

ИНТЕГРАЦИЯ ГЕНЕРАТИВНОГО ДИЗАЙНА И ПАРАМЕТРИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ В САПР ДЛЯ ОПТИМИЗАЦИИ КОНСТРУКЦИЙ АЭРОКОСМИЧЕСКИХ КОМПОНЕНТОВ

И.Н. Занин¹, Е.А. Аникеев¹, П.А. Мельникова¹

¹ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет
имени Г.Ф. Морозова»

Аннотация. В статье рассматриваются современные подходы к проектированию силовых конструкций аэрокосмической техники с использованием методов топологической оптимизации и генеративного дизайна. Обоснована необходимость интеграции параметрического моделирования для обеспечения технологичности сложных геометрических форм. Показано, что применение аддитивных технологий в сочетании с генеративным дизайном позволяет снизить массу компонентов на 40–50% при сохранении прочностных характеристик.

Ключевые слова: топологическая оптимизация, генеративный дизайн, аддитивные технологии, параметрическое моделирование, массовое совершенство, селективное лазерное сплавление, САПР.

INTEGRATION OF GENERATIVE DESIGN AND PARAMETRIC MODELING IN CAD FOR OPTIMIZATION OF AEROSPACE COMPONENT STRUCTURES

I.N. Zanin¹, E.A. Anikeev¹, P.A. Melnikova¹

¹Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov

Abstract. This paper discusses modern approaches to the design of load-bearing structures for aerospace equipment using topology optimization and generative design methods. The need to integrate parametric modeling to ensure the manufacturability of complex geometric shapes is substantiated. It is shown that the application of additive technologies in combination with generative design allows reducing the weight of components by 40–50% while maintaining their strength characteristics.

Keywords: topology optimization, generative design, additive technologies, parametric modeling, mass perfection, selective laser melting, CAD.

В современной аэрокосмической отрасли ключевым критерием эффективности летательных аппаратов является их массовое совершенство. Снижение массы силовых конструкций при сохранении или повышении их прочности и жесткости позволяет значительно увеличить массу полезной нагрузки или запас топлива, что напрямую влияет на экономическую эффективность миссий. Традиционные методы проектирования уже давно исчерпали свой потенциал, им на смену приходят новые методы вычислительного проектирования, такие как топологическая оптимизация и генеративный дизайн [1].

Актуальность данной работы заключается в важности систематизации подходов к интеграции генеративного дизайна в реальное производство. Важнейшим аспектом является выбор технологии изготовления на ранних этапах проектирования, так как она диктует набор технологических ограничений, которые должны быть учтены в математической модели оптимизации. В статье проводится сравнительный анализ двух стратегий: использования аддитивных технологий, снимающих большинство геометрических ограничений, и применения традиционных методов с наложением строгих технологических ограничений на процесс оптимизации.

Топологическая оптимизация (ТО) является численным методом распределения материала в заданной проектной области таким образом, чтобы минимизировать целевую функцию при соблюдении системы ограничений. Наиболее распространенным методом ТО является метод пенализации для твердого изотропного тела.

Математически задача формулируется следующим образом: найти вектор проектных переменных $\mathbf{x}$ (относительная плотность конечных элементов), который минимизирует целевую функцию $f(\mathbf{x})$, например, податливость конструкции:

$$\min_{\mathbf{x}} f(\mathbf{x}) = \mathbf{U}^T \mathbf{K}(\mathbf{x}) \mathbf{U}$$

при ограничениях:

$$V(\mathbf{x}) \leq V_0, f_v 0 < x_{\min} \leq x_i \leq 1, i=1, \dots, N$$

где: $\mathbf{U}$ – вектор перемещений;

$\mathbf{K}$ – глобальная матрица жесткости;

$V(\mathbf{x})$ – текущий объем материала;

V_0 – начальный объем;

f_v – заданная доля объема;

N – количество конечных элементов [2].

Для связи модуля упругости E_i i -го элемента с его относительной плотностью x_i используется степенной закон с параметром штрафа p :

$$E_i(x_i) = E_0 \cdot x_i^p$$

где E_0 – модуль упругости исходного материала.

При этом важно понимать, что исключительно математическая оптимизация без учета производственных ограничений часто приводит к появлению структур дефектами, что в свою очередь мешает переводить результаты в CAD-модели, используемые на производстве.

Было установлено, что при проектировании переходного отсека космического аппарата (ПО КА) для изготовления традиционными методами использование ограничений типа EХТ – экструзия, позволяет получить предсказуемую геометрию, состоящую из набора ребер и оболочек. Однако такая конструкция оказывается значительно тяжелее аналога, полученного без ограничений. В приведенном примере масса ПО КА, изготовленного традиционным методом, составила 16 кг, тогда как допустимое напряжение и запасы устойчивости были обеспечены с большим избытком, что свидетельствует о недоиспользовании материала [3].

Аддитивные технологии позволяют изготавливать детали практически любой геометрической сложности методом послойного синтеза из металлического порошка.

Генеративный дизайн даёт нам свободу геометрии, минимизирует количество отходов, также мы получаем возможность объединения нескольких деталей в одну монолитную и как следствие более прочную конструкцию.

При этом несмотря на все преимущества алгоритмов генеративного дизайна, их прямой вывод в производство часто невозможен без этапа параметризации и доработки, так как результаты ТО обычно представлены в виде полигональной сетки, что делает их непригодными для инженерных расчетов и использовании в управляющих программах для ЧПУ.

Поэтому процесс интеграции должен состоять из интерпретации топологии, с дальнейшим параметрическим реконструированием и итоговой оптимизацией формы и размеров [3].

Таким образом мы можем сформулировать следующие рекомендации для инженеров-конструкторов:

1. На ранних этапах проектирования целесообразно проводить топологическую оптимизацию без технологических ограничений.
2. При выборе технологии изготовления необходимо проводить технико-экономическое обоснование.
3. Для серийного производства необходимо использовать ТО с наложением строгих технологических ограничений, это позволит получить конструкцию близкую к оптимальной [4].
4. Интеграция генеративного дизайна в САПР должна сопровождаться развитием навыков параметрического моделирования у конструкторов, так как автоматическая конвертация результатов ТО в твердотельные модели все еще требует ручного вмешательства и инженерной экспертизы.

Интеграция генеративного дизайна и параметрического моделирования открывает новые горизонты в проектировании аэрокосмических компонентов. Переход от интуитивного конструирования к алгоритмическому синтезу форм позволяет существенно улучшить массовое совершенство изделий. Однако успех внедрения этих технологий критически зависит от правильного выбора производственного базиса.

Аддитивные технологии являются естественным продолжением генеративного дизайна, позволяя реализовывать сложные бионические структуры, недоступные для традиционных методов. В то же время, для широкого промышленного применения необходимо развитие гибридных подходов, сочетающих свободу топологической оптимизации с жесткими требованиями технологичности традиционных процессов. Дальнейшие исследования должны быть направлены на автоматизацию процесса реконструкции параметрических моделей по результатам ТО и учет физики аддитивных процессов непосредственно в цикле генеративного проектирования.[5]

Список литературы

1. Roper S.W.K., Lee H., Huh M., Kim Il.Y. Simultaneous isotropic and anisotropic multi-material topology optimization for conceptual-level design of aerospace components // Structural and multidisciplinary optimization. - 2021. - №1, том 64. - С. 441-456, DOI: 10.1007/s00158-021-02893-4.
2. Зольников К.В., Ачкасов Д.А. Моделирование и оптимизация конструкции полосового фильтра на основе коаксиального резонатора // Моделирование систем и процессов. - 2024. - №2, том 17. - С. 43-50, DOI: 10.12737/2219-0767-2024-17-2-43-50.
3. Полуэктов А.В., Зольников К.В., Ачкасов А.В., Чевычелов Ю.А. Повышение формализации задач верификации топологии и электрической схемы для систем автоматизированного проектирования // Моделирование систем и процессов. - 2024. - №1, том 17. - С. 102-111, DOI: 10.12737/2219-0767-2024-17-1-102-111.
4. Скворцова Т.В., Зольников К.В., Плотников А.М., Скоркин И.В. Формализация верификации топологии и электрической схемы для систем автоматизированного проектирования // Моделирование систем и процессов. - 2024. - №3, том 17. - С. 61-70, DOI: 10.12737/2219-0767-2024-59-68.
5. Юров А.Н., Анциферова В.И., Пачевский Д.Е. Визуализация процессов металлообработки в разработке имитационных программ для оборудования с ЧПУ // Моделирование систем и процессов. – 2021. №1, том 14. – с. 85-92, DOI: 10.12737/2219-0767-2021-14-1-85-92

References

1. Roper S.W.K., Lee H., Huh M., Kim Il.Y. Simultaneous isotropic and anisotropic multi-material topology optimization for conceptual-level design of aerospace components // Structural and Multidisciplinary Optimization. – 2021. – No. 1, Vol. 64. – P. 441–456, DOI: 10.1007/s00158-021-02893-4.
2. Zolnikov K.V., Achkasov D.A. Modeling and optimization of the design of a bandpass filter based on a coaxial resonator // Modeling of Systems and Processes. – 2024. – No. 2, Vol. 17. – P. 43–50, DOI: 10.12737/2219-0767-2024-17-2-43-50.
3. Poluektov A.V., Zolnikov K.V., Achkasov A.V., Chevychelov Yu.A. Enhancing the formalization of topology and electrical circuit verification tasks for computer-aided design systems // Modeling of Systems and Processes. – 2024. – No. 1, Vol. 17. – P. 102–111, DOI: 10.12737/2219-0767-2024-17-1-102-111.

4. Skvortsova T.V., Zolnikov K.V., Plotnikov A.M., Skorkin I.V. Formalization of topology and electrical circuit verification for computer-aided design systems // Modeling of Systems and Processes. – 2024. – No. 3, Vol. 17. – P. 61–70, DOI: 10.12737/2219-0767-2024-59-68.

5. Yurov A.N., Antsiferova V.I., Pachevsky D.E. Visualization of metal-working processes in the development of simulation programs for CNC equipment // Modeling of Systems and Processes. – 2021. – No. 1, Vol. 14. – P. 85–92, DOI: 10.12737/2219-0767-2021-14-1-85-92.