

ПРОЕКТИРОВАНИЕ ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИЙ РАЗЛИЧНОГО НАЗНАЧЕНИЯ НА ОСНОВЕ ТОПОЛОГИЧЕСКОЙ ОПТИМИЗАЦИИ

Д. В. Сорокин✉, Л. А. Бабкина, О. В. Бразговка

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнёва,
г. Красноярск, Российская Федерация

В последние десятилетия активно развиваются теория, алгоритмы и технологии топологической оптимизации для решения задач в различных областях. Данная методика находит широкое применение и использование при проектировании элементов конструкций в инженерных задачах. Отдельный интерес вызывает реализация методов топологической оптимизации в аэрокосмической отрасли. Основным результатом топологической оптимизации является определение эффективного распределения (использования) материала (материалов) в детали. В статье представлен обзор последних достижений, связанных с проектированием изделий широкого назначения, в том числе для ракетно-космической техники, на основе топологической оптимизации. Кратко перечислены основные алгоритмы для решения задач топологической оптимизации. Отдельный акцент в обзоре сделан на открывающиеся качественно новые возможности при моделировании ячеистых и сетчатых структур, изделий из композиционных материалов и мультиматериалов. Приведены примеры решений топологической оптимизации, ставшие уже классическими. Многие полученные результаты проектирования тесно связаны с внедрением различных современных технологий аддитивного производства. В заключении обзора формулируются актуальные вопросы, решение которых позволит обеспечить потенциал будущего роста и перспективы применения всей рассмотренной совокупности технологий проектирования и аддитивного производства в аэрокосмической отрасли.

Ключевые слова: топологическая оптимизация, геометрическое моделирование, ячеистая структура, инженерный анализ, композиционный материал, аддитивные технологии.

Введение

Более 30 лет назад появились первые теоретические и прикладные исследования в области топологической оптимизации (ТО). Первые, наиболее полные и стройные, описания теории и ее приложения были представлены в [1–4].

Термин ТО обозначает методику или технологию, основанную на некоторых вычислительных математических методах, для определения эффективного распределения (использования) материала в детали или конструкции с точки зрения максимизации (минимизации) физико-технических параметров изделия при заданных ограничениях и схемах нагрузки (эксплуатации). Нахождение оптимального проектного решения для конструкции с точки зрения эффективного (непрерывного

или дискретного) распределения материала – нетривиальная задача, и без применения современных вычислительных компьютерных технологий – трудноразрешимая. За последние десятилетия данная технология в проектировании стала очень популярной и востребованной. Десятки коммерческих и бесплатных прикладных программных продуктов реализуют данную методику. Большой список программного обеспечения, которое позволяет решать задачи различной сложности с применением методов ТО, можно увидеть здесь [5].

1. Проекты и решения

На данный момент разработаны различные методы оптимизации размеров, формы и топологии конструкций, которые широко используются при проектировании деталей и элементов сборок в различных областях. Среди существующих мето-

✉ dmitros104@gmail.com

дов оптимизации ТО была признана одним из наиболее эффективных инструментов для конструирования деталей и элементов сборок. Например, сочетание в элементе конструкции наименьшего веса и высокой жесткости (прочности) или низкой (высокой) теплопроводности. Применение ТО, в сочетании с инженерным анализом, дает новые, уникальные возможности при проектировании инновационных деталей, сборочных единиц,

ферменных конструкций и реинжиниринга существующих конструкторских решений. Решение различных задач на основе ТО находит свое применение во многих областях: автомобилестроение (рис. 1), машиностроение (рис. 2, 3а и 3б), авиа-, ракетостроение (рис. 4 и 5), гражданское строительство, архитектура и дизайн (дизайн интерьеров) (рис. 6–8), химическая промышленность (рис. 9), медицина и др. (рис. 10).

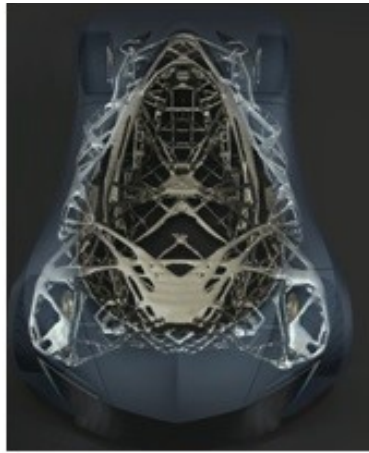


Рис. 1. Примеры оптимизации: силовой каркас кузова автомобиля [6]



Рис. 2. Примеры оптимизации: основание



а

б

Рис. 3. Примеры оптимизации: *а* – коромысло, *б* – качалка

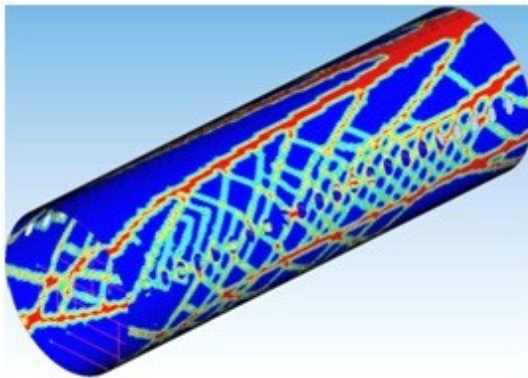
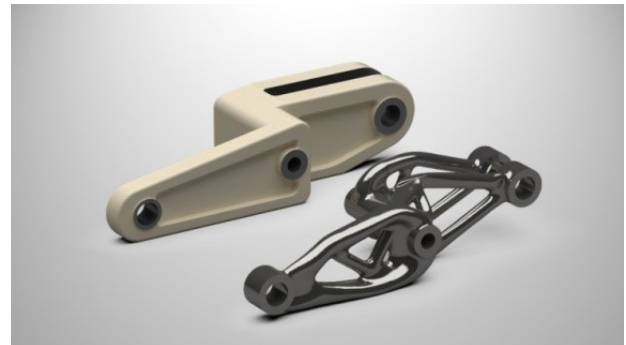


Рис. 4. Примеры оптимизации: фюзеляж самолета

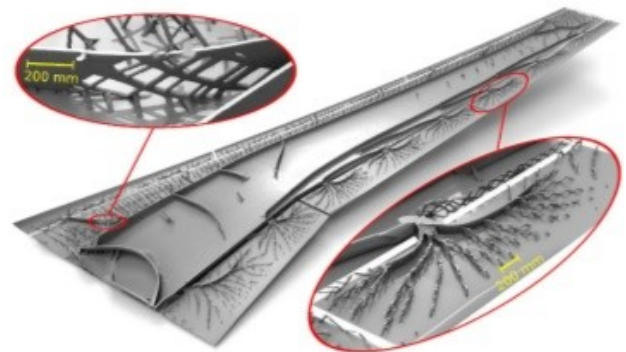
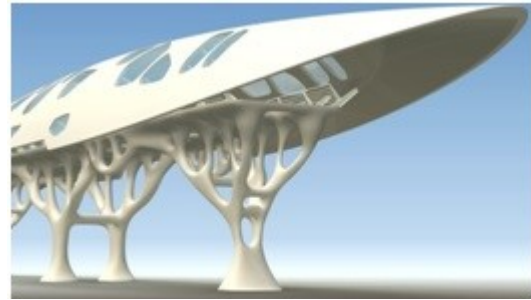


Рис. 5. Примеры оптимизации: силовой каркас крыла [7]

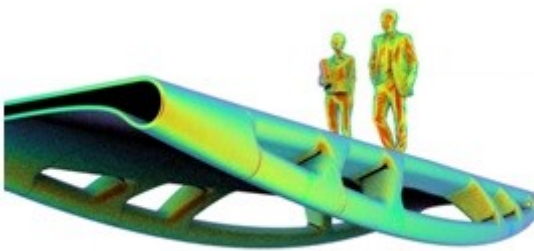


a



б

Рис. 6. Примеры оптимизации: *a* – проект общественного пространства; *б* – проект сооружения



a



б

Рис. 7. Примеры оптимизации: *a* – пешеходный мост; *б* – дизайн мебели

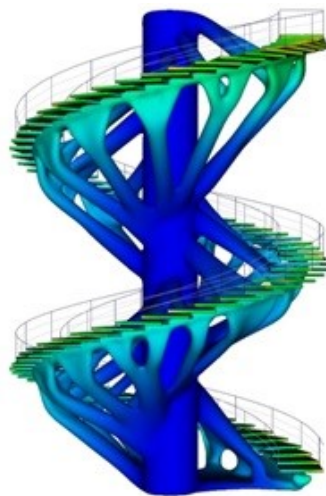


Рис. 8. Примеры оптимизации: винтовая лестница



Рис. 9. Примеры оптимизации: реактор

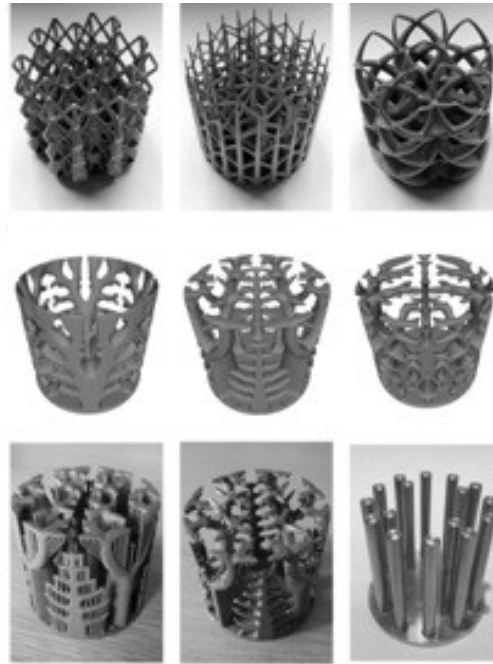


Рис. 10. Примеры оптимизации: радиатор

Отдельный, особенный интерес вызывает применение ТО в аэрокосмической отрасли для создания легких, прочных и технологичных решений при соблюдении стоимостных, материальных и временных ограничений [8].

2. Алгоритмы топологической оптимизации

В общем виде процесс поиска проектного решения на основе ТО можно представить следующей схемой (рис. 11) и описанием.

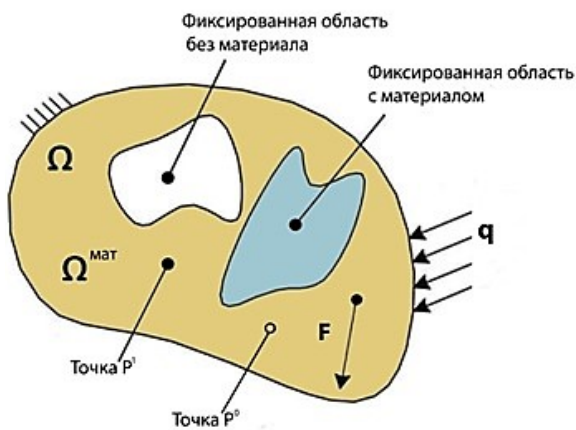


Рис. 11. Схема решения

Пусть будет задана некоторая ограниченная вещественная область Ω в двумерном или трехмерном пространстве:

- к заданной области Ω применяются граничные условия в виде различных возможных нагрузок и ограничений. Ограничения могут

включать задание инвариантных областей с предварительным условием отсутствия или наличия материала в указанной области.

- необходимо определить область $\Omega^{\text{мат}}$, которая представляет оптимальное распределение материала при заданных граничных условиях.

Решение задачи заключается в определении наличия P^1 или отсутствия P^0 материала в заданной точке области Ω и определении очертания (shape) области $\Omega^{\text{мат}}$ в доступном пространстве области Ω .

За последнее время разработаны, исследованы и применяются различные методы ТО:

- метод ESO (evolutionary structural optimization) [9] основан на последовательном удалении наименее нагруженного материала. Однако, удаленный на ранних итерациях материал может быть полезен на следующих этапах, но метод ESO не позволяет его восстановить. Таким образом, данный метод часто приводит к не совсем оптимальным решениям.

- метод BESO (bi-directional evolutionary structural optimization) построен на основе алгоритма эволюционной оптимизации конструкций. BESO метод позволяет материалу быть удаленным и добавленным одновременно. Родоначальником метода BESO являются Yang и др. [10; 11]. Принципиальное отличие метода от ESO заключается в том, что индекс чувствительности элементов определяется путем линейной экстраполяции поля перемещений, получаемого в результате конечно-элементного анализа.

- методы SIMP (Solid Isotropic Material with Penalization) [12; 13] и PTO (Proportional Topology Optimization) [14] реализованы на ос-

нове критерия оптимальности и являются наиболее фундаментальными по сравнению с другими математическими методами. Они впервые были введены для решения задач структурного дизайна Прагером [15]. В этих методах проектные переменные в элементах пропорциональны значению целевой функции. Элементы в конечно-элементной модели удаляются и добавляются в соответствии с критерием оптимальности.

2.1. Алгоритм TO BESO 2D

Проиллюстрируем решение задачи ТО с помощью метода BESO. Эволюционный процесс при выполнении ТО продолжается до тех пор, пока не будет получен желаемый оптимум. Эволюционную процедуру можно представить следующим образом:

Шаг 1: Дискретизация структуры с использованием сетки конечных элементов.

Шаг 2: Выполнение расчета на основе метода конечных элементов для конструкции.

Шаг 3: Удаление элементов, удовлетворяющих условиям.

Шаг 4: Увеличение коэффициента отбраковки в соответствии с уравнениями при достижении устойчивого состояния.

Шаг 5: Повторение шагов 2–4 до тех пор, пока не будет получен желаемый оптимум.

Рассмотрим 2D балку размерами $L = 5$ м, $h = 2$ м, $E = 200$ ГПа, $\mu = 0,3$, закрепленную с одной стороны и нагруженную силой $F = 1000$ Н с другой стороны, приложенной в разных точках. Необходимо получить оптимальную форму несущей конструкции для различных значений процента удаленного материала. Например, необходимо обеспечить в конечной конструкции удаление материала на 10 %, 30 % и 50 %, при этом иметь уровень напряжений в конструкции менее 25 % от максимального значения (рис. 12.1–12.3).

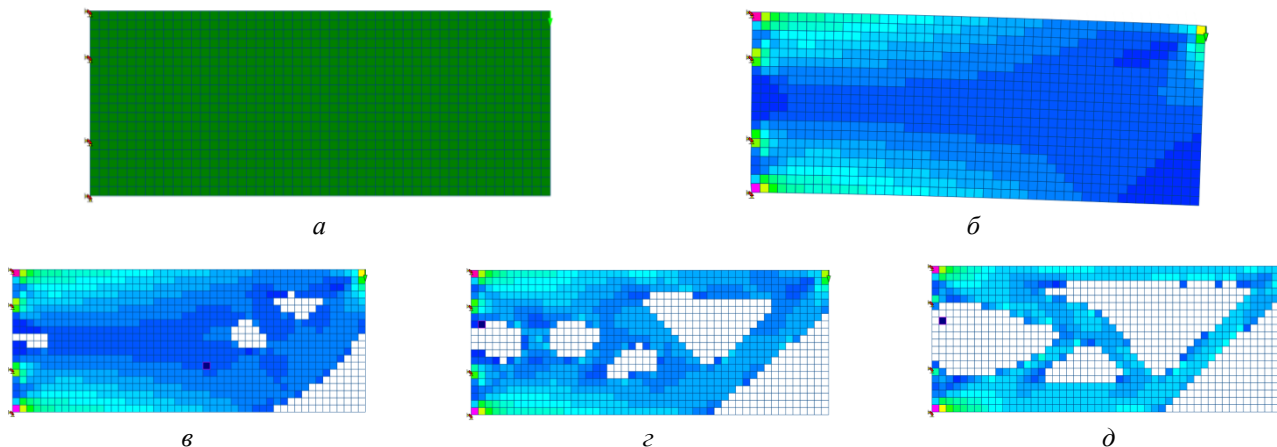


Рис. 12.1. *a* – конечно-элементная модель, 1000 КЭ, $L = 5$ м, $h = 2$ м, $F = 1000$ Н (правый верхний угол), $E = 200$ ГПа, $\mu = 0,3$; *б* – напряжения, МПа; *в* – 13 итераций, 90 % материала; *г* – 28 итераций, 70 % материала; *д* – 56 итераций, 50 % материала

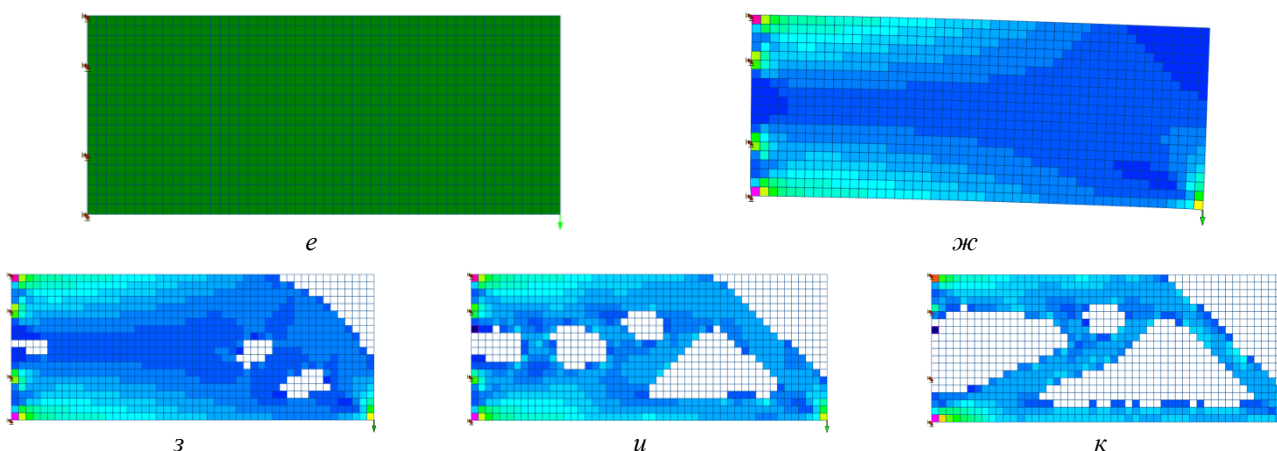


Рис. 12.2. *e* – конечно-элементная модель, 1000 КЭ, $L = 5$ м, $h = 2$ м, $F = 1000$ Н (правый нижний угол), $E = 200$ ГПа, $\mu = 0,3$; *ж* – напряжения, МПа; *з* – 13 итераций, 90 % материала; *и* – 28 итераций, 70 % материала; *к* – 56 итераций, 50 % материала

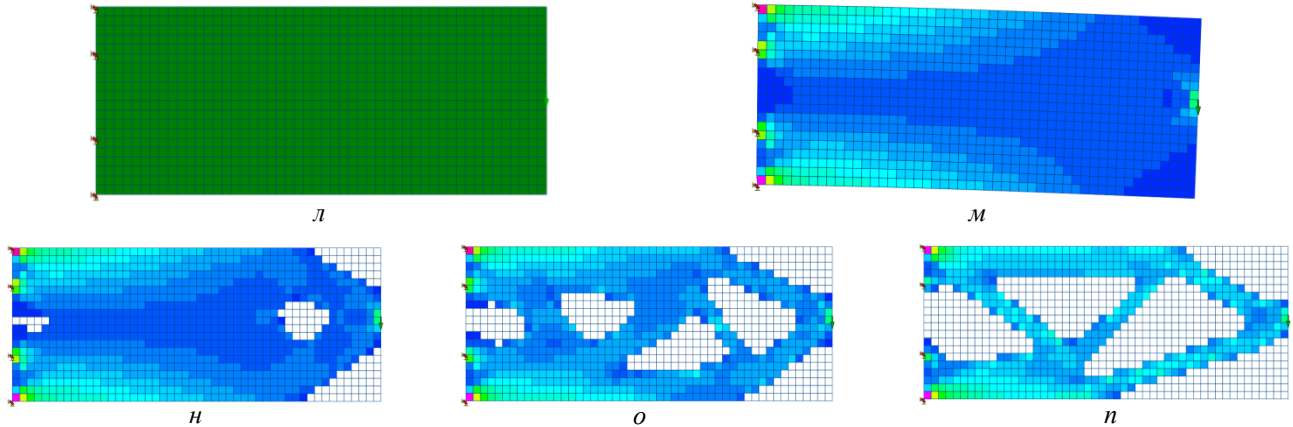


Рис. 12.3. л – конечно-элементная модель, 1000 КЭ, $L = 5$ м, $h = 2$ м, $F = 1000$ Н (справа в середине), $E = 200$ ГПа, $\mu = 0,3$; м – напряжения, МПа; н – 14 итераций, 90 % материала; о – 29 итераций, 70 % материала; п – 45 итераций, 50 % материала

На рис. 12.1–12.3 представлены решения для каждого случая и количество итераций для достижения результата. Полученные решения могут являться основанием для создания соответствующего геометрического представления итоговой конструкции.

3. ТО элементов конструкций ракетно-космической техники

В аэрокосмических транспортных системах применяются стабилизаторы, рули высоты и направления. Применяемые в ракетной технике рули направления (рис. 13а) часто испытывают как аэродинамические, так и тепловые нагрузки.

Инновационная конструкция рулей направления может иметь большое значение при исполнении всего рулевого механизма транспортного средства. В работе [16] рассматривается задача оптимизации типовой цельнодвижущейся рулевой конструкции (рис. 13б) на основе ТО.

Обшивка, тепловые нагрузки, силовой набор и момент инерции являются целями оптимизации для получения конструкции руля направления. Полученное решение должно обеспечить быстрое реагирование конструкции руля направления на команды системы управления (рис. 14).

Основные этапы проектирования с применением ТО и последующим выходом на установки аддитивного производства представлены на рис. 15.

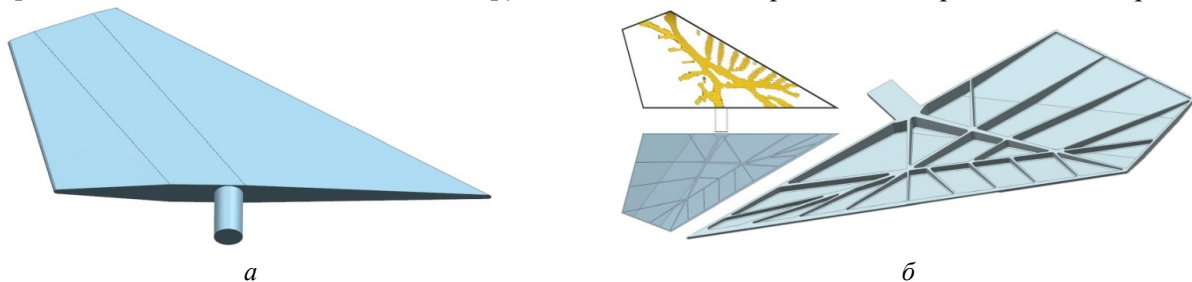


Рис. 13. а – 3D модель руля направления; б – топологическая оптимизация и конструкторская доработка силового каркаса

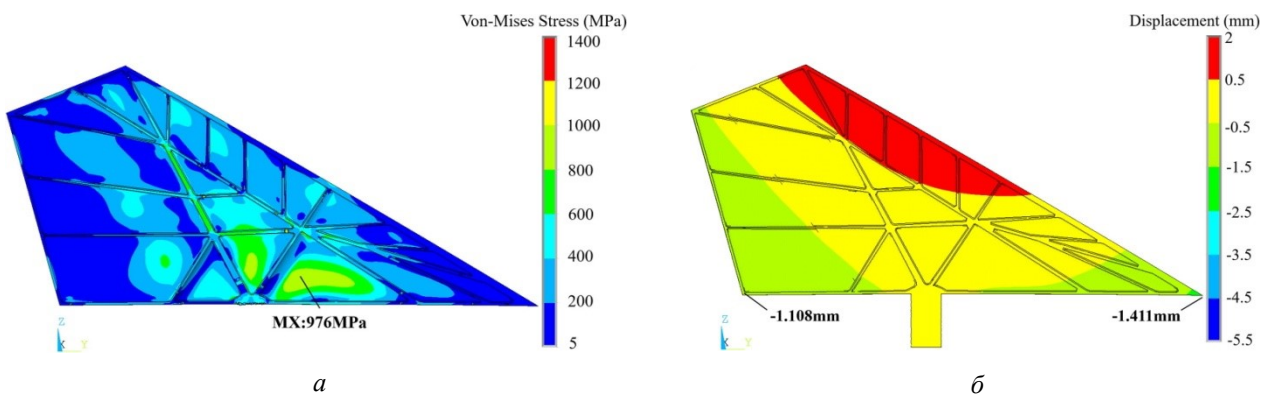


Рис. 14. Прочностной анализ: а – напряжения, б – перемещения

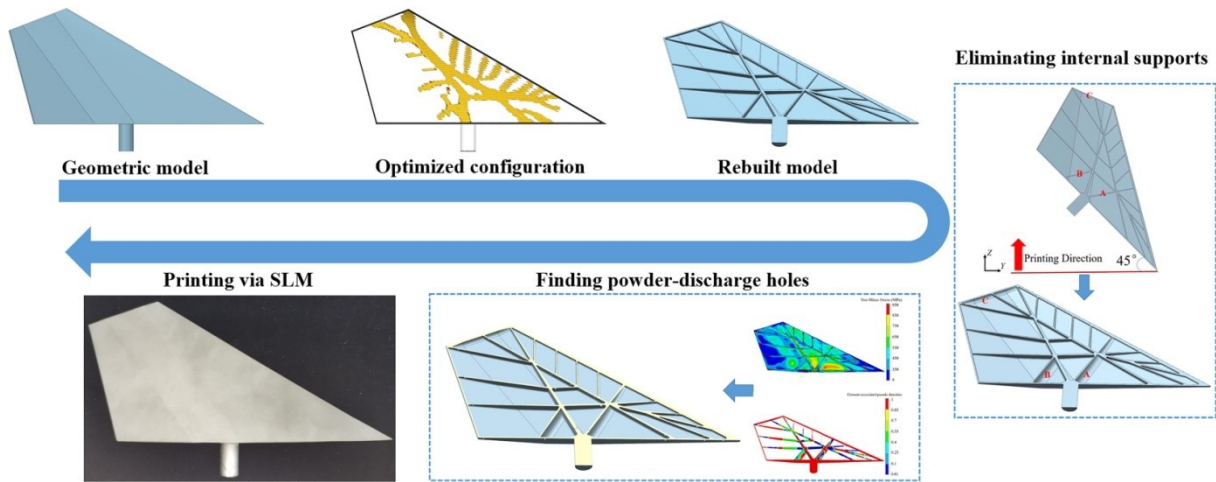


Рис. 15. Цикл разработки и изготовления по технологии SLM типового руля направления

4. ТО ребристых структур

В работе [17] представлены результаты оптимизации топологии расположения ребер при проектировании квадратной усиленной пласти-

ны (пластина с ребрами). Целью проектирования является повышение жесткости и снижение перемещений в пластине, закрепленной с четырех сторон под воздействием распределенной нагрузки (рис. 16).

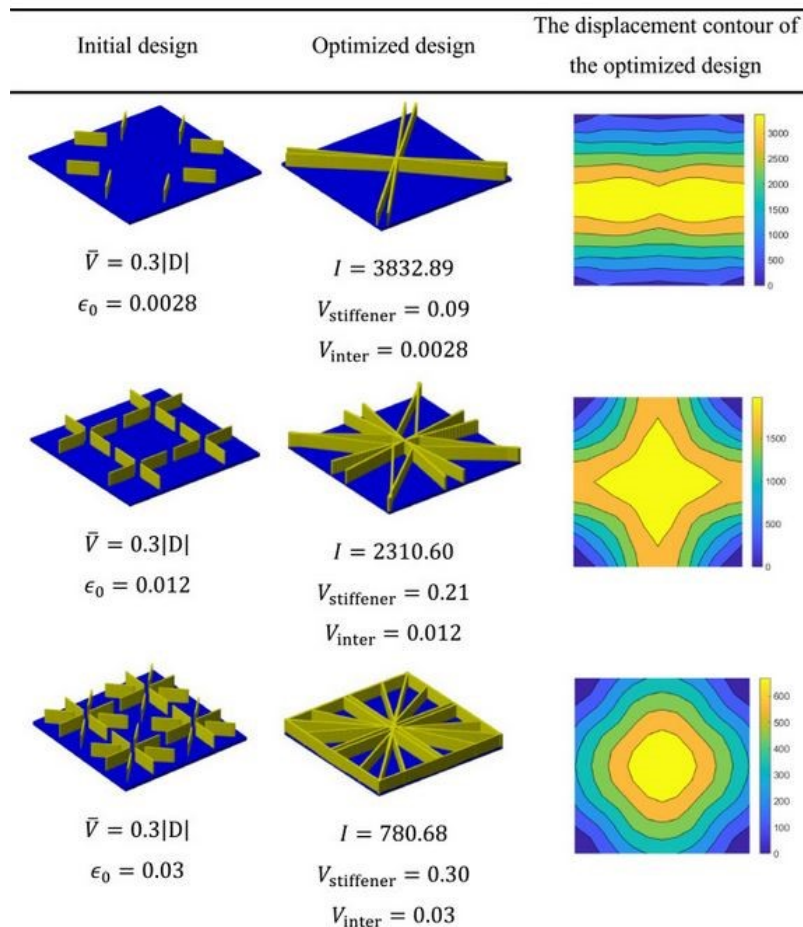


Рис. 16. Пластина с ребрами [17]

В работе [18] рассматривается разработка простого и жизнеспособного подхода проектирования для оптимальной ориентации ребер жест-

кости для конструкции, составленной из пластин и оболочек. Эволюционный алгоритм, реализуемый в математической модели, рассматрива-

ет элементы жесткости как живые структуры. Оптимизация воспринимается как процедура адаптивного роста, которая начинается от точек ограничения и продолжается вдоль направления градиента жесткости пластины и оболочки (рис. 17). Найденная схема размещения ребер обеспечивает максимальную жесткость при удовлетворении требований к объему.

При этом подходе матрица жесткости растущих ребер интерполируется в пределах их окружающих областей, а жесткость соседних конечных элементов модифицируется для моделирования новых ребер жесткости. Такое преобразование позволяет выращивать ребра жесткости, которые должны быть математически отделены от нижележащей сетки конечных элементов (рис. 18).

В данном исследовании разработан алгоритм генеративного проектирования для автоматизированного определения оптимальных компоновок ребер жесткости для заданного пространства проектирования.

Схема интерполяции, называемая «преобразование жесткости», предлагает разделить растущие элементы жесткости от базовой сетки конечно-элементной модели; это позволяет ребрам жесткости расти в произвольном направлении в пределах области проектирования (рис. 19). Предложенный алгоритм может быть легко реализован в стандартном конечно-элементном пакете.

На примере конструкции основания станка алгоритм создает компоновку ребер жесткости. Итоговое размещение ребер повышает прочностные характеристики и учитывает технологичность изготовления основания (рис. 20).

Данный алгоритм потенциально может использоваться при создании различных ребристых усилений для инженерных конструкций.

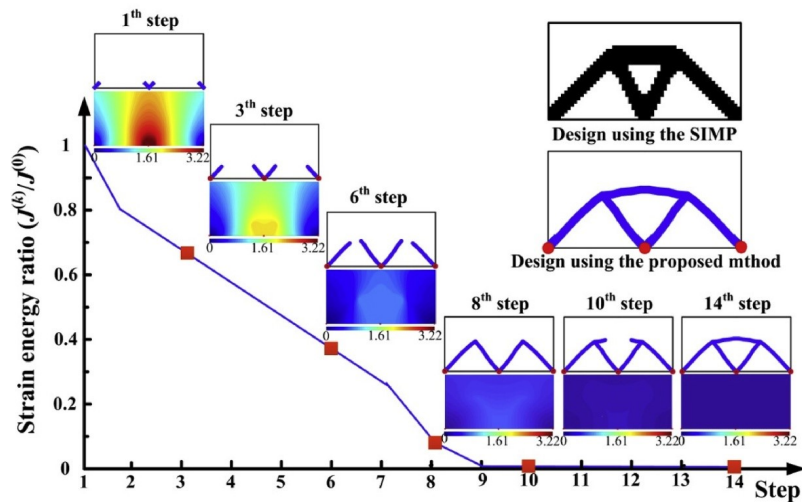


Рис. 17. История роста ребер для 2D проблемы Митчела [18]

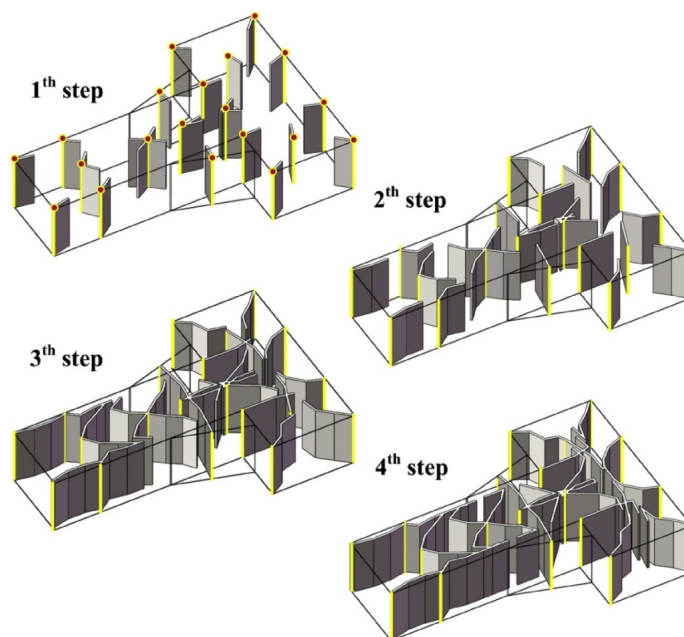


Рис. 18. Пошаговый процесс роста компоновки ребер жесткости внутри конструкции станины

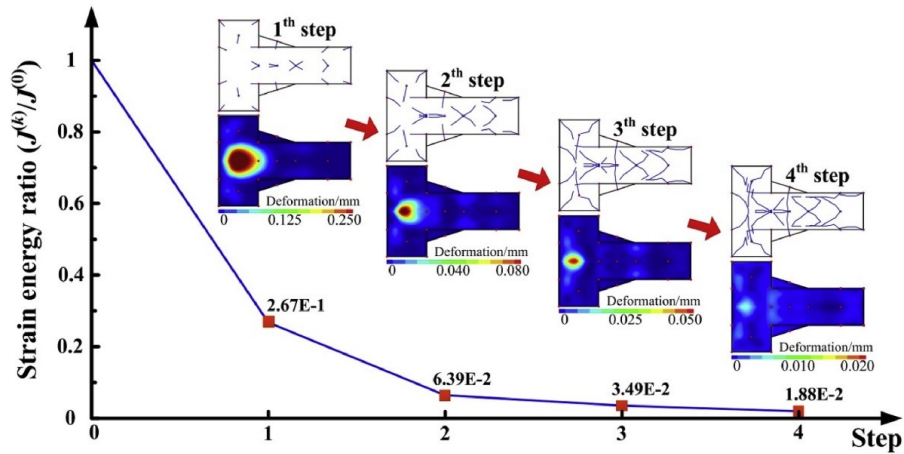


Рис. 19. Итерации отношения энергии деформации при росте ребер жесткости

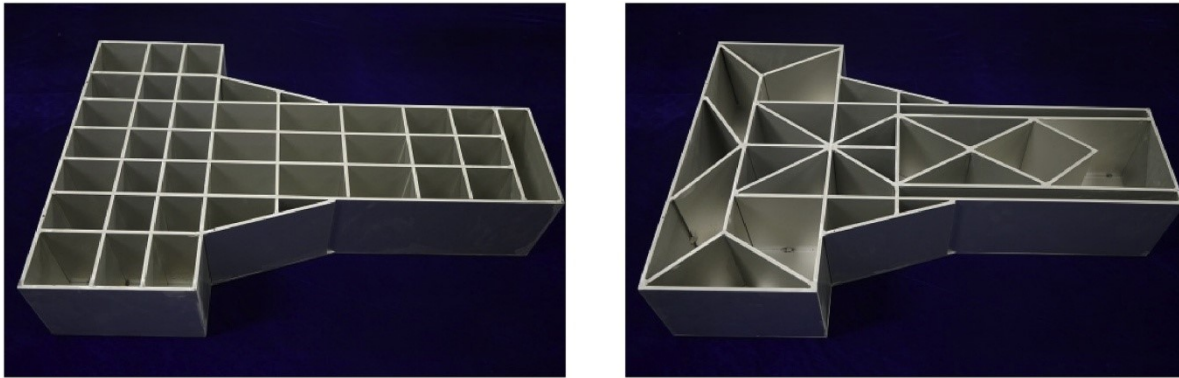


Рис. 20. Масштабная модель для проведения натуральных испытаний

5. Мультиматериальная ТО

В статьях [19; 20] рассматривается постановка и решение задачи оптимизации топологии элемента конструкции, состоящего из нескольких различных материалов (рис. 21). Каждый материал задается определенным объемом. Для решения подобных задач предложен новый подход на основе изогеометрического анализа (IGA) [21; 22].

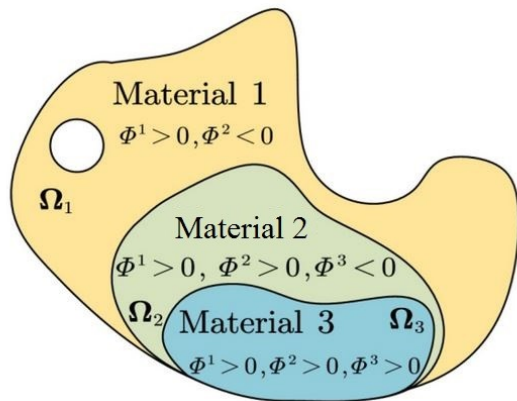


Рис. 21. Схема ТО элемента состоящего из нескольких материалов [22]

В изогеометрическом анализе используется сложная геометрия NURBS (основа большинства

пакетов CAD), непосредственно передаваемая в приложения конечно-элементного анализа.

Большое количество эталонных примеров и полученные результаты (рис. 22) показали высокую точность и надежность в разработке структурных топологий изделий, состоящих из разных материалов.



Рис. 22. Результат ТО элемента из нескольких материалов

Расширение предложенного подхода к проблемам 3D моделирования и ТО, а также других областей, является весьма перспективным подходом. Основанный на данном подходе метод предоставит мощный инструмент для интеграции систем CAD и FEA (Finite Element Method) в единую модель на основе IGA для получения новых инженерных решений.

В работе [23] представлена структура для оптимизации топологии конструкции, состоящей из нескольких материалов в контексте единого тела (рис. 23).

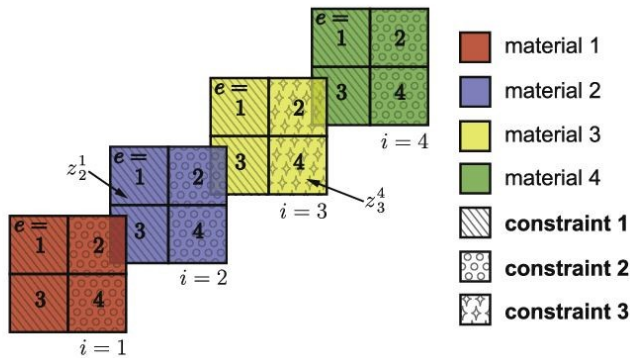


Рис. 23. Материалы-кандидаты и общие и локальные ограничения

Путем адаптации схемы обновления конструктивных переменных сплошной среды каждое ограничение объема обновляется независимо. Эта композиция приводит к решению, в котором могут быть определены общие ограничения по объему/массе. Каждое ограничение объема/массы может управлять либо всеми, либо подмножеством материалов-кандидатов. Также ограничения могут управлять либо всей областью (глобальные ограничения) или субрегионом домена (локальные ограничения).

Ключевые идеи, представленные в статье, продемонстрированы на репрезентативных примерах в 2D (рис. 24) и 3D.

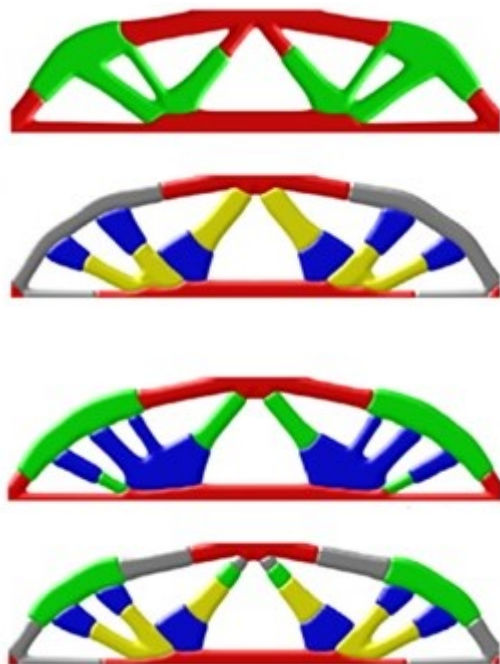


Рис. 24. Распределение материалов в конструкции [23]

Композиция не накладывает ограничений на количество потенциальных материалов-кандидатов (рис. 25). Получены результаты до десяти различных материалов. Показано, что форма и состав конструкции достигает требуемых характеристик с точки зрения механики и интуиции проектировщика. Показано, что путем задания ограничений по объему для субрегионов области (локальные ограничения) можно получить дополнительный контроль над распределением материала. Результаты проектирования представлены в 3D и воспроизведены на 3D принтере с использованием нескольких цветов, представляющих различные материалы (рис. 26).

дидатов (рис. 25). Получены результаты до десяти различных материалов. Показано, что форма и состав конструкции достигает требуемых характеристик с точки зрения механики и интуиции проектировщика. Показано, что путем задания ограничений по объему для субрегионов области (локальные ограничения) можно получить дополнительный контроль над распределением материала. Результаты проектирования представлены в 3D и воспроизведены на 3D принтере с использованием нескольких цветов, представляющих различные материалы (рис. 26).

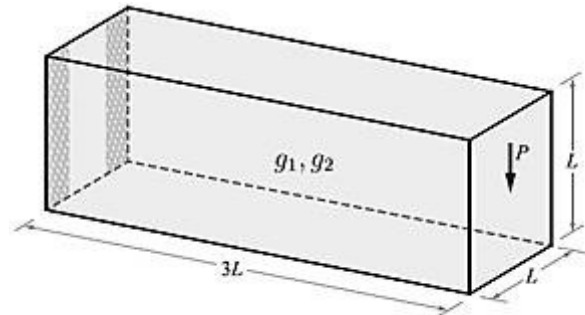
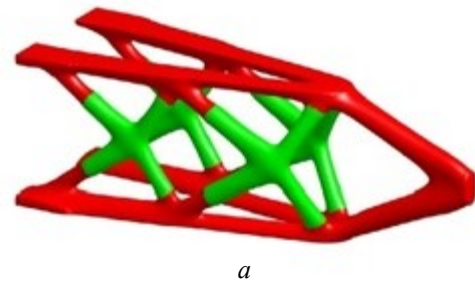
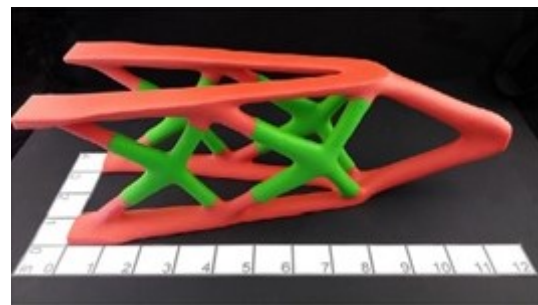


Рис. 25. Пространство проектирования многоматериального элемента и ограничения



a



б

Рис. 26. *a* – компьютерная модель; *б* – прототип

Полученный на 3D принтере прототип не является функциональным. Результат демонстрирует, что данные технологии для реализации конструкций с различными упругими свойствами могут быть реализованы с использованием данного подхода. Следующим этапом развития данного направления может быть изучение ячеистых и/или анизотропных структур для материалов-кандидатов при создании композиции из нескольких материалов.

6. ТО композитных и пористых материалов

Постановка задачи создания композиции из нескольких материалов может учитывать анизотропные и ячеистые материалы [24]. В этом случае проектируемые изделия могут приобретать желаемые прочностные (жесткостные), упругие и другие свойства. Таким образом, данная технология моделирования может рассматриваться как способ разработки конструкций из материалов с изменяющимися свойствами.

Большинство существующих исследований ТО ориентированы на проектирование моноструктур. Другими словами, рассматриваемые конструкции выполнены из однородных материалов. С точки зрения применения в конструкции это традиционные и гомогенные материалы.

В последние годы возникшие и быстро развивающиеся методы трехмерной (3D) печати и производства, такие как FDM, SLS, стереолитография и другие разрабатываемые новые технологии аддитивного производства обеспечивают новые возможности. Растет использование высокопроизводительных гетерогенных материалов, такие

как волокнистый композит [25], бетон, металлический ячеистый или пористый материал и металлический сплав, которые обеспечивают заданные механические характеристики конструкции и их исполнение. Аддитивные технологии предоставляют возможность изготовления чрезвычайно тонких и сложных микроструктур, позволяющие генерировать инновационные, легкие и конструктивно эффективные изделия и сборочные узлы.

Быстрый прогресс, достигнутый в области материаловедения, позволяет контролировать состав микроструктуры материала до беспрецедентного уровня. Общее поведение разнородных материалов сильно зависит от размера, формы, пространственного распределения и свойств составных частей. Учитывая это, проектирование материалов возможно одновременно с проектированием конструкции, что приводит к повышению эксплуатационных характеристик [26–30].

Вышеизложенное подталкивает:

1. К попытке разработки методов оптимизации топологии нелинейных разнородных структур. Разработку методов ТО мультимасштабных структур (рис. 27) можно рассматривать как расширение ТО обычной однородной конструкции.

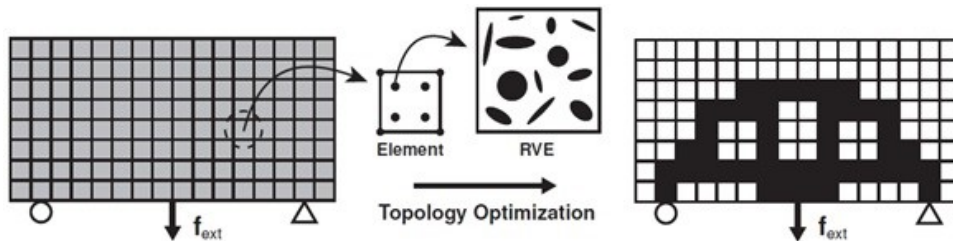


Рис. 27. ТО конструкции с разнородной структурой

2. К попытке проектирования топологии макроскопической структуры конструкции и микроскопической структуры материала одновременно. Оптимизация топологии определяется не только оптимальным пространственным распределением размещения материала в макроскопической структуре, но и оптимальным локальным использованием ячеистого (пористого материала) в микроскопическом масштабе, как схематически показано на рис. 28.

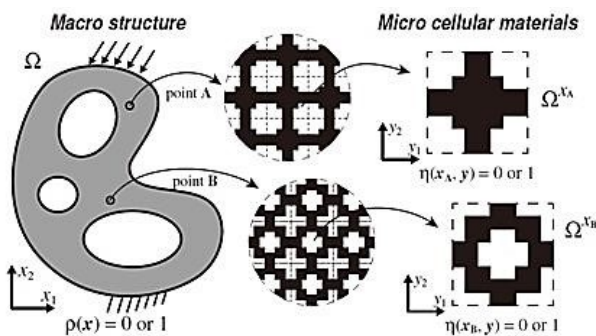


Рис. 28. Схема синхронной ТО конструкции и материала

Исследования и результаты одновременного (синхронного) проектирования на основе ТО как структуры, так и материалов можно найти в ранних работах [31–33]. Пример решения методом ТО для структуры на макро- и микроуровне представлен на рис. 29.

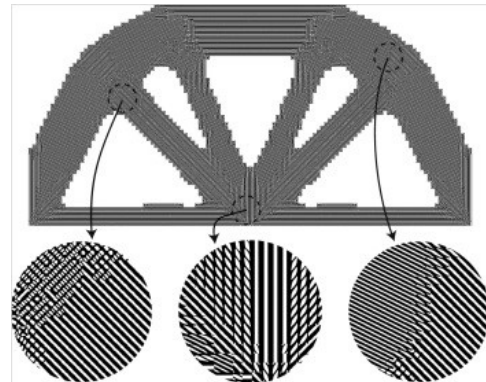


Рис. 29. Синхронная ТО конструкции и материала на макро- и микроуровне

Новые технологии аддитивного производства композитных материалов можно адапти-

ровать для задания ориентации волокон, создавая оптимизированные композитные материалы

структуры армирования для конкретных условий нагрузок и ограничений (рис. 30).

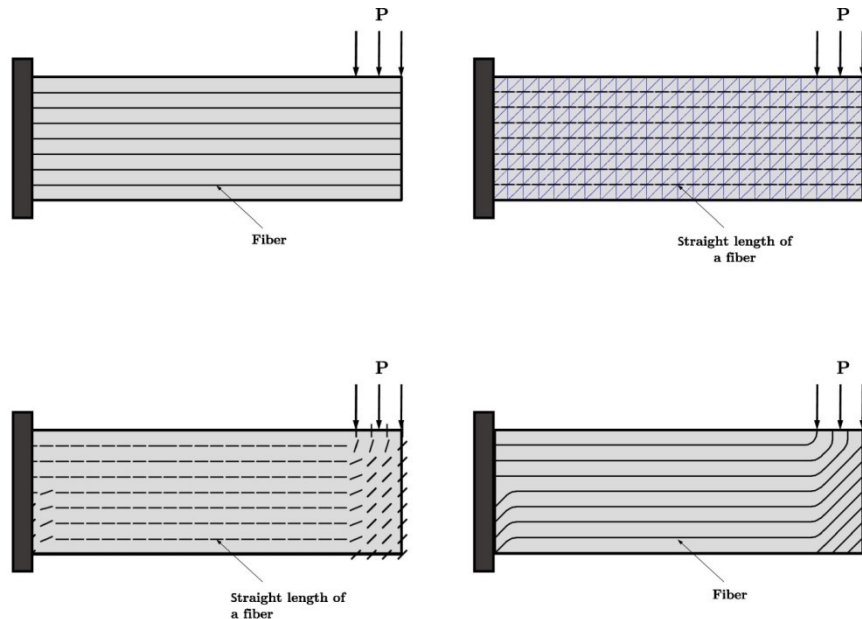


Рис. 30. Оптимизация выкладки армирующего волокна

Для использования таких возможностей изучаются новые методы оптимизации. Примеры разнообразия существующих методов можно найти в работе [34].

Еще одним примером одновременной оптимизации материала и топологии композитной многослойной пластины (рис. 31) служат результаты, полученные в работе [35].

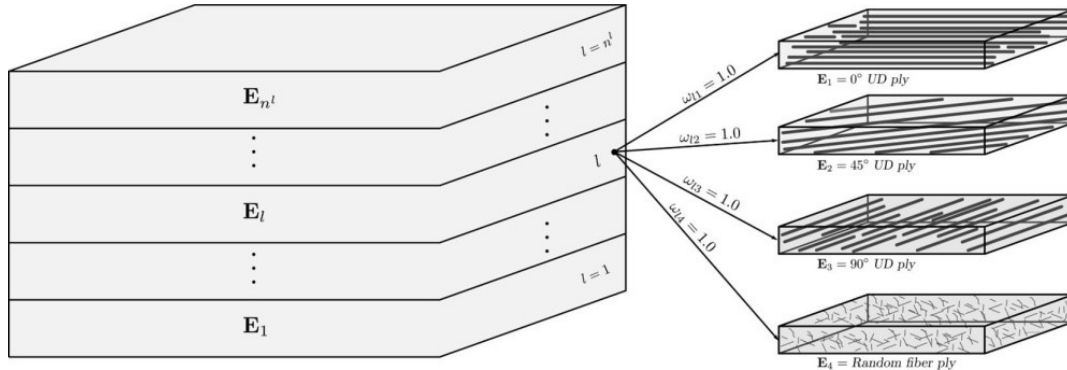


Рис. 31. Слоистый композит и слой-кандидаты [28]

В статье решаются задачи определения комбинаций слоев с различной ориентацией выкладки стекловолокна (слоев-кандидатов) в многослойной композитной пластине.

В другой статье, аналогичной направленности, рассматривается многомасштабный подход к параллельному проектированию с использованием 3D принтинга [36]. Идея заключается в реализации синхронного проектирования конструкции и материала на основе методов ТО с построением конструктивного элемента с применением аддитивных технологий.

Параллельная топологическая оптимизация структуры и материала реализует подход, при котором выполняются одновременный поиск оптимальной конструкции для распределения мате-

риала на макроскопическом уровне и ориентации волокон в микроскопическом масштабе, как показано на рис. 32.

В отличие от подхода на основе ТО моноструктуры способ параллельной оптимизации расширяется на несколько конструктивных переменных, одновременно обрабатываемых в процедуре оптимизации макроструктуры и нахождения оптимальной микроструктуры в данной области проектирования.

В данной работе была выполнена параллельная оптимизация конструкции на основе термопластичных композитов. Композит армирован (рис. 33) непрерывным стекловолокном CFRTPCs (continuous fiber reinforced thermoplastic composites).

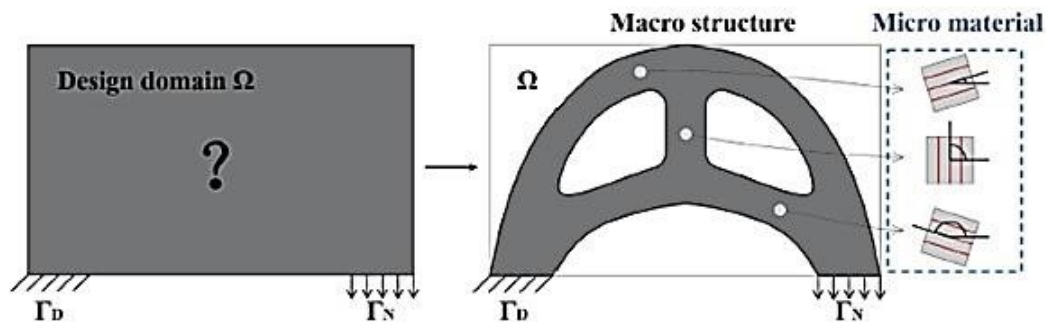


Рис. 32. Схема одновременной ТО конструкции и материала

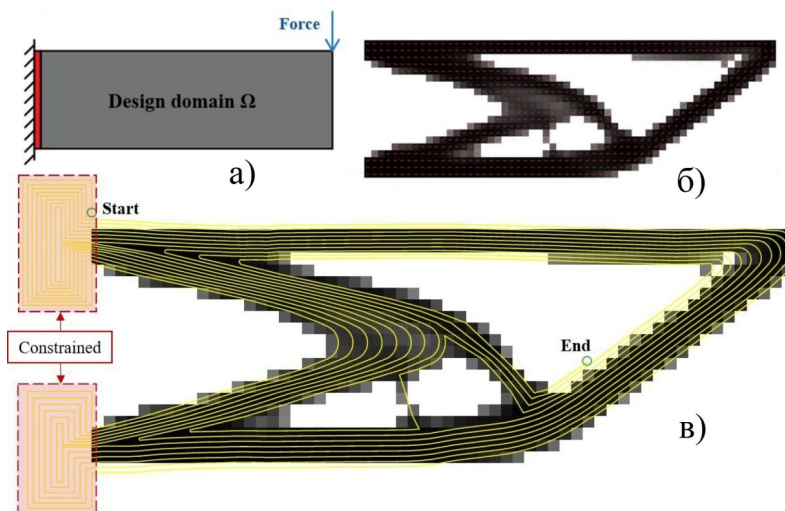


Рис. 33. Многоуровневая синхронная топологическая оптимизация: а – схема; б – ТО конструкции и материала; в – траектории выкладки волокон на устройстве

Были предложены печатные композиты (CFRTPC), которые могут эффективно улучшить механические характеристики конструкции. Анизотропные свойства композитов, одновременная оптимизация ориентации волокна и топологии структуры позволили получить типовые конструктивные решения с улучшенными прочностными и жесткостными характеристиками.

Авторы исследования предложили новый способ построения траектории волокна, основанный на унифицированной ориентации. Результаты исследования были использованы для обеспечения планирования процесса 3D-печати. Была сформирована траектория волокна, которая может реализовать преимущества анизотропных свойств CFRTPC и удовлетворять процессу 3D-печати.

Следовательно, синхронная многоуровневая ТО при проектировании и 3D-печать обладают потенциалом применения и перспективами в аэрокосмической, авиационной и других областях.

Технологический институт США (AFIT) использовал специализированное ПО nTopology [37] и создал архитектуру (топологию) ячеистой материала несущей платформы спутника стандарта CubeSat. Платформа изготовлена методом аддитивного производства из материала

Inconel (рис. 34). Выбор оптимальной ячеистой структуры на основе периодической минимальной поверхности оказался ключевым моментом при проектировании платформы. Конструкция оказалась на 50 % легче и на 20 % жестче, чем оригинальная сборка из алюминия.



Рис. 34. Ячеистая структура платформы CubeSat [37]

Аналогичный подход, связанный с генерацией и оптимизацией ячеистой структуры, активно

применяется для интеграции сложных ячеистых структур в теплопередающие устройства и другие элементы. Благодаря развитию новых алгоритмов геометрического моделирования в сочетании с топологической оптимизацией, учитывающей тепловые нагрузки, достигается большая площадь поверхности теплообменников, что улучшает теплопередачу (рис. 35).

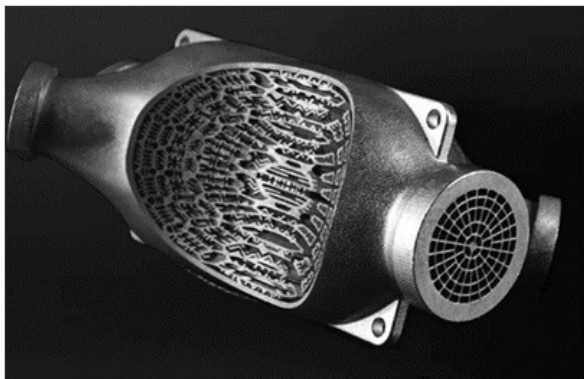


Рис. 35. Ячеистая структура теплообменника

Демонстратор конструкции ракетного двигателя, разработанный и изготовленный совместно компаниями SLM и Cellcore (рис. 36), показывает принципиальную возможность изготовления камеры ЖРД с интегрированными решетчатыми внутренними охлаждающими каналами [38]. Камера ЖРД изготовлена с помощью аддитивных технологий единой консолидированной деталью, заменяющей сложную сборку с набором технологических сборочных операций.



Рис. 36. Консолидация камера сгорания ЖРД

Еще одна интересная область исследований при проектировании ячеистых структур и их применения в материалах под названием ауксетики. В работе [39] рассматривается разработка легких высокопродуктивных ауксетических материалов для применения в защитных конструкциях, кото-

рые предназначены для таких ситуаций, как поглощение энергии взрыва или удара.

Ауксетики представляют собой класс структурных метаматериалов с отрицательным коэффициент Пуассона (рис. 37). При растягивании ауксетических конструкций в продольном направлении они демонстрируют расширение в поперечном направлении и наоборот.

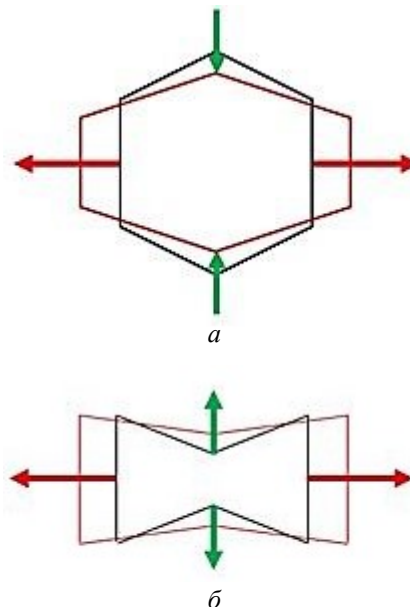


Рис. 37. Коэффициент Пуассона: a – «+»; b – «-»

Эта противоположная деформация ауксетической структуры приводит к нескольким замечательным механическим свойствам, таким как улучшенный модуль сдвига [40; 41], лучшее сопротивление углублению [42], повышенная способность к поглощению энергии. Эти характеристики ауксетических структур используются в различных областях применения, включая защитную броню от взрывной нагрузки, ударопрочность, оберты для упаковки и транспортировки грузов. Свойства ауксетических структур регулируются внутренними архитектурами, составленными на основе единичных ячеек.

В последние годы активно изучаются основные геометрии ауксетической единичной ячейки. Ряд исследователей сосредоточились на разработке новых ауксетических структур путем модернизации и/или объединения существующих.

В работе [41] авторы разработали гибридную ауксетическую архитектуру (AugeHex) путем объединения и повторения ауксетических и шестиугольных сотовых клеток для улучшения механических свойств и поглощения энергии. Структура 3D решетки AugeHex с комбинированной архитектурой повторных ауксетических сот и обычная сота были разработаны в [44].

Помимо развития гибридных структур и различных оптимизаций были найдены мето-

ды в разработке и модернизации ауксетических структур, основанные на вычислении новых топологий ячеек для ауксетиков [45].

В рассматриваемых исследованиях были рассчитаны новые ауксетические топологии с целью максимизация поглощения энергии посредством алгоритмов ТО (рис. 38).

На основе найденных топологий были получены ячейки для новых ауксетических структур: «песочные часы», «раскосная поперечно-лепестковая структура», «поперечно-лепестковая структура».

По результатам расчета были определены геометрические параметры единичной ячейки (рис. 39).

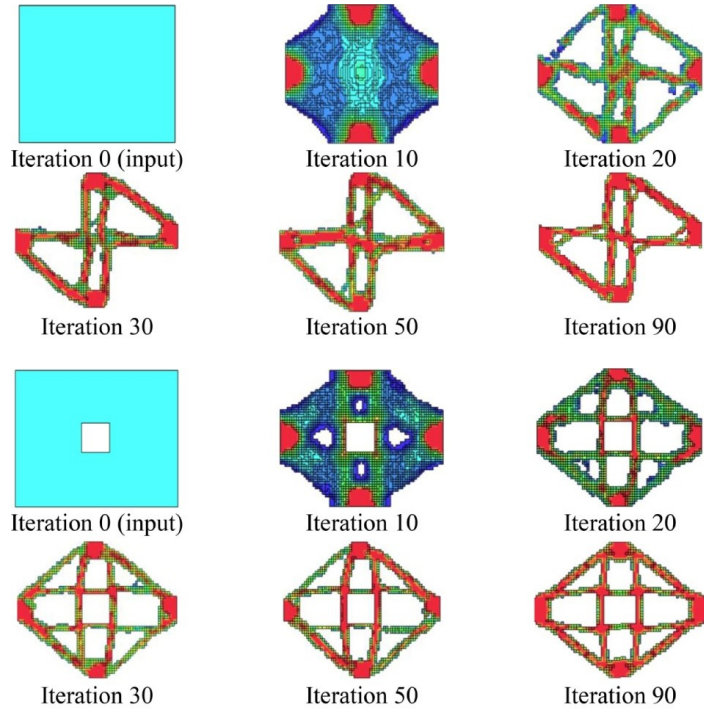


Рис. 38. ТО ячейки [45]

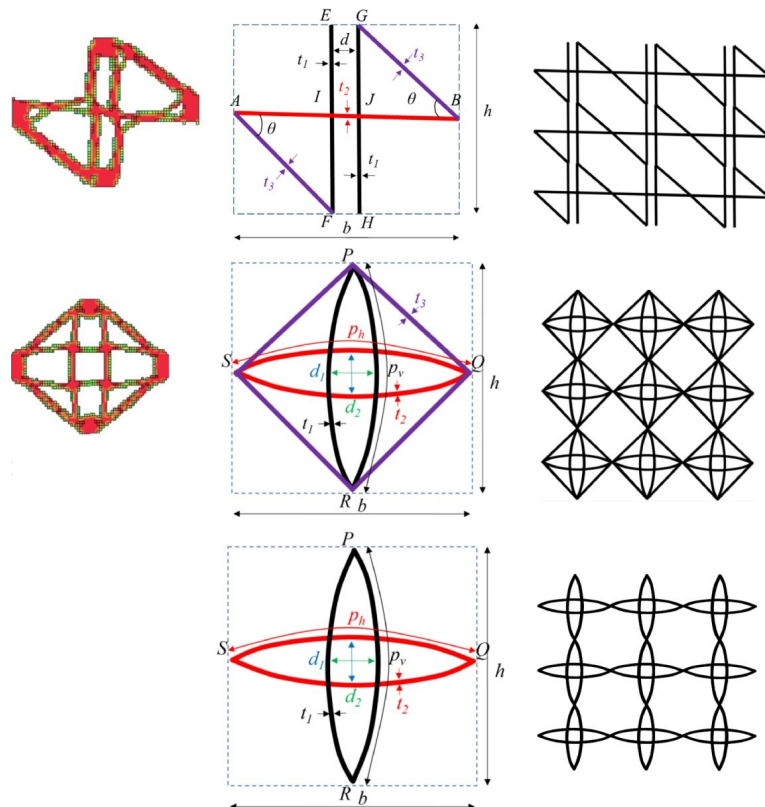


Рис. 39. Геометрические параметры ячейки

На их основе были построены периодические структуры для исследования механических свойств при поглощении энергии под сжимающей нагрузкой.

Проверка моделей с применением нелинейных конечных элементов выявила механизм деформации при отрицательном коэффициенте Пуассона, поведение напряженно-деформированного состояния и энергию абсорбции.

Найденные новые формы единичных ячеек на основе ТО, в целом иллюстрируют более высокие результаты относительно традиционных единичных и гибридных ячеек (рис. 40).

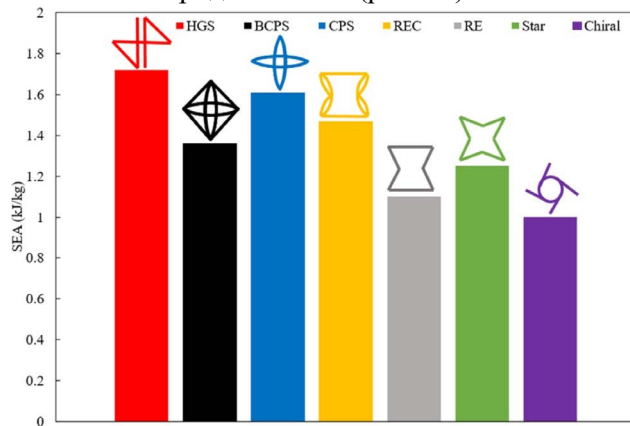


Рис. 40. Тип ячейки и удельное поглощение энергии (SEA) [45]

7. ТО анизотропных конструкций

В современной практике существует несколько конструктивных подходов к адаптеру крепления полезной нагрузки КА – конструкции

переходника, усиленные оболочки, ферменные и сетчатые конструкции [46–48]. Каждый из вариантов имеет свои определенные преимущества и недостатки. Адаптер полезной нагрузки в виде сетчатой структуры, изготовленный из однонаправленного углеродного волокна, демонстрирует наилучшую весовую эффективность (из рассматриваемых вариантов). Технологические достижения и развитие композитных технологий производства позволяют перейти от традиционных решений на основе намотки на технологию автоматизированного размещения (выкладки) волокон на основе оборудования (AFP). AFP оборудование сочетает в себе преимущества обоих методов – размещение и выкладку волокон и обмотку за счет использования автоматизированной системы управления манипулятором и специального прикладного программного обеспечения (рис. 41).

Следовательно, AFP позволяет получать продукты с нетривиальными формами [49]. Также, композитные детали со сложными формами могут быть получены с помощью новых технологий 3D печати композитных конструкций [50].

Сетчатый адаптер должен выдерживать интенсивные сжимающие напряжения, сохраняя при этом свои размеры и форму неизменными. В качестве ограничений для топологической оптимизации принимаются критерии прочности и жесткости исходной сетчатой структуры.

Интересные результаты моделирования напряженно-деформированного состояния конического переходника на основе сетчатой структуры и возможных вариантов топологической оптимизации получены в работе [51] (рис. 42, 43).

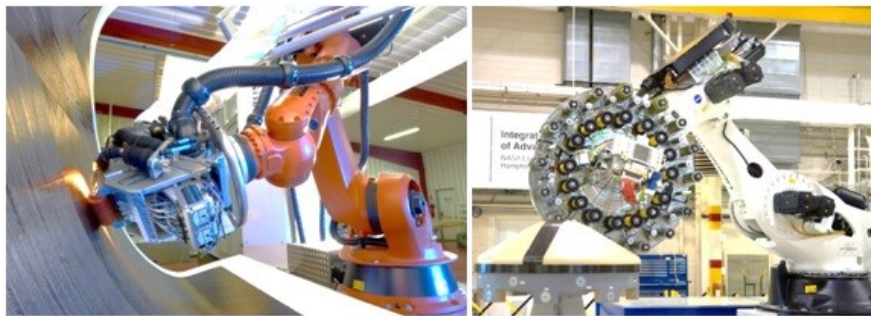


Рис. 41. Оборудование для выкладки волокон и лент на криволинейные поверхности

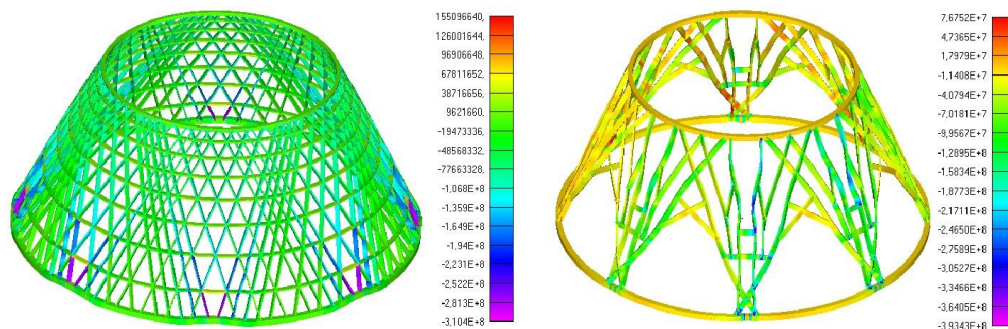


Рис. 42. Осевое сжатие, напряжения [49]

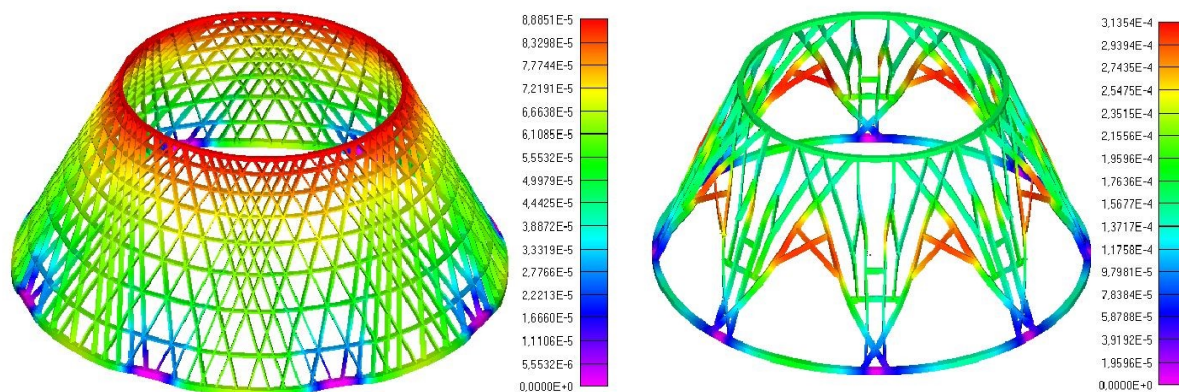


Рис. 43. Осевое сжатие, перемещения [51]

Результаты исследований показывают, что топологическая оптимизация является возможным инструментом при проектировании сетчатых конструкций в аэрокосмической отрасли. Методика имеет определенный потенциал для снижения веса при сохранении прочностных и жесткостных свойств.

Заключение

Проведенный обзор демонстрирует многочисленные успешные результаты проектирования элементов конструкции с применением технологии ТО. Топологическая оптимизация активно применяется на всем аэрокосмическом пространстве с акцентом на облегчение компонентов.

Ряд полученных результатов и решений рассматриваются для использования в аэрокосмической отрасли с потенциалом полноценного производства. Порождаемая сложная геометрия проектируемых элементов РКТ на основе ТО подталкивает к активному внедрению аддитивных технологий для производства аэрокосмических компонентов, деталей, узлов и др.

Растет понимание и интерес к проектированию и успешному изготовлению конструкций все более сложной геометрии с усовершенствованными компонентами.

Решетчатые структуры показали большой потенциал для улучшения конструкции, с уникальными и точно спроектированными свойствами, такие как прочность, жесткость, характеристика поглощения энергии, легкий вес, характеристика теплопередачи. Решения на основе решетчатых (ячеистых) структур становятся все более популярной темой исследований и внедрений.

Можно спрогнозировать значительные области будущего роста проектирования на основе ТО в сочетании с технологиями аддитивного производства (Additive Manufacturing, AM), которые включают:

- применение новых сплавов;
- биметаллическая и мультиметаллическая технологии создания элементов конструкции различного назначения – структура процесса, понимание свойств, характеристики и постобработка;
- базы данных для материалов AM, сертификации процессов и режимов;
- оптимизация проектирования и моделирования процессов изготовления;
- применение ТО и использование решетчатых (ячеистых) структур для уменьшения массы, одного из важных требований в аэрокосмической деятельности.

Реализуемые пилотные проекты на основе ТО и AM уже сейчас демонстрируют определенные преимущества:

- во-первых, сокращение массы и повышение прочностных свойств элементов конструкции РКТ;
- во-вторых, консолидация нескольких деталей со сложной геометрией и технологией сборки в единую конечную деталь;
- в-третьих, создание изделий с новым качеством на основе современных подходов, знаний и алгоритмов в области проектирования;
- в-четвертых, снижение затрат и сроков изготовления отдельных элементов РКТ.

При этом остается много открытых вопросов, связанных с созданием и исследованием новых материалов для АТ, сертификацией, пониманием роли технологий проектирования на основе ТО в аэрокосмической промышленности, подготовкой кадров и др. для успешного развития в ближайшем будущем.

Список литературы

- [1] Bendsøe M. P., Kikuchi N. Generating optimal topologies in structural design using a homogenization method // Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering. 1988. vol. 71. issue 2. pp. 197–224. doi: 10.1016/0045-7825(88)90086-2.

- [2] Bendsoe M. P. Optimal shape design as a material distribution problem // *Structural optimization*. 1989. vol. 1. pp. 193–202. doi: 10.1007/BF01650949.
- [3] Bendsoe M. P. *Optimization of Structural Topology, Shape and Material*. Berlin : Springer, 1995. doi: 10.1007/978-3-662-03115-5.
- [4] Bendsoe M. P., Sigmund O. *Topology optimization: theory, methods, and applications*. Berlin, Heidelberg, New York, Barcelona, Hong Kong, London, Milan, Paris, Tokyo : Springer Science & Business Media, 2003. 370 p.
- [5] *Topology Optimization Guide* [Электронный ресурс]. URL: <https://www.topology-opt.com/software-list/> (дата обращения: 13.04.2022).
- [6] *Structures Optimization for Additive Manufacturing* [Электронный ресурс]. URL: https://mir-s3-cdn-cf.behance.net/project_modules/2800_opt_1/c7205f12779333.56288dc47212d.jpg (дата обращения: 13.04.2022).
- [7] *Giga-voxel computational morphogenesis for structural design* [Электронный ресурс]. URL: https://www.research.manchester.ac.uk/portal/files/63629973/GigaVoxelDesign_Nature_Letter_UnProofed_1_.pdf (дата обращения: 13.04.2022).
- [8] Bendsoe M. P., Sigmund O. *Topology optimization: theory, methods, and applications*. Berlin, Heidelberg, New York, Barcelona, Hong Kong, London, Milan, Paris, Tokyo : Springer Science & Business Media, 2003. 370 p.
- [9] Huang X., Xie M. *Evolutionary Topology Optimization of Continuum Structures: Methods and Applications*. 2010, 240 p. doi: 10.1002/9780470689486.
- [10] Xiaoying Yang B. E. *Bi-directional Evolutionary Method for Stiffness and Displacement Optimisation*. Thesis of the degree of Master of Engineering. Australia, Melbourne. 1999.
- [11] Xia L., Xia Q., Huang X., Xie Y. M. *Bi-directional Evolutionary Structural Optimization on Advanced Structures and Materials* // *Archives of Computational Methods in Engineering*. 2016. vol. 25. pp. 437–478. doi: 10.1007/s11831-016-9203-2.
- [12] Rozvany G. *The SIMP method in topology optimization – Theoretical background, advantages and new applications*. 2012. doi: 10.2514/6.2000-4738.
- [13] Zhang W., Zhong W., Guo X. *An explicit length scale control approach in SIMP-based topology optimization* // *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*. 2014. vol. 282. pp. 71–86. doi: 10.1016/j.cma.2014.08.027.
- [14] Cheng W., Wang H., Zhang M., Du R. *Improved proportional topology optimization algorithm for minimum volume problem with stress constraints* // *Engineering Computations*. 2020. doi: 10.1108/EC-12-2019-0560.
- [15] Prager W. *Optimality criteria in structural design* // *Proc. Natl. Acad. Sci.* 1968. vol. 3. issue 3. pp. 794–794. doi: 10.1073/pnas.61.3.794.
- [16] Song L., Gao T., Tang L., Du X., Zhu J., Lin Y., Shi G., Liu H., Zhou G., Zhang W. *An all-movable rudder designed by thermo-elastic topology optimization and manufactured by additive manufacturing* // *Computers and Structures*. 2021. vol. 243. doi: 10.1016/j.compstruc.2020.106405.
- [17] Li L., Liu Ch., Zhang W., Du Z., Guo X. *Combined model-based topology optimization of stiffened plate structures via MMC approach* // *International Journal of Mechanical Sciences*. 2021. vol. 208. doi: 10.1016/j.ijmecsci.2021.106682.
- [18] Li B., Liu H., Yang Z., Zhang J. *Stiffness design of plate/shell structures by evolutionary topology optimization* // *Thin-Walled Structures*. 2019. vol. 141. pp. 232–250. doi: 10.1016/j.tws.2019.04.012.
- [19] Sohoulia A., Kefal A., Abdelhamid A., Yildiz M., Suleman A. *Continuous density-based topology optimization of cracked structures using peridynamics* // *Structural and Multidisciplinary Optimization*. 2020. vol. 62. pp. 2375–2389. doi: 10.1007/s00158-020-02608-1.
- [20] Habibian A., Sohoulia A., Kefal A., Nadler B., Yildiz M., Suleman A. *Multi-material topology optimization of structures with discontinuities using Peridynamics* // *Composite Structures*. 2021. vol. 258. 113345. doi: 10.1016/j.compstruct.2020.113345.
- [21] Gao J., Xiao M., Zhou M., Gao L. *Isogeometric topology and shape optimization for composite structures using level-sets and adaptive Gauss quadrature* // *Composite Structures*. 2022. vol. 285. 115263.
- [22] Lieu Q. X., Lee J. *A multi-resolution approach for multi-material topology optimization based on isogeometric analysis* // *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*. 2017. vol. 323. pp. 272–302.
- [23] Sanders E. D., Aguilob M. A., Paulino G. H. *Multi-material continuum topology optimization with arbitrary volume and mass constraints* // *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*. 2018. vol. 340. pp. 798–823.
- [24] Robbins J., Owen S. J., Clark B. W., Voth T. E. *An efficient and scalable approach for generating topologically optimized cellular structures for additive manufacturing* // *Addit. Manuf.* 2016. vol. 12. pp. 296–304.
- [25] Azarov A. V., Antonov F. K., Vasiliev V. V., Golubev M. V., Krasovskii D. S., Razin A. F., Salov V. A., Stupnikov V. V., Khaziev A. R. *Development of a two-matrix composite material fabricated by 3d printing* // *Polymer Science, Series D*. 2017. vol. 10. no. 1. pp. 87–90.
- [26] Xia L., Breitkopf P. *Concurrent topology optimization design of material and structure within FE2 nonlinear multiscale analysis framework* // *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*. 2014. vol. 278. pp. 524–542.

- [27] Xia L., Breitkopf P. A reduced multiscale model for nonlinear structural topology optimization // *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*. 2014. vol. 280. pp. 117–134.
- [28] Xia L., Breitkopf P. Design of materials using topology optimization and energy-based homogenization approach in Matlab // *Structural and Multidisciplinary Optimization*. 2015. doi: 10.1007/s00158-015-1294-0.
- [29] Xia L., Breitkopf P. Multiscale structural topology optimization with an approximate constitutive model for local material microstructure // *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*. 2015. vol. 286. pp. 147–167.
- [30] Xia L., Breitkopf P. Recent advances on topology optimization of multiscale nonlinear structures // *Archives of Computational Methods in Engineering*. 2017. doi: 10.1007/S11831-016-9170-7.
- [31] Theocaris P. S., Stavroulaki G. E. Optimal material design in composites: an iterative approach based on homogenized cells // *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*. 1999. vol. 169. no. 1–2. pp. 31–42.
- [32] Rodrigues H., Guedes J. M., Bendsøe M. P. Hierarchical optimization of material and structure // *Structural and Multidisciplinary Optimization*. 2002. vol. 24. no. 1. pp. 1–10.
- [33] Zhang W., Sun S. Scale-related topology optimization of cellular materials and structures // *International Journal for Numerical Methods in Engineering*. 2006. vol. 68. no. 9. pp. 993–1011.
- [34] da Silva A. L. F., Salas R. A., Nelli Silvae E. C., Reddy J. N. Topology optimization of fibers orientation in hyperelastic composite material // *Composite Structures*. 2020. vol. 231. 111488. doi: 10.1016/j.compstruct.2019.111488.
- [35] Hozic D., Thore C.-J., Cameron Ch., Loukil M. A new method for simultaneous material and topology optimization of composite laminate structures using Hyperbolic Function Parametrization // *Composite Structures*. 2021. vol. 276. 114374. doi: 10.1016/j.compstruct.2021.114374.
- [36] Huang Y., Tian X., Zheng Z., Li D., Malakhov A. V., Polilov A. N. Multiscale concurrent design and 3D printing of continuous fiber reinforced thermoplastic composites with optimized fiber trajectory and topological structure // *Composite Structures*. 2022. vol. 285. 115241.
- [37] Next-generation engineering design software [Электронный ресурс]. URL: <https://ntopology.com> (дата обращения: 13.04.2022).
- [38] 3D printing a rocket engine [Электронный ресурс]. URL: <https://www.etmm-online.com/3d-printing-a-rocket-engine-a-886960> (дата обращения: 13.04.2022).
- [39] Bohara R. P., Linforth S., Nguyen T., Ghazlan A., Ngo T. Novel lightweight high-energy absorbing auxetic structures guided by topology optimization // *International Journal of Mechanical Sciences*. 2021. vol. 211. 106793.
- [40] Choi J. B., Lakes R. S. Non-linear properties of metallic cellular materials with a negative Poisson's ratio // *Journal of Materials Science*. 1992. vol. 27. pp. 5375–5381.
- [41] Davood M., Babak H., Ranajay G., Magid H. A., Hamid N.-H., Ashkan V. Elastic properties of chiral, anti-chiral, and hierarchical honeycombs: A simple energy-based approach // *Theoretical and Applied Mechanics Letters*. 2016. vol. 6. issue 2. pp. 81–96.
- [42] Li T., Liu F., Wang L. Enhancing indentation and impact resistance in auxetic composite materials // *Composites, Part B: Engineering*. 2020. vol. 198. 108229.
- [43] Xu M., Xu Z., Zhang Z., Lei H., Bai Y., Fang D. Mechanical properties and energy absorption capability of AuxHex structure under in-plane compression: theoretical and experimental studies // *International Journal of Mechanical Sciences*. 2019. vol. 159. pp. 43–57. doi: 10.1016/j.ijmecsci.2019.05.044.
- [44] Guo M.-F., Yang H., Ma L. Design and characterization of 3D AuxHex lattice structures // *International Journal of Mechanical Sciences*. 2020. vol. 181. 105700. doi: 10.1016/j.ijmecsci.2020.105700.
- [45] Wang H., Lu Z., Yang Z., Li X. A novel re-entrant auxetic honeycomb with enhanced in-plane impact resistance // *Composite Structures*. 2019. vol. 208. pp. 758–770. doi: 10.1016/j.compstruct.2018.10.024.
- [46] Хахленкова А. А., Лопатин А. В. Обзор конструкций адаптеров современных космических аппаратов // *Космические аппараты и технологии*. 2018. Т. 2. № 3. С. 134–146. doi: 10.26732/2618-7957-2018-3-134-146.
- [47] Razin A. F., Vasiliev V. V. Development of composite anisogrid spacecraft attach fitting // *Proc. of 11th European Conf. on Composite Materials*. 2004. 9 p.
- [48] Vasiliev V. V., Barynin V. A., Razin A. F. Anisogrid composite lattice structures Development and aerospace applications // *Composite structures*. 2012. vol. 94. issue 3. pp. 1117–1127. doi: 10.1016/j.compstruct.2011.10.023.
- [49] Frketic J., Dickens T., Ramakrishnan S. Automated manufacturing and processing of fiber-reinforced polymer (FRP) composites: An additive review of contemporary and modern techniques for advanced materials manufacturing // *Additive Manufacturing*. 2017. vol. 14. pp. 69–86. doi: 10.1016/j.addma.2017.01.003.
- [50] Fedulov B., Fedorenko A., Khaziev A., Antonov F. Optimization of parts manufactured using continuous fiber three-dimensional printing technology // *Composites, Part B: Engineering*. 2021. vol. 227. 109406.
- [51] Baldzhiev R. S., Alekseyev A. A., Azarov A. V. Topology optimization of the lattice payload adapter for carrier rocket // *Advances in Composite Science and Technology*. 2018. vol. 683. 012061. doi: 10.1088/1757-899X/683/1/012061.

DESIGNING VARIOUS-PURPOSE SUBASSEMBLIES BASED ON TOPOLOGICAL OPTIMIZATION

D. V. Sorokin, L. A. Babkina, O. V. Brazgovka

*Reshetnev Siberian State University of Science and Technology,
Krasnoyarsk, Russian Federation*

In recent decades, theory, algorithms and topological optimization technologies have been actively developing to solve problems in various fields. This technique is widely used and used in the design of subassemblies in engineering tasks. Of particular interest is the implementation of topological optimization methods in the aerospace industry. The main result of topological optimization is the determination of the effective distribution of material(s) in a part. The article provides an overview of recent developments related to the design of broad-purpose products, including for space and rocket technology based on topological optimization. The main algorithms for solving topological optimization problems are briefly listed. A separate emphasis in the review is placed on the opening qualitative new opportunities in modeling cellular and mesh structures, products from composite materials and multimaterials. Examples of topological optimization solutions that have already become classic are given. Many design results are closely related to the introduction of various modern additive manufacturing technologies. The review concludes with topical issues that will ensure future growth potential and prospects for the application of the entire range of design and additive production technologies in the aerospace industry.

Keywords: topological optimization, geometric modeling, cellular structure, engineering analysis, composite, additive technologies.

References

- [1] Bendsøe M. P., Kikuchi N. Generating optimal topologies in structural design using a homogenization method // Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 1988, vol. 71, issue 2, pp. 197–224. doi: 10.1016/0045-7825(88)90086-2.
- [2] Bendsøe M. P. Optimal shape design as a material distribution problem // Structural optimization, 1989, vol. 1, pp. 193–202. doi: 10.1007/BF01650949.
- [3] Bendsøe M. P. Optimization of Structural Topology, Shape and Material. Berlin, Springer, 1995. doi: 10.1007/978-3-662-03115-5.
- [4] Bendsøe M. P., Sigmund O. Topology optimization: theory, methods, and applications. Berlin, Heidelberg, New York, Barcelona, Hong Kong, London, Milan, Paris, Tokyo, Springer Science & Business Media, 2003, 370 p.
- [5] Topology Optimization Guide. Available at: <https://www.topology-opt.com/software-list/> (accessed 13.04.2022).
- [6] Structures Optimization for Additive Manufacturing. Available at: https://mir-s3-cdn-cf.behance.net/project_modules/2800_opt_1/c7205f12779333.56288dc47212d.jpg (accessed 13.04.2022).
- [7] Giga-voxel computational morphogenesis for structural design. Available at: https://www.research.manchester.ac.uk/portal/files/63629973/GigaVoxelDesign_Nature_Letter_UnProofed_1_.pdf (accessed 13.04.2022).
- [8] Bendsøe M. P., Sigmund O. Topology optimization: theory, methods, and applications. Berlin, Heidelberg, New York, Barcelona, Hong Kong, London, Milan, Paris, Tokyo, Springer Science & Business Media, 2003, 370 p.
- [9] Huang X., Xie M. Evolutionary Topology Optimization of Continuum Structures: Methods and Applications. 2010, 240 p. doi: 10.1002/9780470689486.
- [10] Xiaoying Yang B. E. Bi-directional Evolutionary Method for Stiffness and Displacement Optimisation. Thesis of the degree of Master of Engineering. Australia, Melbourne. 1999.
- [11] Xia L., Xia Q., Huang X., Xie Y. M. Bi-directional Evolutionary Structural Optimization on Advanced Structures and Materials // Archives of Computational Methods in Engineering, 2016, vol. 25, pp. 437–478. doi: 10.1007/s11831-016-9203-2.
- [12] Rozvany G. The SIMP method in topology optimization – Theoretical background, advantages and new applications. 2012. doi: 10.2514/6.2000-4738.
- [13] Zhang W., Zhong W., Guo X. An explicit length scale control approach in SIMP-based topology optimization // Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 2014, vol. 282, pp. 71–86. doi: 10.1016/j.cma.2014.08.027.

- [14] Cheng W., Wang H., Zhang M., Du R. Improved proportional topology optimization algorithm for minimum volume problem with stress constraints // *Engineering Computations*, 2020. doi: 10.1108/EC-12-2019-0560.
- [15] Prager W. Optimality criteria in structural design // *Proc. Natl. Acad. Sci.*, 1968, vol. 3, issue 3, pp. 794–794. doi: 10.1073/pnas.61.3.794.
- [16] Song L., Gao T., Tang L., Du X., Zhu J., Lin Y., Shi G., Liu H., Zhou G., Zhang W. An all-movable rudder designed by thermo-elastic topology optimization and manufactured by additive manufacturing // *Computers and Structures*, 2021, vol. 243. doi: 10.1016/j.compstruc.2020.106405.
- [17] Li L., Liu Ch., Zhang W., Du Z., Guo X. Combined model-based topology optimization of stiffened plate structures via MMC approach // *International Journal of Mechanical Sciences*, 2021, vol. 208. doi: 10.1016/j.ijmecsci.2021.106682.
- [18] Li B., Liu H., Yang Z., Zhang J. Stiffness design of plate/shell structures by evolutionary topology optimization // *Thin-Walled Structures*, 2019, vol. 141, pp. 232–250. doi: 10.1016/j.tws.2019.04.012.
- [19] Sohoulia A., Kefal A., Abdelhamid A., Yildiz M., Suleman A. Continuous density-based topology optimization of cracked structures using peridynamics // *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 2020, vol. 62, pp. 2375–2389. doi: 10.1007/s00158-020-02608-1.
- [20] Habibian A., Sohoulia A., Kefal A., Nadler B., Yildiz M., Suleman A. Multi-material topology optimization of structures with discontinuities using Peridynamics // *Composite Structures*, 2021, vol. 258, 113345. doi: 10.1016/j.compstruct.2020.113345.
- [21] Gao J., Xiao M., Zhou M., Gao L. Isogeometric topology and shape optimization for composite structures using level-sets and adaptive Gauss quadrature // *Composite Structures*, 2022, vol. 285, 115263.
- [22] Lieu Q. X., Lee J. A multi-resolution approach for multi-material topology optimization based on isogeometric analysis // *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 2017, vol. 323, pp. 272–302.
- [23] Sandersa E. D., Aguilob M. A., Paulinoa G. H. Multi-material continuum topology optimization with arbitrary volume and mass constraints // *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 2018, vol. 340, pp. 798–823.
- [24] Robbins J., Owen S. J., Clark B. W., Voth T. E. An efficient and scalable approach for generating topologically optimized cellular structures for additive manufacturing // *Addit. Manuf.*, 2016, vol. 12, pp. 296–304.
- [25] Azarov A. V., Antonov F. K., Vasiliev V. V., Golubev M. V., Krasovskii D. S., Razin A. F., Salov V. A., Stupnikov V. V., Khaziev A. R. Development of a two-matrix composite material fabricated by 3d printing // *Polymer Science, Series D*, 2017, vol. 10, no. 1, pp. 87–90.
- [26] Xia L., Breitkopf P. Concurrent topology optimization design of material and structure within FE2 nonlinear multiscale analysis framework // *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 2014, vol. 278, pp. 524–542.
- [27] Xia L., Breitkopf P. A reduced multiscale model for nonlinear structural topology optimization // *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 2014, vol. 280, pp. 117–134.
- [28] Xia L., Breitkopf P. Design of materials using topology optimization and energy-based homogenization approach in Matlab // *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 2015. doi: 10.1007/s00158-015-1294-0.
- [29] Xia L., Breitkopf P. Multiscale structural topology optimization with an approximate constitutive model for local material microstructure // *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 2015, vol. 286, pp. 147–167.
- [30] Xia L., Breitkopf P. Recent advances on topology optimization of multiscale nonlinear structures // *Archives of Computational Methods in Engineering*, 2017. doi: 10.1007/S11831-016-9170-7.
- [31] Theocaris P. S., Stavroulaki G. E. Optimal material design in composites: an iterative approach based on homogenized cells // *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 1999, vol. 169, no. 1–2, pp. 31–42.
- [32] Rodrigues H., Guedes J. M., Bendsøe M. P. Hierarchical optimization of material and structure // *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 2002, vol. 24, no. 1, pp. 1–10.
- [33] Zhang W., Sun S. Scale-related topology optimization of cellular materials and structures // *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 2006, vol. 68, no. 9, pp. 993–1011.
- [34] da Silva A. L. F., Salas R. A., Nelli Silvae E. C., Reddy J. N. Topology optimization of fibers orientation in hyperelastic composite material // *Composite Structures*, 2020, vol. 231, 111488. doi: 10.1016/j.compstruct.2019.111488.
- [35] Hozic D., Thore C.-J., Cameron Ch., Loukil M. A new method for simultaneous material and topology optimization of composite laminate structures using Hyperbolic Function Parametrization // *Composite Structures*, 2021, vol. 276, 114374. doi: 10.1016/j.compstruct.2021.114374.
- [36] Huang Y., Tian X., Zheng Z., Li D., Malakhov A. V., Polilov A. N. Multiscale concurrent design and 3D printing of continuous fiber reinforced thermoplastic composites with optimized fiber trajectory and topological structure // *Composite Structures*, 2022, vol. 285, 115241.
- [37] Next-generation engineering design software. Available at: <https://ntopology.com> (accessed 13.04.2022).
- [38] 3D printing a rocket engine. Available at: <https://www.etmm-online.com/3d-printing-a-rocket-engine-a-886960> (accessed 13.04.2022).
- [39] Bohara R. P., Linforth S., Nguyen T., Ghazlan A., Ngo T. Novel lightweight high-energy absorbing auxetic structures guided by topology optimization // *International Journal of Mechanical Sciences*, 2021, vol. 211, 106793.

- [40] Choi J. B., Lakes R. S. Non-linear properties of metallic cellular materials with a negative Poisson's ratio // Journal of Materials Science, 1992, vol. 27, pp. 5375–5381.
- [41] Davood M., Babak H., Ranajay G., Magid H. A., Hamid N.-H., Ashkan V. Elastic properties of chiral, anti-chiral, and hierarchical honeycombs: A simple energy-based approach // Theoretical and Applied Mechanics Letters, 2016, vol. 6, issue 2, pp. 81–96.
- [42] Li T., Liu F., Wang L. Enhancing indentation and impact resistance in auxetic composite materials // Composites, Part B: Engineering, 2020, vol. 198, 108229.
- [43] Xu M., Xu Z., Zhang Z., Lei H., Bai Y., Fang D. Mechanical properties and energy absorption capability of AuxHex structure under in-plane compression: theoretical and experimental studies // International Journal of Mechanical Sciences, 2019, vol. 159, pp. 43–57. doi: 10.1016/j.ijmecsci.2019.05.044.
- [44] Guo M.-F., Yang H., Ma L. Design and characterization of 3D AuxHex lattice structures // International Journal of Mechanical Sciences, 2020, vol. 181, 105700. doi: 10.1016/j.ijmecsci.2020.105700.
- [45] Wang H., Lu Z., Yang Z., Li X. A novel re-entrant auxetic honeycomb with enhanced in-plane impact resistance // Composite Structures, 2019, vol. 208, pp. 758–770. doi: 10.1016/j.compstruct.2018.10.024.
- [46] Khakhlenkova A. A., Lopatin A. V. *Obzor konstrukcij adapterov sovremennyh kosmicheskikh apparatov* [Overview of adapter designs for modern spacecrafts] // Spacecrafts & Technologies, 2018, vol. 2, no. 3, pp. 134–146. doi: 10.26732/2618-7957-2018-3-134-146. (In Russian)
- [47] Razin A. F., Vasiliev V. V. Development of composite anisogrid spacecraft attach fitting // Proc. of 11th European Conf. on Composite Materials, 2004, 9 p.
- [48] Vasiliev V. V., Barynin V. A., Razin A. F. Anisogrid composite lattice structures Development and aerospace applications // Composite structures, 2012, vol. 94, issue 3, pp. 1117–1127. doi: 10.1016/j.compstruct.2011.10.023.
- [49] Frketic J., Dickens T., Ramakrishnan S. Automated manufacturing and processing of fiber-reinforced polymer (FRP) composites: An additive review of contemporary and modern techniques for advanced materials manufacturing // Additive Manufacturing, 2017, vol. 14, pp. 69–86. doi: 10.1016/j.addma.2017.01.003.
- [50] Fedulov B., Fedorenko A., Khaziev A., Antonov F. Optimization of parts manufactured using continuous fiber three-dimensional printing technology // Composites, Part B: Engineering, 2021, vol. 227, 109406.
- [51] Baldzhiev R. S., Alekseyev A. A., Azarov A. V. Topology optimization of the lattice payload adapter for carrier rocket // Advances in Composite Science and Technology, 2018, vol. 683, 012061. doi: 10.1088/1757-899X/683/1/012061.

Сведения об авторах

Бабкина Людмила Алексеевна – кандидат технических наук, доцент кафедры компьютерного моделирования Сибирского государственного университета науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнёва.

Бразговка Ольга Владимировна – кандидат педагогических наук, доцент кафедры инженерной графики Сибирского государственного университета науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнёва.

Сорокин Дмитрий Владимирович – кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой инженерной графики Сибирского государственного университета науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнёва.