

УДК 004.94

Обзор методов реконструкции и параметризации геометрии топологически оптимизированных конструкций

Михайлова Екатерина Алексеевна

ekmikhajlova@gmail.com

Волосатова Тамара Михайловна

tamaravol@gmail.com

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

Топологическая оптимизация является одним из наиболее активно развивающихся направлений инженерного проектирования. Однако большинство исследований сосредоточено на совершенствовании алгоритмов оптимизации, оставляя вопрос технологической пригодности получаемых конструкций зачастую без должного внимания. В данной работе рассматриваются возможные подходы к решению этой проблемы с помощью методов реконструкции геометрии. Среди перспективных направлений можно отметить методы, основанные на построении скелета модели по серединным осям (Medial Axis Transform). В качестве идей для будущих исследований рассматривается разработка эвристических правил, направленных на автоматизацию процесса преобразования результатов топологической оптимизации в параметрические модели.

Ключевые слова: топологическая оптимизация, метод-SIMP, NURBS-поверхности, реконструкция геометрии, reverse-engineering

Введение. Структурная оптимизация является одним из наиболее перспективных и активно развивающихся направлений современных инженерных исследований. Активное развитие методов топологической оптимизации пришлось на 1990-е годы [1, 2]. В то время предложенные алгоритмы значительно опережали доступные вычислительные технологии. Существующие на тот момент вычислительные мощности не позволяли эффективно решать даже сравнительно простые задачи, и практическое применение таких методов было экономически нецелесообразным. В 2010-х годах с развитием параллельных вычислений появилась возможность проводить более сложные расчеты и применение структурной оптимизации на практике стало доступно широкому кругу пользователей. Сегодня наличие модуля топологической оптимизации является неотъемлемой частью САПР тяжелого класса.

Интерес к автоматизации ручного проектирования продолжает расти. За последние 30 лет предложено огромное количество новых подходов, модификаций и комбинаций различных методов топологической оптимизации. При этом на практике в промышленных решениях зачастую по-прежнему используют метод SIMP (Solid Isotropic Method with Penalzation), предложенный датским ученым Бендсёе (Bendsøe) еще в 1989 году [3]. В отличие от большинства других методов SIMP обладает доказанной сходимостью и высокой численной устойчивостью. На сегодняшний день метод SIMP фактически стал стандартом в области структурной оптимизации.

Несмотря на то, что идеи топологической оптимизации уже давно известны и активно развиваются, практическое применение данной технологии по-прежнему затруднено. Объясняется это следующим: результаты топологической оптимизации, как правило, представляют собой конструкции со сложной геометрией, включающей множество отверстий и тонкостенных элементов. Сгенерированная 3D-модель обычно представляется в виде грубой конечно-элементной сетки, и последующее определение контура итоговой конструкции производится инженерами-технологами вручную.

Большинство исследований в данной области сосредоточено на совершенствовании алгоритмов [4, 5], при этом вопрос технологической пригодности получаемых решений остается в стороне. В данной статье проводится анализ и исследование возможных подходов решения проблемы технологической непригодности изделий, получаемых методами топологической оптимизации. В качестве идей для будущих исследований рассматривается разработка эвристических правил, направленных на автоматизацию процесса преобразования результатов топологической оптимизации в параметрические модели.

Методы производства. При практическом применении топологической оптимизации обычно предполагается использование аддитивных технологий, позволяющих изготавливать конструкции со сложной геометрией, недостижимой традиционными подходами. Однако такие методы остаются малоприменимыми для серийного производства: высокая стоимость, длительное время печати, ограниченные размеры области построения, а также недостаточная оснащенность предприятий 3D-принтерами существенно сдерживают их широкое внедрение в промышленность.

Альтернативой 3D-печати для топологически оптимизированных конструкций является литье. Применение этого метода позволяет обеспечить серийное производство, что значительно снижает себестоимость изготавливаемых изделий. Однако литейные технологии накладывают ограничения на форму, которую необходимо учитывать еще на этапе оптимизации. К ним относятся требования к минимальной толщине стенок, допустимым углам уклона и возможности извлечения детали из формы.

Однако какой бы подход к производству ни был выбран, неизбежно требуется преобразовать грубую сетку в гладкую поверхность, пригодную для последующей обработки. В следующих разделах данной статьи рассмотрены алгоритмы, направленные на решение этой задачи.

Интерполяция NURBS-поверхностями. Одним из возможных методов сглаживания и восстановления формы конструкции после топологической оптимизации является аппроксимация полученной геометрии с помощью NURBS-поверхностей [6]. Этот процесс представляет собой сложную многоэтапную задачу (рис. 1). Для ее проведения требуется предварительно разбить сетку на сегменты, близкие по форме к прямоугольным. В качестве критерия классификации элементов на сегменты может быть использовано значение угла между их нормальными. Поскольку исходная сетка часто имеет

большие перепады по ориентации нормалей, на первом этапе выполняется сглаживание, которое можно реализовать с помощью классических методов компьютерной графики.

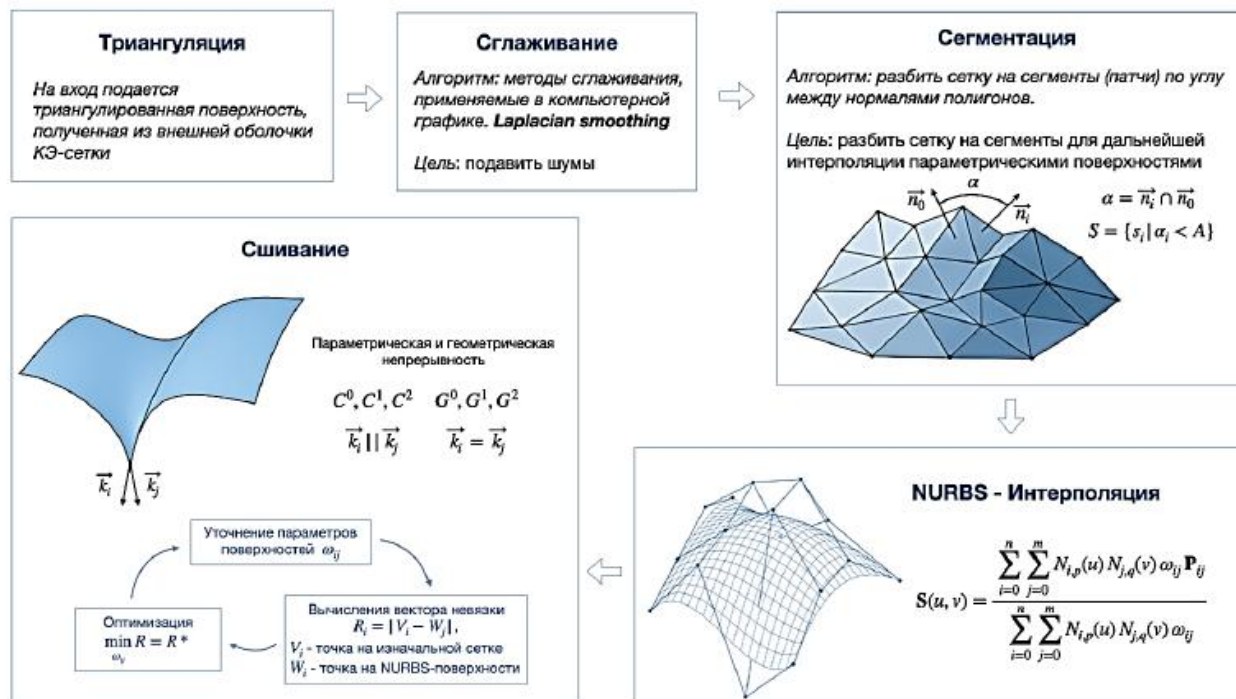


Рис. 1. Схема алгоритма интерполяции триангулированной сетки NURBS-поверхностями

После разбиения сетки на локально гладкие участки каждая группа может быть аппроксимирована аналитической поверхностью. Подобные принципы реализованы в промышленных системах, таких как Autodesk Fusion 360, где для автоматизированного сглаживания применяется интерполяция Т-сплайнами. Однако более универсальным решением является использование NURBS-поверхностей, поскольку именно такой формат поддерживает большинство современных геометрических решателей.

На заключительном этапе алгоритма интерполяции производится сшивание поверхностей. Основной сложностью этой задачи является обеспечение геометрической непрерывности на границах сегментов. Эту задачу можно сформулировать как оптимизационную, где в качестве целевой функции выбирается вектор невязки, представляющий собой расстояния от вершин исходной сетки до аппроксимирующих поверхностей, а варьируемыми параметрами являются весовые коэффициенты, определяющие форму NURBS-поверхностей.

Как уже отмечалось выше, внедрение интерполяции на этапе постобработки сгенерированной геометрии имеет практическое применение, в частности, в Autodesk Fusion 360 в модуле генеративного проектирования (Generative Design). Аппроксимация формы конструкции аналитическими поверхностями не только сглаживает геометрию, но и предоставляет пользователю возможность удобной локальной доработки и уточнения отдельных

участков модели. Однако полученные конструкции нередко остаются технологически непригодными, и их изготовление затруднено даже при использовании аддитивных технологий.

Реконструкция геометрии на основе осевого скелета. Одним из современных подходов к восстановлению геометрии после топологической оптимизации является метод MAT (Medial Axis Transform) [7]. В рамках данного подхода на основе сгенерированной геометрии строится скелет по серединным осям (Рис. 2). Каждая точка на исходной поверхности связывается с центром вписанной сферы, радиус которой характеризует локальную толщину элемента. Рассчитанные таким образом точки используются при построении аналитических поверхностей.



Рис. 2. Схема MAT-метода (Medial Axis Transform)

По сравнению с NURBS-интерполяцией, данный метод позволяет формировать линейчатые поверхности, тем самым значительно упрощая форму изделия. В теории такой метод позволит получать геометрию, подходящую для традиционного производства и обработки на станках с ЧПУ. Однако несмотря на визуально более «технологичный» результат, полученная конструкция все еще не пригодна для производства. Метод не учитывает технологические особенности и не проверяет доступ инструмента к отдельным областям модели. В результате геометрия конструкции по-прежнему требует локальной ручной дооптимизации.

Тем не менее, применение данного метода позволяет значительно сократить разрыв между результатами топологической оптимизации и геометрией, пригодной для производства. Хотя данный подход не обеспечивает полной автоматизации проектирования, он значительно облегчает работу инженера-технолога на финальных этапах подготовки изделия к изготовлению.

Перспективные направления будущих исследований. Подобно методу, описанному в работе [8], сгенерированную топологию можно использовать как ориентир для формирования параметрической модели и последующей дооптимизации геометрических характеристик (рис. 3). Такая комбинация методов структурной оптимизации позволяет дополнительно снизить массу конструкции и одновременно повысить ее технологичность. Однако существенной проблемой остается необходимость ручного упрощения и аппроксимации формы. Перспективным направлением для будущих исследований является автоматизация этого этапа. Возможным решением данной задачи может стать определение эвристик, позволяющих на основе анализа распределения материала в топологически оптимизированной модели определять зоны, соответствующие будущим отверстиям и границам параметрических элементов. При этом важно интегрировать в алгоритм минимизацию перепадов кривизны поверхностей, формируя таким образом геометрию, пригодную для изготовления деталей средствами ЧПУ.

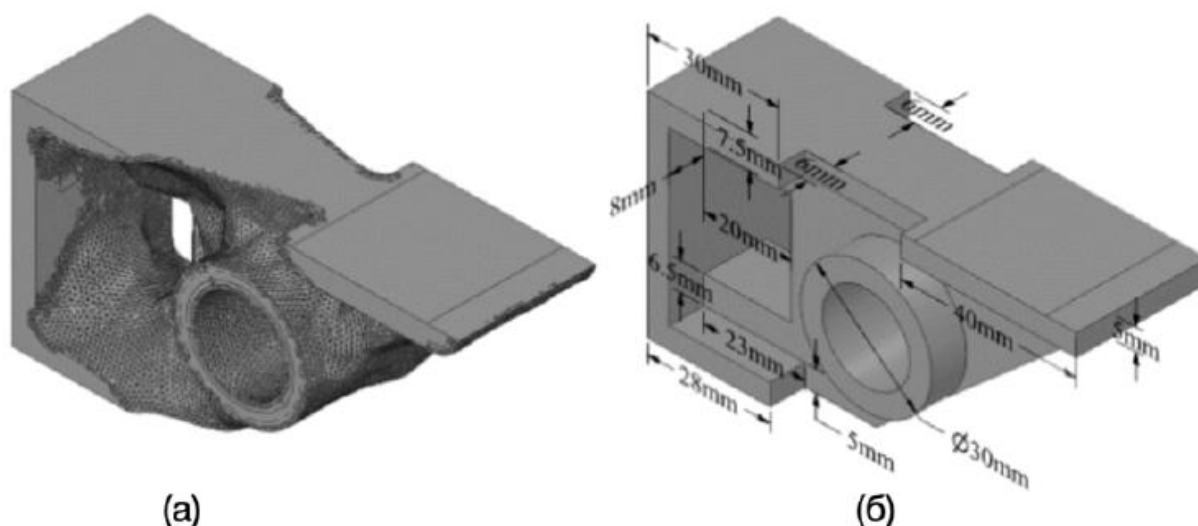


Рис. 3. Топологически оптимизированная конструкция (а), реконструированная параметрическая модель (б)

Говоря о перспективных направлениях исследований в области структурной оптимизации, следует отметить активное развитие подходов, основанных на методах машинного обучения. Современные модели компьютерного зрения достигли впечатляющих результатов в генерации осмысленных изображений. Параллельно с этим активно развиваются методы, направленные на создание трехмерных объектов [9]. Однако на текущем этапе подобные разработки не способны полностью заменить существующие алгоритмы топологической оптимизации. Причин этому несколько: во-первых, генерация трехмерных воксельных сеток представляет собой задачу большой размерности, во-вторых, конструкция должна быть не только визуально осмысленной, но и удовлетворять прочностным требованиям. Кроме того, применение нейронных сетей

ограничено не только вычислительными возможностями, но и отсутствием должного объема обучающих данных.

Тем не менее, потенциал применения методов машинного обучения в подобных задачах остается крайне высоким. Перспективным направлением является использование методов реверс-инжиниринга (reverse-engineering). В таких подходах нейросетевые модели обучаются восстанавливать параметрическое описание объекта по треугольным сеткам, облакам точек или воксельным структурам. На сегодняшний день уже разработаны алгоритмы, способные распознавать простейшие производственные и проектные элементы (CAD-features) в сетчатых моделях [10].

Заключение. В данной работе рассмотрена лишь часть возможных методов решения проблемы технологической непригодности топологической оптимизации на практике. Применение эвристических подходов с методами машинного обучения может стать важным шагом к формированию новых гибридных методологий проектирования. Такие системы будут способны не только автоматизировать процесс проектирования легковесных конструкций, но и формировать решения, учитывающие технологические ограничения и особенности производственного процесса. Генерируемые конструкции будут максимально приближены к технологически реализуемым формам, а необходимость последующей доработки сведется к минимуму. Роль человека при такой парадигме проектирования будет сводиться к принятию ключевых решений и контролю качества предложенных системой вариантов.

Литература

- [1] Zhou M., Rozvany G. The COC algorithm, Part II: Topological, geometry and generalized layout optimization. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 1992, vol. 89, pp. 309–336.
- [2] Xie Y.M., Steven G.P. A simple evolutionary procedure for structural optimization. *Computers & Structures*, 1993, vol. 49, no. 5, pp. 885–896.
- [3] Bendsoe M.P. Optimal shape design as a material distribution problem. *Structural Optimization*, 1989, vol. 1, pp. 193–202.
- [4] Pan Z., Gao X., Wu K. First-order bilevel topology optimization for fast mechanical design. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 2023, vol. 29, no. 12, pp. 5151–5163.
- [5] Михайлова Е.А., Волосатова Т.М. Обзор методов генеративного проектирования на основе топологической оптимизации. *Комплексная автоматизация проектирования и производства (КАПП-2024). II науч.-практ. конф. (с междунар. уч.): матер.* Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2025, с. 54–59.
- [6] Голованов Н.Н. *Геометрическое моделирование*. Москва, Издательство физико-математической литературы, 2002, 472 с.
- [7] Mayer J., Denk M., Wartzack S. Reconstruction of topology optimized geometry with casting constraints in a feature-based approach. *Proceedings of the International Conference on Engineering Design (ICED23)*, Bordeaux, France, Glasgow, Design Society, 2023.
- [8] Tyflopoulos E., Steinert M. Topology and parametric optimization-based design processes for lightweight structures. *Designs*, 2020, vol. 4, no. 3.

- [9] Mezghanni M., Bodrito T., Boulkenafed M., Ovsjanikov M. Physical simulation layer for accurate 3D modeling. *Proceedings of the ACM SIGGRAPH. Eurographics Symposium on Computer Animation (SCA 2023)*, 2023, New York, ACM. <https://doi.org/10.1145/3592095.3607494>
- [10] Zhao F. A novel computational paradigm for reconstructing solid CAD features from a segmented manifold triangular mesh. *Applied Sciences*, 2024, vol. 14, no. 14, art. no. 6183.

A review of geometry reconstruction and parameterization techniques for topology-optimized structures

Mikhailova Ekaterina Alekseevna

ekmikhajlova@gmail.com

Volosatova Tamara Mihaylovna

tamaravol@gmail.com

BMSTU, Moscow, Russia

Topology optimization is one of the most actively developing areas in engineering design. However, most research focuses on improving optimization algorithms, while the manufacturability of the resulting structures often receives insufficient attention. This work reviews possible approaches to addressing this issue using geometry reconstruction methods. Among the promising directions are methods based on the Medial Axis Transform. As potential avenues for future research, the development of heuristics transforming topology optimization results into parametric models is considered.

Keywords: topology optimization, SIMP method, NURBS surfaces, geometry reconstruction, reverse engineering