DOI: 10.15593/2224-9982/2018.53.04

УДК 629.7.012: 004.942

А.М. Хитрин¹, М.М. Ерофеева¹, В.Р. Туктамышев², А.А. Ширяев²

¹ АО «Редуктор-ПМ», Пермь, Россия

² Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Россия

ТОПОЛОГИЧЕСКАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ КОРПУСНЫХ ДЕТАЛЕЙ ВЕРТОЛЕТНОГО РЕДУКТОРА

Аддитивные технологии позволяют получать сложнопрофильные детали различной номенклатуры с высоким коэффициентом использования материала. Для изготовления деталей методами аддитивных технологий большое распространение получили порошки из алюминиевых сплавов за счет своей высокой технологичности. Для наиболее полного использования возможностей аддитивных технологий необходимо применять новые подходы к проектированию деталей, один из которых основан на принципах топологической оптимизации. На примере корпусных деталей редуктора проведена топологическая оптимизация их конструкций для снижения массы. В результате оптимизации получены конструкции отстроенных корпусных деталей уменьшенной на 19–42 % массы по сравнению с изначальной деталью. Анализ результатов, полученных в работе, показал возможность применения топологической оптимизации при проектировании корпусных деталей с учётом их изготовления методами аддитивных технологий с целью уменьшения массы и отстройки от критических частот колебаний. С целью снижения трудоемкости процесса изготовления корпусных деталей из литейных сплавов проработана возможность его замены на алюминиевый сплав AlSi10Mg, используемый в аддитивном производстве. В результате анализа установлено, что замена материала МЛ5 на AlSi10Mg целесообразна при снижении массы более чем на 33 %.

Ключевые слова: аддитивные технологии, топологическая оптимизация, корпусная деталь, сплав AlSi10Mg, сплав МЛ5, SIMP-метод, метод конечного элемента, оптимальное проектирование, вертолетный редуктор, снижение массы.

A.M. Hitrin¹, M.M. Erofeeva¹, V.R. Tuktamyshev², A.A. Shiryayev²

¹ Reductor-PM Corporation, Perm, Russian Federation

² Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

TOPOLOGICAL OPTIMIZATION OF HELICOPTER GEARBOX DETAIL PARTS

Additive technologies make it possible to obtain complex profiles of different nomenclature with a high coefficient of material use. For the manufacture of parts by the methods of additive technologies, powders made of aluminum alloys have become very popular due to their high processability. For the fullest use of the possibilities of additive technologies, it is necessary to apply new approaches to the design of parts, one of which is based on the principles of topological optimization. On the example of the hull parts of the reducer, topological optimization of their structures for reducing the mass is carried out. As a result of optimization, the structures of the rebuilt hull parts reduced by 19-42% of the mass were obtained in comparison with the original part. The analysis of the results obtained in the work showed the possibility of applying topological optimization in the design of hull details, taking into account their manufacturing methods of additive technologies in order to reduce the mass and detuning from the critical vibration frequencies. In order to reduce the laboriousness of the process of manufacturing body parts from casting alloys, the possibility of its replacement with AlSi10Mg aluminum alloy used in additive production has been worked out. As a result of the analysis it was established that the replacement of the ML5 material by AlSi10Mg is advisable with a weight reduction of more than 33%.

Keywords: Additive technologies, topological optimization, body part, AlSi10Mg alloy, ML5 alloy, SIMP-method, finite element method, optimal design, helical reducer, weight reduction

Введение

Проектирование облегченных изделий актуально во многих областях промышленности, где снижение массы основных силовых элементов означает увеличение полезной нагрузки (в аэрокосмической области), экономию материала при изготовлении, энергоэффективность (облегчение подвижных элементов различных установок). Топологическая оптимизация (ТО) является одним из самых быстрых и эффективных методов облегчения изделий при сохранении их прочностных и жесткостных характеристик.

В настоящее время интенсивно развиваются аддитивные методы изготовления деталей. Многие компании, такие как MTU, Boeing, Pratt & Whitney, General Electric, АО «ОДК Авиадвигатель», ОАО «ОКБ Сухого», ФГУП «НАМИ», всё более широко применяют детали, изготовленные с применением аддитивных технологий (АТ) [1]. Преимущества АТ: уменьшение расходов и времени производства, сокращение массы и числа деталей, а также возможность производства деталей при малых размерах партии [2–4] и способность производить детали с чрезвычайно сложной геометрией [5–11] и которые нельзя произвести традиционным способом.

Целью ТО является определение оптимального распределения материала в области проектирования при заданных нагрузках с удовлетворением критериев и ограничений оптимизации [4, 12–15]. В этом случае для расчёта используется метод конечных элементов, в котором каждому конечному элементу приписывается условная плотность, управляющая вкладом конечного элемента в глобальную матрицу жёсткости. Решением задачи ТО в данной постановке является распределение условной плотности в области проектирования. В качестве критериев и ограничений при топологической оптимизации могут выступать различные функции (и их сочетания), такие как, например, податливость или потенциальная энергия деформации, объём, перемещения, прочностные характеристики.

Для деталей авиационных двигателей задачей ТО может являться как минимизация объёма/массы при прочностных ограничениях, так и оптимизация других параметров с ограничениями по объёму.

В настоящее время активно ведутся работы по практическому применению топологической оптимизации. В качестве примеров можно привести работы [13–19]. Однако в большинстве случаев оптимизируются конструкции с плоскими гранями, для которых интерпретировать полученные результаты достаточно просто.

Топологическая оптимизация конструкции

Объекты оптимизации – корпусные детали редукторов. К данным деталям крепятся шестерни в сборе с подшипниками. В редуктор заливается масло. При работе шестерни и подшипники редукторов нагреваются, корпусные детали отводят тепло.

Под оптимизацией понимается снижение массы изделий с сохранением механических характеристик изделий, таких как прочность и устойчивость. При статических расчетах прочности минимально допустимый коэффициент запаса – 2,5, критерий устойчивости – отстройка собственных частот колебаний изделий от опасных критических частот, желательная отстройка – 20 %, как в докритическом, так и закритическом случае (минимальная отстройка – 5 %).

Используемые материалы при расчетах и их физические свойства представлены в табл. 1.

Таблица 1

Физические свойства материалов

Номера деталей	Свойства материала							
	Марка материала	Плотность, кг/м ³	Модуль упругости, ГПа	Коэффициент Пуассона	КЛТР, К ⁻¹	Теплоемкость, кДж/кг·°С	Коэффициент теплопроводности, Вт/м·К	Временное сопротивление разрыву σ_b , МПа не менее
1 (рис. 1, а, б)	МЛ5	1810	42	0,34	$26,8 \cdot 10^{-6}$	1050	65	226,0 (23,0)
2 (рис. 1, в)	АК6	2800	71	0,33	$21,4 \cdot 10^{-6}$	838	176	355,0 (36,0)
3 (рис. 1, г, д)	Д1ТКР	2790	74	0,33	$23 \cdot 10^{-6}$	920	127	355,0 (36,0)

С коэффициентом запаса 2,5 допустимый уровень напряжений для материалов МЛ5 – 90 МПа, АК 6 и Д1ТКР – 140 МПа.

Для решения задачи топологической оптимизации был выбран программный комплекс Catop. Исходные модели, нагрузки и ограничения деталей представлены на рис. 1.

Рис. 1. Нагрузки и ограничения

В параметрах оптимизации было задано снижение массы на 50–70 %. Для управления формой оптимальной топологии деталь № 1 была разделена на 3 тела. Результаты оптимизации для детали № 1 представлены на рис. 2.

Рис. 2. Топологическая оптимизация: *а* – оптимизируемые тела; *б, в* – результаты оптимизации

При создании оптимальной геометрии были построены твердые тела с различными толщинами и вырезами. На рис. 3 представлена оптимальная геометрия детали № 1. Для отметки 1 на рис. 3 толщина составляет 2 мм. Для отметки 2 толщина – 4 мм. Снижение массы составляет 20 %.

Рис. 3. Оптимальная геометрия: *а* – совмещение оптимальной геометрии в STL- и CAD-форматах; *б* – оптимальная CAD-геометрия

После построения геометрии проведен статистический расчет прочности и модальный расчет оптимизированных деталей (рис. 4).

Рис. 4. Результаты статического расчета прочности: *a*, *б* – деталь № 1; *в*, *г* – деталь № 2; *д*, *е* – деталь № 3

Получившиеся собственные частоты колебаний детали № 1 выше опасных критических частот: 50 Гц (ведущая шестерня), 33,7 Гц (ведомая шестерня), 1450 Гц (зубовая частота), и составляют 3170, 3350, 3365 Гц.

Для детали № 2 получились следующие собственные частоты (первые 10 частот): 561, 793, 1336, 1698, 1796, 2259, 2415, 2814, 3701, 3943 Гц.

Для детали № 3 – 90, 106, 112, 126, 145, 152, 154, 165, 311, 328 Гц.

На рис. 5 представлены исходные и оптимизированные модели деталей.

Рис. 5. Исходная и оптимизированная геометрии

Обсуждение результатов

Результаты проведенной оптимизации представлены в табл. 2, 3.

Рассматриваемые корпусные детали изготавливаются литьем из сплава МЛ5. Прорабатывается возможность их изготовления методом селективного лазерного плавления (SLM) из порошкового материала AlSi10Mg. Данный сплав выбран потому, что имеет похожий химический состав с литейным сплавом АК9, который также широко используется.

Таблица 2

Результаты топологической оптимизации. Масса

Номер детали	Исходная масса, г	Масса после оптимизации, г	Снижение массы, %
1	1600	1315	20
2	165	96	42
3	247	193	22

Таблица 3

Результаты топологической оптимизации. Напряжения

Номер детали	Напряжения в исходной детали, МПа	Напряжения в детали после оптимизации, МПа
1	40	20
2	0,1	0,1
3	5	5

В результате топологической оптимизации масса деталей снизилась от 20 до 42 %. Максимальные напряжения в оптимизированных деталях равны напряжениям в деталях до оптимизации.

Плотность магниевого сплава МЛ5 – 1810 кг/м³, алюминиевых сплавов AlSi10Mg/AK9 – 2680/2650 кг/м³. Поскольку вес детали из МЛ5 на треть легче алюминиевой, замена материала и технологии изготовления целесообразна при снижении массы исходной детали при оптимизации на более чем 33 %.

Механические свойства сплава AlSi10Mg на четверть выше, чем у сплава МЛ5. Также стоит рассмотреть возможность использования алюминиевого сплава с добавлением наноксидов, механические свойства (σ_b) которого выше на 50–300 %, чем у сплава без добавок [20].

Заключение

Результатом оптимизации является:

- снижение массы деталей от 20 до 42 %;
- замена магниевого сплава МЛ5 на алюминиевый AlSi10Mg в детали № 1 нецелесообразна;
- выполнена отстройка на 10–20 % от критических частот для детали № 1.

Библиографический список

1. Зленко М.А., Попович А.А., Мутылина И.Н. Аддитивные технологии в машиностроении. – СПб.: Изд-во политехн. ун-та, 2013. – 221 с.
2. Bionic lightweight design by laser additive manufacturing (LAM) for aircraft industry / C. Emmelmann, M. Petersen, J. Kranz, E. Wycisk // Proceedings of SPIE – The International Society for Optical Engineering. – 2011. – Vol. 8065. – Article number 80650L- 80650L-12. DOI: 10.1117/12.898525.
3. Brackett D., Ashcroft I., Hague R. Topology optimization for additive manufacturing // 22nd annual international solid freeform fabrication symposium. – 2011. – P. 348–362.
4. Seppälä J., Hupfer A. Topology optimization in structural design of a LP turbine guide vane: potential of additive manufacturing for weight reduction // ASME Turbo Expo 2014: Turbine technical conference and exposition. – 2014. – Vol. 7A. – P. 1–10. DOI:10.1115/GT2014-25637
5. Zhai Y., Lados D.A., LaGoy J.L. Additive manufacturing: making imagination the major limitation // JOM. – 2014. – Vol. 66(5). – P. 808–816.
6. Optimal topology for additive manufacture: a method for enabling additive manufacture of support-free optimal structures / M. Leary, L. Merli, F. Torti, M. Mazur, M. Brandt // Mater. Des. – 2014. – Vol. 63. – P. 678–690.
7. Feasible build orientations for self-supporting fused deposition manufacture: a novel approach to space filling tessellated geometries / M. Leary, M. Babaei, M. Brandt, A. Subic // Adv Mater. Res. – 2013. – Vol. 633. – P. 148–168.
8. Chahine G., Smith P., Kovacevic R. Application of topology optimization in modern additive manufacturing // Solid freeform fabrication symposium. – 2010. – P. 606–618.
9. Doubrovski Z, Verlinden J.C., Geraedts J.M. Optimal design for additive manufacturing: opportunities and challenges // ASME 2011 international design engineering technical conferences and computers and information in engineering conference. American Society of Mechanical Engineers. – 2011. – P. 635–646.

10. Additive manufacturing integration with topology optimization methodology for innovative product design / T. Primo, M. Calabrese, A. Del Prete, A. Anglani // *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* – 2017. – Vol. 93. – P. 467–479. DOI: 10.1007/s00170-017-0112-9
11. Zhu J.H., Zhang W.H., Xia L. Topology Optimization in Aircraft and Aerospace Structures Design // *Arch Computat Methods Eng.* – 2016. – Vol. 23. – P. 595–622. DOI: 10.1007/s11831-015-9151-2
12. Болдырев А.В., Комаров В.А. Автоматизация конструирования летательных аппаратов: учеб. пособие. – Самара: Изд-во СГАУ, 2012. – 123 с.
13. Сысоева В.В., Чедрик В.В. Алгоритмы оптимизации топологии силовых конструкций // *Учёные записки ЦАГИ.* – 2011. – Т. 42, No. 2. – С. 91–102.
14. Topology-optimized intermediate casing of aero engine and comparative evaluation of titanium and composite architecture in terms of load capacity and weight reduction / M. Kober, T. Klauke, A. Kühhorn, O. Lenk // *ASME Turbo Expo 2008: Power for land, sea and air.* – 2008. – Vol. 5. – Iss. PART A. – P. 69–79. DOI: 10.1115/GT2008-50644
15. Rozvany G.I.N. A critical review of established methods of structural topology optimization // *Structural and Multidisciplinary Optimization.* – 2009. – Vol. 37, № 3. – P. 217–237. DOI: 10.1007/s00158-007-0217-0
16. Боровиков А.А., Тененбаум С.М. Топологическая оптимизация переходного отсека КА // *Аэрокосмический научный журнал. МГТУ им. Н.Э. Баумана.* – 2016. – № 5. – С. 16–30. DOI: 10.7463/aersp.0516.0847780
17. Васильев Б.Е., Магерамова Л.А. Анализ возможности применения топологической оптимизации при проектировании неохлаждаемых рабочих лопаток турбин // *Вестн. Самар. ун-та. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение.* – 2015. – Т. 14, № 3. – Ч. 1. – С. 139–147. DOI: 10.18287/2412-7329-2015-14-3-139-147
18. Tomlin M., Meyer J. Topology Optimization of an Additive Layer Manufactured (ALM) Aerospace Part // *The 7th Altair technology conference.* – 2011. – 9 p.
19. Computational Methodology for Optimal Design of Additive Layer Manufactured Turbine Bracket / H. Levatti [et al.] // *Conference Paper.* – Cardiff, 2014. – 13 p.
20. Агуреев Л.В. Разработка способа получения алюмокомпозитов высокой прочности модифицированием микродобавками порошков наноксидов: дис. ... канд. техн. наук (05.16.06) / МИСиС. – М., 2015. – 153 с.

References

1. Zlenko M.A., Popovich A.A., Mutyulina I.N. Additivnye tekhnologii v mashinostroenii [Additive technologies in mechanical engineering]. St. Petersburg, Izdatelstvo politekhnicheskogo universiteta, 2013, 221 p.
2. Emmelmann C., Petersen M., Kranz J., Wycisk E. Bionic lightweight design by laser additive manufacturing (LAM) for aircraft industry. *Proceedings of SPIE – The International Society for Optical Engineering*, 2011, Vol. 8065, Article number 80650L- 80650L-12. DOI: 10.1117/12.898525.
3. Brackett D., Ashcroft I., Hague R. Topology optimization for additive manufacturing. 22nd annual international solid freeform fabrication symposium, 2011, pp. 348-362.
4. Seppälä J., Hupfer A. Topology optimization in structural design of a LP turbine guide vane: potential of additive manufacturing for weight reduction. *ASME Turbo Expo 2014: Turbine technical conference and exposition*, 2014, Vol. 7A, pp. 1-10. DOI: 10.1115/GT2014-25637
5. Zhai Y., Lados D.A., LaGoy J.L. Additive manufacturing: making imagination the major limitation. *JOM*, 2014, Vol. 66(5), pp. 808-816.
6. Leary M., Merli L., Torti F., Mazur M., Brandt M. Optimal topology for additive manufacture: a method for enabling additive manufacture of support-free optimal structures. *Mater Des*, 2014, Vol. 63, pp. 678-690.
7. Leary M., Babaee M., Brandt M., Subic A. Feasible build orientations for self-supporting fused deposition manufacture: a novel approach to space filling tessellated geometries. *Adv. Mater Res*, 2013, Vol. 633, pp. 148-168.
8. Chahine G., Smith P., Kovacevic R. Application of topology optimization in modern additive manufacturing. *Solid freeform fabrication symposium*, 2010, pp. 606-618.
9. Doubrovski Z., Verlinden J.C., Geraedts J.M. Optimal design for additive manufacturing: opportunities and challenges. *ASME 2011 international design engineering technical conferences and computers and information in engineering conference.* American Society of Mechanical Engineers, 2011, pp. 635-646.

10. Primo T., Calabrese M., Del Prete A., Anglani A. Additive manufacturing integration with topology optimization methodology for innovative product design. *Int J Adv Manuf Technol*, 2017, Vol. 93, pp. 467-479. DOI: 10.1007/s00170-017-0112-9.
11. Zhu JH, Zhang WH, Xia L. Topology Optimization in Aircraft and Aerospace Structures Design. *Arch Computat Methods Eng*. 2016, Vol. 23, P. 595–622. DOI: 10.1007/s11831-015-9151-2.
12. Boldyrev A.V., Komarov V.A. Avtomatizatsiya konstruirovaniya letatel'nykh apparatov: uchebnoe posobie [Automation of the design of aircraft: electronic training. allowance]. Samara, Samarskiy gosudarstvennyy aerokosmicheskiy universitet, 2012, 123 p.
13. Sysoeva V.V., Chedrik V.V. [Algorithms for optimizing the topology of power structures]. *TsAGI Science Journal*, 2011, Vol. 42, no. 2, pp. 91-102.
14. Kober M., Klauke T., Kühhorn A., Lenk O. Topology-optimized intermediate casing of aero engine and comparative evaluation of titanium and composite architecture in terms of load capacity and weight reduction. ASME Turbo Expo 2008: Power for land, sea and air, 2008, Vol. 5, Iss. PART A, pp. 69-79. DOI: 10.1115/GT2008-50644.
15. Rozvany G.I.N. A critical review of established methods of structural topology optimization. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 2009, Vol. 37, no. 3, pp. 217-237. DOI: 10.1007/s00158-007-0217-0
16. Borovikov A.A., Tenenbaum S.M. Topologicheskaya optimizatsiya perekhodnogo otseka KA [Topological optimization of the spacecraft transfer compartment]. *Aerospace scientific journal*. MSTU them. N.E. Bauman. 2016, no. 05, pp. 16-30. DOI: 10.7463/aersp.0516.0847780.
17. Vasilev B.E., Magerramova L.A. Analiz vozmozhnosti primeneniya topologicheskoy optimizatsii pri proyektirovanii neokhlazhdayemykh rabochikh lopatok turbin [Analysis of the possibility of applying topological optimization in the design of uncooled turbine blades]. *VESTNIK of Samara University. Aerospace and Mechanical Engineering*, 2015, Vol. 14, no. 3, PART 1, pp. 139-147. DOI: 10.18287/2412-7329-2015-14-3-139-147.
18. Tomlin M., Meyer J. Topology Optimization of an Additive Layer Manufactured (ALM) Aerospace Part. The 7th Altair Technology Conference, 2011, 9 p.
19. Levatti H.U., Innocente M.S., Morgan D.H., Cherry J., Lavery N.P., Mehmood S., Cameron I., Sienz J. Computational Methodology for Optimal Design of Additive Layer Manufactured Turbine Bracket. Conference Paper. Cardiff, 2014, 13 p.
20. Agureev L.V. Razrabotka sposoba polucheniya alyumokompozitov vysokoy prochnosti modifitsirovaniyem mikrodobavkami poroshkov nanooksidov. Ph. D. Diss. [Development of a method for obtaining high-strength aluminum composites by modifying with micro additives powders of nano-oxides Ph. D. Diss.]. Moscow, 2015. 153 p.

Об авторах

Хитрин Антон Михайлович (Пермь, Россия) – старший инженер-технолог АО «Редуктор-ПМ» (614010, г. Пермь, ул. Героев Хасана, д. 105, e-mail: Xitrinam_87@mail.ru).

Ерофеева Мария Михайловна (Пермь, Россия) – ведущий специалист по новым технологиям АО «Редуктор-ПМ» (614010, г. Пермь, ул. Героев Хасана, д. 105, e-mail: erofeeva@reductor-pm.com).

Туктамышев Виталий Рафаилович (Пермь, Россия) – кандидат технических наук, доцент кафедры «Инновационные технологии машиностроения» ФГБОУ ВО ПНИПУ (614013, г. Пермь, ул. Акад. Королева, д. 15, e-mail: tuktvr@gmail.com).

Ширяев Алексей Александрович (Пермь, Россия) – аспирант кафедры «Динамика и прочность машин» ФГБОУ ВО ПНИПУ (614013, г. Пермь, ул. Акад. Королева, д. 15, e-mail: alex.shiryaev.pstu@gmail.com).

About the authors

Anton M. Hitrin (Perm, Russian Federation) – Senior Engineer-Technologist, Reductor-PM Corporation (105, Geroev Hasana st., Perm, 614010, Russian Federation, e-mail: Xitrinam_87@mail.ru).

Mariya M. Erofeeva (Perm, Russian Federation) – Leading Specialist in New Technologies, Reductor-PM Corporation (105, Geroev Hasana st., Perm, 614010, Russian Federation, e-mail: erofeeva@reductor-pm.com).

Vitaliy R. Tuktamyshev (Perm, Russian Federation) – CSc in Technical Sciences, Associate Professor, Department of Innovative Technologies of Mechanical Engineering, Perm National Research Polytechnic University (15, Akademika Koroleva st., Perm, 614013, Russian Federation, e-mail: tuktvr@gmail.com).

Aleksey A. Shiryaev (Perm, Russian Federation) – PhD Student, Department of Dynamics and Strength of Machines, Perm National Research Polytechnic University (15, Akademika Koroleva st., Perm, 614013, Russian Federation, e-mail: alex.shiryaev.pstu@gmail.com).