УДК 515.1

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ ТОПОЛОГИЧЕСКОЙ ОПТИМИЗАЦИИ ДЛЯ МОДЕРНИЗАЦИИ МАШИНОСТРОИТЕЛЬНОЙ ДЕТАЛИ С ЦЕЛЬЮ ЕЁ ИЗГОТОВЛЕНИЯ АДДИТИВНЫМИ МЕТОДАМИ

Забелина С.И., Цыденжапов Д.С. – студенты группы 17В31
Научный руководитель: Ибрагимов Е.А., к.т.н.
Юргинский технологический институт (филиал)
Национального исследовательского
Томского политехнического университета,
Россия, г. Юрга

Актуальной задачей современного машиностроения является создание облегченных, прочных, экономичных в изготовлении деталей. Традиционные методы производства, такие как литье и механическая обработка, часто не позволяют создать самую эффективную форму детали. Аддитивные технологии (3D-печать) открывают новые возможности, позволяя создавать детали практически любой геометрической сложности. Однако необходим инструмент, который подскажет, какую именно форму следует создать. Таким инструментом является топологическая оптимизация – математический метод, который вычисляет оптимальное распределение материала в заданном объеме, обеспечивая максимальную жесткость конструкции при минимальной массе и заданных нагрузках.

Цель работы: на практическом примере детали «Рычаг левый» показать модернизацию классической машиностроительной конструкции с использованием современных цифровых технологий.

1. Исходные данные и постановка задачи.

Объект: деталь «Рычаг левый».

Исходный материал: чугун СЧ25 ($\sigma_в$ = 250 МПа).

Целевой материал: нержавеющая сталь 316L для SLM ($\sigma_в \approx$ 550 МПа).

Задача: провести топологическую оптимизацию с целью снижения массы не менее чем на 20% при сохранении способности выдерживать статическую нагрузку 1000 Н, приложенную к отверстиям.

Ограничения: сохранение посадочных поверхностей отверстий диаметрами 25, 30 мм и резьбовых отверстий М6, М8.

Инструмент: SolidWorks 2025 (модули Modeling, Simulation).

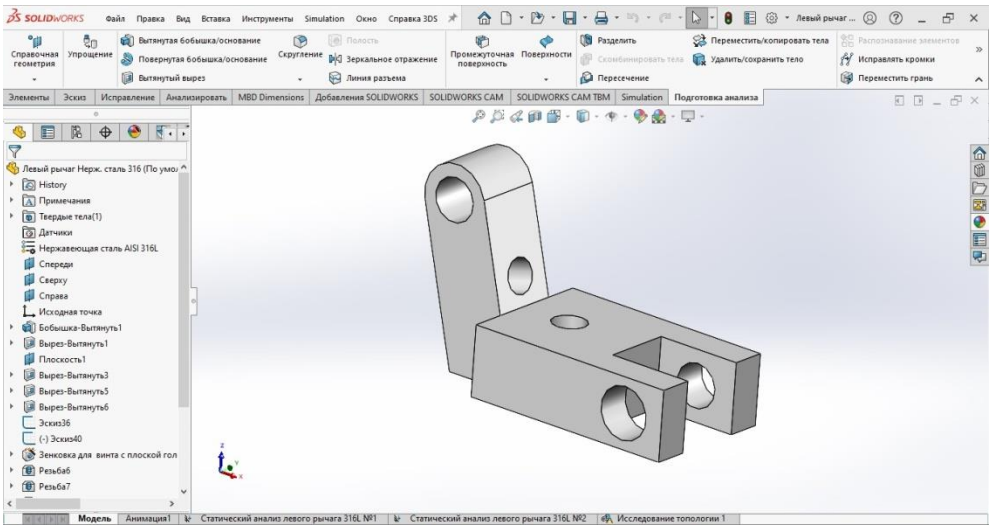

Рисунок 1– Исходная деталь

1.1 Моделирование и топологическая оптимизация в SolidWorks.

На основе исходного чертежа была создана параметрическая модель в SolidWorks (рис. 1). Для проведения оптимизации было сформировано исследование «Topology Study».

А. Задано:

1) Область оптимизации вся деталь.

2) Сохраняемые области: поверхности всех отверстий и прилегающие к ним зоны для обеспечения неизменности интерфейсов крепления.

3) Граничные условия: на цилиндрические поверхности двух отверстий наложены условия «Фиксированная геометрия».

4) Нагрузки: сила 1000 Н приложена к цилиндрическим поверхностям диаметрами 25 мм, имитируя усилие от штока или тяги.

В. Параметры оптимизации и результаты

Цель: минимизация массы.

Ограничение: снижение массы на 20%.

Результат: алгоритм «Topology Study» сгенерировал модель, визуализирующую оптимальное распределение материала (рис. 2). Материал удален из зон, не участвующих в передаче силового потока.

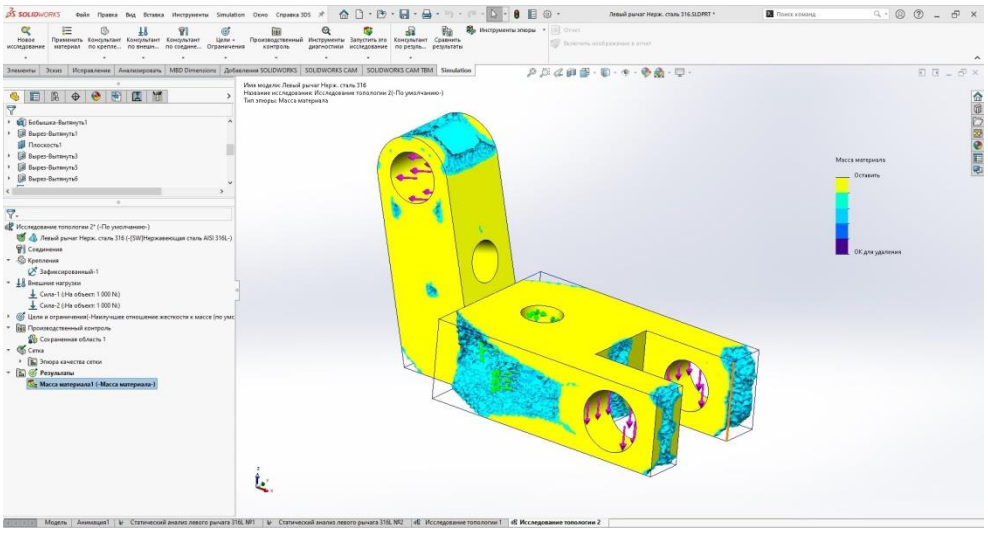

Рисунок 2 – Результат топологической оптимизации в SolidWorks.

2. Редизайн детали. Создание новой геометрии детали.

На основании проведенной топологической оптимизации была создана новая геометрия рычага (рис. 3). Все острые углы заменены на плавные переходы с радиусами для снижения концентрации напряжений.

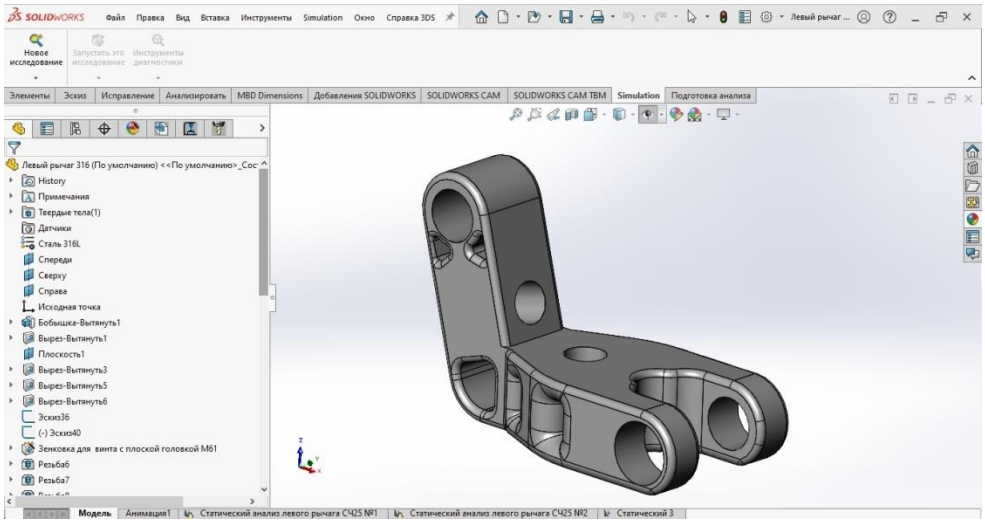

Рисунок 3 – 3D-модель оптимизированной детали после редизайна

3. Проверочный расчет.

Для проверки новой геометрии было создано исследование «Static Study». Материал модели является нержавеющая сталь 316L (SolidWorks Materials Library). Нагрузки и закрепления аналогичны установленным первоначально в «Topology Study».

В результате проверочного расчета (рис. 4) минимальный коэффициент запаса прочности составил 4,1. Это означает, что деталь может выдерживать нагрузки в 4 раза больше расчетных. Распределение напряжений указывает, что оптимизация прошла успешно, материал эффективно перераспределен по силовым линиям, отсутствуют резкие перепады напряжений, конструкция не имеет явно перегруженных элементов

4. Выбор технологии изготовления и материала.

4.1 Обоснование выбора нержавеющей стали 316L.

Сталь 316L обладает пределом прочности $\sigma_в$ ~550 МПа, что более чем в 2 раза выше, чем у исходного чугуна СЧ25, высокими коррозионной стойкостью и усталостной прочностью. Преимуществом данной стали является ее технологичность для SLM. Сталь 316L является одним из самых отработанных и надежных материалов для металлической 3D-печати.

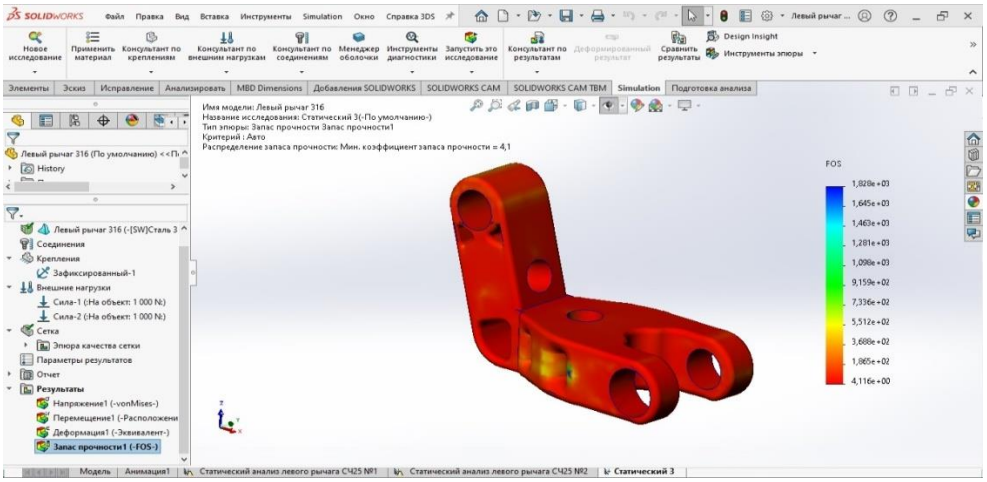

Рисунок 4 – Распределение напряжений в оптимизированной детали

4.2 Обоснование выбора технологии SLM.

Технология селективного лазерного плавления (SLM) является единственно возможной для изготовления сложной органической геометрии, полученной в результате оптимизации. Она обеспечивает высокую плотность (до 99.9%) и механические свойства, сопоставимые с деформируемым металлом, возможность создания полостей и каналов сложной формы, высокое разрешение и точность изготовления.

В результате оптимизации получена новая деталь. Её масса снижена с 3,328 кг до 2,570 кг, объем изменился с 417119,2 мм^3 до 322140,7 мм^3. Сокращение массы и объема составило 23%. В результате замены материала улучшились прочностные характеристики детали. При одинаковой нагрузке в 1000 Н минимальный коэффициент запаса прочности оптимизированной стальной детали равен 4,1, в то время как чугунная деталь имела запас прочности 1,8. Новая деталь стала обладать коррозионной стойкостью и повышенной усталостной прочностью, обладает потенциалом для дальнейшего облегчения без потери прочностных характеристик.

Конструкция успешно оптимизирована. Поставленная задача выполнена. Масса детали снижена более чем на 20%. Проделанная работа наглядно демонстрирует эффективность совместного использования топологической оптимизации и аддитивных технологий.

Список литературы:

1. Топологическая оптимизация и аддитивные технологии [Электронный ресурс] // URL: https://cstechnology.ru/projects-and-solutions/topology-optimization-and-additive-technology/

2. SOLIDWORKS: Основы разработки 3D моделей [Электронный ресурс] // URL: https://www.cad-is.ru/learning_post/solidworks-bazovye-osnovy-razrabotki-3d-modeley(дата обращения 27.10.2025).

3. Топологическая оптимизация деталей с использованием неявного представления геометрической модели [Научная статья] Московский авиационный институт, Москва, Россия