

И.Л. КОВАЛЕВА, Д.П. КУНКЕВИЧ, В.В. НАПРАСНИКОВ, Ю.В. ПОЛОЗКОВ, А.А. ЧВАНЬКОВ

ТОПОЛОГИЧЕСКАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ КОНСТРУКТИВНОЙ ГЕОМЕТРИИ ЛЕГКОВЕСНЫХ ДЕТАЛЕЙ

Белорусский национальный технический университет

Работа посвящена оптимизации формы легковесных деталей. Проанализированы преимущества и недостатки топологической оптимизации, как наиболее эффективного и популярного подхода к решению такого рода задач. Одной из характерных проблем применяемых методов является зависимость их результатов от сеточного разбиения, а также необходимость последующего перепроектирования геометрической модели. Для решения этой проблемы предложено выполнять формирование полостей на основе метода ESO непосредственно в конструктивной геометрической модели. Описаны основные этапы предлагаемого подхода, обосновано использование кластеризации для упрощения формы поверхностей сформированных полостей.

Ключевые слова: легковесные детали; топологическая оптимизация; твердотельная конструктивная геометрия; конструктивные элементы формы; кластеризация.

Введение

Снижение материалоемкости деталей является важнейшей из задач, стоящих в настоящее время перед проектировщиками. Одним из направлений её решения может быть использование легковесных деталей - деталей с внутренними полостями. Такие детали по сравнению с монолитными аналогами обладают меньшим объемным весом и лучшими теплоизоляционными свойствами, однако при этом они обладают и меньшей механической прочностью. Поэтому задача проектирования легковесных деталей является задачей оптимизации и заключается в поиске компромисса между желаемым снижением материалоемкости и недопустимым изменением технико-эксплуатационных свойств деталей. Для определения количества, расположения и геометрических параметров полостей, называемых также ячеистыми структурами [1–4], в последние годы широко применяются методы топологической оптимизации.

Обзор методов топологической оптимизации

В ходе топологической оптимизации (ТО) осуществляется поиск оптимального распределения материала в заданной области детали для заданных нагрузок и граничных условий. При этом найденное распределение должно соответствовать заданному набору целевых показателей.

В настоящее время известны следующие основные методы ТО: ESO (Evolutionary Structural Optimization) [5], SIMP (Solid Isotropic Material with Penalisation) [6] и Level-Set (метод установления уровня) [7] и их различные комбинации.

ESO-метод был предложен профессорами Mike Xie и Grant Steven в 1992 г. ESO называют методом жесткого уничтожения (жадного

вырезания), который итерационно удаляет или добавляет определенное количество материала детали. Метод ESO основан на определении уровня напряжений в произвольной части детали методом конечных элементов [8]. Недостаточно нагруженный материал может быть удален, что влечет за собой удаление отдельных элементов конечно-элементной модели. ESO относительно прост в реализации.

Удаленный на ранних итерациях материал может быть полезен на последующих. Однако метод ESO не позволяет восстановить его и это может снизить качество решения. Метод BESO (или метод двунаправленной эволюционной оптимизации конструкций) позволяет на основе анализа напряженно-деформированного состояния не только удалять менее нагруженные элементы, но и добавлять новые элементы в те области, напряженное состояние которых выше некоторого значения. В результате обеспечивается возможность определения более эффективной структуры.

Из-за сложностей с инженерной интерпретацией метод SIMP не сразу получил признание. Главная идея метода состоит в создании поля виртуальной плотности, которое является аналогом некоторой реальной характеристики детали. С помощью SIMP осуществляется уменьшение податливости детали за счет перераспределения материала в анализируемой области пространства при заданных граничных условиях. В результате формируется равнопрочный объект. SIMP широко применяется в аддитивных технологиях (технологиях 3D-печати).

Метод ESO-SIMP объединяет методы ESO и SIMP. Расчетными переменными в нем являются относительные плотности элементов, а целевой функцией служит среднее соответствие. Метод ESO-SIMP имеет множество преимуществ по сравнению с методом ESO и методом SIMP с

точки зрения эффективности и надежности [9].

Основная идея метода Level-Set состоит в том, чтобы представить кривую или поверхность в неявном виде. При этом они принимаются в качестве нулевого уровня многомерной функции, а затем изучить деформацию этой функции [10].

Описанные выше методы ТО имеют ряд схожих проблем: проблему «шахматной доски», т.е. образования в теле оптимизируемой детали не связанных между собой объемов материалов и зависимость от сеточного разбиения [11].

Декомпозиционный и конструктивный методы формирования полостной геометрии детали

Традиционно проблему зависимости от сеточного разбиения рассматривают лишь с точки зрения того, что использование различных конечных элементов сеток приводит к различным «оптимальным» топологиям. Однако при этом не рассматриваются сложности, связанные с описанием геометрии детали и полученных полостей.

Среди методов описания геометрических моделей можно выделить два - конструктивный и декомпозиционный. Первый предполагает представление объекта множеством геометрических фигур, комбинируемых теоретико-множественными операциями. Он является основным при конструкторском проектировании, что регламентировано стандартами представления информации об изделии (IGES, STEP) и поддерживается современными системами геометрического моделирования.

Декомпозиционная модель — это множество непересекающихся элементов регулярной формы (прямоугольные параллелепипеды, тетраэдры). Данное представление широко используется в инженерном анализе методом конечных элементов. Существующие методы топологической оптимизации работают именно с ним. Это, собственно, и является причиной основного недостатка этих методов: полученную в результате оптимизации конечно-элементную модель необходимо, по сути, построить заново конструктивными методами.

Очевидными представляются два подхода к преодолению отмеченной

сложности. Во-первых, конечно-элементную сетку в целом можно аппроксимировать конструктивными элементами формы. Эта очень сложная задача, хотя, безусловно, перспективная. Однако, с учетом того, что в данном контексте рассматривается именно полостная геометрия, более простым и эффективным представляется формирование полостей в геометрических моделях на конструктивном уровне.

Основные положения подхода к формированию полостей на конструктивной геометрии

Формирование полостей выполняется на основе метода ESO. Прежде всего, выделяются наименее нагруженные места детали. Делается это посредством расчёта напряженно-деформированного состояния (НДС) при помощи того же метода конечных элементов. Однако далее вместо «выключения» наименее нагруженных элементов из конечно-элементной модели материал вырезается из модели конструктивной.

Геометрия удаляемого материала определяется на основании так называемых элементов формы [12]. Их можно рассматривать как фигуры, формы которых определены, размеры заданы параметрически. Целесообразно иметь несколько таких элементов различной сложности, которая определяется параметрами как размерными, так и параметрами расположения. В качестве первого элемента формы (ЭФ1) предлагается использовать шар - один размерный параметр (радиус) и три параметра расположения (координаты центра).

После расчета НДС в точку, где его характеристики принимают минимальные значения, помещается ЭФ1 и вырезается из тела детали. Затем оценивается целесообразность повторения процедуры. Для этого могут использоваться различные критерии. Например, могут использоваться величины напряжений или деформаций, количество удаленного материала и др. Если эти показатели не превышают критических значений, добавляется следующий ЭФ1. На рисунке 1 приведена блок-схема описанного процесса.



Рисунок 1 – Блок-схема формирования полостей

НДС даже при наличии концентраторов изменяется достаточно плавно. Поэтому ЭФ1 располагаются группами. Каждая такая группа образует вполне компактную полость. Однако поверхности этих полостей сложны и не технологичны. Чтобы упростить форму этих полостей, а заодно и их описание, предлагается выполнить кластеризацию ЭФ1 и заменить каждый кластер единым аппроксимирующим ЭФ.

Принцип кластеризации предлагается следующий. ЭФ1, расположенный там, где характеристики НДС минимальны, становится первым элементом кластера, а его центр - центром кластеризации. Затем ищется ближайший к нему ЭФ1 и эти два элемента объединяются в кластер. Для нового кластера пересчитывается положение его центра, и к этому кластеру

присоединяется ближайший следующий ЭФ1. Если расстояние от текущего центра кластеризации до следующего ЭФ1 значительно превосходит предыдущие, это расценивается как признак формирования нового кластера. Процесс продолжается до тех пор, пока все ЭФ1 не будут кластеризованы.

Реализация и результаты
Практическая проверка предложенного подхода выполнялась на базе системы геометрического моделирования SolidWorks. Геометрические преобразования и инженерные расчеты реализовывались макросом на языке Visual Basic for Application, функционирующим непосредственно на базе указанной системы. Задачи кластеризации решались с использованием программного модуля на языке Python [13].

Рисунок 1 – Блок-схема формирования полостей

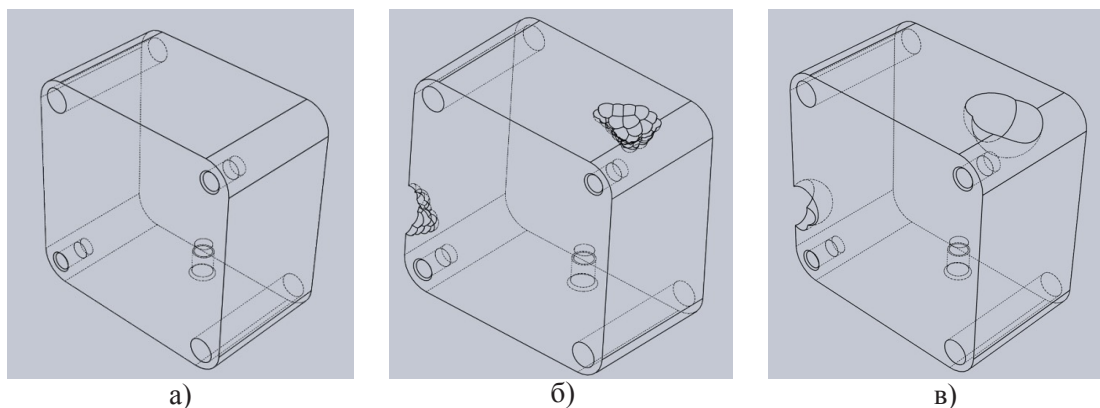


Рисунок 2 – Этапы формирования полостей: а) исходная деталь, б) группы ЭФ1, в) аппроксимация групп ЭФ1 едиными элементами

Группы ЭФ1 (кластеры) в представленном примере были заменены такими же ЭФ1, но большего радиуса. В общем же случае, более эффективным аппроксиматором может оказаться более сложный ЭФ, например, эллипс. Позиционирование такой фигуры и определение ее размерных параметров может быть выполнено исходя их массово-инерционных характеристик аппроксимируемого кластера.

Заключение

В работе предложен подход к формированию в геометрических моделях деталей полостей для снижения материалоемкости при сохранении функциональных свойств - прочности,

жесткости. Подход является своего рода «сужением» топологической оптимизации на задачи, связанные с построением «внутренней» геометрии. Преимуществом является использование конструктивных методов геометрического моделирования, а не декомпозиционных, на которых основана топологическая оптимизация, как таковая. Это позволяет избежать перестроений геометрических моделей при решении некоторых задач.

Обоснованность основных положений подхода подтверждена его практической апробацией. В рамках апробации разработаны программно-методические средства, которые могут служить основой для соответствующей утилиты для системы геометрического моделирования.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Полозков, Ю.В.** Проблемы проектирования и формообразования легковесных деталей в аддитивном производстве / Ю.В. Полозков // Математические методы в технике и технологиях : сб. тр. междунар. науч. конф., Минск, 10 – 12 октября 2017 г. / СПб.: Изд-во Политехн. ун-та ; под общ. ред. А. А. Большакова. – Минск, 2017. – Т. 10 – С. 61 – 65.
2. **Полозков, Ю.В.** Унификация формального описания ячеек и ячеистых структур для их структурного синтеза в проектировании легковесных деталей / Ю.В. Полозков, Д.П. Кункевич. // Наука – образованию, производству, экономике: материалы 16-ой Международной научно-технической конференции (71-й научно-технической конференции профессорско-преподавательского состава, научных работников, докторантов и аспирантов БНТУ), Минск, 2018 г. / БНТУ; редкол.: С. В. Харитончик [и др.]. : В 4 т. – Минск, 2018. – Т. 1. – С. 229.
3. **Полозков, Ю.В.** Реализация алгоритма для автоматизации многовариантного инженерного анализа деталей с ячеистыми структурами с помощью PYANSYS / Ю.В. Полозков, В. В. Напрасников, И.В. Павловский, Е.А. Яковец. // Математические методы в технике и технологиях: сб. тр. междунар. науч. конф., Минск, 26 - 30 октября 2020 г. / СПб.: Изд-во Политехн. ун-та ; под общ. ред. А. А. Большакова. – Минск, 2020. – Т. 12, Ч. 3. – С. 37 – 43.
4. **Напрасников, В.В.** Особенности использования оптимизационных алгоритмов ANSYS WB при проектировании легковесных деталей / В. В. Напрасников, Полозков Ю.В., Д.П. Кункевич, А.Н. Соловьев. // Математические методы в технике и технологиях. – 2021. – № 12. – С. 57 – 61.
5. **Xie YM, Steven GP.** A simple evolutionary procedure for structural optimization. *Comput Struct* 1993;49:885–96.
6. **Bendsoe MP, Sigmund O.** Topology optimization—theory, methods and applications. Springer; 2003.
7. **Allaire G, Jouve F, Toader AM.** Structural optimization using sensitivity analysis and a level-set method. *J Comput Phys* 2004;194:363–93.
8. **Jikai Liu, Yongsheng Ma.** A survey of manufacturing oriented topology optimization methods. *Advances in Engineering Softwar*, August 2016, pp. 161-175.
9. A new hybrid topology optimization method coupling ESO and SIMP method / H. Jiao, Q. Zhou, S. Fan, Y. Li // *Lecture Notes in Electrical Engineering Proceedings of China. Modern Logistics Engineering.* – 2014. – P. 373–384.
10. **Liu Z., Korvink J., Huang R.** Structure topology optimization: fully coupled level set method via FEMLAB // *Structural and Multidisciplinary Optimization.* – 2005. – June. – Vol. 29, iss. 6. – P. 407–417.
11. **Темис Ю.М., Якушев Д.А.** Оптимизация конструкции деталей и узлов ГТД // *Вестник СГАУ.* – 2011. – № 3-1. – С. 183–188.
12. **Ракович А.Г.** Автоматизация проектирования приспособлений для металлорежущих станков. - М.: Машиностроение, 1980. - 136 с.
13. Ковалева И.Л., Кункевич Д.П., Бородуля А.В., Чваньков А.А. Конструирование легковесных деталей с помощью элементов формы // *Инновационные технологии, автоматизация и мехатроника в машино- и приборостроении: материалы X международной научно-практической конф.* Минск: Бизнесофсет, 2022 – с. 49 – 50.

REFERENCES

1. **Polozkov, YU.V.** The problems of design and shape creation of lightweight parts in additive manufacturing / YU.V. Polozkov // *Matematicheskie metody v tekhnike i tekhnologiyah* : sb. tr. mezhdunar. науч. конф., Minsk, 10 – 12 oktyabrya 2017 g. / SPb.: Izd-vo Politekhn. un-ta ; pod obshch. red. A. A. Bol'shakova. – Minsk, 2017. – Т. 10 – S. 61 – 65.

2. **Polozkov, YU.V.** Unification of formal description of cells and cells structure for topological synthesis in design of lightweight parts / Yu.V. Polozkov, D.P. Kunkevich. // *Nauka – obrazovaniyu, proizvodstvu, ekonomike: materialy 16-oj Mezhdunarodnoj nauchno-tehnicheskoy konferencii (71-j nauchno-tehnicheskoy konferencii professorsko-prepodavatel'skogo sostava, nauchnyh rabotnikov, doktorantov i aspirantov BNTU)*, Minsk, 2018 g. / BNTU; redkol.: S. V. Haritonchik [i dr.]. : V 4 t. – Minsk, 2018. – T 1. – S. 229.

3. **Polozkov, YU.V.** Implementation of algorithm of multiple structure analysis of parts with cell structure by means of PY ANSYS/ Yu.V. Polozkov, V.V. Naprasnikov, I.V. Pavlovskij, E.A. YAKovec. // *Matematicheskie metody v tekhnike i tekhnologiyah* : sb. tr. mezhdunar. nauch. konf., Minsk, 26 - 30 oktyabrya 2020 g. / SPb.: Izd-vo Politekhn. un-ta ; pod obshch. red. A. A. Bol'shakova. – Minsk, 2020. – T. 12, CH. 3. – S. 37 – 43.

4. **Naprasnikov, V.V.** Singularity of applying ANSYS WB optimization algorithms for design of lightweight parts/ V.V. Naprasnikov, Yu.V. Polozkov, D.P. Kunkevich, A.N. Solov'ev. // *Matematicheskie metody v tekhnike i tekhnologiyah*. – 2021. – № 12. – S. 57 – 61.

5. Xie YM, Steven GP. A simple evolutionary procedure for structural optimization. *Comput Struct* 1993;49:885–96.

6. **Bendoe MP, Sigmund O.** Topology optimization—theory, methods and applications. Springer; 2003.

7. **Allaire G, Jouve F, Toader AM.** Structural optimization using sensitivity analysis and a level-set method. *J Comput Phys* 2004;194:363–93.

8. **Jikai Liu, Yongsheng Ma.** A survey of manufacturing oriented topology optimization methods. *Advances in Engineering Softwar*, August 2016, pp. 161-175.

9. A new hybrid topology optimization method coupling ESO and SIMP method / H. Jiao, Q. Zhou, S. Fan, Y. Li // *Lecture Notes in Electrical Engineering Proceedings of China. Modern Logistics Engineering*. – 2014. – P. 373–384.

10. **Liu Z., Korvink J., Huang R.** Structure topology optimization: fully coupled level set method via FEMLAB // *Structural and Multidisciplinary Optimization*. – 2005. – June. – Vol. 29, iss. 6. – P. 407–417.

11. **Temis YU.M., YAKushev D.A.** Optimization of parts and assemblies of torque converter // *Vestnik SGAU*. – 2011. – № 3-1. – S. 183–188.

12. **Rakovich A.G.** Automatization of design of fixtures for metal cutting machines. - M.: Mashinostroenie, 1980. - 136 s.

13. **Kovaleva I.L., Kunkevich D.P., Borodulya A.V., Chvan'kov A.A.** Feature based engineering design of lightweight parts// *Innovacionnye tekhnologii, avtomatizaciya i mekhatronika v mashino- i priborostroenii: materialy X mezhdunarodnoj nauchno prakticheskoy konf.* Minsk: Biznesofset, 2022 – p.49-50.

I. L. KOVALEVA, D. P. KUNKEVICH, V. V. NAPRASNIKOV, Y. V. POLOZKOV, A. A. CHVANKOV

TOPOLOGICAL OPTIMIZATION OF CONSTRUCTIVE SOLID GEOMETRY OF LIGHTWEIGHT STRUCTURES

Belarusian National Technical University

The work is devoted to solving the problem of topological optimization in the design of lightweight structures. The advantages and disadvantages of popular topological optimization methods are analyzed. One of the characteristic problems of all methods is the dependence of their results on grid partitioning. Besides, there is a necessity to recast the geometry model of the structure. To solve this problem, it is proposed to perform the formation of cavities based on the ESO method directly at the constructive solid geometry from the shape elements. The main stages of the proposed approach are described, the use of clustering to simplify the shape of the surfaces of the formed cavities is justified.

Keywords: *lightweight parts, topological optimization, solid structural geometry, structural shape elements,*



Ковалева Ирина Львовна, кандидат технических наук, доцент кафедры «Программное обеспечение информационных систем и технологий» БНТУ. Научные интересы - методы и алгоритмы оптимизации технических систем, машинное обучение, распознавание образов.

Irina L. Kovaleva, PhD, associate Professor of the Department of Software for Information technologies and systems of the Belarusian National Technical University. Her research interests focus on methods and algorithms of optimization and decision-making, pattern recognition and machine learning.

Email: ilkovaleva@bntu.by



Кункевич Дмитрий Петрович, кандидат технических наук, доцент кафедры «Программное обеспечение информационных систем и технологий» БНТУ. Научные интересы – автоматизация конструкторско-технологического проектирования и инженерного анализа механических систем.
Kunkevich Dmitry, PhD, associate Professor of the Department of Software for Information technologies and systems of the Belarusian National Technical University. His research interest focus on computer aided design and engineering of mechanical systems.

Email: kunkevich@bntu.by



Напрасников Владимир Владимирович, кандидат технических наук, доцент кафедры «Программное обеспечения информационных систем и технологий» БНТУ. Научные интересы – конечно-элементное моделирование, компьютерные средства инженерного анализа технических систем.
Naprasnikov Vladimir Vladimirovich, PhD, associate Professor of the Software Department of the Belarusian National Technical University. His research interest focus on finite-element computer aided engineering.

Email: vnaprasnikov@bntu.by



Полозков Юрий Владимирович, доцент, кандидат технических наук, заведующий кафедрой «Программное обеспечения информационных систем и технологий» БНТУ. Научные интересы - автоматизация проектирования объектов и процессов аддитивного производства, оцифровка описаний поверхностей объектов, информационные технологии в образовании.
Polozkov Yury Vladimirovich, PhD, head of the Department of Software for Information technologies and systems of the Belarusian National Technical University. His research interest focus on computer aided design and engineering of the objects of additive production, surfaces digitization, information technologies in the education.

Email: YuVPolozkov@bntu.by



Чваньков Андрей Александрович, инженер кафедры «Программное обеспечение информационных систем и технологий» БНТУ. Научные интересы – системы обработки данных.
Chvankov A., engineer of the Department of Software for Information technologies and systems. His research interests focus on data processing systems.

Email: povt@bntu.by