

СОЗДАНИЕ АДДИТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ С УЧЕТОМ УСТАЛОСТНОГО ПОВЕДЕНИЯ МАТЕРИАЛА В АВИАЦИОННОМ ИНЖИНИРИНГЕ

© 2018 В.А. Кудряшов¹, А.А. Лапышев²

¹ АО «Авиастар-СП», г. Ульяновск

² Ульяновский государственный технический университет

Статья поступила в редакцию 01.11.2018

В статье проанализированы наиболее успешные результаты применения аддитивных технологий, отражены достоинства на существующем этапе развития. Постановка задачи формулируется следующим образом: необходимо найти оптимальные параметры технологического процесса при производстве деталей с использованием аддитивных технологий, используемых в конструкции ближне-, средне- и дальнемагистрального самолёта. В качестве критерия оптимизации в данном исследовании рассматривались оптимальный технологический процесс по ресурсам времени, материальным затратам, масса конструкции при разных уровнях серийности производства. Численное моделирование и оптимизация параметров рабочего процесса проводилась в САЕ-системе Nastran. Для каждой из комбинаций оптимизируемых переменных технологического процесса определялись на основе численного моделирования. Анализ результатов оптимизации показал, что рост параметров рабочего технологического процесса приводит к расширению области локально-оптимальных параметров. При оптимальных параметрах рабочего технологического процесса можно ожидать оптимизации стоимости работ до 30 %

Ключевые слова: Аддитивные технологии, усталостное поведение материала, моделирование, оптимизация, параметры.

Аддитивные технологии (далее АМ) с каждым днем находят все больше применений во всех отраслях промышленности, в том числе в авиации. Одним из первопроходцев в данной области является компания 3D Systems. Они с 1986 года начали использовать коммерческие стереолитографические машины - SLA.

Использование технологии послойного нанесения материала и спекания при помощи лазерного луча или плазмы позволяет экономить материал при изготовлении деталей сложной формы, оптимизировать соотношение исходного материала к материалу готовой детали самолета. Аддитивные технологии позволяют снизить соотношение исходного материала к обработке к сложной детали в составе самолета на порядок. с традиционных 20:1 до 1,5- 2:1. Что при использовании редких и дорогостоящих материалов оказывает существенное влияние на выбор технологии получения детали [1].

Следует выделить основные преимущества аддитивных технологий:

1. Уменьшение количества деталей в сборках изделия, изготовление деталей со сложными внутренними каналами и полостями;

2. Оптимизация затрат при мелкосерийном

производстве за счет сокращения времени на освоение продукции;

3. Получение деталей с малым припуском;

4. Отсутствие необходимости в изготовлении прессформ.

Но кроме очевидных достоинств аддитивные технологии содержат и значительные недостатки:

1. Высокая стоимость исходного материала (от 200 долларов США за килограмм);

2. Повышенные требования к качеству порошка: сферическая форма, размер элементов $\leq 40-100$ мкм;

3. Высокие остаточные напряжения в связи с разницей температур детали и наплавляемого слоя;

4. Низкая дефектобезопасность в связи с наличием пор в детали;

5. Существующие методы неразрушающего контроля не подходят для контроля изделий, полученных при помощи аддитивных технологий;

6. Качество поверхности в большинстве случаев требует механической обработки;

7. Ограничения размеров создаваемой детали (габариты типовой камеры построения: $800 \times 400 \times 500$ мм);

8. Недостаточная стандартизация, ограниченная и сложная сертификация (аттестация всего спектра сырья, параметров лазера/электронного пучка, способов перемещения пучка);

9. Малые производственные мощности; сложности с воспроизводством процесса.

Кудряшов Владимир Александрович, руководитель проекта. E-mail: kudryashov-vl@mail.ru

Лапышев Алексей Александрович, старший преподаватель кафедры «Самолетостроение».

E-mail: alex.lapishev@yandex.ru



Рис. 1. Соотношение уровня развития аддитивных технологий в различных сферах промышленности

Тем не менее, цифровое проектирование деталей и использование аддитивных технологий дает возможность снизить массу деталей за счет использования возможностей получения тонкостенных переходов внутри элементов агрегатов.

Следует выделить основные отличия среди методов аддитивных технологий по которым производится синтез:

- методы построения слоя (Bed Deposition, Direct Deposition);
- методы закрепления слоя;
- фракция материала.

В машиностроительных отраслях наиболее распространенными аддитивными технологиями являются: SLA, SLS, SLM (DMP), DLP, Poly-Jet (MJM), FDM, Ink-Jet (CJP).

Для увеличения объемов серийного производства, необходимо снизить затраты аддитивного производства для успешного конкурентирования с традиционными видами производства посредством выпуска более крупных партий. При этом, при производстве большого количества деталей следует определить и контролировать экономический баланс.

Следует отметить, что компанией Norsk Titanium AS, было напечатано 1300 образцов деталей для испытаний. Было установлено, что образцы соответствуют требованиям и могут быть использованы для установки в изделия применяемые в аэрокосмической промышленности, при этом в среднем срок изготовления деталей оптимизируется в 2 раза. Командой из университета

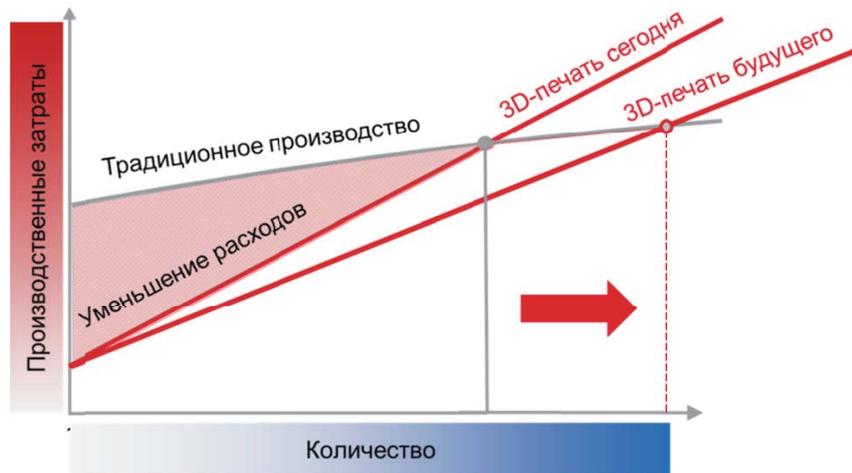


Рис. 2. Определение рентабельности производства при применении аддитивных технологий



Рис. 3. Опыт изготовления детали при помощи технологии WAAM (Cranfield совместно с компанией BAE Systems)

Cranfield совместно с компанией BAE Systems, для компании Boeing, была напечатана одна из самых длинных в настоящее время деталей из сплава алюминия длиной 6 метров, весом 300 кг. Использование технологии WAAM путем наплавления металла проволокой с использованием сварочного устройства позволило изготовить большие металлические детали с высокой скоростью.

В условиях мелкосерийного производства изготовление оснастки традиционными методами является дорогостоящим. При этом, при возникновении потребности в изготовлении оснастки методом литья, повысятся затраты на хранение. При широком диапазоне номенклатуры деталей возникают большие производственные затраты, связанные с хранением. Традиционные методы оказываются чрезвычайно затратными по времени.

При изготовлении оснастки традиционным методом из алюминиевых сплавов время изготовления составит в среднем 3-4 недели. При изготовлении пресс-формы для литья под давлением возникает необходимость изменения конструкции стандартных металлических

пресс-форм, параметров формования и длительности производственного цикла. Ориентировочная стоимость одного приспособления – 100000 рублей. При изготовлении приспособления методом прямого выращивания по полиамидной технологии время изготовления составит в среднем 2-3 дня, при этом стоимость одного приспособления составит в среднем 25000 рублей. Оценка эксплуатационных характеристик изделий, полученных методом литья под давлением, производилась на машинах весом 50-100 тонн. На срок службы оснащения влияют характеристики материала.

Raytheon Company использует технологию Quick Cast для изготовления прототипов корпусов тактических ракет, что позволяет быстро вносить необходимые уточнения в конструкцию изделий. При этом, использование технологии SLA с использованием методов Quick Cast для литья на фоне меньшего времени изготовления по сравнению с традиционными методами и высокой точностью крупногабаритных компонентов сборочных единиц позволяет выполнять работы в автономных условиях.



Рис. 4. Примеры деталей, изготовленных из стекловолокно+ПОМ, стекловолокно+ПК



Рис.5. Использование технологии SLA для точного изготовления крупногабаритных изделий

Технология SLA позволила делать деталь из нескольких элементов путем соединения их с помощью фотополимерной смолы, дающей экономию по сравнению с традиционными технологиями фрезерования, в среднем 2700 долларов США. При этом, было уменьшено количество сборочных частей. При изготовлении 20 000 изделий, экономия составила 54 000 000 долларов США. Ежемесячная производственная программа Raytheon Company по изготовлению моделей на основе технологии QuickCast в среднем 560 машино-часов. Raytheon Company выполняла изготовление пресс-форм при подготовке производства самолета Cessna. Впускной патрубок был изготовлен по технологии SLA, обклеен стеклотканью, окрашен и установлен на самолет Cessna для последующих летных испытаний.

При помощи аддитивных технологий возможно изготовление индивидуальных элементов интерьера. В оригинальном исполнении приборная панель кабины Boeing 767 состояла более чем из 800 частей. При использовании аддитивных технологий была произведена оптимизация до 11 литых деталей.

На основе оснащения с использованием аддитивных технологий Stratasys освоен процесс выкладки композиционных материалов. Освоено изготовление из растворяемого материала подложки сложных удаляемых сердечников

каркаса для намотки армирующих материалов с пропиткой связующим веществом или выкладки препрегов. Материал Ultem 9085, Ultem 1010 используется для выкладки композиционных материалов.

Использование AM технологий позволяет изготавливать пресс-формы со сложными внутренними каналами охлаждения. Возможно создание каналов охлаждения произвольной формы в отличие от традиционных методов механической обработки.

Аддитивные технологии позволяют обеспечивать экономию материала по массе изделий до 2-3 раз при сохранении всех прочностных свойств конструкции за счет топологической оптимизации конструкции. Задача заключается в получении конструкции с аналогичными или повышенными прочностными свойствами при оптимизации материалоемкости, увеличении грузоподъемности. Получаемую конструкцию невозможно сделать традиционными методами механической обработки.

На рис.10 представлена переборка, отделяющая пассажирский салон от служебного отсека на самолетах типа Airbus A320. Переборка для установки откидных кресел бортпроводников, созданная с помощью аддитивных технологий на 47% легче (около 30 кг) существующих аналогов, сохраняет при этом необходимую проч-

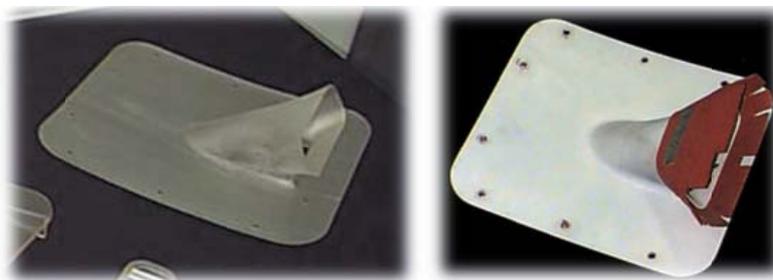


Рис. 6. Впускной патрубок (Cesna): слева выращенная деталь; справа готовая деталь для установки

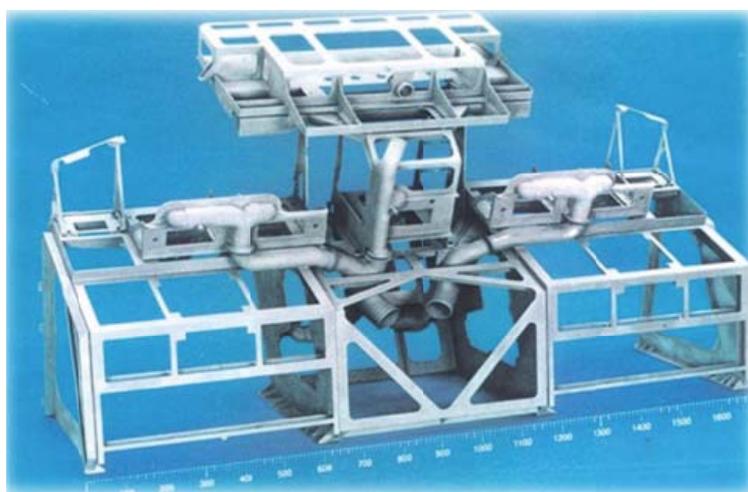


Рис. 7 Кабина Boeing 767

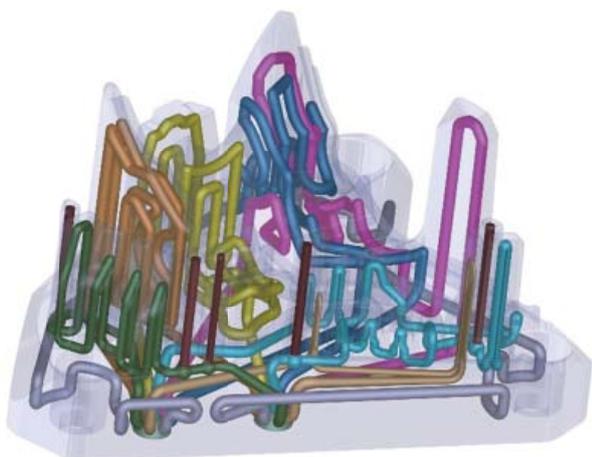


Рис. 8. Схема расположения каналов охлаждения в пресс-форме

ность. При монтаже переборки на существующий парк самолетов типа A320, возможна оптимизация эмиссии углекислого газа на 415 000 тонн в год. Для аддитивного производства

переборки Airbus и Autodesk использовали сплав «Scalmalloy». Сплав обладает высокой прочностью и модулем упругости на разрыв. Данный проект на этапе сертификационных испытаний.

На рис. 11 представлен один из результатов работы группы ученых исследовательского подразделения Европейского аэрокосмического и оборонного концерна (EADS Innovation Works), участвующих в строительстве самолетов Airbus. Облегченный кронштейн, изготовленный с помощью 3D-печати сложной детали шасси максимальным габаритным размером до 350 мм. По традиционной технологии кронштейн изготавливается путем фрезерования из цельного блока заготовки из титанового сплава.

ПАО «ОДК-Сатурн» совместно с ФГУП ВИАМ инициировало работы по паспортизации жаропрочного кобальтового суперсплава отечественного производства, для технологии послойного синтеза на подложке. Были выполнены работы по корректировке параметров качества (гранулометрический состав, морфология, текучесть МПК, содержание посторонних частиц, насып-

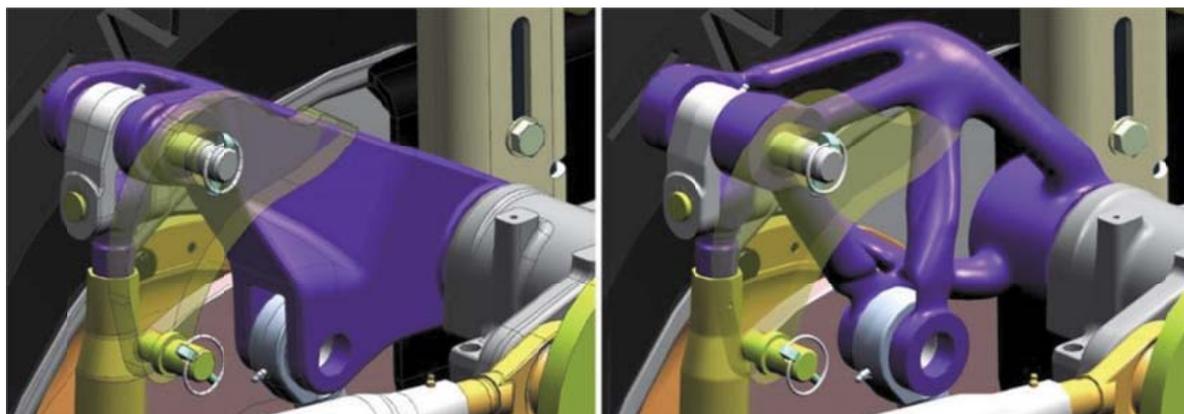


Рис. 9. Переборки топологического дизайна кронштейна кинематического механизма двери самолета

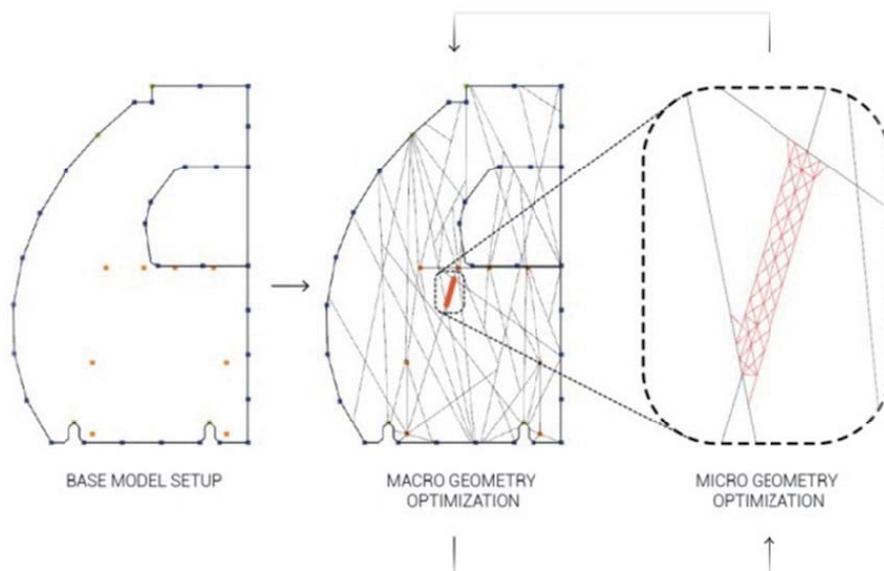


Рис. 10. Топологическая переборка перегородки между пассажирским и служебным отсеком Airbus A320



Рис. 11. Изготовление облегченного кронштейна из титанового сплава с использованием аддитивных технологий

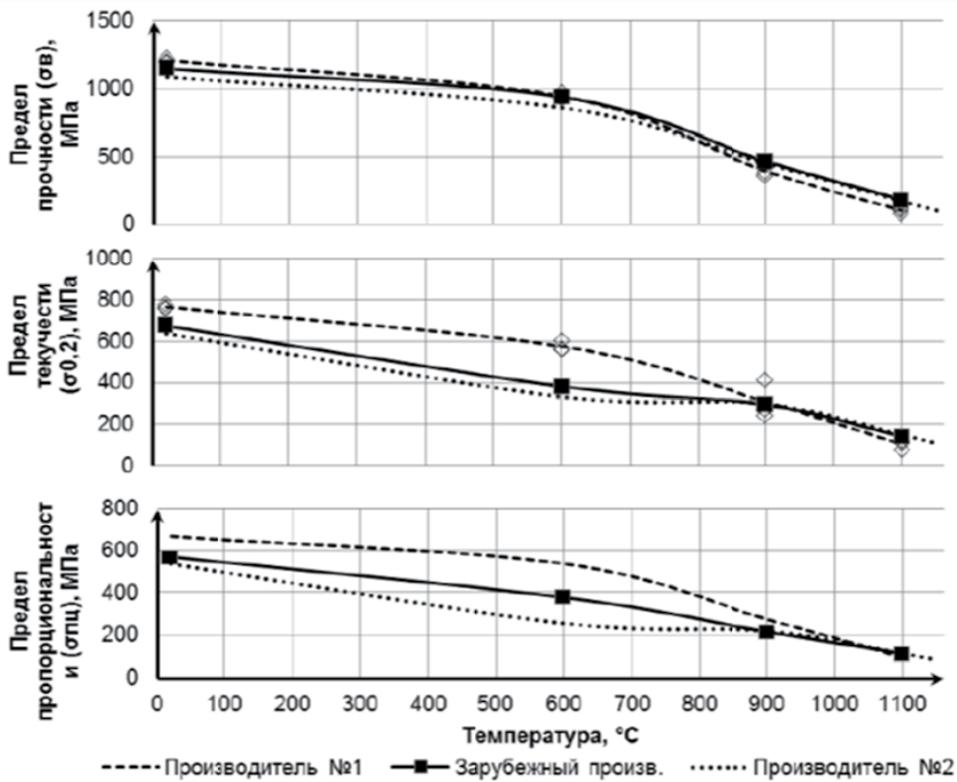


Рис. 12. Результаты испытаний синтезированного материала

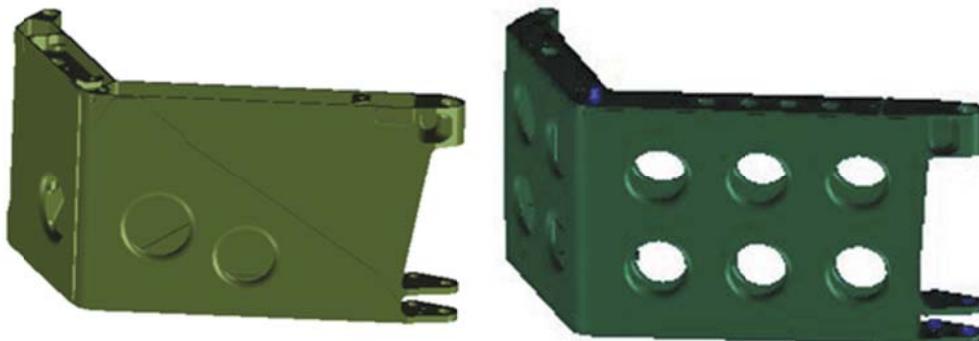


Рис. 13. Рычаг навески служебной двери самолета до оптимизации, после оптимизации

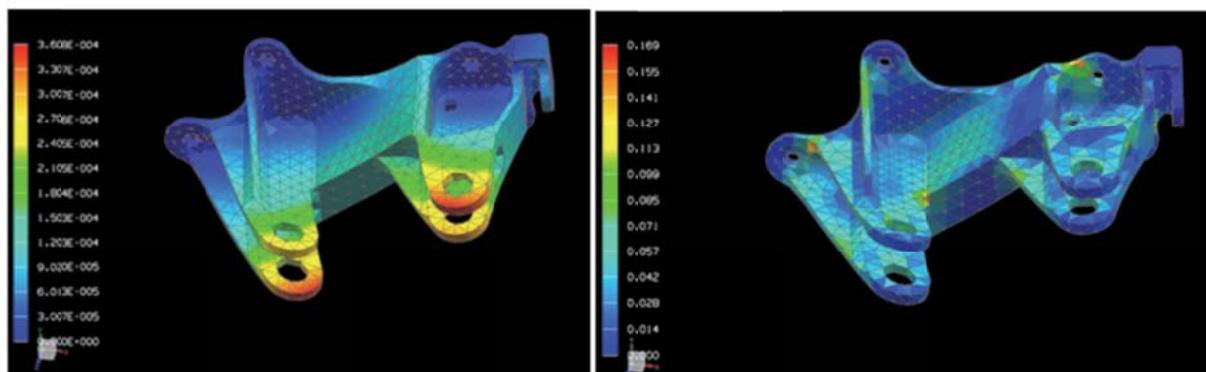


Рис. 14. Анализ напряжений и деформаций при оптимизации конструкции кронштейна плоско-параллельного перемещения двери

ная плотность, химический состав, и др.) с целью приведения в соответствие с требованиями технологических процессов, подтверждения применимости АТ и обеспечения необходимого уровня эксплуатационных характеристик синтезированных изделий. В ходе работ, на стандартных синтезированных образцах, был подтвержден высокий уровень механических свойств синтезированного материала (рис. 12).

Проведенный анализ дает возможность выявить дальнейшие пути развития аддитивных технологий:

- оптимизация материалоемкости и повышение КИМ;
- применение АМ в серийном производстве, изготовлении технологической оснащения;
- технологии изготовления компонентов систем и интерьера с помощью АМ;
- электронно-лучевая плавка при создании несущих компонентов летательных аппаратов (ЛА);
- моделирование технологических процессов с использованием АМ;
- технологии получения крупногабаритных агрегатов с ограниченным количеством соединений;
- технологии высокоскоростного прямого лазерного выращивания (HPLM);
- специальное программное обеспечение для организации и управления серийным выпуском изделий на базе АМ;
- перспективные технологии сборочного производства ЛА.

Таким образом, АМ позволят уменьшить затраты при производстве ЛА в сочетании габаритных конструкций с элементами сложной формы.

Основываясь на полученных данных была проведена оптимизация конструкции узла навески и кронштейна плоско-параллельного перемещения служебной двери самолета ИЛ-76 с использованием 3-D печати.

Коэффициент безопасности при выполнении анализа конструкции составляет 1.5. В результа-

те конечно-элементного анализа рычага навески двери конструкция выдерживает заданные нагрузки. Масса рычага до оптимизации составляла 3,76 кг. Масса кронштейна после оптимизации составит 2,632 кг. Оптимизация по массе составляет 30 % или 1,128 кг с одной детали.

В результате конечно-элементного анализа узла механизма плоско-параллельного перемещения двери конструкция выдерживает заданные нагрузки. Масса кронштейна до оптимизации составляла 0,392 кг. Масса кронштейна после оптимизации - 0,272 кг. Оптимизация по массе составляет 30,6 % или 0,120 кг с одной детали.

В результате конечно-элементного анализа можно сделать вывод, что модели оптимизированной конструкции выдерживают заданные нагрузки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Вулпе М.Н.* Лазерная сварка заготовок, полученных аддитивными технологиями // *Технология машиностроения и материаловедение.* 2017. № 1. С. 142-144
2. *Зленко М.А., Нагайцев М.В., Добыши В.М.* Аддитивные технологии в машиностроении: пособие для инженеров. М.: ГНЦ РФ ФГУП «НАМИ», 2015. 220 с.
3. *Зарубин Д.А., Ушомирская Л.А.* Электролитно-плазменное струйное полирование деталей, изготовленных аддитивными технологиями// *Материалы научной конференции с международным участием. Лучшие доклады «Неделя науки СПбПУ».* СПб.: ФГАОУ ВО СПбПУ 2016. С.74-77
4. *Федоров М.М.* Разработка замкнутой технологической цепочки изготовления деталей ГТД по аддитивным технологиям // *Вестник Рыбинской государственной авиационной технологической академии им. П.А. Соловьева.* 2017. С.115-118
5. ГОСТ Р 57558 - 2017 «Аддитивные технологические процессы. Базовые принципы. Термины и определения»

**THE CREATION OF ADDITIVE TECHNOLOGIES TAKING
INTO ACCOUNT THE FATIGUE BEHAVIOUR OF A MATERIAL IN AVIATION ENGINEERING**

© 2018 V.A. Kudryashov¹, A.A. Lapyshv²

¹JSC Aviastar-SP, Ulyanovsk

² Ulyanovsk State Technical University

The article analyzes the most successful results of the use of additive technologies, reflects the advantages at the current stage of development. The problem statement: it is necessary to find the optimal parameters of the technological process in the production of parts using additive technologies used in the design of short -, medium - and long-haul aircraft. The optimization was performed using the computer-aided system "Nastran" with time resources, material costs, weight of the aircraft construction of work at different levels of serial production selected as an optimization criterion. Numerical simulation of the working process was performed for each of the combinations of optimized variables. Analysis of the optimization results showed that the growth of the parameters of the working process leads to the expansion of the locally optimal parameters. Under optimal technological parameters of the working process can be expected to optimize the value of works until the 30th %

Keywords: Additive technologies, material fatigue behavior, modeling, optimization, parameters.

Vladimir Kudryashov, Project Manager.

E-mail: kudryashov-vl@mail.ru

*Aleksey Lapyshv, Senior Lecturer of Ulyanovsk State
Technical University. E-mail: alex.lapishev@yandex.ru*