



КОМПЬЮТЕРНАЯ МЕХАНИКА

УДК 004.942

В.И. ИВЧЕНКО

заместитель начальника Республиканского компьютерного центра машиностроительного профиля¹
E-mail: ivchenko_vi@oim.by

А.В. ШМЕЛЁВ, канд. техн. наук

заместитель генерального директора по научной работе¹
E-mail: shmeliov.alexei@gmail.com

А.В. ТАЛАЛУЕВ

начальник Республиканского компьютерного центра машиностроительного профиля¹
E-mail: taval1976@gmail.com

А.В. ОМЕЛЮСИК

младший научный сотрудник Республиканского компьютерного центра машиностроительного профиля¹
E-mail: alexlifting@mail.ru

¹Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси, г. Минск, Республика Беларусь

Поступила в редакцию 22.09.2022.

МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ТОПОЛОГИЧЕСКОЙ ОПТИМИЗАЦИИ СИЛОВЫХ КОНСТРУКЦИЙ С ПРИМЕНЕНИЕМ СРЕДСТВ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Предложены методические рекомендации по развитию процесса проведения топологической оптимизации силовых конструкций, адаптированного для использования аддитивных технологий. Детально рассмотрена стадия постпроцессорной обработки сгенерированной в результате оптимизации полигональной геометрии детали. В процесс топологической оптимизации включена стадия валидации путем сопоставления расчетных и экспериментальных данных по оценке работоспособности (прочности) оптимизированной конструкции. Для варианта изготовления силовых конструкций методом 3D-печати предусмотрено проведение исследований механических свойств получаемого на 3D-принтере материала с учетом настроек печати и ориентации слоев материала относительно прикладываемой нагрузки при испытаниях. Приведен пример апробации предложенных методических рекомендаций на примере силового крюка, входящего в конструкцию устройства остановки колесного транспорта. Оптимизация выполнялась в программной среде SolidThinking Inspire (Altair Engineering, США). Приведены результаты расчетного и экспериментального определения разрушающей нагрузки для исходной и оптимизированной конструкции крюка. Для эксперимента крюки изготавливались из ABS-пластика по FDM-технологии. Конечно-элементные модели крюков разрабатывались в программном комплексе ANSYS Workbench (ANSYS, США). Описание свойств материалов, граничных условий и прикладываемой нагрузки выполнено в приложении LS-PrePost, расчет — в решателе LS-DYNA (ANSYS, США). Расчетная и экспериментальная оценки эффективности проведенной топологической оптимизации составили 44,4 и 57,8 %, т. е. их отличие находится пределах 13,4 %. Зоны и характер разрушений, выявленных расчетным и экспериментальным путем, полностью совпадают. Полученные результаты подтверждают корректность предложенных методических рекомендаций, выбранных подходов моделирования и определения свойств материала конструкции, изготавливаемой методом 3D-печати.

Ключевые слова: компьютерное проектирование, моделирование, топологическая оптимизация, методика, силовая конструкция, снижение массы, повышение жесткости, прочность, ABS-пластик, 3D-печать, FDM-технология

DOI: <https://doi.org/10.46864/1995-0470-2022-4-61-68-79>

Введение. Перед разработчиками несущих и силовых конструкций машин стоят перманентные задачи снижения их веса при обеспечении требований технологичности, функциональности и надежности. С учетом увеличения разнообразия режимов и условий эксплуатации современной техники решение указанных задач традиционными методами и средствами проектирования постоянно усложняется. При этом развитие средств проектирования, с одной стороны, позволяет постоянно совершенствовать и усложнять технику, что выражается в улучшении ее потребительских свойств, интенсификации эксплуатации и увеличении энергооборуженности, а с другой — развитие технологий производства, таких как многокоординатная обработка, высокоточное литье и конечно же 3D-печать, обеспечивает возможность получения силовых конструкций практически любой сложности. В этой связи решение обозначенной проблемы заключается в комплексном применении современных численных методов и средств компьютерного моделирования и топологической оптимизации. Это привело к активному развитию за последнее десятилетие программных средств топологической оптимизации, интегрированных с другими средствами моделирования. Среди наиболее известных компьютерных программ, позволяющих оптимизировать топологию конструкций, можно отметить SolidThinking Inspire, TOSCA-Structure, HyperWorks OptiStruct, GENESIS, ProTop, Abaqus/ATOM, Autodesk Netfabb Ultimate, CATIA 3DEXPERIENCE (Function Driven Generative Designer), Simulabs Topology Design.

Применение топологической оптимизации сопровождается исследованиями по различным направлениям. В первую очередь это работы, посвященные развитию и совершенствованию математических методов и алгоритмов выполнения процедур топологической оптимизации, изучению особенностей их реализации и оценке эффективности применения [1–5]. Например, в работе [3] рассматриваются особенности влияния описания зон приложения к оптимизируемой модели граничных условий на формируемую силовую систему. Отдельные исследования направлены на выбор и анализ эффективности применения определенных методов и процедур для оптимизации конструкций кузовов автомобилей [4], силовых систем авиационных и космических аппаратов [5]. Активно развиваются прикладные направления, связанные с разработкой и апробацией методик выполнения топологической оптимизации дета-

лей и конструкций различного назначения, включающих этапы подготовки базового пространства для поиска оптимальной топологии конструкции, обработки сгенерированных в результате оптимизации поверхностей детали, а также традиционных проверочных расчетов показателей прочности оптимизированных конструкций [6–11].

Основной и наиболее перспективной технологией изготовления деталей с оптимизированной топологией является 3D-печать. Поэтому другая очень важная часть исследований относится к области материаловедения. Она посвящена экспериментальному и расчетному определению механических свойств материалов, получаемых методом 3D-печати [12–16]. Приводятся результаты конечно-элементного моделирования мезоструктуры материала, получаемого в результате 3D-печати для расчетного определения его механических свойств, выполняется сопоставление полученных характеристик с экспериментальными данными, выделяются ключевые условия обеспечения их соответствия [12–14]. Изучается влияние угла раstra, направления и плотности печати на механические свойства конкретного материала, влияние технологии изготовления и оборудования для 3D-печати [15–16].

Эффективность использования на практике средств топологической оптимизации зависит от наличия апробированных и валидированных методических процедур их применения. При этом крайне важно иметь методики расчетной оценки работоспособности изготавливаемого методом 3D-печати изделия, учитывающие особенности фактических механических свойств материала, включая критерии его разрушения при предельных нагрузках. Поэтому *цель данной работы* — сформировать комплексную методику топологической оптимизации силовых конструкций, содержащую рекомендации по проверке критериев ее работоспособности, апробированную на примере реальной детали и учитывающую влияние на конструкцию выбранной технологии 3D-печати и свойств материала.

Комплексная методика топологической оптимизации силовых конструкций. Целью топологической (структурной) оптимизации является поиск распределения материала конструкции в заданном объеме пространства, обеспечивающего увеличение или уменьшение определенного свойства конструкции (уменьшение массы, увеличение энергии деформации, корректировка собственной частоты) с учетом наложенных ограничений (например, максимальных напряжений, возникающих

в конструкции). В качестве критерия для определения оптимального решения в основном используется масса либо показатель жесткости конструкции. Для формирования искомого решения задается исходный объем материала. При задании массы в качестве критерия оптимизации поиск эффективного решения заключается в поиске минимума целевой функции, а для критерия жесткости — максимума. В первом случае в качестве ограничения наиболее часто выступают максимальные напряжения, во втором — частоты собственных колебаний или значения деформаций конструкции.

На основании анализа и обобщения работ [6–11, 17] предлагается процесс топологической оптимизации конструкций, состоящий из следующих этапов.

1. *Постановка задачи*, включает определение:

- 1.1. нагрузочных режимов, имеющих преобладающее действие в эксплуатации (составление и описание расчетной схемы);
- 1.2. границ геометрической области (объема) начального пространства для поиска оптимальной формы (включает изменяемую и неизменяемую части геометрии);
- 1.3. целевой функции, критериев и граничных условий оптимизации (нагрузки и граничные условия прикладываются к неизменяемой геометрии);
- 1.4. критериев прочности (работоспособности).

2. *Препроцессорная подготовка*:

- 2.1. разработка (импорт) компьютерной геометрической модели объекта исследования (на основе границ геометрической области начального пространства);
- 2.2. разработка компьютерной расчетной (конечно-элементной) модели объекта исследования;
- 2.3. задание изменяемых и неизменяемых областей модели;
- 2.4. задание нагрузочных режимов, свойств материала, определение свойств контактных и кинематических пар;
- 2.5. задание целевой функции оптимизации, значений критериев и ограничений для поиска оптимального решения.

3. *Процессорная обработка*:

- 3.1. автоматическое выполнение топологической оптимизации для заданных нагрузочных режимов, выбранной целевой функции, критериев и ограничений поиска оптимального решения.

4. *Постпроцессорная обработка*:

- 4.1. экспорт автоматически сгенерированной полигональной геометрии поверхности (-ей) (в формате STL — stereolithography), описывающей (-их) границы распределения материала для найденной оптимальной геометрии конструкции;
- 4.2. редактирование сгенерированной полигональной геометрии конструкции (выполняется при необходимости);
- 4.3. преобразование отредактированной полигональной геометрии в твердотельную модель конструкции;

4.4. экспорт отредактированной твердотельной модели оптимизированной конструкции в CAD-формат (Parasolid, STEP, IGES и т. п.), необходимый для последующего анализа на основе метода конечных элементов;

4.5. проведение проверочных расчетов для отредактированной твердотельной модели оптимизированной конструкции, анализ результатов.

5. *Валидация процесса*:

- 5.1. изготовление исследуемых образцов исходной и оптимизированной конструкции с применением аддитивных или равноценных технологий;
- 5.2. проведение натурных сравнительных испытаний исходной и оптимизированной конструкций, сопоставление и анализ результатов.

При существенном отклонении от заданных критериев прочности (работоспособности) выполняется возврат к стадии 2.5 для корректировки критериев или(и) граничных условий оптимизации. В случае относительно небольших отклонений выполняется переход к стадии 4.2 или 4.3 для ручного редактирования геометрии конструкции. Проведение таких изменений с последующими проверочными расчетами осуществляется до достижения заданных требований прочности.

Вопросы, касающиеся описания этапов 1–3 и соответствующих им стадий процесса топологической оптимизации, проанализированы и апробированы в работе [11]. Проведем более детальное описание стадий этапа 4.

Постпроцессорная обработка. Стадия 4.1.

По завершению автоматизированного поиска оптимальной топологии конструкции на этапе 3 программой-оптимизатором в пределах заданного на стадии 1.2 пространства для поиска оптимальной геометрии формируется автоматически сгенерированная полигональная геометрия поверхности (-ей), описывающей (-их) границы оптимального распределения материала. Данная полигональная геометрия экспортируется во внешний файл в формате STL, который содержит описание всех треугольных граней (полигонов или фасетов), формирующих их точки и нормалей.

Для сгенерированной полигональной геометрии оптимизированной конструкции имеется высокая вероятность наличия резких переходов и перепадов поверхностей, несущественных приращений или удалений материала, имеющих сложную форму. Это происходит в результате особенностей работы алгоритма оптимизатора, в том числе с учетом выбранных начальных настроек поиска оптимальной геометрии, размерности сформированной конечно-элементной модели начального пространства для поиска оптимальной геометрии.

Стадия 4.2. С целью устранения указанных недостатков автоматически сгенерированной полигональной геометрии оптимизированной конструкции, а также для задания возможных технологи-

ческих требований к формированию оптимальной геометрии, например, литейных или штамповочных уклонов, выполняется ее редактирование средствами встроенного в программу оптимизатора или стороннего САД-приложения. Согласно [17] имеется три основных способа редактирования такой геометрии:

A — «ручное» построение твердотельной геометрии на основе автоматически сгенерированной полигональной геометрии (стадии 4.2 и 4.3 объединяются);

B — преобразование и сглаживание полигональной геометрии;

C — применение автоматизированного сглаживания NURBS-поверхностями для описания оптимальной геометрии;

Способ *A* может применяться для деталей и конструкций, имеющих простую форму. Он заключается в создании средствами САД-приложения на основе автоматически сгенерированной полигональной модели ряда сечений, в которых отрисовывается профиль границ материала. Потом выполняется соединение полученных замкнутых линий профиля переходными криволинейными поверхностями, и таким образом аппроксимируется геометрия конструкции.

Способ *B* основан на работе с полигональной геометрией путем применения различных инструментов ее прямого редактирования. Таким образом выполняются операции: удаление первоначальных наборов полигонов в выбранных местах резкого перепада или дефекта геометрии с заменой их скорректированными наборами; закрытие возможных несплошностей; нормирование и изменение размера полигонов; сглаживание резких переходов. Хотя большинство перечисленных операций автоматизировано, данный способ требует определенной подготовки специалиста и немало времени для достижения приемлемого результата.

Способ *C* заключается в применении средств корректировки геометрии путем автоматизированного создания параметризованных неоднородных рациональных B-сплайнов (или Non-uniform rational B-spline — NURBS) и, соответственно, поверхностей на их основе. Одним из наиболее известных примеров подобных средств автоматизированного построения поверхностей является технология PolyNURBS (Altair Engineering, США), реализованная в программном комплексе топологической оптимизации Altair Inspire [18].

Также возможны различные комбинации из перечисленных выше трех методов. Например, на начальной стадии выполняется ручное редактирование локальных фрагментов полигональной геометрии, а затем на ее основе производится автоматизированное создание сглаженных NURBS-поверхностей.

Стадия 4.3. Отредактированная геометрия оптимизированной конструкции, представленная наборами полигональных или NURBS-поверхностей

либо их комбинациями, преобразуется в объемное тело, ограниченное этими поверхностями. Основным условием для выполнения этой операции является обеспечение замкнутости набора поверхностей, описывающих геометрию конструкции. На этой стадии также выполняется объединение (либо задание общих границ для стадии генерации расчетной сетки) автоматически сгенерированной объемной оптимизированной геометрии конструкции с частями неизменяемой геометрии (стадия 1.2), с помощью которой задавались граничные условия либо прикладывались нагрузки.

Стадия 4.4. Полученная объемная (твердотельная) геометрия оптимизированной конструкции с использованием возможностей применяемого геометрического редактора экспортируется в необходимый геометрический формат.

Стадия 4.5. Проведение проверочных расчетов необходимо для оценки работоспособности оптимизированной конструкции и представляет наиболее комплексную, наукоемкую стадию, описание которой недостаточно рассмотрено в опубликованных работах. Поэтому рассмотрим ее более подробно.

Проведение проверочных расчетов оптимизированной конструкции. При проведении проверочных расчетов оптимизированной конструкции с использованием традиционных подходов необходимо иметь описание основных нагрузочных режимов и свойств материала. Прикладываемые к модели нагрузки известны, т. к. они были сформированы на стадии 1.1 процесса оптимизации и именно для их действия была получена рассматриваемая оптимальная геометрия. Следовательно, на данной стадии основной задачей является определение свойств материала конструкции с учетом особенностей технологии ее изготовления. Например, при использовании 3D-печати по наиболее распространенной FDM-технологии механические свойства материала напечатанной конструкции в значительной степени определяются плотностью заполнения материала, направлением формирования слоев и растра печати относительно действующей нагрузки [12, 13].

Процесс экспериментального исследования механических свойств материала, полученного методом 3D-печати, включает следующие этапы:

- выбор типа и размеров испытательного образца (тип образца определяет вид нагружения: растяжение, сжатие, кручение, изгиб или сдвиг);
- определение набора исследуемых механических свойств (модуль Юнга, коэффициент Пуассона, предел текучести (при наличии), предел прочности, относительное удлинение при разрушении и др.);
- формирование групп испытательных образцов на основании отличительных признаков (плотность заполнения материала, направление формирования слоев, растра печати) либо их комби-

наций, описывающих влияние на определяемые механические свойства;

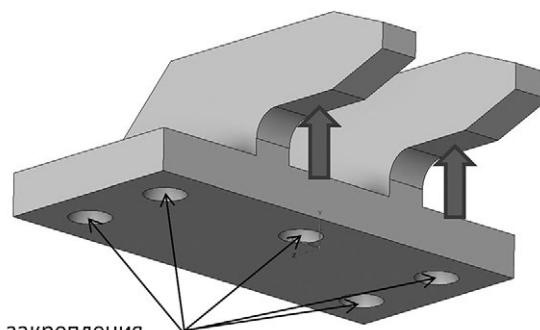
- экспериментальное определение механических свойств;
- обработка и анализ результатов испытаний с оценкой отличий исследуемых механических свойств (среднее значение, среднее квадратическое отклонение, дисперсия, коэффициент вариации) рассматриваемых групп образцов (одной из задач данной стадии исследований является подтверждение либо опровержение наличия анизотропии или ортотропии по тем или иным свойствам);
- выбор модели материала и определение ее параметров для описания механических свойств материала;
- валидация проведенных исследований.

Валидация выполняется с целью оценки корректности определения свойств материала, выбора модели материала и определения ее параметров вплоть до критериев разрушения. Заключается в сопоставлении результатов расчетных и экспериментальных исследований по определению значений показателей работоспособности конструкции. Таким образом, для валидации проводится эксперимент с разрушением исследуемой конструкции, изготовленной с применением выбранных технологии, установки 3D-печати и материала. Закрепление и нагружение конструкции при испытании обеспечивается согласно режиму нагружения, определенному на стадии 1.1. При сопоставлении расчетной и экспериментальной оценок эффективности оптимизации изготавливаются и доводятся до разрушения при испытаниях образцы изделий исходной и оптимизированной конструкции.

Пример проведения проверочных расчетов оптимизированной конструкции. Рассмотрим пример выполнения проверочных расчетов оптимизированной конструкции крюка, входящего в состав устройства останова колесного транспорта. При срабатывании устройства крюк испытывает динамическое нагружение с приложением внешних сил в вертикальном направлении, как показано на рисунке 1. Поэтому критерием работоспособности конструкции является обеспечение прочности. В данном случае в качестве значения критерия прочности принимается значение разрушающей нагрузки для исходной конструкции крюка. Это значение определяется экспериментальным и/или расчетным путем. Закрепление крюка осуществлено по крепежным отверстиям с ограничением всех степеней свободы, кроме вращательных относительно осей отверстий.

Результаты для основных этапов топологической оптимизации конструкции крюка приведены на рисунке 2.

В рассматриваемом случае топологическая оптимизация выполнялась для целевой функции минимизации податливости. В качестве одного из условий для формирования объема оптимального



Зоны закрепления

Рисунок 1 — Закрепление и нагружение объекта исследований (исходная конструкция крюка)

Figure 1 — Fixation and loading of the research object (initial hook design)

решения выступало использование 25 % объема изменяемого пространства модели. Топологическая оптимизация выполнялась в программном комплексе SolidThinking Inspire.

Для обеспечения технической возможности 3D-печати оптимизированной конструкции в ограниченном объеме камеры принтера, а также экономии материала, после получения отредактированной твердотельной геометрии оптимизированной конструкции выполнялось ее масштабирование по всем осям в соотношении 1:2,5. Полигональная модель формировалась на основании масштабированной твердотельной модели. Аналогичная процедура масштабирования проводилась и с исходной конструкцией крюка.

Соотношение объемов полученных 3D-моделей крюков оптимизированной и исходной конструкции составило 0,695, т. е. при использовании одного и того же материала, одной технологии изготовления масса оптимизированного крюка будет на 30,5 % ниже исходной.

Изготовление образцов крюков исходной и оптимизированной конструкций выполнялось методом 3D-печати по технологии FDM на 3D-принтере Fortus 250mc (Stratasys, США). Для печати использовался материал ABSplus-P430 (Stratasys, США). Основные настройки 3D-принтера приведены в таблице 1.

Изготовленные образцы исходного и оптимизированного вариантов крюков приведены на рисунке 3.

Результаты исследования механических свойств материала, полученного после печати при указанных в таблице 1 настройках принтера в зависимости от ориентации расположения (на плоскости и на ребре), ориентации раstra печати и слоев печати к направлению прикладываемой при испытаниях к образцам нагрузки, изложены в работе [19]. Использовались пропорциональные образцы IV типа по стандарту ASTM D-638. В таблице 2 приведены определенные по итогам обработки экспериментальных данных значения параметров билинейной модели поведения материала для рассматриваемого пластика ABSplus-P430. Значения параметров модели

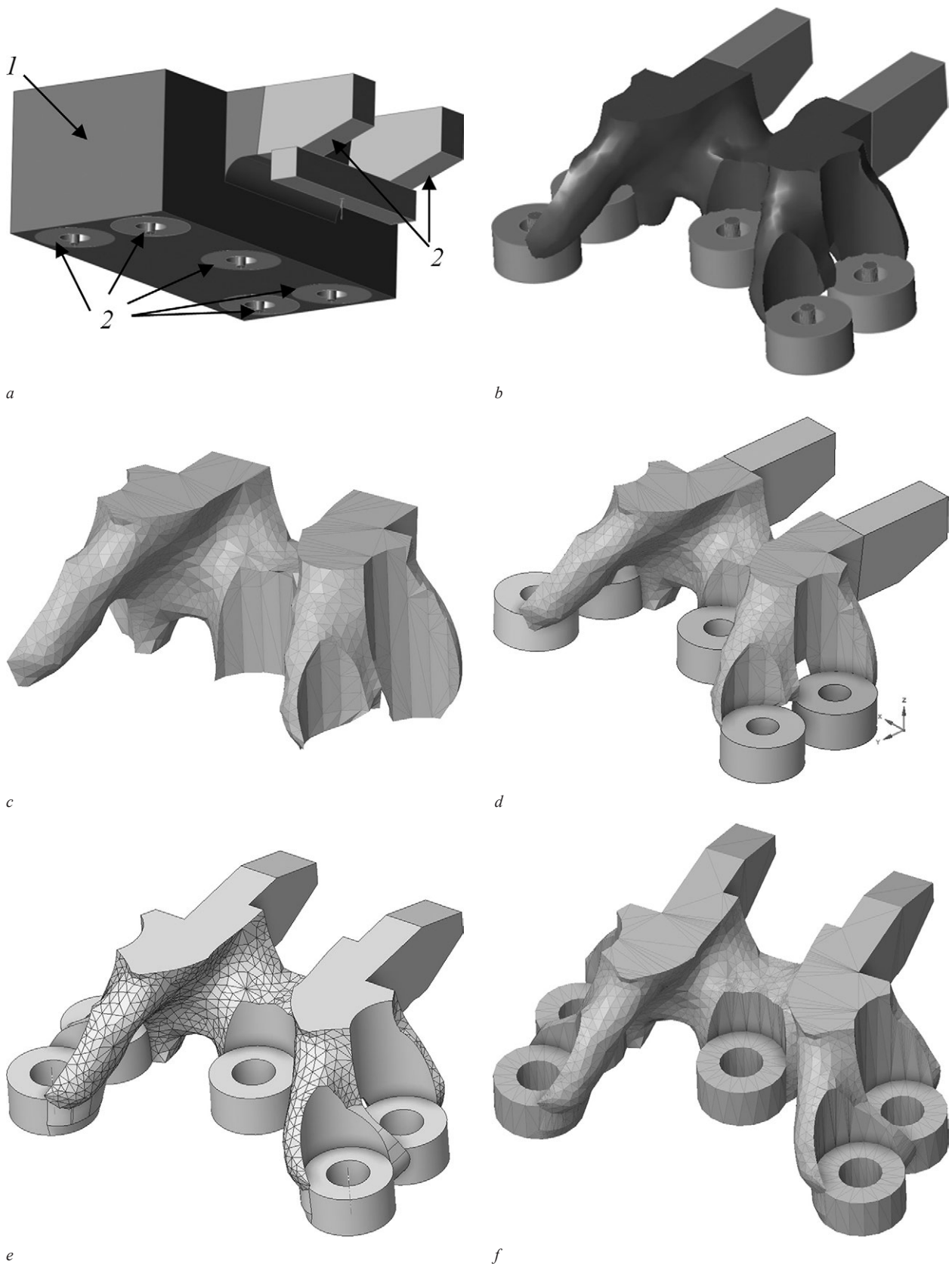
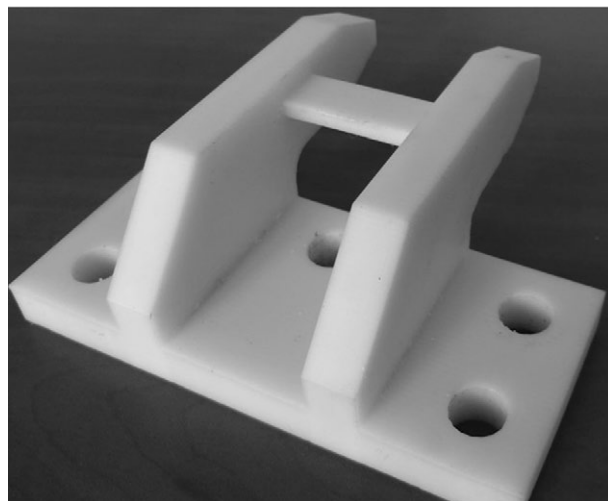


Рисунок 2 — Преобразование геометрии в процессе топологической оптимизации конструкции крюка:
a — объем начального пространства (1 — оптимизируемая геометрия; 2 — неизменяемая геометрия); *b* — результат топологической оптимизации; *c* — автоматически сгенерированная полигональная геометрия оптимизированной конструкции; *d* — совмещенная оптимизированная (полигональная) и неизменяемая (твердотельная) геометрия; *e* — отредактированная твердотельная геометрия оптимизированной конструкции; *f* — отредактированная полигональная геометрия оптимизированной конструкции

Figure 2 — Geometry transformation in the process of topological optimization of the hook design:
a — volume of the initial space (1 — optimized geometry; 2 — preserved geometry); *b* — result of topological optimization; *c* — automatically generated polygonal geometry of the optimized design; *d* — combined optimized (polygonal) and preserved (solid) geometry; *e* — refined solid geometry of the optimized structure; *f* — refined polygonal geometry of the optimized structure

Таблица 1 — Настройки 3D-принтера
Table 1 — 3D printer settings

Параметр	Значение
Дискретность слоя, мм	0,178
Толщина контура, мм	0,178
Заполнение, %	100
Температура головки экструдера, °C	310
Температура камеры, °C	78
Заполнение, %	100
Цвет нити	слоновая кость



a



b

Рисунок 3 — Конструкция крюков, изготовленных методом 3D-печати: *a* — исходная; *b* — оптимизированная
Figure 3 — Design of hooks made by 3D printing: *a* — initial; *b* — optimized

материала определялись путем подбора соответствующих величин при компьютерном моделировании испытаний. Указанные группы образцов имеют следующие отличия (см. таблицу 2): № 1 — большая сторона сечения образца расположена на плоскости печатного стола, растр печати имеет ориентацию

Таблица 2 — Значения параметров модели материала
Table 2 — Values of the material model parameters

Наименование показателя	№ группы образцов		
	1	2	3
Модуль Юнга, МПа	2010	1759	2137
Предел текучести, МПа	39,9	34,5	44,5
Тангенциальный модуль упрочнения, МПа	175,0	205,0	82,5
Пластическая деформация при разрушении	0,0386	0,0197	0,0550
Отличие расчетных значений от экспериментальных			
Относительное удлинение при разрыве, %	0,1	1,0	0,9
Нагрузка при разрыве, %	1,9	1,9	3,7
Плотность энергии деформаций, %	7,6	1,2	0,8

+45°/–45° к направлению прикладываемой нагрузки; № 2 — большая сторона сечения образца расположена на плоскости печатного стола, растр печати имеет ориентацию 0°/90° к направлению прикладываемой нагрузки; № 3 — образец расположен ребром на плоскости печатного стола, растр печати имеет ориентацию +45°/–45° к направлению прикладываемой нагрузки. С целью оценки достоверности полученного расчетного описания поведения материала в таблице 2 также показаны результаты сопоставления данных компьютерного моделирования испытаний образцов материала с экспериментом.

Разработанные конечно-элементные модели исходного и оптимизированного вариантов крюков для расчетной оценки величины разрушающей нагрузки приведены на рисунках 4 *a* и *b*. Расчетные модели крюков созданы в программном комплексе ANSYS Workbench. Описание свойств материалов, граничных условий и прикладываемых нагрузок выполнено в приложении LS-PrePost, расчет — в решателе LS-DYNA. В качестве критерия разрушения задавалась величина пластической деформации при растяжении. Результаты моделирования в виде конечно-элементных моделей с зонами разрушений (автоматически удалены элементы, в которых пластические деформации растяжения достигли заданного критерия разрушения), полученными в ходе нагружения, приведены на рисунках 4 *c*, *d*.

Испытания крюков по определению разрушающей нагрузки проводились на универсальной испытательной разрывной машине Instron Satec 300LX, обеспечивающей погрешность измерения деформации и нагрузки не более 0,5 %. Для реализации необходимой схемы нагружения проектировалось и изготавливалось испытательное приспособление. С целью проверки обеспечения прочности приспособления проводился его расчет для рассматриваемого режима нагружения с масштабированием полученных расчетным способом разрушающих нагрузок в два раза. На рисунке 5

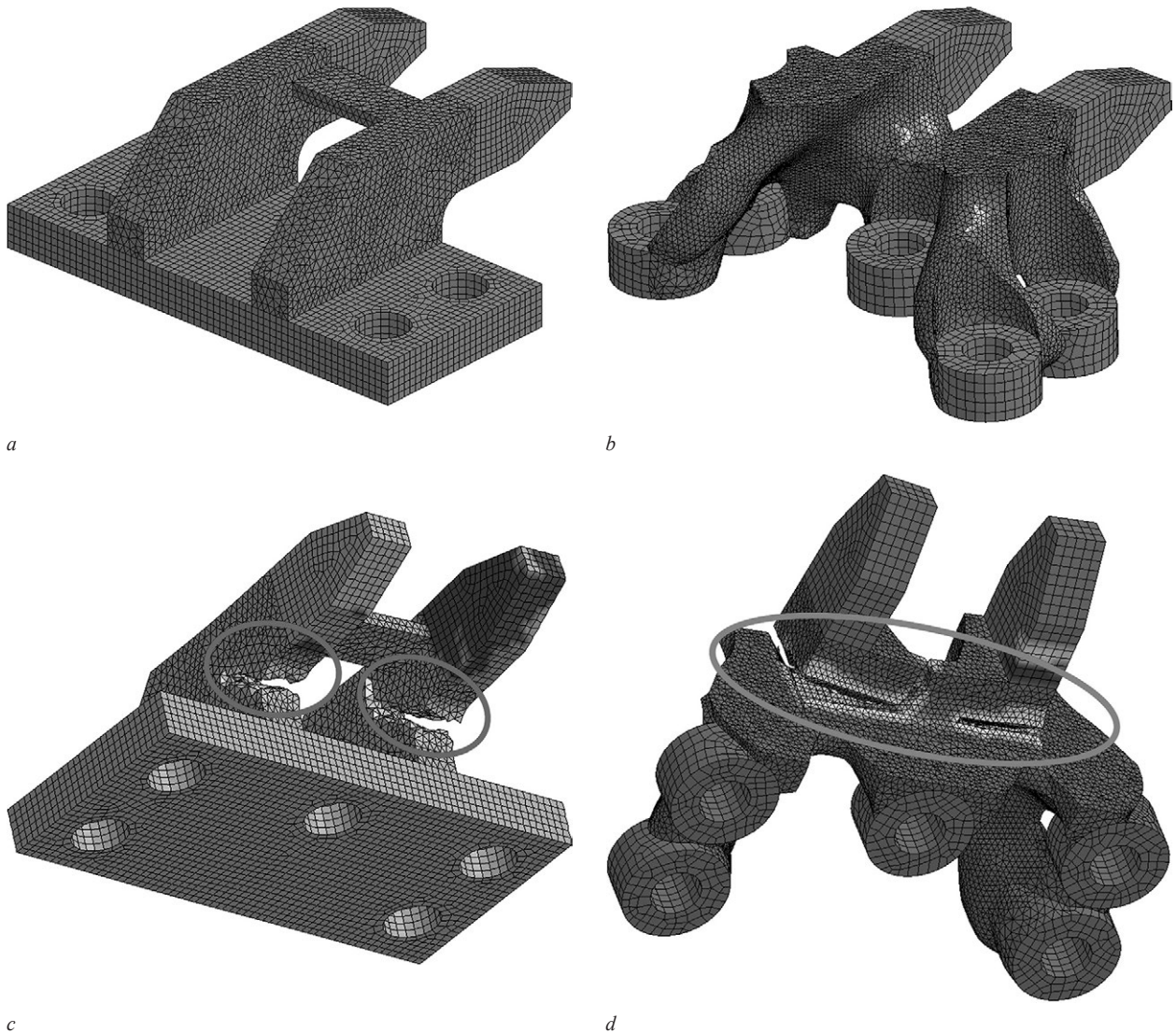


Рисунок 4 — Конечно-элементные модели крюков. Конструкция: *a* — исходная; *b* — оптимизированная. Зона разрушений конструкций: *c* — исходная; *d* — оптимизированная
 Figure 4 — Finite element models of hooks. Design: *a* — initial; *b* — optimized. Structural damage zone: *c* — initial; *d* — optimized

приведены результаты численного расчета прочности испытательного приспособления при удвоенной расчетной разрушающей нагрузке и крюк в исходном варианте конструкции, зафиксированный в испытательном приспособлении на разрывной машине, в ходе испытаний по определению разрушающей нагрузки.

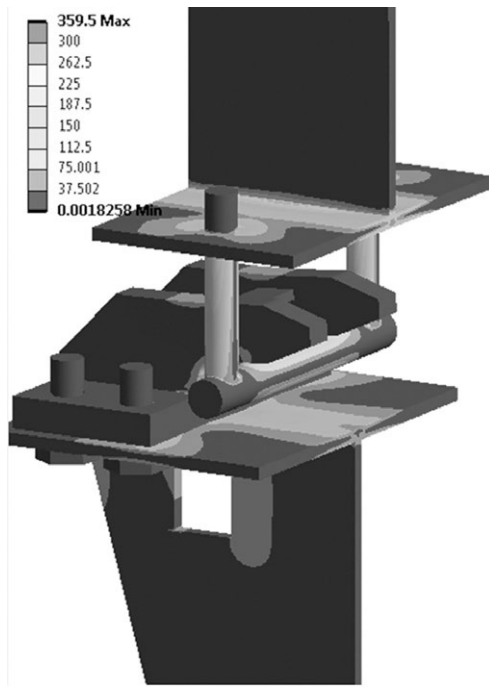
На рисунке 6 показаны разрушения крюков исходной и оптимизированной конструкции, полученные в ходе испытаний на экспериментальной установке.

Сопоставление расположения зон разрушения, геометрии изломов, полученных расчетным (см. рисунок 4) и экспериментальным (см. рисунок 6) путем, свидетельствует об их хорошем соответствии как для исходной, так и для оптимизированной конструкции. Таким образом, в качественном плане апробацию можно считать успешной.

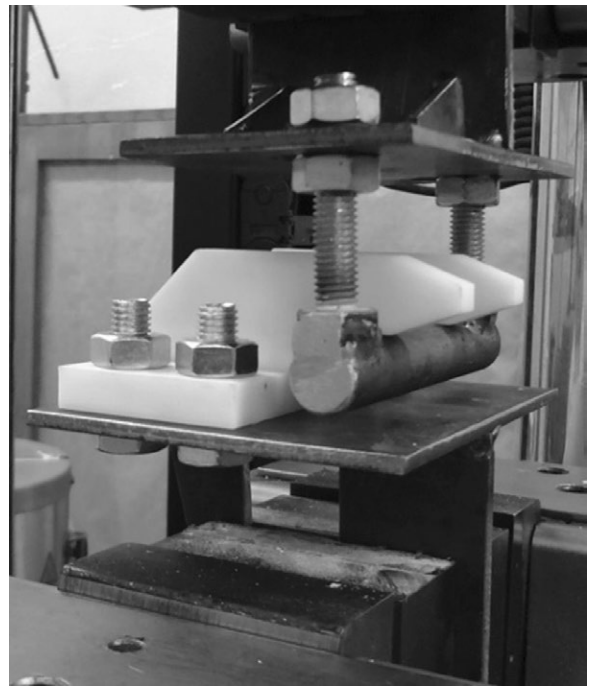
Результаты расчетных и экспериментальных исследований значений разрушающих усилий для сопоставления сведены в таблицу 3.

Согласно полученным результатам, отличие расчетных и экспериментальных значений разрушающих нагрузок крюков исходной и оптимизированной конструкции не превышает 10,3 %, что является вполне удовлетворительным для моделирования разрушения материала, обладающего нелинейными и анизотропными свойствами. Расчетная и экспериментальная оценки эффективности проведенной оптимизации также находятся в удовлетворительном соотношении 44,4 и 57,8 % соответственно, т. е. их отличие составляет 13,4 %.

Заключение. Существующий методический аппарат исследования и оптимизации силовых конструкций требует постоянной актуализации с целью повышения их надежности и эффективности, снижения затрат на изготовление. Возможности для совершенствования данных процессов могут заключаться в комплексном применении современных численных методов, средств компьютерного моделирования и топологической

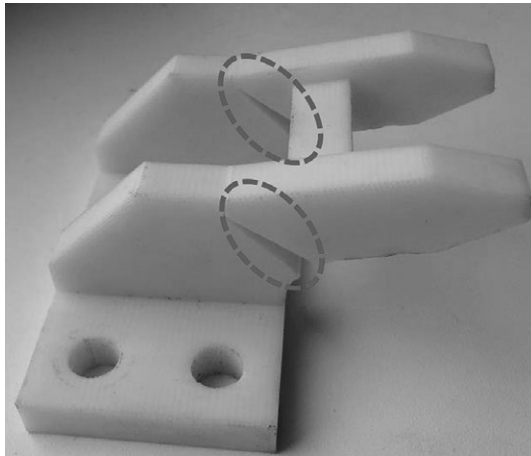


a

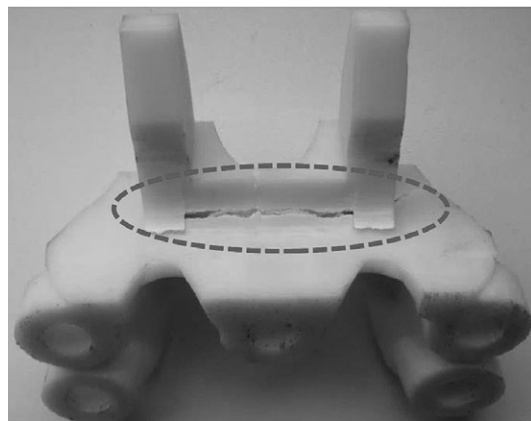
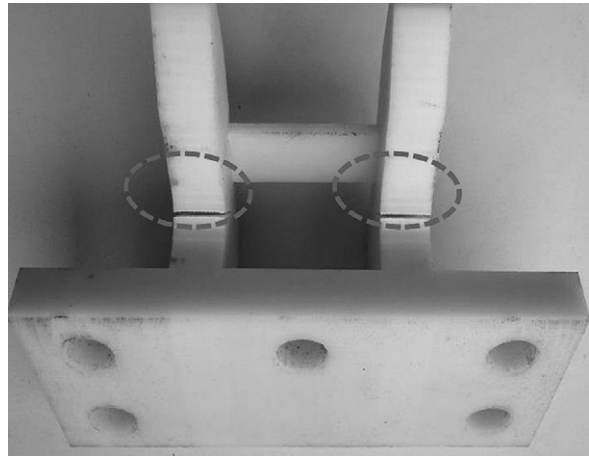


b

Рисунок 5 — Экспериментальная установка для определения разрушающей нагрузки крюка:
a — расчет прочности испытательного приспособления экспериментальной установки; *b* — испытание крюка исходной конструкции
Figure 5 — Test installation for determining the destructive load of the hook:
a — calculation of the strength of the test device of the experimental installation; *b* — testing of the hook of the initial design



a



b

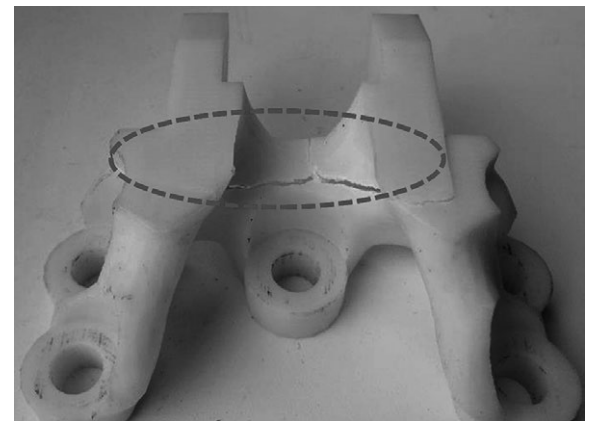


Рисунок 6 — Разрушения крюков в результате испытаний. Конструкция крюка: *a* — исходная; *b* — оптимизированная
Figure 6 — Breakdown of hooks as a result of tests. Hook design: *a* — initial; *b* — optimized

Таблица 3 — Значения разрушающих нагрузок
Table 3 — Values of breakdown loads

Способ определения	Разрушающая нагрузка, Н		Отличие	
	Исходная конструкция	Оптимизированная конструкция	Н	%
Расчет	2376	3432	1056	44,4
Эксперимент	2130	3362	1232	57,8
Отличие, %	10,3	2,0	14,3	13,4

оптимизации, а также в использовании возможностей аддитивных технологий, в частности 3D-печати.

В совокупности с другими средствами компьютерного моделирования применение методов и средств топологической оптимизации позволяет перейти от метода «интуитивного» проектирования к проектированию по заданным характеристикам, ускорить и повысить эффективность перехода в производстве к технологиям 3D-печати и таким образом ускорить освоение процессов и методов, формирующих основы «цифрового производства».

Предложенная комплексная методика топологической оптимизации силовых конструкций включает рекомендации по проверке критериев ее эффективности посредством апробации результатов оптимизации, заключающейся в сопоставлении расчетных и экспериментальных данных по оценке работоспособности (прочности) исходной и оптимизированной конструкций. Методика адаптирована для конструкций, изготовленных методом 3D-печати, материалы которых зачастую проявляют анизотропные свойства.

Результаты апробации методики на примере силового крюка, входящего в конструкцию устройства остановки колесного транспорта, подтверждают корректность предложенных методических рекомендаций, выбранных подходов моделирования и определения свойств материала конструкции, полученной методом 3D-печати.

Разработанная комплексная методика топологической оптимизации силовых конструкций может быть эффективно применена, начиная с самых ранних стадий концептуального проектирования.

Список литературы

1. Cazacu, R. Overview of structural topology optimization methods for plane and solid structures / R. Cazacu, L. Grama // ANNALS OF THE UNIVERSITY OF ORADEA. Fascicle of Management and Technological Engineering. — 2014. — Vol. XXIII (XIII), iss. 3. — DOI: <https://doi.org/10.15660/AUOFMTE.2014-3.3043>.
2. Sigmund, O. Topology optimization approaches: a comparative review / O. Sigmund, K. Maute // Structural and Multidisciplinary Optimization. — 2013. — Vol. 48, iss. 6. — Pp. 1031–1055. — DOI: <https://doi.org/10.1007/s00158-013-0978-6>.
3. Structural topology optimization with constraints on multi-fastener joint loads / J.-H. Zhu [et al.] // Structural and Multidisciplinary Optimization. — 2014. — Vol. 50, iss. 4. — Pp. 561–571. — DOI: <https://doi.org/10.1007/s00158-014-1071-5>.

4. Leiva, J.P. Structural optimization methods and techniques to design efficient car bodies [Electronic resource] / J.P. Leiva // Proc. of International Automotive Body Congress 2011, Troy, MI, 9–10 Nov. 2011. — New York, 2011. — Vol. 28. — Pp. 41–54. — Mode of access: https://www.vrand.com/wp-content/uploads/2012/02/jpleiva_iabc2011.pdf. — Date of access: 09.09.2022.
5. Zhu, J.-H. Topology Optimization in Aircraft and Aerospace Structures Design / J.-H. Zhu, W.-H. Zhang, L. Xia // Archives of Computational Methods in Engineering. — 2016. — Vol. 23, iss. 4. — Pp. 595–622. — DOI: <https://doi.org/10.1007/s11831-015-9151-2>.
6. Brackett, D. Topology optimization for additive manufacturing / D. Brackett, I. Ashcroft, R. Hague // 22nd Annual International Solid Freeform Fabrication Symposium — An Additive Manufacturing Conference, SFF. — 2011. — Pp. 348–362.
7. Tomlin, M. Topology Optimization of an Additive Layer Manufactured (ALM) Aerospace Part / M. Tomlin, J. Meyer // The 7th Altair CAE Technology Conference. — 2011. — Pp. 1–9.
8. Мягков, Л.Л. Реализация топологической оптимизации методом BESO в среде ANSYS APDL и ее применение для оптимизации формы шатуна тепловозного дизеля / Л.Л. Мягков, С.П. Чирский // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. — 2018. — № 11(704). — С. 38–48. — DOI: <https://doi.org/10.18698/0536-1044-2018-11-38-48>.
9. Применение метода топологической оптимизации для уменьшения массы конструктивно подобного кронштейна трубопровода авиационного ГТД / Д.Д. Попова [и др.] // Вестник ПНИПУ. Аэрокосмическая техника. — 2018. — № 55. — С. 42–51. — DOI: <https://doi.org/10.15593/2224-9982/2018.55.05>.
10. Топологическая оптимизация корпусных деталей вертолетного редуктора / А.М. Хитрин [и др.] // Вестн. ПНИПУ. Аэрокосмическая техника. — 2018. — № 53. — С. 43–51. — DOI: <https://doi.org/10.15593/2224-9982/2018.53.04>.
11. Компьютерное проектирование несущих конструкций машин с применением средств топологической оптимизации / С.Н. Поддубко [и др.] // Актуальные вопросы машиностроения: сб. науч. тр. / Объедин. ин-т машиностроения НАН Беларуси; редкол.: С.Н. Поддубко [и др.]. — 2016. — Вып. 5. — С. 86–90.
12. Somireddy, M. Mechanical Characterization of Additively Manufactured Parts by FE Modeling of Mesostructure / M. Somireddy, A. Czekanski // Journal of Manufacturing and Materials Processing. — 2017. — Vol. 1, iss. 2, 18. — DOI: <https://doi.org/10.3390/jmmp1020018>.
13. Bhandari, S. Finite element modeling of 3D-printed part with cellular internal structure using homogenized properties / S. Bhandari, R.A. Lopez-Anido // Progress in Additive Manufacturing. — 2019. — Vol. 4, iss. 2. — Pp. 143–154. — DOI: <https://doi.org/4.10.1007/s40964-018-0070-2>.
14. Representative Volume Element (RVE) Analysis for Mechanical Characterization of Fused Deposition Modeled Components / P. Ferretti [et al.] // Polymers. — 2021. — Vol. 13, iss. 20, 3555. — DOI: <https://doi.org/10.3390/polym13203555>.
15. Gonabadi, H.J. The effect of processing parameters on the mechanical characteristics of PLA produced by a 3D FFF printer / H.J. Gonabadi, A. Yadav, S.J. Bull // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. — 2020. — Vol. 111, iss. 3–4. — Pp. 695–709. — DOI: <https://doi.org/10.1007/s00170-020-06138-4>.
16. Investigation of the effect of raster angle, build orientation, and infill density on the elastic response of 3D printed parts using finite element microstructural modeling and homogenization techniques / H. Gonabadi [et al.] // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. — 2022. — Vol. 118, iss. 5–6. — Pp. 1485–1510. — DOI: <https://doi.org/10.1007/s00170-021-07940-4>.
17. Максимов, П.В. Анализ методов доработки конечно-элементной модели после топологической оптимизации / П.В. Максимов, К.В. Фетисов // Международный научно-исследовательский журнал. — 2016. — № 9(51). — С. 58–60. — DOI: <https://doi.org/10.18454/IRJ.2016.51.102>.
18. Optimize the shape of a part with the PolyNURBS tool in Inspire [Electronic resource]. — Mode of access: <https://www.sculpteo.com/en/tutorial/prepare-your-model-3d-printing-inspire/enhance-part-with-polynurbs-inspire/>. — Date of access: 09.09.2022.
19. Shmelev, A.V. Experimental and estimated determination of mechanical characteristics of 3D printed ABS plastic samples under tension / A.V. Shmelev, V.I. Ivchenko, A.V. Talaluev // Engineering Journal: Science and Innovation. — 2021. — No. 4(112). — DOI: <https://doi.org/10.18698/2308-6033-2021-4-2070>.

IVCHENKO Vadim I.

Deputy Head of the Republican Computer Center of Mechanical Engineering¹

E-mail: ivchenko_vi@oim.by

SHMIALIOU Aliaksei V., Ph. D. in Eng.

Deputy Director General for Research¹

E-mail: shmeliou.alexei@gmail.com

TALALUEV Aleksey V.

Head of the Republican Computer Center of Mechanical Engineering¹

E-mail: taval1976@gmail.com

OMELIUSIK Aleksey V.

Junior Researcher of the Republican Computer Center of Mechanical Engineering¹

E-mail: alexlifting@mail.ru

¹Joint Institute of Mechanical Engineering of the NAS of Belarus, Minsk, Republic of Belarus

Received 22 September 2022.

METHODOLOGICAL RECOMMENDATIONS ON TOPOLOGICAL OPTIMIZATION OF POWER STRUCTURES USING NUMERICAL MODELING TOOLS

Methodological recommendations are proposed for the development of the process of topological optimization of load carrying structures adapted for the use of additive technologies. The stage of postprocessing of the polygonal geometry of the part generated as a result of optimization is considered in detail. The validation stage is included in the process of topological optimization by comparing the calculated and experimental data to assess the operability (strength) of the optimized structure. For the option of manufacturing load carrying structures by 3D printing, it is planned to conduct studies of the mechanical properties of the material obtained on a 3D printer; taking into account the printing settings and the orientation of the material layers relative to the applied load during testing. An example of approbation of the proposed methodological recommendations is given on the example of a load carrying hook included in the design of a wheeled transport anti-ram device. The optimization was performed in the SolidThinking Inspire software environment (Altair Engineering, USA). The results of the calculated and experimental determination of the destructive load are presented for the initial and optimized hook design. For the experiment, the hooks were made of ABS plastic using FDM technology. Finite element models of hooks were developed in the ANSYS Workbench software package (ANSYS, USA). Assignment of material properties, boundary conditions and applied load is performed in the LS-PrePost application, calculation in the LS-DYNA solver (ANSYS, USA). The calculated and experimental efficiency estimates were 44.4 and 57.8 %, i. e. their difference is within 13.4 %. The zones and the nature of the destruction identified by calculation and experimentally completely coincide. The results obtained confirm the correctness of the proposed methodological recommendations, the selected modeling approaches and the determination of the properties of the material of the structure manufactured by 3D printing.

Keywords: computer-aided design, modeling, topological optimization, methodology, power structure, weight reduction, stiffness increase, strength, ABS plastic, 3D printing, FDM technology

DOI: <https://doi.org/10.46864/1995-0470-2022-4-61-68-79>

References

1. Cazacu R., Grama L. Overview of structural topology optimization methods for plane and solid structures. *Annals of the University of Oradea. Fascicle of management and technological engineering*, 2014, vol. XXIII (XIII), iss. 3. DOI: 2014/3.10.15660/AUOFMTE.2014-3.3043.
2. Sigmund O., Maute K. Topology optimization approaches: a comparative review. *Structural and multidisciplinary optimization*, 2013, vol. 48, iss. 6, pp. 1031–1055. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00158-013-0978-6>.
3. Zhu J.-H., Hou J., Zhang W.-H., Li Y. Structural topology optimization with constraints on multi-fastener joint loads. *Structural and multidisciplinary optimization*, 2014, vol. 50, iss. 4, pp. 561–571. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00158-014-1071-5>.
4. Leiva J.P. Structural optimization methods and techniques to design efficient car bodies. *Proceedings of International automotive body congress 2011*. Troy, MI, 2011, vol. 28, pp. 41–54. Available at: https://www.vrand.com/wp-content/uploads/2012/02/jpleiva_iabc2011.pdf (accessed 09 September 2022).
5. Zhu J.-H., Zhang W.-H., Xia L. Topology optimization in aircraft and aerospace structures design. *Archives of computational methods in engineering*, 2016, vol. 23, iss. 4, pp. 595–622. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11831-015-9151-2>.

6. Brackett D., Ashcroft I., Hague R. Topology optimization for additive manufacturing. *22nd Annual international solid free-form fabrication symposium — An additive manufacturing conference, SFF*. Austin, 2011, pp. 348–362.
7. Tomlin M., Meyer J. Topology optimization of an additive layer manufactured (ALM) aerospace part. *Proceeding of the 7th Altair CAE technology conference*. 2011, pp. 1–9.
8. Myagkov L.L., Chirskiy S.P. Realizatsiya topologicheskoy optimizatsii metodom BESO v srede ANSYS APDL i ee primeneniye dlya optimizatsii formy shatuna teplovoznogo dizelya [The implementation of the BESO method for topology optimization in ANSYS APDL and its application for optimization of the connecting rod shape of a locomotive diesel engine]. *BMSTU journal of mechanical engineering*, 2018, no. 11(704), pp. 38–48. DOI: <https://doi.org/10.18698/0536-1044-2018-11-38-48> (in Russ.).
9. Popova D.D., Samoilenko N.A., Semenov S.V., Balakirev A.A., Golovkin A.Yu. Primeneniye metoda topologicheskoy optimizatsii dlya umensheniya massy konstruktivno podobnogo kronshteyna truboprovoda aviatsionnogo GTD [Application of the topological optimization method to reduce the mass of gas turbine engine model bracket]. *PNRPU aerospace engineering bulletin*, 2018, no. 55, pp. 42–51. DOI: <https://doi.org/10.15593/2224-9982/2018.55.05> (in Russ.).
10. Hitrin A.M., Erofeeva M.M., Tuktamyshev V.R., Shiryayev A.A. Topologicheskaya optimizatsiya korpusnykh detaley vertoletnogo reduktora [Topological optimization of helicopter gearbox detail parts]. *PNRPU aerospace engineering bulletin*, 2018, no. 53, pp. 43–51. DOI: <https://doi.org/10.15593/2224-9982/2018.53.04> (in Russ.).
11. Poddubko S.N., Shmelev A.V., Ivchenko V.I., Zabolotskiy M.M., Trukhnov L.I., Khatskevich A.S. Kompyuternoye proektirovaniye nesushchikh konstruktivnykh mashin s primeneniem sredstv topologicheskoy optimizatsii [Computer-aided design of machines load-bearing structures using topology optimization tools]. *Aktualnye voprosy mashinovedeniya*, 2016, iss. 5, pp. 86–90 (in Russ.).
12. Somireddy M., Czekanski A. Mechanical characterization of additively manufactured parts by FE modeling of mesostructure. *Journal of manufacturing and materials processing*, 2017, vol. 1, iss. 2. DOI: <https://doi.org/10.3390/jmmp1020018>.
13. Bhandari S., Lopez-Anido R. Finite element modeling of 3D-printed part with cellular internal structure using homogenized properties. *Progress in additive manufacturing*, 2019, vol. 4, iss. 2, pp. 143–154. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40964-018-0070-2>.
14. Ferretti P., Santi G.M., Leon-Cardenas C., Fusari E., Donnici G., Frizziero L. Representative volume element (RVE) analysis for mechanical characterization of fused deposition modeled components. *Polymers*, 2021, vol. 13, iss. 20. DOI: <https://doi.org/10.3390/polym13203555>.
15. Gonabadi H., Yadav A., Bull S.J. The effect of processing parameters on the mechanical characteristics of PLA produced by a 3D FFF printer. *The international journal of advanced manufacturing technology*, 2020, vol. 111, iss. 3–4, pp. 695–709. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00170-020-06138-4>.
16. Gonabadi H., Chen Y., Yadav A., Bull S. Investigation of the effect of raster angle, build orientation, and infill density on the elastic response of 3D printed parts using finite element microstructural modeling and homogenization techniques. *The international journal of advanced manufacturing technology*, 2022, vol. 118, iss. 5–6, pp. 1485–1510. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00170-021-07940-4>.
17. Maksimov P.V., Fetisov K.V. Analiz metodov dorabotki konechno-elementnoy modeli posle topologicheskoy optimizatsii [The analysis of methods of refinement of the finite element model after topology optimization]. *International research journal*, 2016, no. 9(51), pp. 58–60. DOI: <https://doi.org/10.18454/IRJ.2016.51.102> (in Russ.).
18. *Optimize the shape of a part with the PolyNURBS tool in Inspire*. Available at: <https://www.sculpteo.com/en/tutorial/prepare-your-model-3d-printing-inspire/enhance-part-with-poly-nurbs-inspire/> (accessed 09 September 2022).
19. Shmelev A.V., Ivchenko V.I., Talaluev A.V. Experimental and estimated determination of mechanical characteristics of 3D printed ABS plastic samples under tension. *Engineering journal: science and innovation*, 2021, no. 4(112). DOI: <https://doi.org/10.18698/2308-6033-2021-4-2070>.