

ТОПОЛОГИЧЕСКАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ ДЛЯ АДДИТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

В. К. Громова¹, С. Ю. Громов²

¹vika.zhilkina.1999@mail.ru, ²gromov.svyatoslav@gmail.com

ФГБОУ ВО «Уфимский государственный авиационный технический университет» (УГАТУ)

Аннотация. В данной статье рассматриваются проблемы аддитивного производства для авиапромышленности. Рассмотрена топологическая оптимизация деталей на примере детали типа «Кронштейн». Спроектирована одна из опор подредукторной рамы для проведения топологической оптимизации детали типа «Кронштейн» и дальнейших проверочных прочностных расчетов. Были получены и обработаны результаты расчетов изначальной и оптимизированной детали.

Ключевые слова: аддитивное производство; топологическая оптимизация; авиастроение.

ВВЕДЕНИЕ

Аддитивное производство (далее АП) – группа технологических методов производства изделий и прототипов, основанных на поэтапном формировании изделия путем добавления материала на основу (платформу или заготовку). Принципиальное отличие от традиционных технологий механической обработки заключается именно в том, что детали создаются не путем удаления материала, а наоборот, добавлением материала.

В летательных аппаратах широко применяются алюминиевые и титановые сплавы из-за относительно низкой плотности, высокой усталостной и коррозионной прочности. Наиболее часто используемым сплавом для аддитивного производства является сплав Ti-6Al-4V (аналог ВТ6) (рис. 1) [1].



Рис. 1. Скоба, сертифицированная FAA, созданная Norsk Titanium

Исходя из приоритета безопасности в авиации, возможность производства сплошной металлической детали является главной задачей, рассматриваемая для процессов АП. Было проведено множество исследований с применением различных методов АП [2-6].

Несмотря на то, что в других отраслях производства, таких как, например, автомобилестроение, технологии аддитивного производства широко распространены, в авиастроении дела обстоят иначе. Безопасность в авиации находится на первом месте. А поэтому необходимо решить ряд проблем, чтобы доказать, что аддитивное производство достаточно безопасно.

ПРОБЛЕМЫ АДДИТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

Постоянство механических свойств. В разработке и производстве ЛА постоянство механических параметров очень важно. Материалы, созданные различными методами аддитивного

производства, обладают различными значениями прочности, а потому не всегда могут применяться в любой ответственной детали. Также, анизотропная природа аддитивного производства означает различие механических свойств в различных направлениях.

Исследование дефектов и усталости. Нет технологии аддитивного производства, которая бы давала 100% гарантию, что в изделии нет дефектов. Дефекты, такие как: пористость, пустоты, трещины и включения, остаются проблемами производства, ограничивая такой ключевой параметр как усталостная прочность. Для проверки детали на внутренние дефекты используются методы, широко применяемые для проверки дефектов и в деталях, произведенных классическими способами механической обработки, например ультразвуковой метод. Проводится множество исследований дефектов, усталостной прочности и их взаимодействия, но до сих пор нет заключения о методах контроля или принятых стандартов дефектных деталей. Усталостная прочность – ключевой параметр, напрямую определяющий ресурс и возможность отказа изделия.

Контроль изделия. При производстве созданные детали проходят различные уровни контроля отклонений форм, размеров и расположения поверхностей. Для кривых и поверхностей, расположенных в двух измерениях провести подобный контроль не составляет труда. Однако для изделий, созданных с помощью аддитивного производства, имеют места сложные трехмерные кривые и криволинейные поверхности, которые невозможно измерить. На данный момент подобная проблема решается при помощи 3D-сканеров, которые сканируют изделие и сверяют полученные результаты с цифровой моделью.

Сертификация. Любое изделие, установленное на коммерческий ЛА должно быть проверено и сертифицировано соответствующими органами. Однако, для сертификации, особенно для силовых элементов ЛА, деталей, созданных с помощью аддитивного производства, необходимо намного больше испытаний, чем на растяжение и сжатие, таких как: испытание на сдвиг, удар, ползучесть и все эти испытания необходимо проводить множество раз, для того, чтобы изделие было установлено на ЛА. Также, из-за анизотропии необходимо производить испытания в различных направлениях изделия, что увеличивает время сертификации в 2-3 раза, по сравнению с традиционными методами механической обработки.

ТОПОЛОГИЧЕСКАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ

Уменьшение массы изделий, создаваемых с помощью аддитивного производства, достигается путем топологической оптимизации первоначальной детали. Топологическая оптимизация – это процесс изменения конструкции, структуры детали и ее варьирующихся параметров при заданном критерии оптимальности с сохранением или улучшением ее функционала (рис.2) [7]. При этом геометрия детали может существенно измениться, что не позволит изготовить ее методами механообработки, поэтому подобная оптимизация хороша как раз для аддитивного производства.



Рис. 2. Топологическая оптимизация кронштейна

В вертолете насчитывается до 100 кронштейнов. Уменьшив массу каждого на несколько процентов позволит получить суммарный выигрыш по массе.

В ходе данной работы был спроектирован кронштейн подредукторной рамы среднего вертолета соосной схемы, предназначенный для крепления редуктора к силовому каркасу вертолета. Прототипом стал вертолет Ка-32 (рис. 3).



Рис. 3. Опора подредукторной рамы

Для прочностного расчета была собрана одна из 4 опор каркаса подредукторной рамы. Приложена нагрузка с учетом необходимого запаса прочности и перегрузки, которую должен выдерживать вертолет. Расчетный случай был выбран следующий: режим висения вертолета, при котором весь вертолет, за исключением редуктора, колонки и несущих винтов, прикладывает нагрузку, равную своему весу, к опоре.

Была проведена топологическая оптимизация кронштейна с уменьшением массы на 40% с помощью Autodesk Inventor. Окончательно получена деталь, масса которой меньше исходной на 25% (рис. 4). Уменьшение напряжений в конструкции объясняется удалением части концентраторов напряжений, которые присутствуют в исходной детали. После этого был проведен проверочный расчет оптимизированной детали, результаты которого представлены ниже (рис. 5).

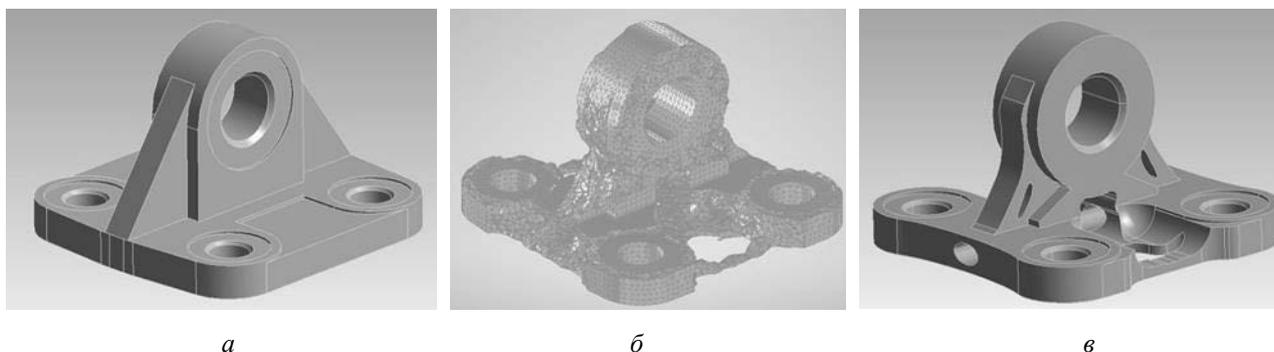


Рис. 4. Процесс топологической оптимизации:
а – исходная деталь, вес 1 кг; *б* – оптимизация, предложенная программой;
в – оптимизированная деталь, вес 0,75 кг



Рис. 5. Результаты расчетов исходной и оптимизированной детали

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной статье рассмотрены проблемы аддитивного производства, представлены результаты разработки топологически оптимизированной детали, а также результаты расчетов стандартной и оптимизированной детали. По результатам расчетов можно сделать вывод, что в новой детали при тех же нагрузках возникают меньшие напряжения. Это связано с тем, что были удалены концентраторы напряжений исходной детали.

Данный метод проектирования позволяет существенно уменьшить вес конструкций, что является важнейшим параметром в авиационной отрасли. Однако вместе с этим очень важным критерием является надежность, поэтому необходимо искать пути решения нынешних проблем АП.

Одним из таких путей является 3D-сканирование напечатанной детали. Этим методом проверяется соответствие наружной конфигурации произведенной детали ее модели-источнику.

Для проверки детали на внутренние дефекты используются методы, широко применяемые для проверки дефектов и в деталях, произведенных классическими способами механической обработки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Davies S.**, Norsk Titanium closes significant investment to extend Rapid Plasma Deposition development [Электронный ресурс]. URL: <https://www.tctmagazine.com/additive-manufacturing-3d-printing-news/norsk-titanium--investment-rapid-plasma-deposition> (дата обращения 12.05.2021).
2. **P. Edwards, A. O'connor, M. Ramulu**, Electron beam additive manufacturing of titanium components: properties and performance, *Journal of Manufacturing Science and Engineering* 135(6) (2013) 061016.
3. **S. Lu, H. Tang, Y. Ning, N. Liu, D. StJohn, M. Qian**, Microstructure and mechanical properties of long Ti-6Al-4V rods additively manufactured by selective electron beam melting out of a deep powder bed and the effect of subsequent hot isostatic pressing, *Metallurgical and Materials Transactions A* 46(9) (2015) 3824-3834.
4. **X. Tan, Y. Kok, Y.J. Tan, M. Descoins, D. Mangelinck, S.B. Tor, K.F. Leong, C.K. Chua**, Graded microstructure and mechanical properties of additive manufactured Ti-6Al-4V via electron beam melting, *Acta Materialia* 97 (2015) 1-16.
5. **H.K. Rafi, N. Karthik, T.L. Starr, B.E. Stucker**, Mechanical property evaluation of Ti-6Al-4V parts made using electron beam melting, *Proceedings of the Solid Freeform Fabrication Symposium*, 2012, pp. 526-535.
6. **H. Gong, K. Rafi, H. Gu, G.J. Ram, T. Starr, B. Stucker**, Influence of defects on mechanical properties of Ti-6Al-4V components produced by selective laser melting and electron beam melting, *Materials & Design* 86 (2015) 545-554.
7. **Cheng T., Firmo E.**, Immelt Updates Investors On GE's Digital Industrial Strategy [Электронный ресурс]. URL: <https://www.ge.com/news/reports/immelt-updates-investors-ge-digital-industrial-strategy> (дата обращения 29.04.2021).

ОБ АВТОРАХ

ГРОМОВА Виктория Константиновна, магистрант 1 курса каф. авиационных двигателей УГАТУ, степень бакалавра по направлению «Авиастроение», профиль «Технология производства вертолетов» (УГАТУ, 2021).

ГРОМОВ Святослав Юрьевич, магистрант 1 курса каф. авиационных двигателей УГАТУ, степень бакалавра по направлению «Авиастроение», профиль «Технология производства вертолетов» (УГАТУ, 2021).

METADATA

Title: Topological optimization for additive technologies.

Authors: V. K. Gromova¹, S. Y. Gromov²

Affiliation: Ufa State Aviation Technical University (UGATU), Russia.

Email: ¹ vika.zhilkina.1999@mail.ru, ² gromov.svyatoslav@gmail.com

Language: Russian.

Source: *Molodezhnyj Vestnik UGATU* (scientific journal of Ufa State Aviation Technical University), no. 2 (25), pp. 25-28, 2021. ISSN 2225-9309 (Print).

Abstract: This article discusses the problems of additive manufacturing for the aircraft industry. Topological optimization of parts is considered on the example of a part of the "Bracket" type. One of the supports of the sub-gear frame has been designed for topological optimization of the "Bracket" type part and further verification strength calculations. The results of calculations of the original and optimized part were obtained and processed.

Key words: topological optimization; additive manufacturing; aircraft industry.

About authors:

GROMOVA, Victoria Konstantinovna, 1st year master's student of the department. aircraft engines USATU, bachelor's degree in "Aircraft engineering", profile "Helicopter production technology" (USATU 2021).

GROMOV, Svyatoslav Yurievich, 1st year master's student of the department. aircraft engines USATU, bachelor's degree in "Aircraft engineering", profile "Helicopter production technology" (USATU 2021).