

УДК 629.12+ 004.9

DOI: 10.37890/jwt.vi80.509

Методики оптимизации аддитивной технологии формообразования на примере нагруженных изделий из пластмасс

Прокопенко Н. М.

ORCID: 0009-0004-5650-0589

*Волжский государственный университет водного транспорта, г. Нижний Новгород,
Россия*

Аннотация. В рамках статьи описана разработка методик по оптимизации аддитивных технологий (FDM печати), с учетом нагрузок, действующих на рассматриваемое тело, с целью экономии материалов и сокращения времени производства, в рамках робототехники, кораблестроения и разработки водных, наземных и воздушных дронов. Проведен анализ существующих методов модификации по усилению моделей. Проведены испытания различных способов модификации 3D моделей для печати. На основе тестов предложен и разработан универсальный метод усиления деталей для трехмерной печати. В основе метода лежит принцип создания сферических полостей внутри детали на месте самых нагруженных зон детали, которые затем, при создании управляющей программы для принтера, будут обводиться внешними стенками из пластика, создавая уплотнение внутри детали. Для определения зон, требующих оптимизации, применяется анализ напряжений и топологический анализ Inventor и Ansys, на основе результатов которых создавались трехмерные модели самых нагруженных зон, или модели зон, требующих усиления. Создан программно-аппаратный комплекс по модификации трёхмерных моделей для 3D печати и разработано программное обеспечение по автоматизации основных частей методики обработки готовых деталей – создания полостей на основе трёхмерной модели нагруженных зон.

Ключевые слова: Аддитивные технологии, 3D печать, FDM, кораблестроение, робототехника, подводный дрон, оптимизация, анализ напряжений, топологический анализ, Inventor, Ansys, моделирование, эксперимент, Blender, Python.

Methods for optimizing additive technologies using the example of loaded plastic products

Nikita M. Prokopenko

ORCID: 0009-0004-5650-0589

Volga State University of Water Transport, Nizhny Novgorod, Russia

Abstract. The article describes the development of methods for optimizing additive technologies (FDM printing), taking into account the loads acting on the body in question, in order to save materials and reduce production time, within the framework of robotics, shipbuilding and the development of water, land and air drones. An analysis of existing modification methods to strengthen models was carried out. Various methods of modifying 3D models for printing have been tested. Based on the tests, a universal method for strengthening parts for three-dimensional printing was proposed and developed. The method is based on the principle of creating spherical cavities inside the part in place of the most loaded areas of the part, which then, when creating G-code programs for the printer, will be surrounded by outer plastic walls, creating a seal inside the part. Inventor and Ansys stress analysis and topology analysis are used to identify areas requiring optimization, based on the results of which 3D models of the most loaded areas, or models of areas requiring

reinforcement, were created. A software and hardware complex has been created for modifying three-dimensional models for 3D printing and software has been developed to automate the main parts of the processing technique for finished parts - creating cavities based on a three-dimensional model of loaded zones.

Keywords: Additive technologies, 3D printing, FDM, shipbuilding, robotics, underwater drone, optimization, stress analysis, topological analysis, Inventor, Ansys, modeling, experiment, Blender, Python.

Введение

Стремительное развитие и усовершенствование технологий 3D печати приводит к увеличению темпа проектирования и разработки на всех этапах производственной цепочки и является приоритетным направлением [1]. Аддитивные технологии активно внедряются в различных отраслях: робототехнике, кораблестроении [2,3], в разработке и создании беспилотных дронов [4].

Современные разработки в 3D печати позволяют печатать корпусные детали лодок сложной формы за короткие сроки [2]. Так же ведутся разработки в направлении печати металлами, с использованием 4D печати, например для создания гребных винтов [3]. При разработке дронов удешевление и упрощение производства является важным фактором, в чем помогают аддитивные технологии, а также новые типы материалов и методов печати [5]. Новые типы дронов будут более легкими, простыми в воссоздании, и удобными в ремонте, за счет внедрения 3D печати. Такие дроны могут применяться для исследования в дальних частях планеты, без доступа к сложным производственным машинам [6,7].

Разработано и применяется множество типов печати – от запекания порошка лазером, до запекания фотополимерной смолы ультрафиолетовым излучением, но самый популярный тип печати - печать методом экструзии пластика (FDM (fused deposition modeling)). Данный тип печати популярен из-за своей простоты и доступности несмотря на то, что имеет некоторые недостатки.

Детали при FDM (а также и других форматах) печати получаются полыми, т.е. созданная деталь будет состоять из оболочки, состоящей из стандартных элементов – стенок, дна и верхней поверхности. Во внутренней полости создается тонкая сетка – поддержка, которая не обеспечивает усиления (плотность около 10-20%), но позволяет печатать будущие слои на ней. Можно усилить деталь используя плотность заполнения от 80 и до 100%, но при этом значительно повысится время печати и затраты материала. Главной целью данной работы ставилось создание методики оптимизации моделей для FDM печати по массе, с учетом нагрузок на разрабатываемую деталь.

Анализ учитывал несколько существовавших на тот момент методик изменения свойств печати. Например, использование масок внутри программы Slic3r (рис.1). Модификаторы маски в данной программе позволяют менять настройки печати в конкретной области печати (менять плотность заполнения, толщину стенок, высоту слоев и т.п.).

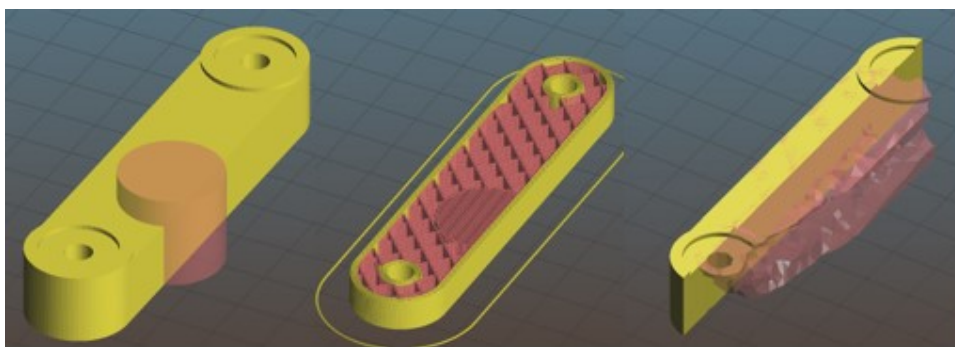


Рис.1. Применение масок-модификаторов

Применение масок, встроенных в ПО, не является оптимальным, так как данные маски имеют простые формы, и их расстановка должна проводиться вручную. При этом, использование нескольких масок может приводить к ошибкам и сбоям программы. Было необходимо выбрать оптимальный вариант создания масок-модификаторов и способ внедрения их в деталь. Было рассмотрено несколько основных типов создания масок [8].

Модификаторы, созданные пользователем

Для разработки более сложных масок применялся Autodesk Inventor, где создавалась изначальная деталь. Были использованы встроенные модули анализа напряжений и топологического анализа. На основе их результатов создавались модели нагруженных зон, которые затем сохранялись в формате, совместимом с программами-слайсерами (рис.2).

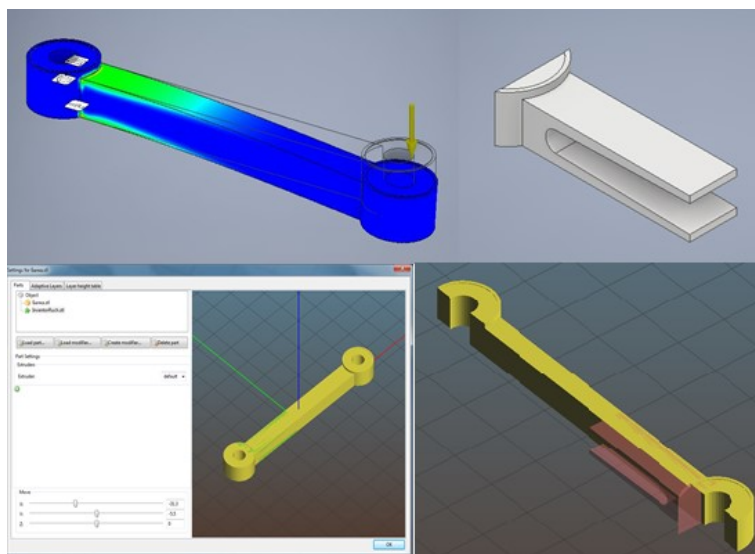


Рис.2. Анализ напряжений и модификатор, созданный на его основе

После проведения расчетов путей движения печатной головки с учётом изменения плотности поддержек был получен файл с усиленной деталью (рис.3).

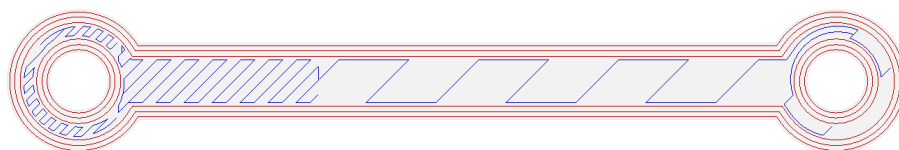


Рис.3. Получившаяся модель в разрезе в виде проекции

Данные модификаторы создавались вручную, поэтому их создание может занимать значительное время и повлиять на точность модификатора. Так же на качество данного метода влияет сам модуль анализа напряжений – он выдает лишь визуализацию нагрузок. Поэтому в дальнейшем применялся топологический анализ в Inventor.

Генератор форм

Данный тип анализа применяется при необходимости создания облегченной детали с учетом требуемых характеристик и нагрузок (рис.4). При удалении большей части материал изначальной детали, в обычных случаях полученная модель становится неприменимой, так как она теряет свой функционал или же становится сложной в производстве. Так как в данном методе модификации детали внешняя оболочка тела будет не тронута, оптимизированная модель сложной формы, находящаяся только внутри детали, усилит модель, не влияя при этом своих изначальных свойств.

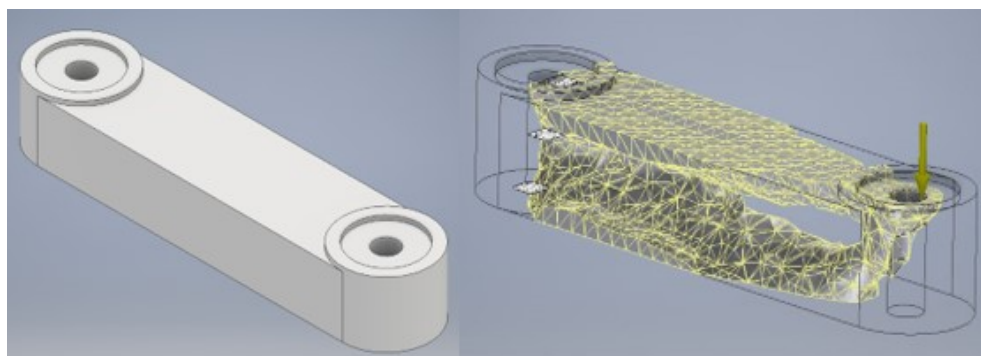


Рис.4. Деталь и её оптимизированная модель в генераторе форм

Важно отметить, что при таком методе внешний вид детали не будет изменяться в значительной мере, единственные изменения будут проведены внутри модели, что позволяет создавать усиленную деталь, не отличающуюся по внешним параметрам от изначальной.

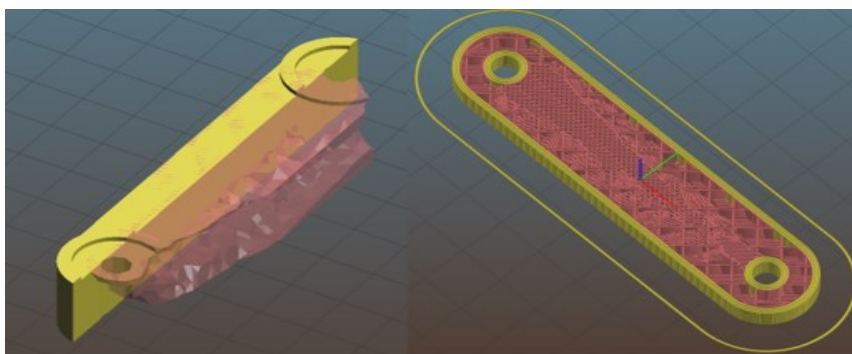


Рис.5. Деталь с модификатором в слайсере

Пример модификации представлен в программе Slic3er (рис.5). В данном случае стандартное заполнение имеет плотность 10%, а часть, затронутая маской - 50%. Для создания модификаторов использовались разные программы, позволяющие проводить анализ напряжений и топологический анализ, такие как: Inventor, SolidWorks, NX, ANSYS, Fusion 360. В основном были применены программные пакеты Inventor и Ansys (рис.6), так как они позволяли без затруднений сохранять получившиеся маски в формате STL, и проводить необходимые анализы модели.

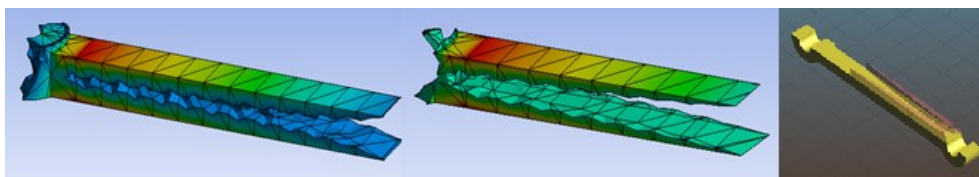


Рис.6. Диапазоны напряжений и разрез детали, в котором видно расположений модификатора в Ansys

Результат применения маски виден на рисунке 7. Там, где деталь пересекается с маской, заполнение меняется с 10% на 50%.

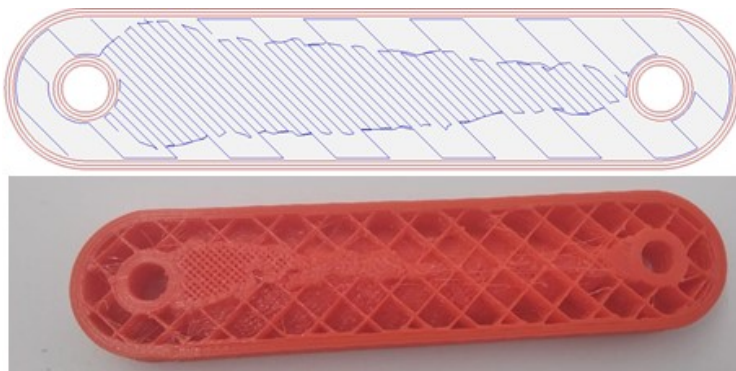


Рис.7. Разрез управляющей программы и реальной детали с 50% наполнением

Данный метод выполнял необходимую задачу, но был недостаточно универсален – такая методика доступна не во всех слайсерах, некоторые из них значительно устарели и уже не подходит для современных стандартов печати, а также работа с масками сложной формы приводило к множеству ошибок при расчете управляющей

программы. В дальнейшем было решено разработать такую методику, которая могла бы быть применена в любых слайсерах, вне зависимости от их возможностей.

Модификация готовых моделей

Применение данного метода включает в себя модификацию готовых моделей-оболочек. При таком усилении внутри детали располагаются малые отверстия (чаще всего сквозные) (рис.8). Слайсер воспринимает полученные новые поверхности как оболочки, требующие создания стенок, и обводит их периметрами, тем самым создавая «стержни» внутри фигуры [9].

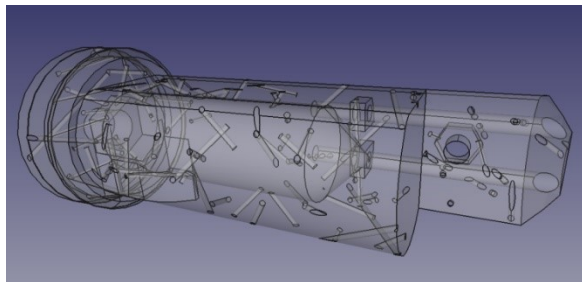


Рис.8. Пример использования метода – в детали созданы случайные отверстия

Эти полости должны иметь такой размер, чтобы слайсер воспринимал их как часть детали, но достаточно маленький размер, чтобы не изменить деталь значительно. Программа создает оболочку для каждой «внешней» поверхности, в соответствии с настройками, заданными пользователем. Каждая плоскость будет представлена «стенкой» детали имеющую толщину, например, в три линии (или 1,2 мм), и каждое созданное отверстие будет обведено такой стенкой. Получившиеся отверстия достаточно малы, и поэтому за счет расширения пластика отверстие будет полностью закрыто. Сначала были проведены испытания, в которых данные отверстия создавались вручную. Было решено использовать диаметр отверстий 0,2 мм, так как это стандартный размер сопла большинства FDM принтеров. Основываясь на анализе напряжений, в детали создавалась матрица из подобных отверстий (рис.9).

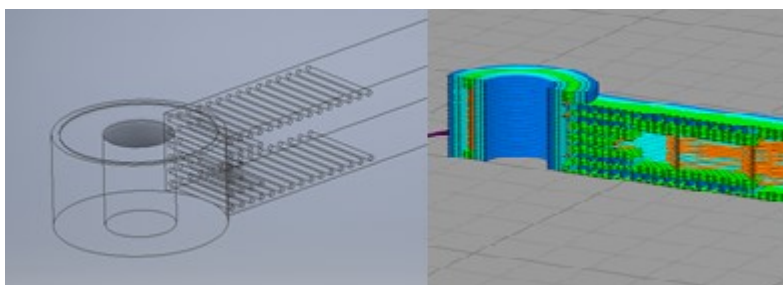


Рис.9. Матрица трубок, созданная вручную в Inventor на основе анализа напряжений и результат в слайсере (разрез)

Применение генератора форм обосновано тем, что топологический анализ в Inventor позволяет получить трехмерную модель оптимизированной детали, которая видна внутри изучаемой детали. Основываясь на данной оптимизированной модели, создавалась матрица из отверстий внутри детали. Данный процесс занимает много времени, поэтому существовала необходимость упростить его в дальнейшем (рис.10).

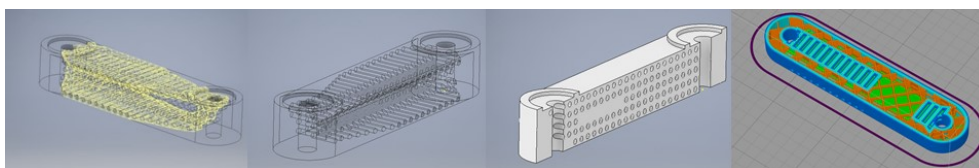


Рис.10. Деталь в среде Inventor и в слайсере Simplify3D

Создание сферических полостей

Процесс работы при создании множества трубок внутри детали является достаточно трудоемким, и результирующие полости могут успешно сопротивляться напряжениям не во всех направлениях. При создании множества случайных отверстий сквозь деталь велика вероятность создания слабых мест внутри фигуры. Вместо сквозных отверстий в детали можно применять отверстия более простой и компактной формы – в данном случае сферы. Они более просты для случайного расположения внутри детали, и их пересечение не создает критичных повреждений в детали. В том числе, сферические элементы реагируют на нагрузки одинаково со всех направлений.

Полости создавались по тому же принципу, как и в случае сквозных отверстий. Один из результатов подобного преобразования можно увидеть ниже (рис.11). Но при большом количестве полостей малого размера работа в САD программах (в данном примере Inventor) сильно затруднялась, так как была велика вероятность ошибки программы и самого пользователя.

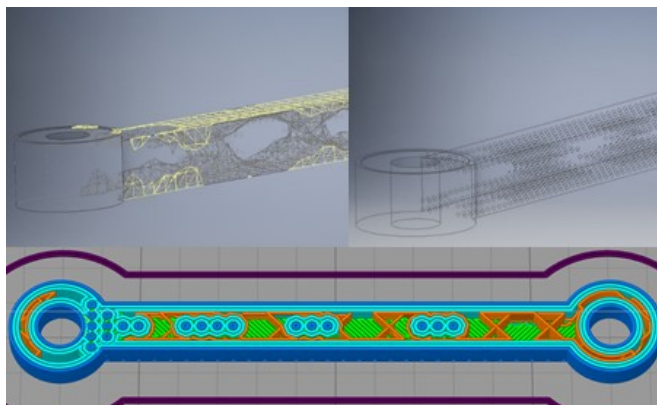


Рис.11. Матрица сферических полостей, созданная по результату топологии

Было решено произвести автоматизацию размещения полостей при помощи программного языка Python, для которого существует множество библиотек по работе с 3D моделями. В последствии выбор пал на программный пакет Blender – открытое и бесплатное ПО для работы с трехмерной графикой и анимацией. Данная программа подходит для этой задачи, так как рассчитана на работу со сложными моделями и большим количеством трехмерных тел. При работе с программой Blender было предложено создавать «градиентное наполнение» с разной кучностью полостей в зависимости от нагрузок. Для этого было необходимо создавать несколько масок на основе разных диапазонов нагрузок. Процесс работы в Blender подобен созданию полостей в САD программах, но является более простым для расчетов. Первыми попытками создания множества сфер, располагающихся на основе маски, было создание массива изосфер (упрощенный вид сферы, для облегчения работы программ), и удаления тех сфер, которые находились за пределом необходимого

диапазона напряжений (находились вне созданной маски). Затем полученный массив вырезался при помощи булевых модификаторов из основной детали, создавая полости внутри тела. Итоговую деталь после этого сохраняли в формате STL и импортировали в выбранный слайсер (Simplfy3D) (рис.12). Для упрощения данного процесса были применены различные инструменты программы Blender, например, системы частиц.

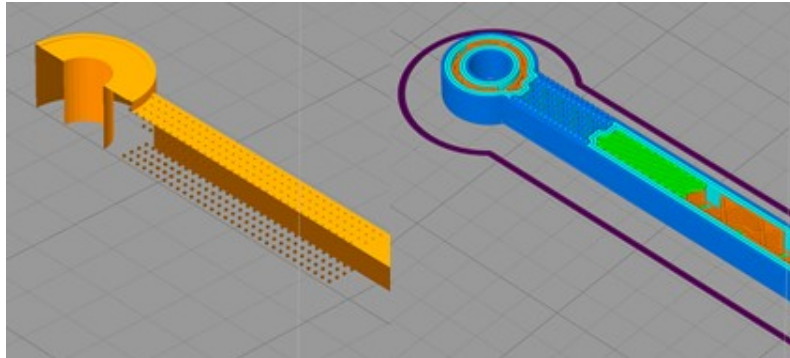


Рис.12. Вид обработанной детали в слайсере

Использование систем частиц

Чаще всего в Blender применяют динамические системы частиц для симуляции различных визуальных эффектов, но для данной задачи применены статические системы частиц. Главным преимуществом данного инструмента является то, что при создании системы частиц есть возможность точно настраивать поведение и расположение этих точек. Также, каждой частице можно присвоить один и тот же родительский элемент (в данном случае сферу), что позволяет сразу изменять все частицы сразу, без необходимости в перерасчете модели. Располагать частицы можно на основе какой-либо модели, например, привязать точкам полигонов, средним точкам, поверхностям. Для создания массива сфер будет достаточно расположить сферы по объему созданного заранее модификатора.

Метод преобразования детали представлен на примере модели кулака автоматизированной тележки. Данная модель не до конца оптимизирована для 3D печати, так как рычаг, находящийся на верхней части детали не закреплен достаточно надежно.

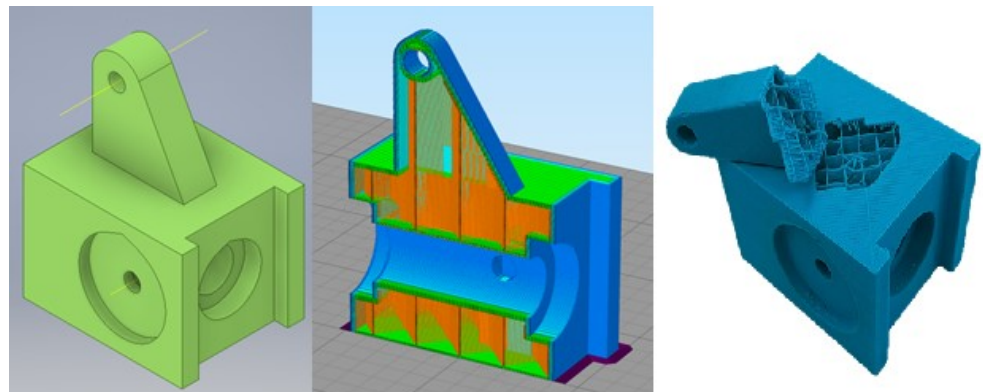


Рис.13. Модель детали «кулак», разрез симуляции детали со стандартными настройками печати и реальная деталь

Такая форма кулака была бы оптимальной при других видах производства, например при создании детали на фрезерном станке, так как деталь при таком методе создания будет состоять из сплошного материала, а при аддитивной печати, деталь остается полый (рис.13). При этом сам рычаг держится только на тонком слое верхней плоскости кулака, как видно на рисунке 13 и 16. Важно было сохранить изначальную форму детали, но при этом устранить недостатки, которые проявляются за счёт пустотелости итоговой детали. На загруженную модель-маску, созданную при помощи топологического анализа в Ansys, накладывается модификатор, который создает систему частиц (рис.14).

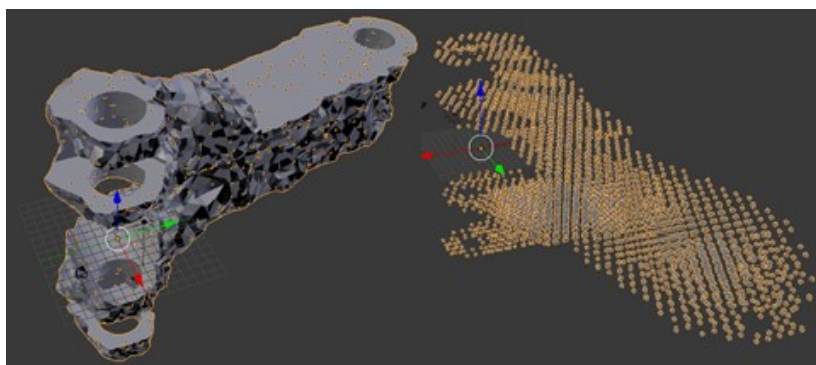


Рис.14. Маска топологического анализа (слева) и результирующий массив из сфер

Полученной системе точек присваивается родительский элемент – сфера радиусом 0,2 мм. Затем загружается основная модель, из которой при помощи булевых операторов вырезается полученный массив сфер (рис.15), оставляя полости внутри главной модели.

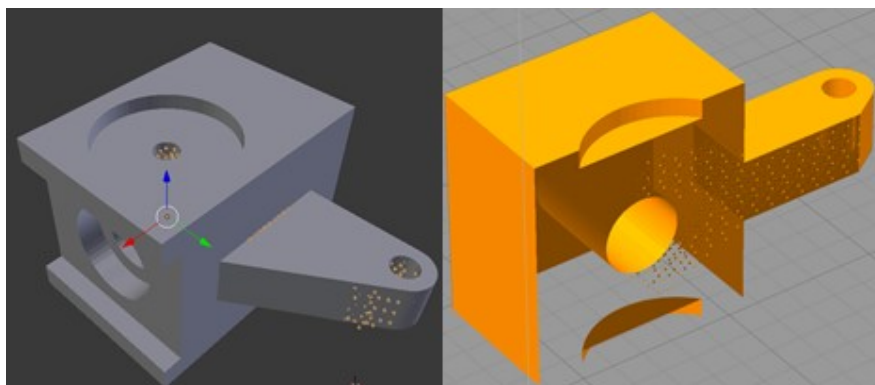


Рис.15. Модифицированная деталь

Готовая деталь экспортируется и загружается в среду слайсера.

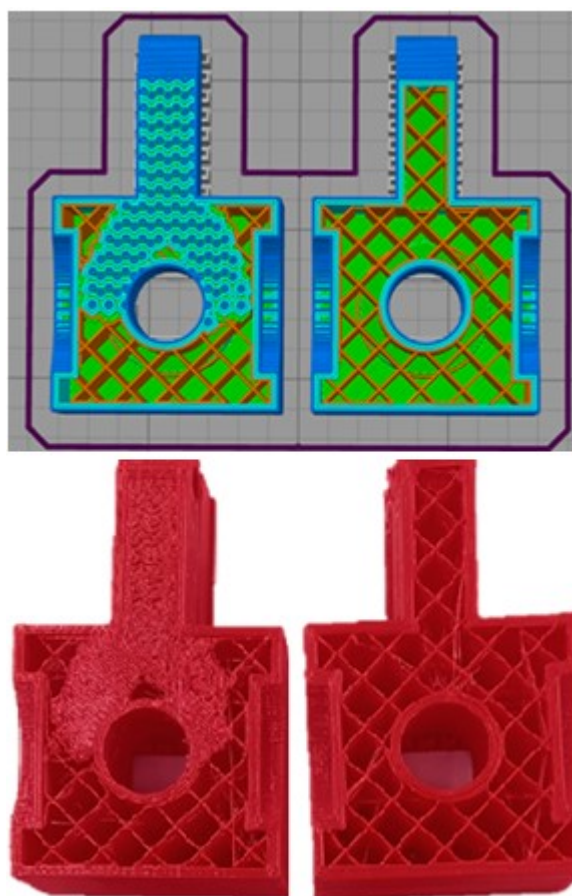


Рис.16. Сравнение усиленной детали (слева) и обычной модели (справа)

На рисунке 16 видно, что модифицированная деталь имеет уплотнения, состоящее из множества периметров (на подобии шаров или пузырей), а обычная деталь имеет наполнение только из стандартных поддержек. Так же на правой модели видно, что верхний рычаг в необработанной модели может быть оторван без особых усилий. В дальнейшем весь процесс модификации деталей в Blender был полностью автоматизирован.

В данном примере время печати изначальной модели – 1 час 45 минут; детали с плотным заполнением (80%) – 3 часа 10 минут; Модифицированной детали – 2 часа 14 минут. Количество использованного материала распределяется следующим образом: Обычная деталь – 27,14 грамм; деталь с плотным заполнением – 64,1 грамм; Модифицированной детали – 33,06 грамм (рис.17). Тем самым сокращая время печати между цельной и оптимизированной деталью почти в полтора раза, а количество затраченного материала почти в двое. В случае, когда не задействованная в модификации часть модели была бы больше, экономия времени и материала возросла бы в разы.

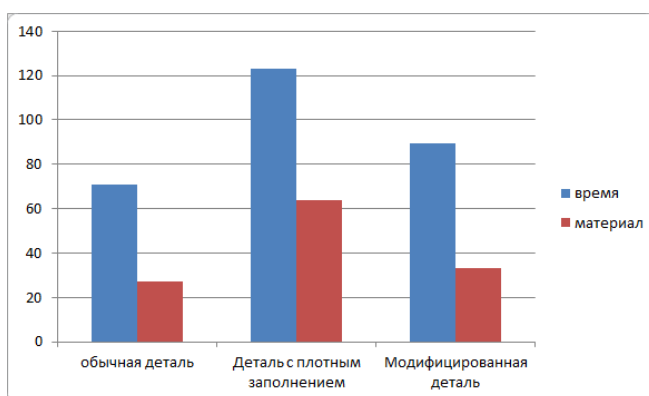


Рис.17. График сравнения печати моделей

При подобном преобразовании детали важным моментом является то, что модифицировать можно не всю деталь, а, например, лишь малое звено. Это позволяет сохранить форму изначальной детали, усиливая при этом только необходимые элементы конструкции, и тем самым повышая надежность созданной модели, сохраняя при этом материал и значительно сокращая время производства, по сравнению с другими методами усиления моделей. Важно также и то, что деталь, обработанную данным методом, можно печатать при применении любого слайсера и метода печати, без потери необходимого усиления, что делает данную методику более универсальной. Данную методику так же возможно использовать для изменения центра тяжести деталей. Несмотря на то, что в основе данного исследования лежала печать из пластика, данную методику можно применять в любых способах печати, в основе которых лежит схожий принцип создания УП для принтера.

Заключение

Результатом данной работы является методика оптимизации деталей для аддитивной печати и аппаратно-программный комплекс по автоматизации ее частей. Данная методика может быть применена при разработке деталей и узлов, которые подвергаются нагрузкам, например при печати корпусов в кораблестроении, позволяя ускорить и удешевить производство судов, созданных такими методами. При создании и разработке малых пилотируемых подводных дронов, данная технология позволит упростить производство, облегчить саму конструкцию, а также предоставит возможность быстрого воссоздания элементов сборки на местах. Планируется применение данной технологии в разработке и макетировании проектов, связанных с импортозамещением хаусботов [10], а также ведется работа по внедрению данной методики в проект канатной дороги на этапе тестов и проектирования [11]. Последующие разработки могут вестись в направлении создания более широкого спектра настроек модификации деталей.

Список литературы

1. Распоряжение Правительства РФ от 14 июля 2021 г. N 1913-р об утверждении Стратегии развития аддитивных технологий в РФ на период до 2030 г. – 2021. / [Электронный ресурс]. – Режим доступа: URL: <https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/401404208/>
2. Duane Marrett, Additive Manufacturing Becoming a Disruptive Force in Marine Tooling– 2017 / [Электронный ресурс]. – Режим доступа: URL:

- <https://blog.thermwood.com/additive-manufacturing-becoming-a-disruptive-force-in-marine-tooling-blog-0>
3. Rushabh Haria, Damen Shipyards release further details about world's first 3D printed propeller – 2017 / [Электронный ресурс]. – Режим доступа: URL: <https://3dprintingindustry.com/news/damen-shipyards-worlds-first-3d-printed-propeller-121112/>;
 4. Марина Совина, В России появится ударный подводный дрон// lenta.ru – 2023 13 декабря / [Электронный ресурс]. – Режим доступа: URL: <https://lenta.ru/news/2023/12/13/v-rossii-poyavitsya-udarnyy-podvodnyy-dron/>;
 5. Korniejenko K, Gądek S, Dynowski P, Tran DH, Rudziewicz M, Pose S, Grab T. Additive Manufacturing in Underwater Applications. Applied Sciences. 2024; 14(4):1346. <https://doi.org/10.3390/app14041346>
 6. E.V. Kozlova, V.V. Yakinchuk, K.A. Starikov, A.V. Bolshakova A.A. Bocharov Life Cycle Management of the 3D-printer Technology to Design an Underwater Drone Hull to Study the Arctic Published under licence by IOP Publishing Ltd IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, Volume 625, International Round Table "Modern Problems of the Arctic" 25 June 2020, Saint-Petersburg Peter the Great Polytechnic University, Russian Federation
 7. G. Poornima, R. Pavithra, M. Praveen, S. Ragasurya, C. Aashish; Design and analysis of 3D printed unmanned underwater vehicle. AIP Conf. Proc. 22 May 2023; 2492 (1): 040071. <https://doi.org/10.1063/5.0114352>
 8. Anders Clausen, Niels Aage, Ole Sigmund Exploiting Additive Manufacturing Infill in Topology Optimization for Improved Buckling Load // Engineering. - 2016. - Volume 2, № 2 – P. 250-257.
 9. Форум RepRap, «Making RepRap prints stronger» [Электронный ресурс] – Режим доступа: URL: <https://reprapltd.com/fibre/>;
 10. Гордлеева, И. Ю. Обзор импортозамещения на рынке хаусботов и предложение по выбору силового агрегата с применением гидроприводов / И. Ю. Гордлеева, С. Д. Гордлеев, И. В. Никитаев // Научные проблемы водного транспорта. – 2021. – № 68. – С. 40-58. – DOI 10.37890/jwt.v68.212. – EDN QPAEDQ.
 11. Гордлеева, И. Ю. Канатная дорога на мускульной тяге / И. Ю. Гордлеева, И. В. Никитаев, Д. В. Веселов // Цифровой регион. Социально-экономическое развитие сельских территорий: опыт, компетенции, проекты: Материалы X Всероссийской научно-практической конференции, Княгинино, 28–29 марта 2023 года. – Княгинино: Нижегородский государственный инженерно-экономический университет, 2023. – С. 121-123. – EDN LKZEFM.

References

1. Order of the Government of the Russian Federation of July 14, 2021 N 1913-r on approval of the Strategy for the development of additive technologies in the Russian Federation for the period until 2030. – 2021. / URL: <https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/401404208/>
2. Duane Marrett, Additive Manufacturing Becoming a Disruptive Force in Marine Tooling– 2017 / URL: <https://blog.thermwood.com/additive-manufacturing-becoming-a-disruptive-force-in-marine-tooling-blog-0>
3. Rushabh Haria, Damen Shipyards release further details about world's first 3D printed propeller – 2017 / <https://3dprintingindustry.com/news/damen-shipyards-worlds-first-3d-printed-propeller-121112/>;
4. Marina Sovina, V Rossii poyavitsya udarnyi podvodnyi dron– 2023 / – URL: <https://lenta.ru/news/2023/12/13/v-rossii-poyavitsya-udarnyy-podvodnyy-dron/>;
5. Korniejenko K, Gądek S, Dynowski P, Tran DH, Rudziewicz M, Pose S, Grab T. Additive Manufacturing in Underwater Applications. Applied Sciences. 2024; 14(4):1346. <https://doi.org/10.3390/app14041346>
6. E.V. Kozlova, V.V. Yakinchuk, K.A. Starikov, A.V. Bolshakova A.A. Bocharov Life Cycle Management of the 3D-printer Technology to Design an Underwater Drone Hull to Study the Arctic Published under licence by IOP Publishing Ltd IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, Volume 625, International Round Table "Modern Problems of the

- Arctic" 25 June 2020, Saint-Petersburg Peter the Great Polytechnic University, Russian Federation
7. G. Poornima, R. Pavithra, M. Praveen, S. Ragasurya, C. Aashish; Design and analysis of 3D printed unmanned underwater vehicle. AIP Conf. Proc. 22 May 2023; 2492 (1): 040071. <https://doi.org/10.1063/5.0114352>
 8. Anders Clausen, Niels Aage, Ole Sigmund Exploiting Additive Manufacturing Infill in Topology Optimization for Improved Buckling Load // Engineering. - 2016. - Volume 2, № 2 – P. 250-257.
 9. RepRap forum, «Making RepRap prints stronger» URL: <https://reprapltd.com/fibre/>;
 10. Gordleeva, I. Y. Obzor importozameshcheniya na rynke khausbotov i predlozhenie po vyboru silovogo agregata s primeneniem gidroprivodov / I. YU. Gordleeva, S. D. Gordleev, I. V. Nikitaev // Nauchnye problemy vodnogo transporta. – 2021. – № 68. – P. 40-58. – DOI 10.37890/jwt.v68.212. – EDN QPAEDQ.
 11. Gordleeva, I. YU. Kanatnaya doroga na muskul'noi tyage / I. Y. Gordleeva, I. V. Nikitaev, D. V. Veselov // Tsifrovoy region. Sotsial'no-ehkonomicheskoe razvitie sel'skikh territorii: opyt, kompetentsii, proekty: Materialy X Vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii, Knyaginino, 28–29 march 2023. – Knyaginino: Nizhny Novgorod State Engineering and Economic University, 2023. – P. 121-123. – EDN LKZEFM.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Прокопенко Никита Михайлович, ассистент кафедры подъемно-транспортных машин и машиноремонта, Волжский государственный университет водного транспорта) (ФГБОУ ВО «ВГУВТ»), 603951, г. Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5, e-mail: nikoprk@yandex.ru

Nikita M. Prokopenko, assistant of the Department of Lifting and Transport Machines and Machine Repair, Volga State University of Water Transport, 5, Nesterov st, Nizhny Novgorod, 603951

Статья поступила в редакцию 28.05.2024; опубликована онлайн 20.09.2024.
Received 28.05.2024; published online 20.09.2024.