


Рис. 3.3. Принцип работы технологии SLM

В качестве реального оборудования для печати технологим FDM будет использоваться 3D-принтер TENLOG TL-D3 Pro (рис. 3.4).



Рис. 3.4. 3D принтер TENLOG TL-D3 Pro

Основные характеристики принтера представлены в табл. 3.2.

Таблица 3.2

Характеристики 3D принтера TL-D3 Pro

Параметр	Значение
1	2
Модель	TL-D3 Pro 600W
Точность аддитивного производства	±0.1мм
Материал рамы	Алюминиевый сплав и листовой металл
Платформа	Алюминиевый сплав и стекло
Количество экструдеров	2
Диаметр сопла	0.4 мм
Рабочая температура сопла	Max 300°C при комнатной 20°C
Температура стола	MAX 110°C при комнатной 20°C
Рабочая температура	10-50°C
Рабочая камера	300 мм*300 мм*350 мм
Толщина слоя	0.1 мм-0.4 мм
Интерфейс	16G SD card/USB 2.0
Экран	Сенсорный 4,3-дюймовый цветной
Скорость печати	10-150 мм/с
Используемые материалы	TPU, PVA, PLA, ABS, HIPS, WOOD, PETG, гибкие материалы
Диаметр нити	1.75 мм
Язык	English, French, German, Spanish, Italian, Japanese, Chinese, пользовательский
Форматы файлов	STL, OBJ, AMF, G-код
Точность позиционирования оси XY	0.011 мм
Модель	TL-D3 Pro 600W
Точность позиционирования оси XY	0.011 мм
Точность позиционирования оси Z	0.0025 мм
Входная мощность	110V/230V@50/60Hz
Выходная мощность	24V, Max 25A
Программное обеспечение	Cura, Repetier-Host
Операционная система	Windows XP, 7, 8, 10, Linux
Диапазон напряжения	110-120V, 200 - 240V, 50 / 60Hz
Размеры (Длина*Ширина*Высота)	590 мм*520 мм*760 мм
Вес	15.6 кг

В качестве материала для печати будет использоваться пластик PLA (рис. 3.5).

Основные характеристики PLA пластика для 3D печати: прочность высокая; гибкость низкая; долговечность средняя; сложность использования низкая; температура печати 180°C – 230°C; температура стола для печати 20°C – 60°C (не обязательно); усадка деформации при охлаждении минимальная; растворим: дихлорэтан, хлористый метилен; экологически безопасный.



Рис. 3.5. Материал для печати технологией FDM – нить пластика PLA

3.2. Подготовка модели в слайсере CURA

Подготовку модели для печати на принтере производят с помощью специальных программ, которые переводят формат модели в код для 3D-принтера. Одной из таких программ является программа Cura.

Cura 3D — слайсер для 3D-принтеров. Он разбивает трехмерную модель на слои, создает файл известный как Gcode, который является кодом для печати 3D модели на 3D-принтере.

Программа переводит файлы STL, OBJ или 3MF в формат, понятный для принтера. 3D-принтеры печатают один слой на другом, чтобы создать 3D-объект. Cura обрабатывает 3D-модель и определяет, как эти слои разместятся на платформе для 3D печати, создавая набор инструкций для принтера.

Поскольку каждый принтер имеет свои настройки, область печати, размер сопла, Cura передается аппаратные настройки в профиле принтера. Как только у него появятся необходимые данные, вы можете указать такие параметры, как высота и толщина слоя. Основываясь на основных характеристиках принтера и ваших настройках, Cura рассчитает путь, который должна пройти печатающая головка для печати вашей модели, и создаст Gcode.

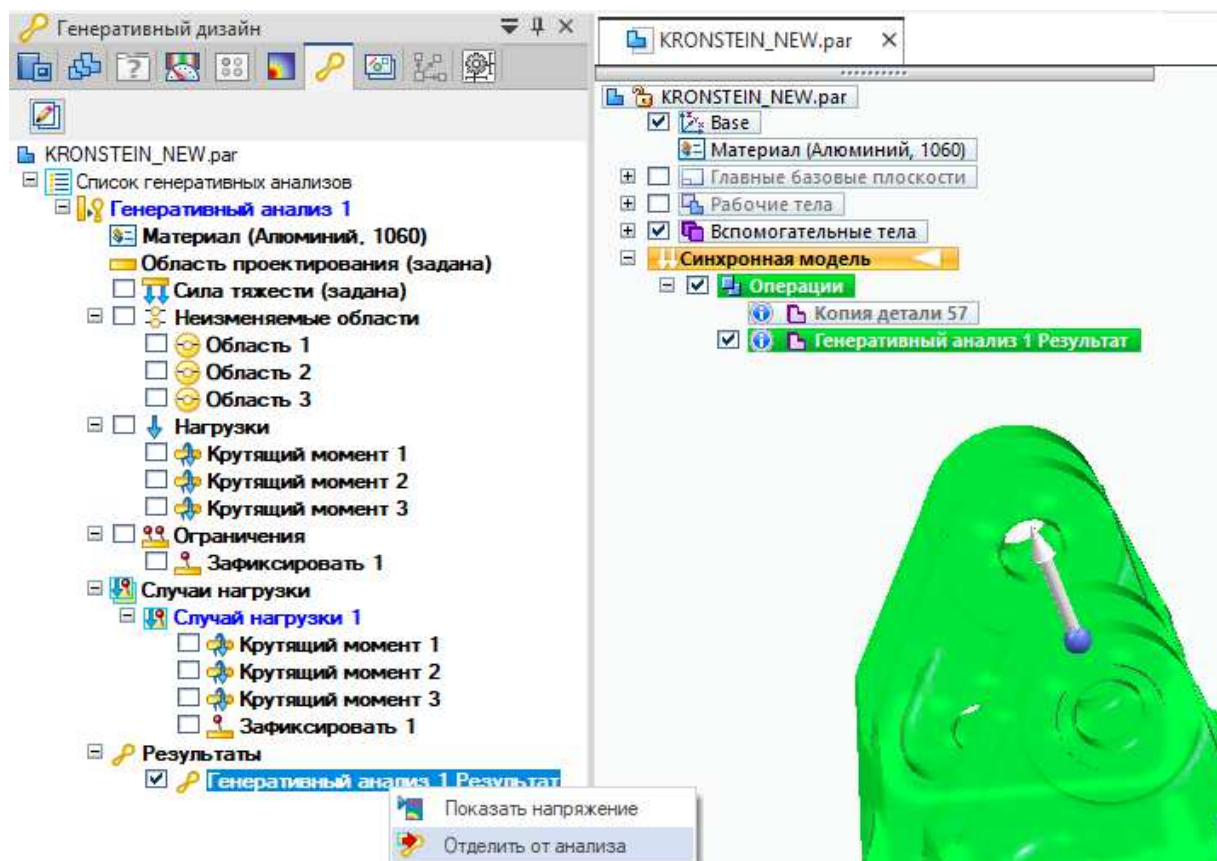


Рис. 3.6. Отделение модели от результатов анализа

Затем G-код можно сохранить на SD-карту или отправить на принтер по беспроводной сети или кабелю, в зависимости от принтера, непосредственно из Cura.

Изготовим с помощью слайсера Cura топологически оптимизированную конструкцию детали «Кронштейн».

Все слайсеры 3D печати используют формат STL, поэтому чтобы работать в слайсере, нам необходимо получить нашу деталь в формате STL. Для этого после завершения топологической оптимизации в Solid Edge необходимо в дереве построений отделить результат расчетов от анализа (рис. 3.6).

Это позволит редактировать данную модель и преобразовывать ее в другие форматы. Также полученное тело необходимо сделать рабочим, а старое неоптимизированное тело удалить (рис. 3.7).

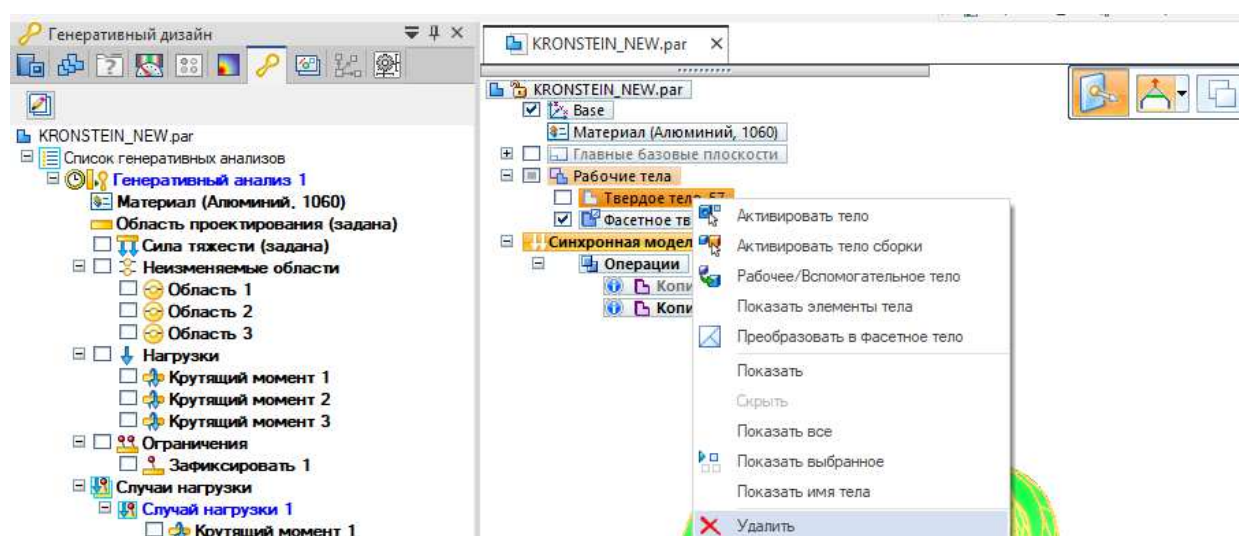


Рис. 3.7. Подготовка модели для импорта в формат STL

Таким образом, оптимизированное тело стало рабочим, благодаря чему его можно сохранить в формате STL (рис. 3.8).

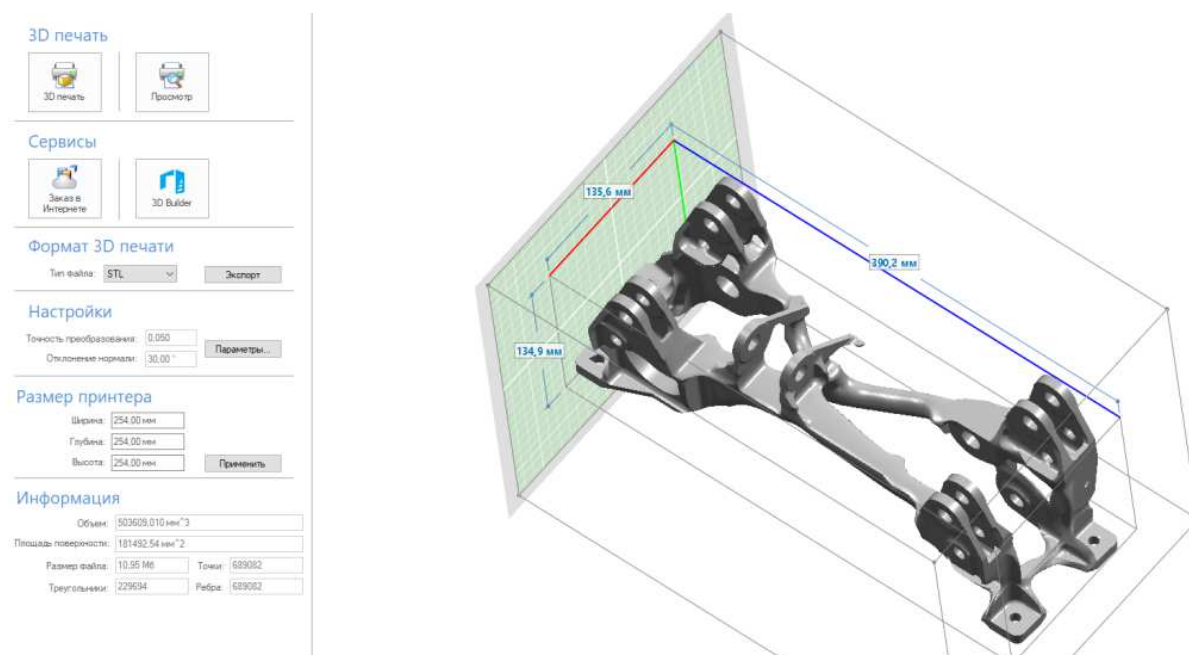


Рис. 3.8. Сохранение детали в формате STL

Принтер		Left
Параметры принтера		
X (Ширина)	300	MM
Y (Глубина)	300	MM
Z (Высота)	350	MM
Форма стола	Rectangular	
Начало координат в центре	☐	
Нагреваемый стол	☒	
Подогреваемый объем печати	☐	
Вариант G-кода	Marlin	
Стартовый G-код		
<pre>G21 ;metric values G90 ;absolute positioning M82 ;set extruder to absolute mode M107 ;start with the fan off G28 ;Move to min endstops G1 Z15.0 F9000 ;move the platform down 15mm M117 Printing...</pre>		

Рис. 3.9. Стартовый G-код

Далее переходим в CURA для подготовки программы для печати детали. В первую очередь необходимо подготовить CURA к печати на принтере. Чтобы это сделать, необходимо настроить профиль принтера. Некоторые принтеры поставляются с уже адаптированным ПО Cura. Это касается принтеров Ultimaker или Lulzbot. Часто адаптированный слайсер можно скачать прямо с сайта производителя принтеров.

Войдя в окно «Добавить принтер», нам требуется выбрать требуемый принтер из списка и добавить его.

Чтобы настроить параметры выбранного принтера, откроем меню: «Настройки – Принтеры – Параметры принтера».

Далее необходимо указать параметры принтера (они указаны в характеристиках принтера, приведенных выше), а также указать Стартовый (рис. 3.9) и завершающий G-код (рис. 3.10).

Extruder	Right Extruder
Параметры головы	
X минимум	-20 MM
Y минимум	-10 MM
X максимум	10 MM
Y максимум	10 MM
Высота портала	350 MM
Количество экструдеров	2 ▼

Завершающий G-код

```

M104 T0 S0 ;1st extruder heater off
M104 T1 S0 ;2nd extruder heater off
M140 S0 ;heated bed heater off (if you have it)
G91 ;relative positioning
G1 E-1 F300 ;retract the filament a bit before lifting the nozzle, to release some of the pressure
G1 Z+0.5 E-5 X-20 Y-20 F9000 ;move Z up a bit and retract filament even more
G28 X0 Y0 ;move X/Y to min endstops, so the head is out of the way
    
```

Рис. 3.10. Завершающий G-код

G –коды аналогичны G-кодам фрезерный станков, расшифруем команды стартового и завершающего G-Code для 3D-принтера.

Стартовый G-код: G21 – режим работы в метрической системе; G90 – абсолютное позиционирование; M82 – перевести экструдер в абсолютный режим; M107 – начать с выключенным вентилятором; G28 – вернуться на референтную точку; G1 Z15.0 F9000 – переместить платформу вниз на 15 мм; M117 – печать...

Завершающий G-код:

M104 T0 S0 – нагреватель 1-го экструдера выключить; M104 T1 S0 – нагреватель 2-го экструдера выключить; M140 S0 – выключить подогрев стола; G91 – относительное позиционирование; G1 E-1 F300 – слегка втянуть нить перед тем, как поднять сопло, чтобы немного сбросить давление; G1 Z+0,5 E-5 X-20 Y-20 F9000 – сдвинуть Z немного вверх и еще больше втянуть нить; G28 X0 Y0 – переместить X / Y на минимальные конечные упоры, чтобы головка не мешала; M84 – выключить stepper; G90 – абсолютное позиционирование.

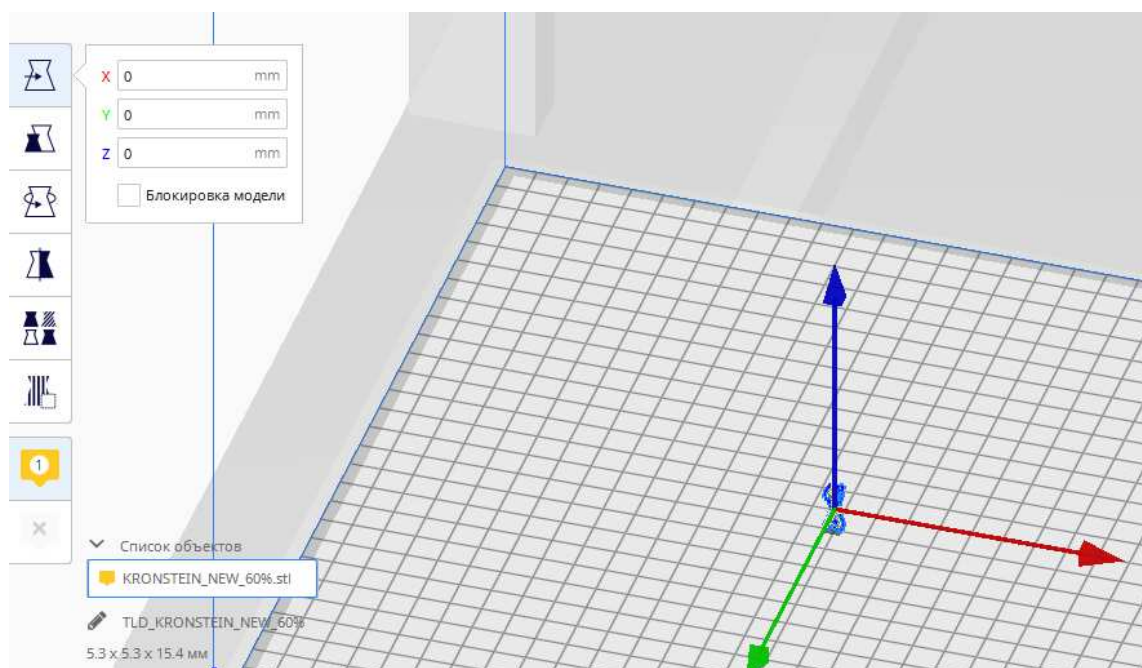


Рис. 3.11. Позиционирование детали в системах координат

После ввода нажимаем «Закрыть». Настройка параметров принтера завершена.

После настройки принтера нужно импортировать модель. Для этого нужно нажать «Файл» в верхнем меню, затем «Открыть файл». Выбираем файл STL и импортируем его.

Во вкладке «Подготовка» модель появляется в области сборки, сейчас она выглядит слишком маленькой (рис. 3.11). Откроем пункт меню «Масштаб» и смасштабируем деталь (рис. 3.12).

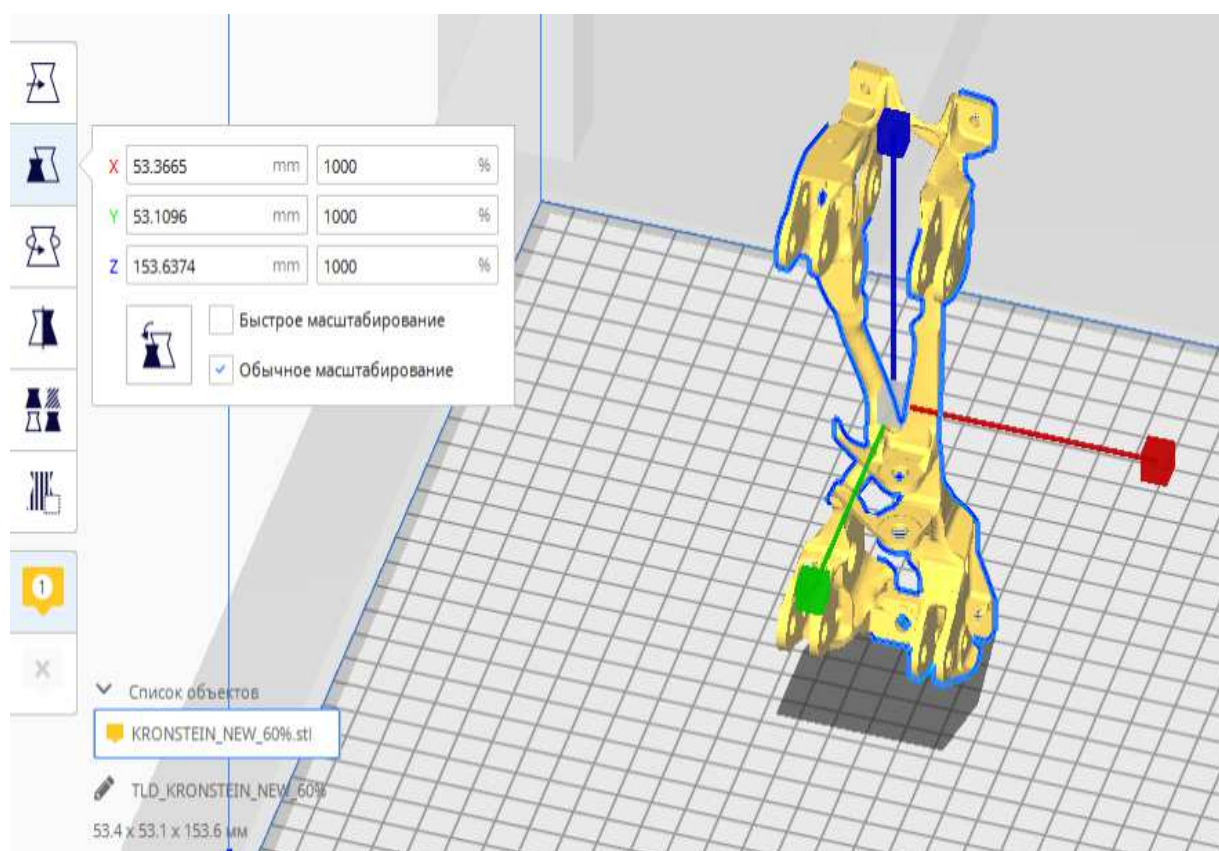


Рис. 3.12. Масштабирование детали

Поворот вокруг области сборки Сига: нажимаем и удерживаем правую кнопку мыши, чтобы вращать область сборки. Это удобно для проверки 3D-модели со всех сторон (рис. 3.13).

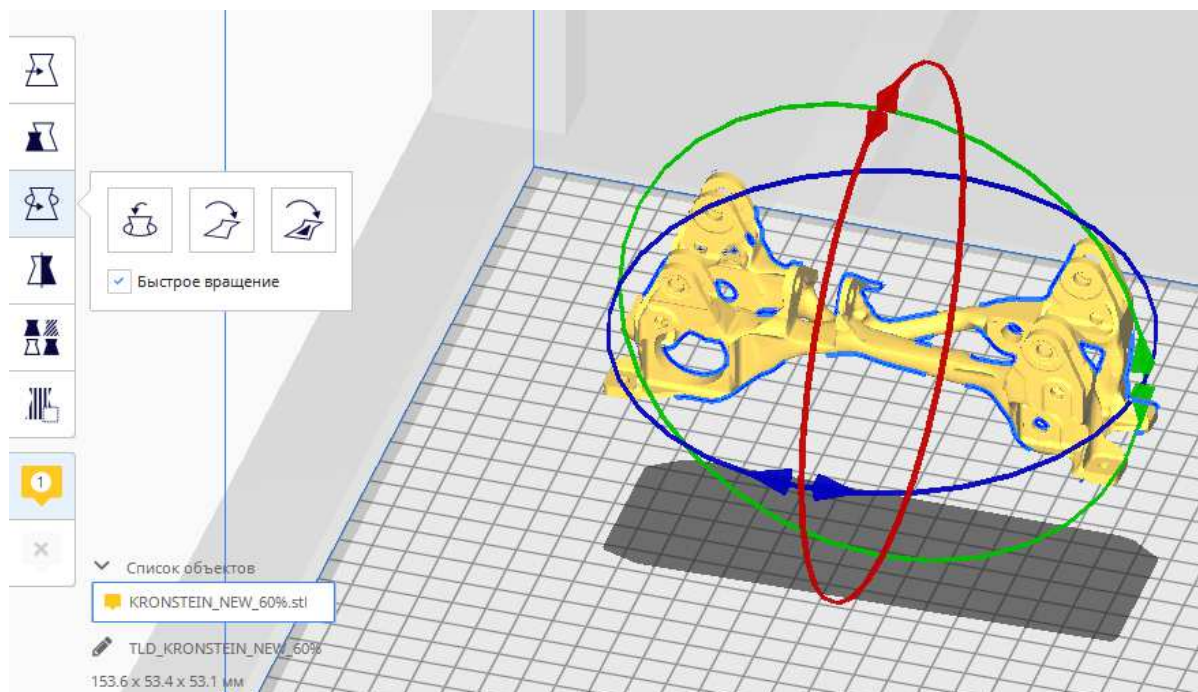


Рис. 3.13. Вращение детали в необходимых направлениях

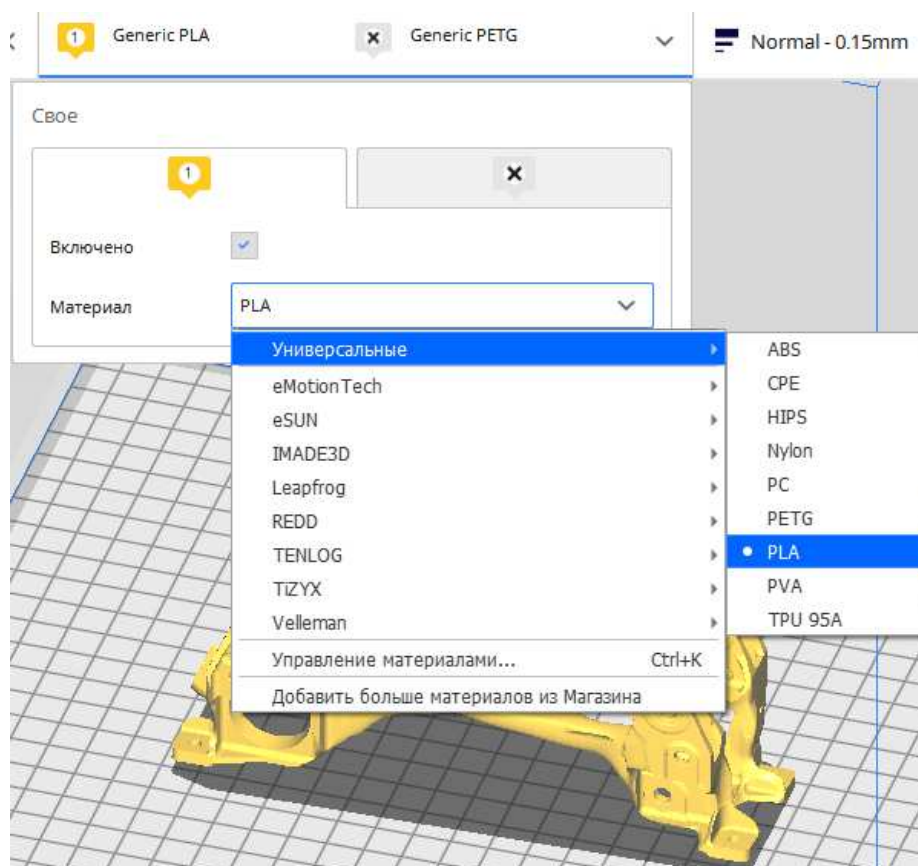


Рис. 3.14. Задание материала детали

Дальше необходимо выбрать материал печати. У каждого материала для 3D печати свои характеристики. Чтобы выбрать материал, необходимо открыть кладку с экструдером и в раскрывающемся списке «Материал» выбрать: универсальные – PLA (рис. 3.14).

Для создания G-кодов для принтера требуется задать настройки для печати. По умолчанию можно использовать рекомендуемые настройки — это только начало. Так как нам требуется реализовать конкретные параметры для печати, мы используем расширенные настройки. Рассмотрим их ниже.

В панели настройки печати справа выбираем «Расширенные настройки»:

Quality (Качество) связано с параметром Layer Height (Высота слоя). Эта настройка зависит от возможностей 3D принтера. Чем меньше высота слоя, тем лучше качество, а увеличение высоты слоя повысит скорость печати. По умолчанию высота слоя установлена на 0.1 мм. Установим значение 0,15 для более быстрой печати.

Shell (Стенки). Этот параметр отвечает за толщину стенок модели, а также за толщину нижнего и верхнего слоев. По умолчанию установлено значение толщины стенок 0,9 мм.

Print Speed (Скорость печати). Это общая скорость 3D печати во время непосредственной подачи материала. Как правило, чем меньше скорость, тем качественнее 3D печать. Для пластика PLA оптимальные значения скорости печати составляют 40-45 мм/с.

Travel Speed (Скорость холостых перемещений). Это скорость, с которой перемещается печатающая головка, когда материал не подается. По умолчанию устанавливается на 120 мм/с. Эту скорость рекомендуется выставлять в зависимости от скорости непосредственной печати. А если быть точнее, то в 2 раза больше. В таком случае ускорения и торможения будут

происходить достаточно плавно, чтобы обеспечить качественную и при этом быструю печать.

Enable Fan Cooling (Включить охлаждение кулерами). Важная составляющая любого 3D принтера, данную опцию необходимо активировать. Как правило, кулеры работают не на полную мощность до окончания 5-го слоя. Для печати пластиком PLA рекомендуется выставить значение скорости вращения вентиляторов 50% от максимального уровня.

Support (Поддержки). Дает возможность добавлять суппорт-структуры (искусственные базы) для печати. Данную опцию необходимо активировать.

Build Plate Adhesion (Адгезия стола для печати). Не у всех моделей достаточная площадь основания для хорошего контакта со столом для печати. Если так, то эта настройка поможет вам обеспечить качественный контакт с основанием.

Special Modes (Специальные режимы). Если вы печатаете больше одной модели, эта опция позволит вам указать, что они будут печататься одна за другой.

Material (Материал). У каждого материала для 3D печати свои характеристики. Данный параметр позволяет настроить характеристики материала, если они отличаются от заводских.

Enable Retraction (Включить подачу в обратном направлении). Рекомендуется всегда включать эту опцию. Благодаря ей материал подается в обратном направлении во время холостых перемещений экструдера. Это предотвращает преждевременное засорение сопла 3D-принтера при частых холостых перемещениях.

Infill Density (Плотность заполнения). Это количество материала, которое подается для внутренней части модели. Чем выше наполнение, тем

больше жесткость модели. Как правило, этот параметр устанавливается на 20%.

Build Plate Adhesion (Адгезия (сцепляемость) стола для печати) Это как раз те настройки, которые помогают улучшить контакт модели и стола. Одна из самых распространенных проблем 3D печати – это когда модель отлепляется от стола для печати. Существует три варианта для улучшения контакта - Skirt, Brim или Raft.

Skirt (Юбка). Это линия вокруг 3D модели во время печати первого слоя, которая помогает прочистить сопло во время начала 3D печати.

Brim (Обрамление). Это несколько дополнительных линий, которые печатаются перед первым слоем модели и обеспечивают лучшую сцепляемость нижнего слоя модели и стола.

Raft (Подложка). Это сетка (подложка) под первым слоем 3D модели, благодаря которой значительно улучшается контакт модели и стола.

Шаблоны заполнения. Влияют на прочность модели, расход материала и время печати

По умолчанию слайсер Cura печатает заполнение в виде сетки, печатая в одном диагональном направлении. Это обеспечивает разумную прочность, не расходуя слишком много материала. Это также один из самых быстрых шаблонов с точки зрения времени печати. Стандартный шаблон заполнения Cura должен подойти для большинства распространенных применений. Однако в некоторых специальных приложениях шаблон по умолчанию может быть не самым лучшим. В таких случаях Cura предлагает широкий выбор шаблонов заполнения (рис. 3.15).

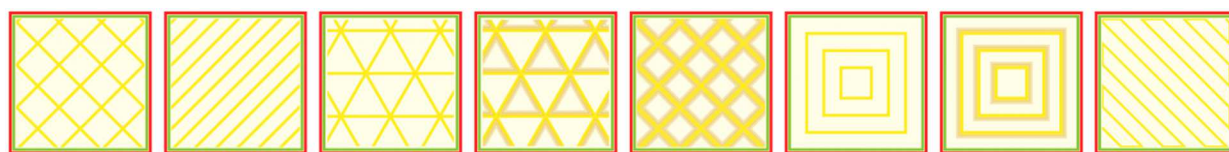


Рис. 3.15. Шаблоны заполнения при печати

Доступно больше шаблонов заполнения, чем показано на рисунке. Чтобы изменить шаблон заполнения Cura, можно подключить скрытый параметр «Шаблон заполнения», и он появится в разделе «Заполнение». На выбор будет доступно из 13 различных моделей. Некоторые из важных моделей:

Сетка: заполнение в форме сетки, с линиями в обоих диагональных направлениях на каждом слое.

Линии: создаёт заполнение в форме сетки, печатая в одном диагональном направлении

Треугольники: создает треугольный узор заполнения.

Куб: 3D-заполнение наклонных кубов.

Тетраэдр: трехмерное заполнение фигур пирамиды.

Концентрический: заполнение печатается снаружи по направлению к центру модели. Таким образом, линии заполнения не будут видны через стены отпечатка.

Концентрическое 3D: заполнение печатается снаружи по направлению к центру модели с наклоном по всему отпечатку.

Зигзаг: заполнение в виде сетки, непрерывно печатаемое в одном диагональном направлении.

Основные факторы, которые необходимо учитывать при выборе шаблона заполнения в слайсере Cura:

- Какие нагрузки будет испытывать деталь.
- Величина поверхности модели.

Если деталь будет использоваться не в качестве механической части, а скорее в эстетических целях, то удастся не заполнять ее вообще. Однако, если та же 3D-модель имеет большую внутреннюю полость, то для поверхности потребуется некоторые поддержки для печати. В таких случаях лучший тип заполнения – концентрический. Будет использоваться мини-

мальное количество материала и самая быстрая печать. В то же время он обеспечивает достаточную поддержку верхних стенок. Если необходимо, чтобы модель имела разумную прочность, тогда лучше всего выбрать 2D-модель, такую как Сетка, Линии или Треугольники. Линии обеспечивают наименьшую прочность, но не потребляют много материала и быстро печатаются. Треугольники предлагают большую прочность и высокие боковые нагрузки. Сетка потребляет больше материала, медленнее печатается, но обеспечивает довольно большую прочность. Лучше использовать этот наполнитель, так как он обеспечивает прочность стенок и более длинные, тонкие конструкции. С этими узорами в Cura получатся отличные внутренние поддержки и почти изотропные механические свойства. Остановимся на шаблоне заполнения Сетка, так как он обеспечивает наибольшую прочность изготавливаемой детали.

3.3. Генерация G-кода

После того, как все параметры заданы, остается сгенерировать GCODE и экспортировать файл из Cura на SD карту или отправить ее напрямую на 3D принтер. Cura проведет все необходимые операции для конвертирования STL-файла в G-код для 3D принтера.

Cura предоставит предварительную оценку времени и массы пластика, которое понадобится для печати модели (рис. 3.16).

Слой: делается это с помощью клавиш со стрелками. Кроме того, есть слайдер для быстрого просмотра всех слоев, которые формируют отпечаток (рис. 3.17). По мере продвижения в Cura эта функция удобна для точного определения слоев, где у нас вдруг понадобится изменить настройки G-кода, например, увеличить скорость вращения вентилятора, высоту слоя или поток.

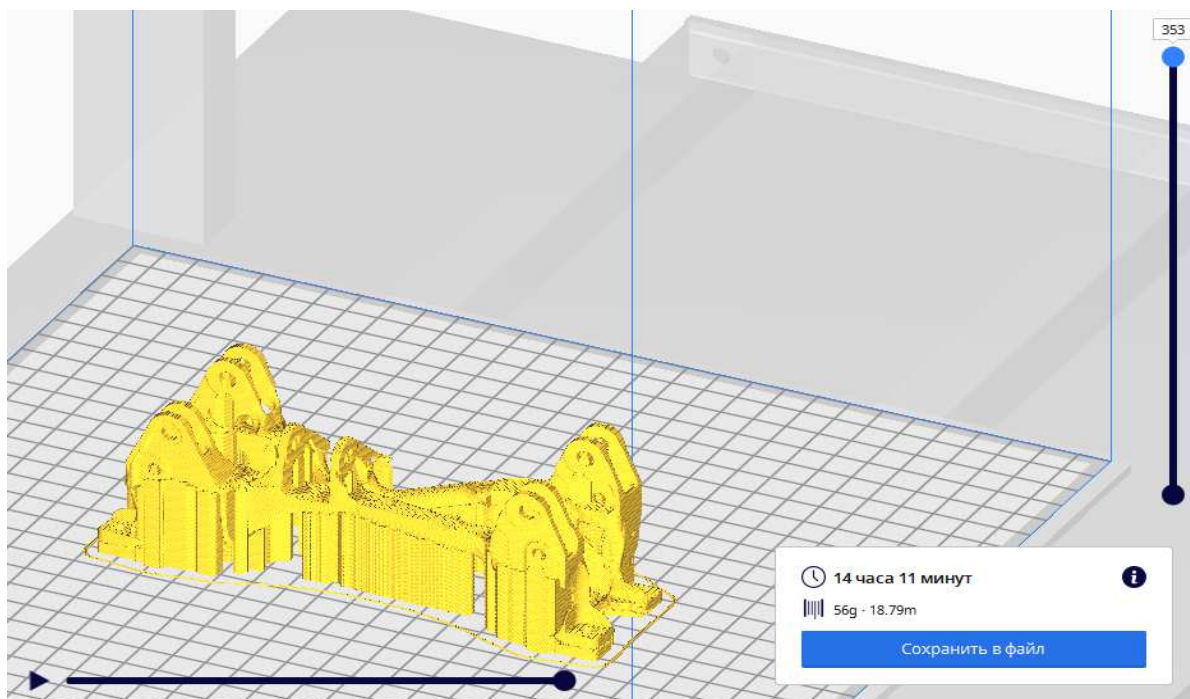


Рис. 3.16. Итоговое время печати и затраты материала

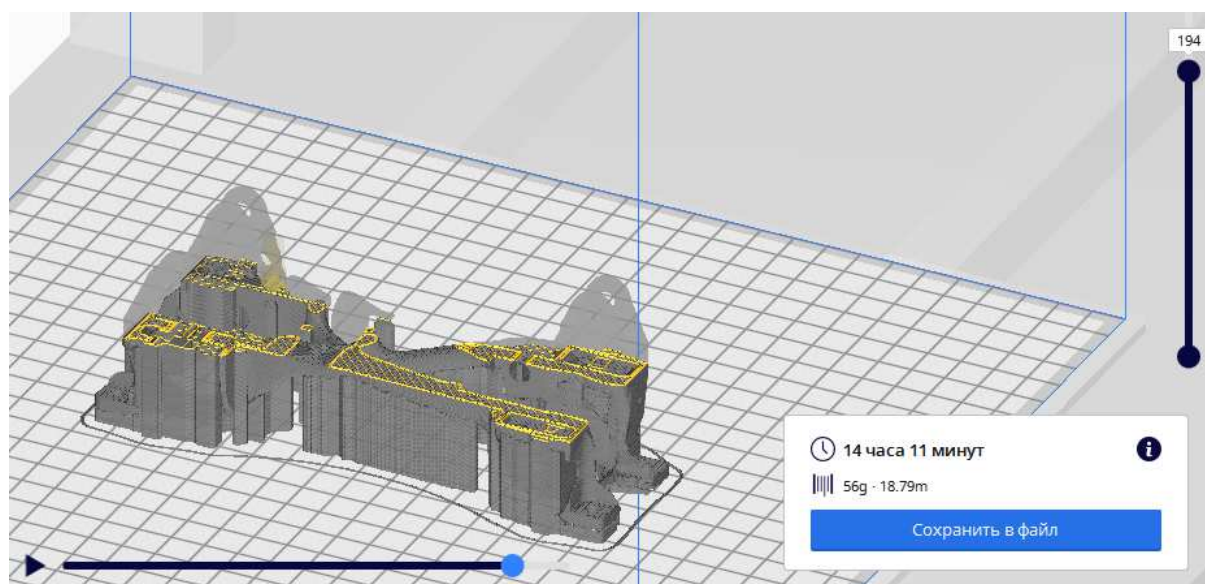


Рис. 3.17. Просмотр 194го слоя печати в CURA

При нажатии сохранить в файл появится файл с GCODE, который нужно сохранить на флешку и перекинуть на принтер.

3.4. Подготовка модели в слайсере CURA

Далее на принтере нам необходимо выбрать необходимый G-код для печати и запустить печать детали «Кронштейн» (рис. 3.18).

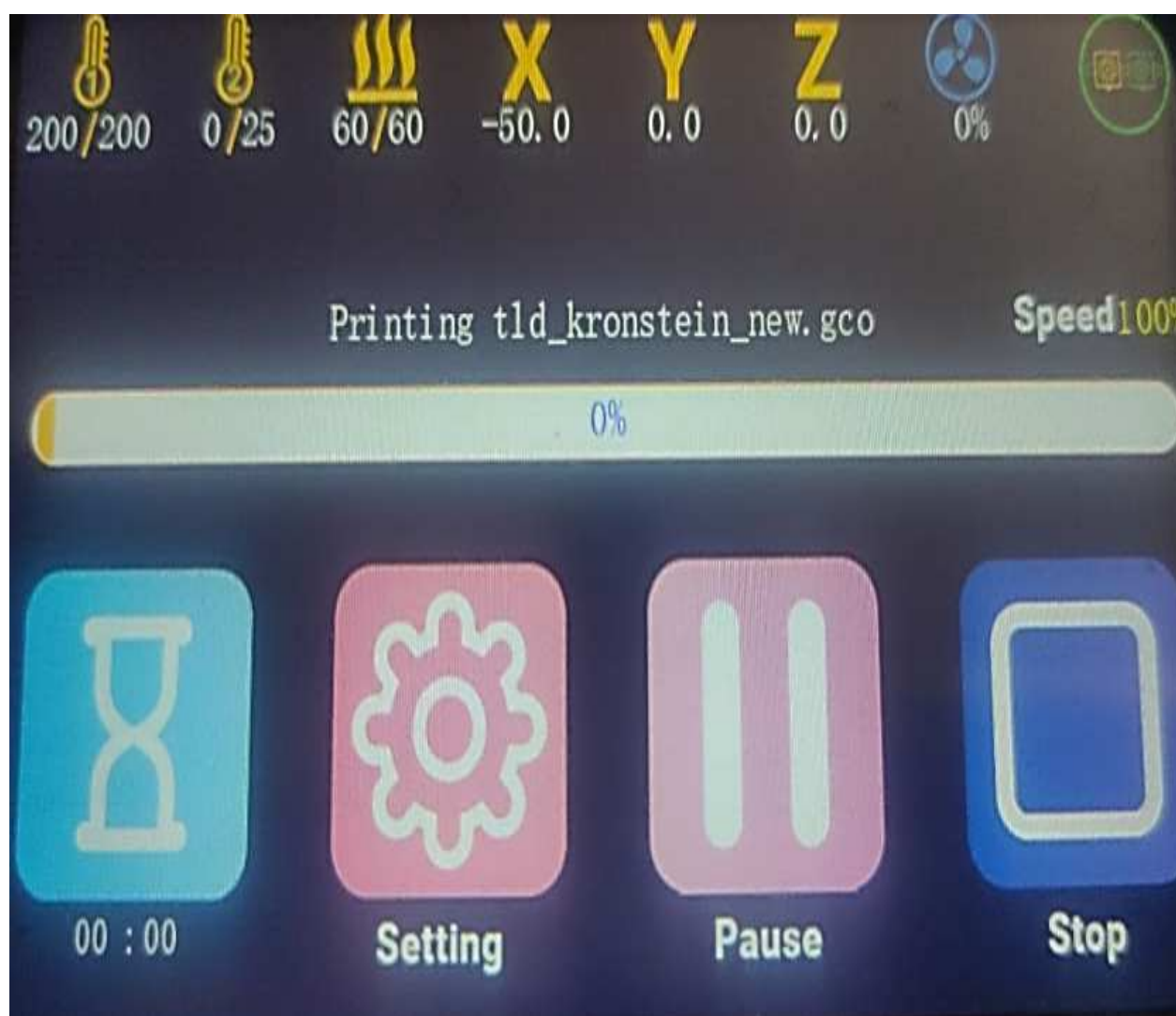


Рис. 3.18. Панель управления 3D-принтера во время печати

Вначале печатается подложка и искусственные базы, на которых будет располагаться деталь (рис. 3.19).

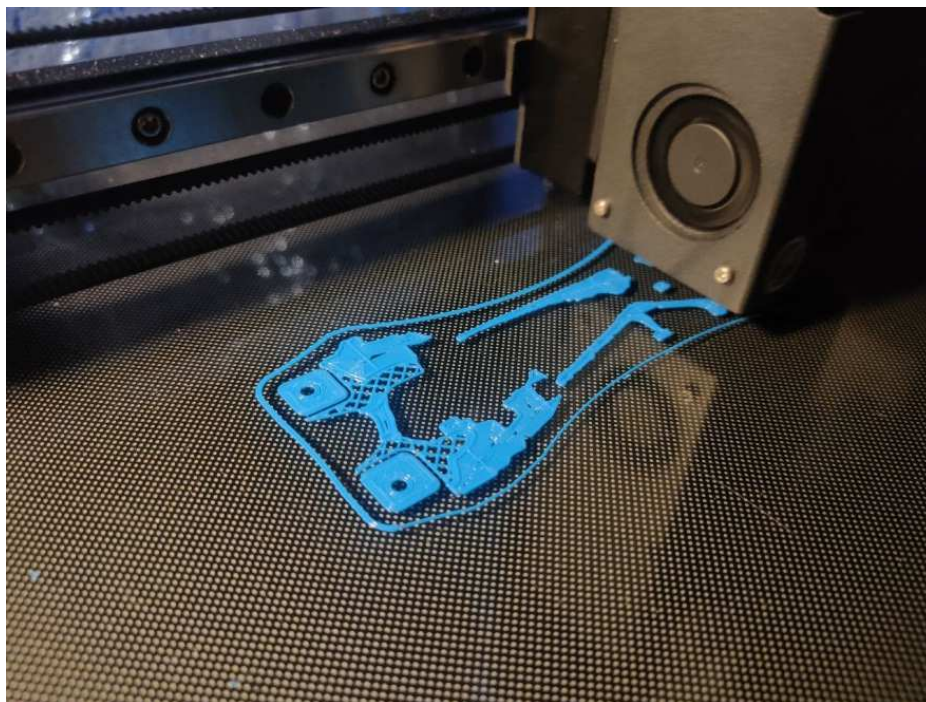


Рис. 3.19. Печать первого слоя

Затем начинается непосредственно печать детали с заполнением внутренних полостей на 20%, кое-где ещё печатаются поддержки (рис. 3.20).

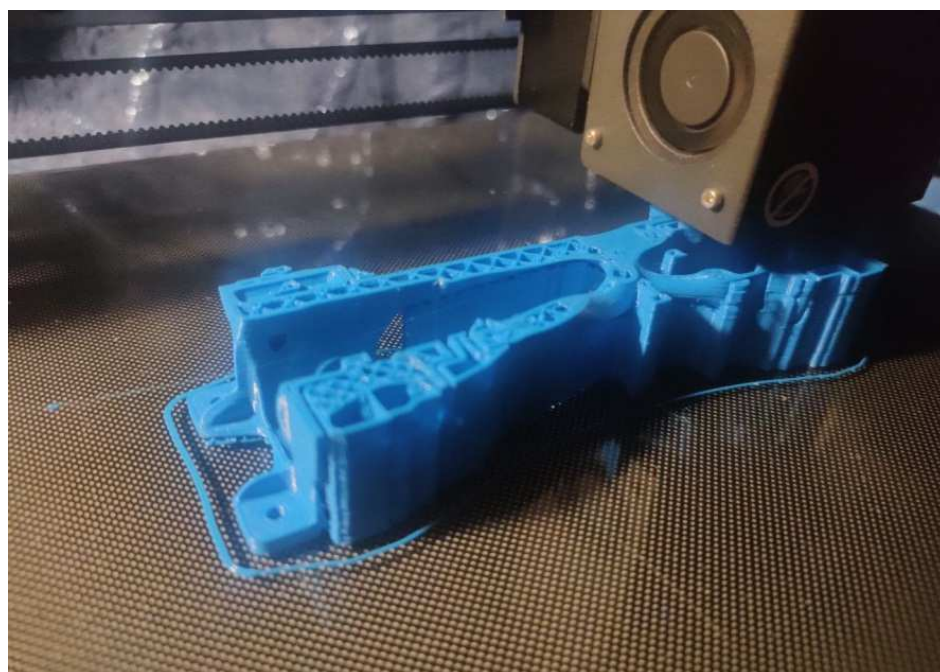


Рис. 3.20. Наполовину напечатанная деталь

Спустя 14 часов работы принтер завершает печать детали (рис. 3.21).

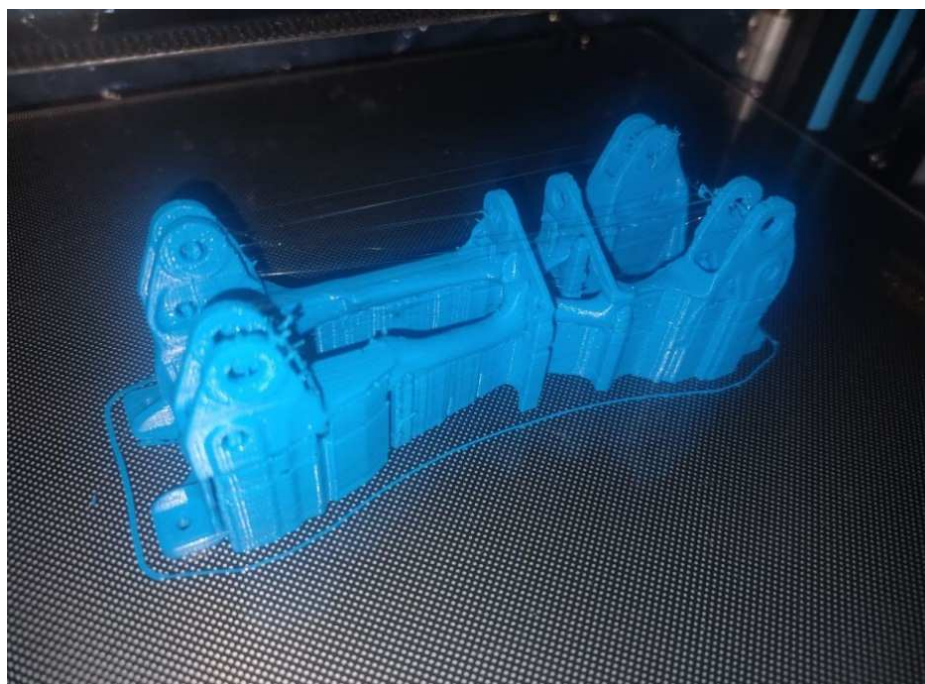


Рис. 3.21. 100% напечатанная деталь с поддержками

После завершения печати необходимо вручную отделить искусственные базы. В результате работы получена деталь «Кронштейн» в масштабе 1:2,5, которая может использоваться для контроля геометрии изготавливаемых кронштейнов (рис. 3.22).



Рис. 3.22. Готовая деталь с удаленными поддержками

Вопросы к главе 3

- 1) Дайте характеристику технологии селективного лазерного сплавления SLM.
- 2) Из каких типовых операций состоит цикл построения слоя по технологии SLM?
- 3) Опишите преимущества технологии SLM, применяемые при изготовлении детали.
- 4) Дайте характеристику методики печати по технологии FDM.
- 5) Дайте характеристику оборудования, используемого для 3D печати по технологии FDM.
- 6) Назовите марку материала для 3D печати пластиком.
- 7) Для чего предназначена программа Cura 3D?
- 8) Какие задачи решаются программой Cura 3D?

4. РАСЧЕТ ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ЦЕЛЕСООБРАЗНОСТИ 3D-ПЕЧАТИ

4.1. Расчет стоимости изготовления детали методом 3D-печати

Расчёт экономики для сравнения двух технологий производился с точки зрения оценки затрат. Для подобного расчета необходимо получить или рассчитать себестоимость изготовления детали методом АТ и литья, а также учесть стоимость станка 3D печати с одной стороны и стоимость оснастки для литья с другой стороны.

Для расчета себестоимости изготовления детали методом АТ была использована методика компании AMPower Insights. В соответствии с данной методикой расходы на деталь, изготовленную методом АТ, можно разделить на следующие типы: затраты на подготовку данных; затраты подготовки и загрузки машины; затраты во время работы машины; затраты на очистку машины; затраты на термообработку; затраты на удаление поддержек; затраты на дополнительную механообработку.

Необходимые параметры для расчета взяты из технических характеристик установки BLT-S400. Другую часть данных для расчета составляют полученные габариты и масса оптимизированного кронштейна. Кроме того, геометрия кронштейна и габариты камеры 400x250x400 позволяют разместить в ней кронштейн.

Для расчета всех выше приведенных затрат были использованы следующие формулы:

Затраты на подготовку данных рассчитываются по формуле:

$$DP = \frac{t_D \cdot C_L}{N_T},$$

где t_D – время для подготовки данных, ч; C_L – стоимость труда, руб/ч; N_T – общее количество деталей, шт.

Затраты на подготовку и загрузку машины рассчитываются по формуле:

$$MS = \frac{t_M \cdot (C_L + C_{AM})}{N_B},$$

где t_M – время для подготовки машины, ч; C_{AM} – машинно-часовой тариф, включая потребление энергии и расходные материалы, руб/ч; N_B – количество деталей за одну загрузку, шт.

Затраты во время работы машины рассчитываются по формуле:

$$MRT = \frac{(M_M + M_M \cdot F_M) \cdot C_M + \left(\left(\frac{V_M}{P_M \cdot F_L} \right) + \left(\frac{t_R}{3600} \right) \cdot \left(\frac{h_B}{S_L \cdot 1000} \right) \right) \cdot C_{AM}}{N_B},$$

где M_M – масса деталей и поддержек в камере, кг; F_M – коэффициент материальных потерь; C_M – стоимость материалов (20MnCr5) руб/кг; V_M – объем деталей и поддержек в камере, см³; P_M – скорость построения, см³/ч; F_L – коэффициент использования лазера; t_R – время нанесения нового слоя порошка, сек; h_B – общая высота заполнения камеры (габарит детали по высоте), мм; S_L – толщина слоя, нм;

Затраты на очистку машины и детали рассчитываются по формуле:

$$MU = \frac{t_U \cdot C_{AM} + t_B \cdot C_L}{N_B},$$

где t_U – время очистки машины, ч; t_B – время очистки готового изделия, ч.

Затраты на удаление поддержек рассчитываются по формуле:

$$SR = \frac{t_P \cdot C_L}{N_B},$$

где t_P – время на удаление поддержек, ч; итоговую стоимость можно определить как сумму всех затрат:

$$C = DP + MS + MRT + MU + SR + C_H + C_C,$$

где C_H – стоимость термообработки на деталь, руб; C_C – стоимость механообработки одной детали, руб.

$$\begin{aligned}
DP &= \frac{2 \cdot 300}{100} = 6 \text{ (руб)}, \\
MS &= \frac{2 \cdot (300 + 240)}{1} = 1080 \text{ (руб)}, \\
MRT &= \frac{(7 + 7 \cdot 0,01) \cdot 5000 + \left(\left(\frac{780,62}{30 \cdot 1} \right) + \left(\frac{20}{3600} \right) \cdot \left(\frac{132}{300 \cdot 1000} \right) \right) \cdot 240}{1} \\
&= 41595 \text{ (руб)}, \\
MU &= \frac{2 \cdot 240 + 1 \cdot 300}{1} = 780 \text{ (руб)}, \\
SR &= \frac{0,2 \cdot 300}{1} = 60 \text{ (руб)}, \\
C &= 6 + 1080 + 41595 + 780 + 60 + 600 + 1200 = 45321 \text{ (руб)},
\end{aligned}$$

Итоговая стоимость изготовления детали методом АТ для партии из 100 единиц составила 45321 рубль.

Также отдельно рассчитаем стоимость изготовления этой же детали без использования метода топологической оптимизации, для чего требуется пересчитать формулу MRT

$$\begin{aligned}
MR &= \frac{(13,5 + 13,5 \cdot 0,01) \cdot 5000 + \left(\left(\frac{1680,59}{30 \cdot 1} \right) + \left(\frac{20}{3600} \right) \cdot \left(\frac{132}{300 \cdot 1000} \right) \right) \cdot 240}{1} \\
&= 81620 \text{ (руб)}, \\
C &= 6 + 1080 + 81620 + 780 + 60 + 600 + 1200 = 85346 \text{ (руб)}.
\end{aligned}$$

Стоит понимать, что установка имеет возможность изготавливать широкую номенклатуру изделий, и поэтому следует учитывать при расчёте некоторую предполагаемую загрузку станка. По опыту предприятий, имеющих в распоряжении установки для 3D печати металлами, а особенно по опыту компаний западных стран, установка становится прибыльной только при максимальной нагрузке, в идеале работая 24 часа в сутки 7 дней в неделю. На текущей стадии технологического развития технологии 3D печати в холдинге спрогнозировать загрузку станка довольно проблематично,

поэтому примем ее равной 50 %. За расчетный период возьмем 10 лет как стандартный период амортизации оборудования.

Необходимые капитальные затраты для установки BLT-S400 представлены в табл. 4.1.

Таблица 4.1.

Капитальные затраты на станок BLT-S400 по состоянию на 2022 год

Стоимость базовой версии станка BLT-S400	33 600 000 руб
Необходимые затраты на периферию для смены порошка, очистки машины и изделия, удаления поддержек	600 000 руб
ИТОГОВЫЕ ЗАТРАТЫ	34 200 000 руб

С учетом предполагаемой нагрузки в 50 % и расчетного периода в 10 лет возможно распределить стоимость станка на весь период, что в итоге составит примерно 780 рублей за час работы приобретенного оборудования. Время использования машины для изготовления каждой детали можно рассчитать как сумму времени загрузки, времени изготовления и времени очистки машины, деленную на количество деталей в одной партии. Время изготовления, в свою очередь, возможно рассчитать по следующей формуле:

$$t_{MRT} = \left(\frac{V_M}{P_M \cdot F_L} \right) + \left(\frac{t_R}{3600} \right) \cdot \left(\frac{h_B}{S_L \cdot 1000} \right),$$

$$t_{MRT} = \left(\frac{780,62}{30 \cdot 1} \right) + \left(\frac{20}{3600} \right) \cdot \left(\frac{132}{50 \cdot 1000} \right) = 26,02 \text{ ч.}$$

В данном случае получим время изготовления детали – 26,02 часа. Таким образом, распределенные затраты на машину для аддитивного производства добавят к каждой детали еще по $300 \cdot 26,02 = 7806$ рублей, тем самым получая итоговую себестоимость в $45321 + 7806 = 53127$ рублей за единицу.

В случае изготовления кронштейна без применения топологической оптимизации время обработки будет соответственно:

$$t_{MRT} = \left(\frac{1680,59}{30 \cdot 1} \right) + \left(\frac{20}{3600} \right) \cdot \left(\frac{132}{50 \cdot 1000} \right) = 56,02 \text{ ч.}$$

Таким образом, распределенные затраты на машину для аддитивного производства добавляют к каждой детали еще по $300 \cdot 56,02 = 16806$ рублей, тем самым получая итоговую себестоимость в $85346 + 16806 = 102152$ рубля за единицу.

4.2. Расчет стоимости изготовления детали методом литья

Для сравнения рассчитаем стоимость получения заготовки традиционным способом с помощью отливки.

Технологическая себестоимость заготовок, получаемых литьём (в земляные формы, кокили, по выплавляемым моделям, под давлением), горячей штамповкой на молотах, прессах, ГKM определяются по формуле:

$$S_{\text{заг}} = \frac{C_i}{10000} \cdot G \cdot K_T \cdot K_C \cdot K_B \cdot K_M \cdot K_{\Pi} - (G - q) \cdot \frac{C_{\text{отх}}}{1000},$$

где C_i – базовая стоимость 1 тонны заготовок, руб; q – масса готовой детали, кг; G – масса заготовки, кг; K_T – коэффициент, зависящий от класса заготовки; K_C – коэффициент, зависящий от группы сложности; K_B – коэффициент, зависящий от массы заготовки; K_M – коэффициент, зависящий от марки материала заготовки; K_{Π} – коэффициент, зависящий от объема производства заготовок; $C_{\text{отх}}$ – базовая стоимость 1 тонны отходов, руб.

$$S_{\text{заг}} = \frac{100000}{1000} \cdot 10,8 \cdot 1,05 \cdot 1,2 \cdot 0,87 \cdot 1,93 \cdot 0,77 - (10,8 - 5,4) \cdot \frac{5000}{1000} \\ = 1732 \text{ руб.}$$

При этом себестоимость изготовления исходной детали литьем составляет около 1732 рубля. Соответственно, себестоимость изготовления детали методом АТ на порядок выше и требуется проведение дальнейшей

оценки с учетом затрат на оборудование в случае применения АТ и затрат на изготовление оснастки в случае литья.

Для итоговой оценки себестоимости литья была взята стоимость изготовления металлической оснастки (кокиль), которая составила около 4 710 000 рублей за единицу. Соответственно, в случае с литьем проявляется эффект масштаба и себестоимость оснастки распределяется по всей партии изготовленных деталей.

4.3. Итоговое сравнение экономических затрат

Составив график расходов на изготовление детали методом литья и АТ (рис. 4.1), можно наблюдать, что экономически сопоставимые по себестоимости две технологии становятся при партиях чуть менее 100 единиц для данного примера. При меньшем объеме АТ становятся ощутимо выгоднее, а при больших же партиях стоит обратить внимание на серийное изготовление методом литья.

Также для наглядности была представлена информация о стоимости изготовления исходной детали без оптимизации, но изготовленную также с помощью АТ, стоимость которой составила 102152 рубля, что почти в два раза выше, чем у оптимизированной детали.

Однако следует обратить внимание также еще на один экономический эффект, который достигнут в этом примере неявно. В данном случае это снижение массы на 60%, что имеет свою отдачу в виде увеличения полезной нагрузки летательного аппарата.

Но напрямую учесть фактор экономии на снижении массы в данном расчете проблематично, так как экономия отражается у эксплуатанта авиационной техники, а не изготовителя. Благоприятный же экономический эффект для производителя вертолетной техники может быть достигнут за

счет усиления конкурентной позиции ввиду лучших характеристик изделия, что может сказаться благоприятно на объеме продаж и их маржинальности. Оценка такого влияния может быть отдельной серьезной и весьма интересной темой для исследований, что позволит определить некоторые эмпирические коэффициенты, позволяющие дать лучший прогноз для экономически обоснованного числа серии изготовления деталей [26].



Рис. 4.1. Сравнительная диаграмма затрат АТ и литья

Полученный в данном примере диапазон экономической целесообразности применения АТ указывает на возможность применения технологии для штучного и мелкосерийного производства, что может соответствовать текущим реалиям по выпуску определенных изделий авиационной техники, но тем не менее требует уточнения для каждого конкретного изделия. Как видно из расчетов, топологическая оптимизация гармонично дополнила АТ благодаря ощутимому снижению себестоимости производства. Стоит заметить, что при этом АТ обеспечивает возможность применения топологической оптимизации. Для успешного внедрения АТ на

предприятию необходимо четкое понимание возможной загрузки оборудования, так как без этого невозможно дать реальную оценку выгод от АТ.

Вопросы к главе 4.

1) Методика какой компании использовалась для расчета себестоимости изделия, изготавливаемого по методики АТ?

2) На какие типы можно разделить расходы на изготовления изделия методом АТ?

3) При каких объемах производства изделия можно говорить об экономической выгоде от применения метода АТ по сравнению с методом литья?

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассмотрены возможности внедрения АТ при производстве деталей высокой сложности с использованием методов топологической оптимизации. Представлен алгоритм проектировочного расчета конструкции детали с использованием метода топологической оптимизации. Показан вычислительный эксперимент в задачах динамики и прочности деталей высокой сложности с применением расчетов в САЕ-системах, после чего в качестве рассмотрения возможностей внедрения АТ в промышленность была выбрана деталь, выполнен чертеж детали, статический САЕ анализ и топологическая оптимизация. Создана уменьшенная копия изделия из более дешевого материала, недорогого пластика вместо металла. Выполнена 3D-печать самого изделия после того, как копия прошла проверку.

Произведен экономический расчет, позволяющий сравнить стоимость и трудоемкость изготовления деталей традиционными методами и

при помощи АТ. Был сделан вывод о возможностях внедрения разработанной технологии АП.

В результате работы была выполнена конструкторско-технологическая подготовка производства с применением CAD/CAE/CAM модулей и применена АТ создания детали на 3D принтере.

Аддитивная технология потенциально может быть внедрена в промышленное производство, однако в ходе исследования удалось выяснить некоторые проблемы внедрения этих технологий в производство.

Для достижения желаемого результата необходимо решить ряд взаимосвязанных задач: освоение промышленного производства металлических порошковых композиций; разработка системы национальных стандартов для всего спектра аддитивного производства (металлические порошковые композиции и синтезированные материалы, модели рабочего оборудования, методов контроля и испытаний и оборудования и т. д.); необходимо провести практическую подготовку специалистов в области аддитивного производства, без которой решение существующих проблем будет крайне затруднительно.

БИБЛИОГРАФИЯ

1. Зленко М.А. Аддитивные технологии в машиностроении / М.А. Зленко, М.В. Нагайцев, В.М. Довбыш // Пособие для инженеров. – М. ГНЦ РФ ФГУП «НАМИ» 2015. 220 с.
2. Чемодуров А.Н. Применение аддитивных технологий в производстве изделий машиностроения / А.Н. Чемодуров // Известия ТулГУ. Технические науки. 2016. Вып. 8. Ч. 2. С. 210 - 217
3. Тилинин, М. В. Аддитивные технологии в отечественном авиастроении: текущие позиции и направления развития / М. В. Тилинин, Б. М. Прибытков. // Молодой ученый. – 2019. – № 47 (285). – С. 133-138.
4. Перевертов, В. П. Качество управления альтернативными технологиями формообразования деталей в «умных» производственных системах / В. П. Перевертов, И. К. Андрончев, И. Ю. Семочкина // Надежность и качество сложных систем. – 2019 – № 4 (28). – С. 102–110.
5. Журнал Аддитивные технологии №2/2022 (64с.)
6. SLM 3D-принтеры, Интернет-источник: <https://addsol.ru/slm-3d-printer-pechat-metallom/>
7. 3D LAM Mid, Интернет-источник: <https://ru.3dlam.com/models/>
8. 3D печать металлом на принтере RussianSLM от 3DSL.ARU, Интернет-источник: <https://www.3dsl.ru/3d/>
9. Промышленное лазерное оборудование, Интернет-источник: <https://www.laserapr.ru/lazernoe-oborudovanie/>
10. ТЭТА — российский лидер электронно-лучевых технологий, Интернет-источник: <https://tetacom.ru/>
11. АО «Полема» - завод порошковой металлургии. Порошки для 3D печати, Интернет-источник: <http://www.polema.net/poroshki-dlja-3d-pechati.html>

12.АО КОМПОЗИТ. Гранулы из титановых и никелевых сплавов, Интернет-источник:<https://www.kompozit-mv.ru/index.php/ru/metallischeskiematerialy-i-metallurgicheskie-tekhnologii/35-granuly-iztitanovykh-i-nikelevykh-splavov>

13.Additive manufacturing with NX, Интернет-источник: <https://www.cardsplmsolutions.com/nl/wp-content/uploads/sites/2/2020/03/NX-Additive-Manufacturing-gecomprimeerd.pdf>

14.Журнал Аддитивные технологии №1/2022 (48с.)

15.Башин, К. А. Методы топологической оптимизации конструкций, применяющиеся в аэрокосмической отрасли / К. А. Башин, Р. А. Торсунов, С. В. Семенов // Вестник пермского национального исследовательского политехнического университета. Аэрокосмическая техника. — 2017. — № 51. — С. 51—61.

16.Bendsoe, M. P Generating Optimal Topologies in Struct Design Using a Homogenization Method/M. P. Bendsoe and N. Kikuchi// Computer Methods in Applied chanics and Engineering, Vol. 71, pp. 197-224, 1988.

17.Боровиков, А.А. Методика определения расположения межпанельных кронштейнов корпуса космического аппарата с использованием топологической оптимизации / А.А. Боровиков, Леонов, О.Н. Тушев // Вестник МГТУ им. Н. Э. Баумана. Серия: Машиностроение. 2019. № 4. С. 4–19. DOI: 10.18698/0236-3941-2019-4-4-19.

18.Самаркин, А.И. Оптимизация геометрии режущего инструмента путем снижения его массы методами топологической оптимизации / А.И. Самаркин, Е.И. Самаркина, С.И. Дмитриев, Е.А. Евгеньева // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2023. № 2. С. 82–84. DOI: 10.36652/0202-3350-2023-24-2-82-84.

19.Сысоева В.В. Алгоритмы оптимизации топологии силовых конструкций / В.В. Сысоева, В.В. Чедрик // Ученые записки ЦАГИ. – 2011. – Т. 42, No. 2. – С. 91–102.

20.Hazrat Ali Md., Smagulov Z., Otepbergenov T. Finite element analysis of the CFRP-based 3D printed ankle-foot orthosis / Md. Hazrat Ali, Z. Smagulov, T. Otepbergenov // Procedia Computer Science. 2021. Vol. 179. Pp. 55–62. DOI:10.1016/2020.12.008.

21.Пронин, А.И. Разработка и исследование технологичной конструкции детали «сопло инжектора» в условиях конкретного производственного участка с использованием CAD/CAE систем / А.И. Пронин, В.В. Мыльников, Д.А. Валько, Е.В. Лыгин // Современные наукоемкие технологии. 2022. №6. С. 57-63

22.Зиновьев Д. Основы конструирования в Solid Edge ST10. Синхронная среда. «Студия Vertex». 2018. 206 с.

23.ГОСТ 977 – 88 Отливки стальные. Общие технические условия. Москва. ИПК Издательство стандартов.

24.ГОСТ 4543 – 71 Прокат из легированной конструкционной стали. Технические условия. Москва. ИПК Издательство стандартов.

25.Иванов, И.Р. Моделирование и исследование лазерного плавления в методе 3D печати на примере порошка алюминия / И.Р. Иванов, В.Д. Селезнёв // Физика. Технологии. Инновации: сборник научных трудов. — Екатеринбург: [УрФУ], 2015. — Вып. 1. — С. 89-95.

26. Князев, С.А. Анализ технико-экономической целесообразности внедрения аддитивных технологий в вертолестроении / С. А. Князев, С. И. Пыжов. — Текст : непосредственный // Молодой ученый. — 2019. — № 49 (287). — С. 175-184. (дата обращения: 16.05.2022).

27.Исследование и разработка конструкции сборочного узла кузова автомобиля с использованием CAD/CAE систем / А. И. Пронин, В. В.

Мыльников, Д. А. Валько, О. Б. Кондрашкин // Вестник машиностроения. – 2020. – № 11. – С. 15-20. – DOI 10.36652/0042-4633-2020-11-15-20. – EDN XLXMPF.

28. Разработка и исследование конструкции детали с использованием CAD / CAE систем / А. И. Пронин, В. В. Мыльников, Д. А. Валько, О. Б. Кондрашкин // Ремонт. Восстановление. Модернизация. – 2018. – № 6. – С. 13-16. – EDN XQOIPZ.

29. Экспресс-анализ прочности с использованием CAD/CAM/CAE системы / Д. А. Валько, А. И. Пронин, В. В. Мыльников, О. Б. Кондрашкин // VII Международная конференция "Деформация и разрушение материалов и наноматериалов" : Сборник материалов, Москва, 07–10 ноября 2017 года. – Москва: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова Российской академии наук (ИМЕТ РАН), 2017. – С. 865-866. – EDN YSEJHZ.

30. Морозов Е.М. А.Ю. Муйземнек, А.С. Шадский ANSYS в руках инженера: механика разрушения. М.: Ленанд, 2008. 456 с.

Пронин Александр Иннокентьевич
Мыльников Владимир Викторович
Кондрашкин Олег Борисович
Лыгин Евгений Владимирович

ПРОГРЕССИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ДЕТАЛЕЙ ВЫСОКОЙ СЛОЖНОСТИ

Учебное пособие

Редактор:
В.В. Втюрина

Подписано в печать

формат 60х90 1/16. Бумага газетная. Печать трафаретная.
Уч. изд. л. 5,4. Усл. печ. л. 5,6. Тираж 300 экз. Заказ №

Федеральное государственное образовательное учреждение высшего образования
«Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет»
603000, Нижний Новгород, ул. Ильинская, 65.
Полиграфический центр ННГАСУ, 603000, Нижний Новгород, ул. Ильинская, 65
<http://www.nngasu.ru>, rector@nngasu.ru