

УДК 67.02

А.А. Автушенко, Р.Р. Анамова, А.О. Иванов, А.В. Рипецкий, А.В. Осипов

МЕТОДИКА ПРИМЕНЕНИЯ АДДИТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ НА ЭТАПАХ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ОПЫТНЫХ ОБРАЗЦОВ АГРЕГАТОВ И УЗЛОВ АВИАЦИОННОЙ ТЕХНИКИ

Рассмотрены особенности применения аддитивных технологий в авиационной промышленности. Предложена методика применения аддитивных технологий для изготовления опытных образцов агрегатов и узлов авиационной техники, апробированная при изготовлении макета агрегата современного авиационного двигателя.

Ключевые слова: аддитивные технологии, 3D-печать, макет, авиационная техника, SLS-технология.

Аддитивные технологии (технологии 3D-печати) относятся к перспективным производственным технологиям, позволяющим изготавливать с высокой точностью детали со сложной геометрической формой и пространственной конфигурацией. Аддитивные технологии отличаются друг от друга выбором материалов и способа их нанесения, однако во всех случаях создание модели основывается на послойном наращивании [1].

Выделяют следующие положительные особенности аддитивных технологий с точки зрения авиационной промышленности:

- 1) использование одного и того же оборудования для опытного и серийного производства;
- 2) сокращение энергопотребления производства [2];
- 3) гибкое перепрофилирование одного и того же оборудования под производство различных партий изделий;
- 4) высокая автоматизация технологического процесса;
- 5) минимальные сроки технологической подготовки производства;
- 6) стабильность получаемых характеристик технологического процесса и произведенных деталей;
- 7) возможность варьирования используемого технологического сырья без смены оборудования;
- 8) прогнозируемые с высокой достоверностью сроки всех этапов производства и, следовательно, стоимости этапов производства;
- 9) сокращение потребного кадрового состава;
- 10) возможность управления свойствами материала в зависимости от целевого предназначения изготавливаемой продукции.

Авиационная и космическая отрасли являются важным рынком для 3D-печати. Корпорация «Boeing» активно использует аддитивное производство для изготовления систем, направляющих воздушный поток в военных и гражданских самолетах. Компания «GE Aviation» применяет 3D-печать при производстве новых двигателей LEAP для изготовления распылителей топлива [3].

Однако применение аддитивных технологий для макетирования, изготовления опытных образцов агрегатов и узлов авиационной техники в настоящее время затруднено, так как при этом к качеству поверхности деталей, изготавливаемых посредством аддитивных технологий, предъявляются жесткие требования, которые не всегда возможно удовлетворить.

В связи с изложенным актуальной является задача разработки методики применения аддитивных технологий на этапах изготовления опытных образцов агрегатов и узлов авиационной техники.

Коллективом кафедры «Инженерная графика» МАИ (НИУ), который с 2005 г. работает в области создания макетов агрегатов авиационной техники с применением аддитивных технологий, предложена следующая методика:

- 1) доработка 3D-модели агрегата с учетом особенностей производства методом аддитивных технологий;
- 2) декомпозиция параметрической 3D-модели изделия;
- 3) разработка вариантов технологического членения изделия с учетом особенностей технологического оборудования, технологических процессов при производстве и сборке изделия.

Методика апробирована при изготовлении полноразмерных и уменьшенных макетов изделий с помощью технологии Selective Laser Sintering (SLS-технологии). SLS-технология основана на селективном лазерном спекании порошковых материалов и относится к технологиям аддитивного производства. Основным оборудованием являлась установка EOSINT P 395. В качестве основного материала использован полиамид 12 - PA 2200.

Изготовление опытных образцов и выявление недостатков. Рассмотрим этапы применения методики на примере изготовления полноразмерного макета агрегата современного авиационного двигателя. В качестве исходных данных для создания макета использована параметрическая трехмерная модель (рис. 1).

Проверка прочностных характеристик образца. Проведен прочностной анализ образцов, изготовленных из материала PA2200 (рис. 2), который показал удовлетворительные результаты (рис. 3,4).

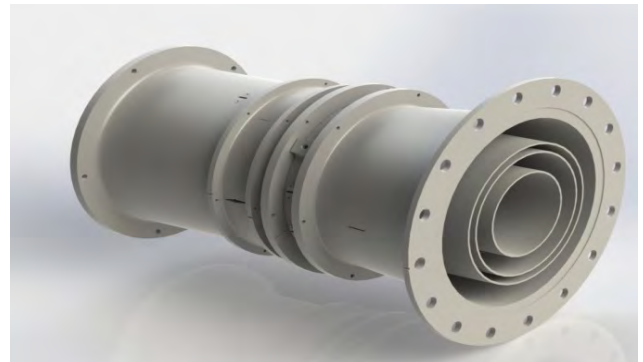


Рис. 1. 3D-модель агрегата авиационного двигателя



Рис. 2. Проведение прочностного анализа образцов

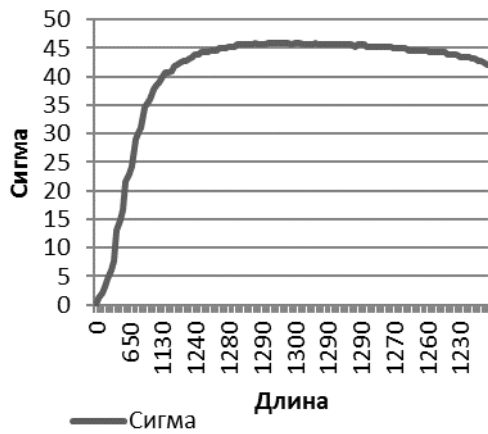


Рис. 3. Прочностные характеристики материала PA2200 под нагрузкой

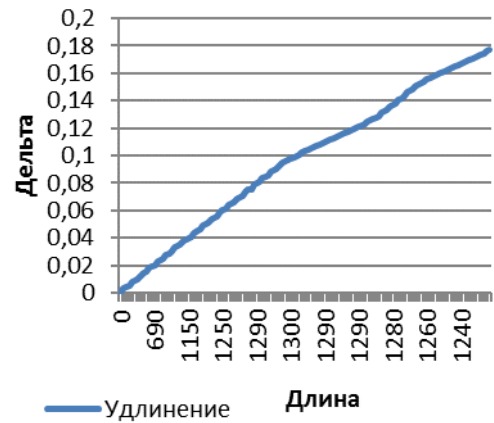


Рис. 4. Удлинение материала PA2200 под нагрузкой

Проверка качества поверхности образца.
Для проверки получаемого качества поверхности и отработки способа технологического членения изготовлен образец (рис. 5).

Контроль качества поверхности изготовленного образца показал отклонение его геометрии от геометрии 3D-модели изделия (рис. 6, 7).

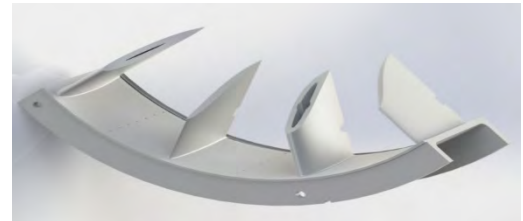


Рис. 5. 3D-модель образца

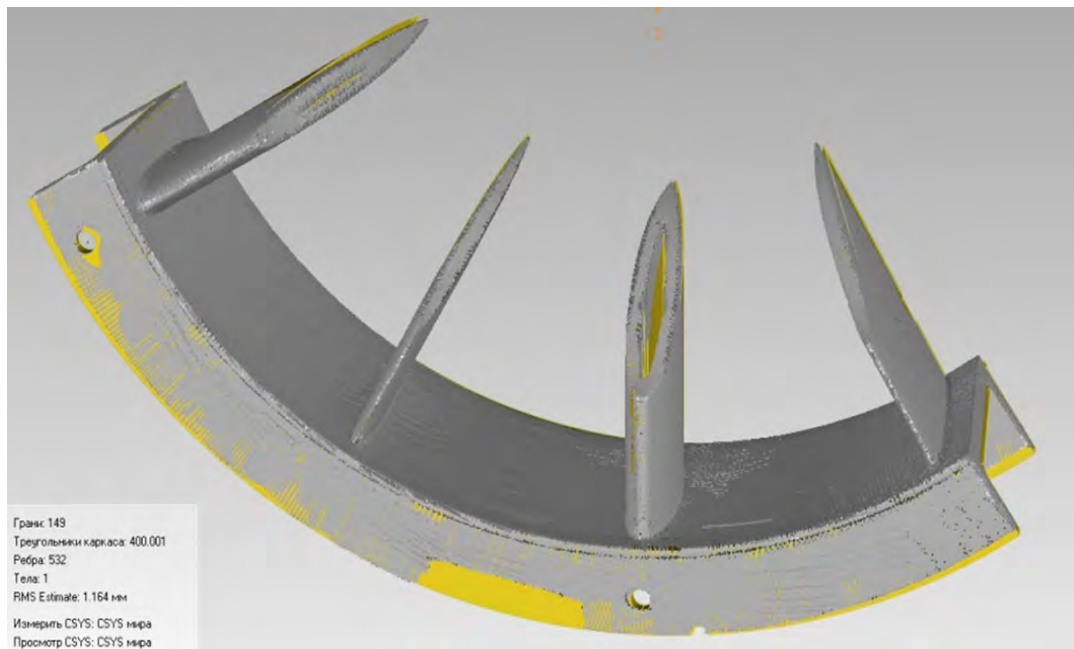


Рис. 6. Сопоставление результата 3D-сканирования опытного образца и геометрии CAD-модели

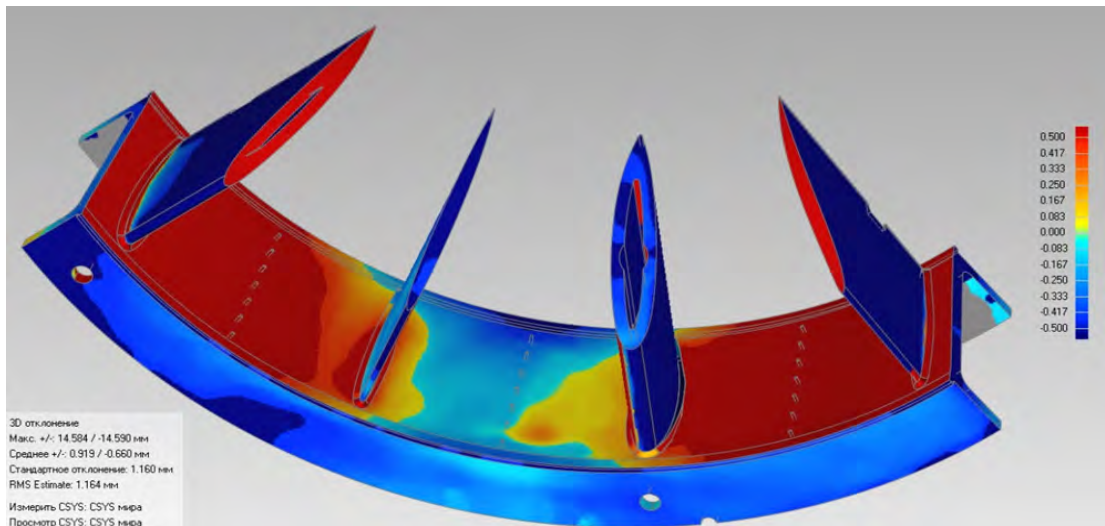


Рис. 7. Отклонение поверхности опытного образца от идеальной

Доработка 3D-модели агрегата с учетом особенностей производства методом аддитивных технологий. Причиной отклонения поверхности опытного образца от идеальной послужило качество геометрии, которая заложена в формат файла, используемый для хранения трехмерных моделей объектов, – STL-геометрии. Данные STL-геометрии передаются на оборудование из CAD-системы. Для устранения недостатков при изготовлении применена методика исправления STL-сетки с помощью программного комплекса 3DTransVidia.

Параметрическая электронная модель может быть представлена в трех видах: как облако точек с известными координатами каждой точки, как поверхностная сетка треугольников (например, в формате STL) и, наконец, в параметрическом виде, когда объект задан параметрическими поверхностями и кривыми. 3DTransVidia обеспечивает совместимость различных представлений модели [4]. На рис. 8 и 9 представлены STL-сетка, импортированная из CAD-системы, и исправленная сетка. Плотная сетка позволяет существенно уменьшить шероховатость поверхности изготовленного образца.

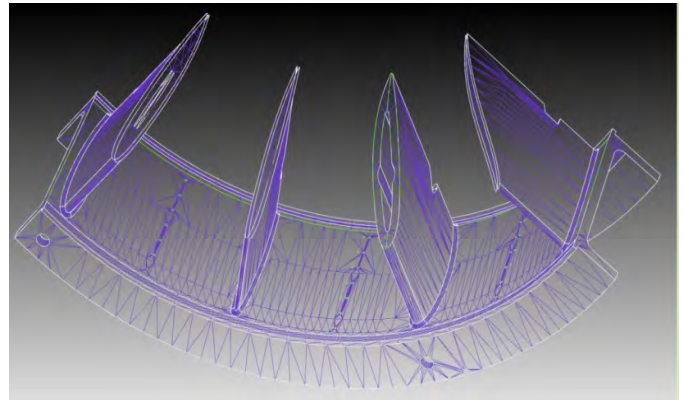


Рис. 8. Изначальная сетка, полученная из CAD-системы

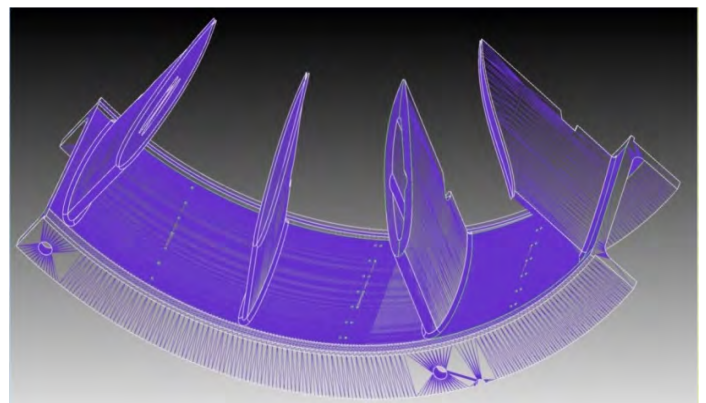


Рис. 9. Исправленная сетка

Декомпозиция параметрической 3D-модели изделия и технологическое членение конструкции. Для изготовления больших частей макета необходимо провести работу по технологическому членению агрегатов. При этом в конструкцию добавлены специальные фиксирующие кольца, которые позволяют точно выполнить последующую сборку агрегатов.

Окончательный вариант модели изделия представлен на рис. 10 и 11.

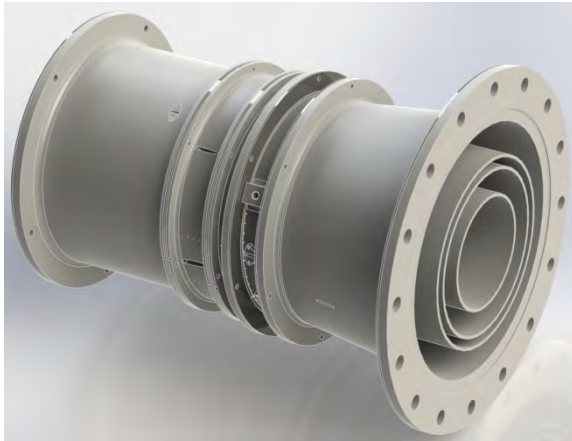


Рис. 10. Окончательная 3D-модель

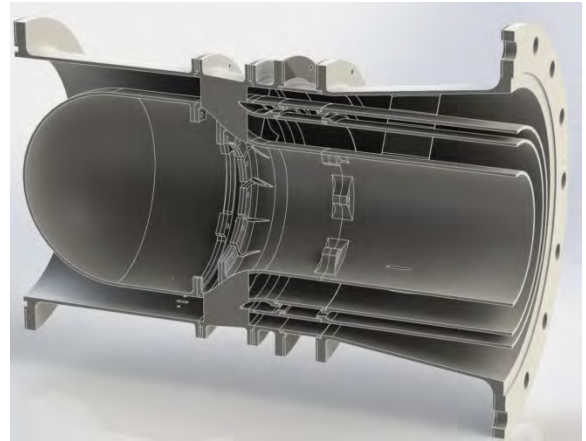


Рис. 11. 3D-модель в разрезе

В доработанной модели предусмотрены посадочные места под кольца и дополнительные посадочные поверхности, используемые при окончательной сборке. Окончательная проработка изделий проведена с учетом возможностей оборудования – размеров камеры для изготовления.

Работа по изготовлению поделена на 2 этапа. На первом этапе изготовлены изделия, которые по своим габаритам не превышали размеры рабочей камеры оборудования. На втором этапе изготовлены агрегаты крупногабаритных изделий в виде отдельных деталей с последующей сборкой и финишной обработкой.

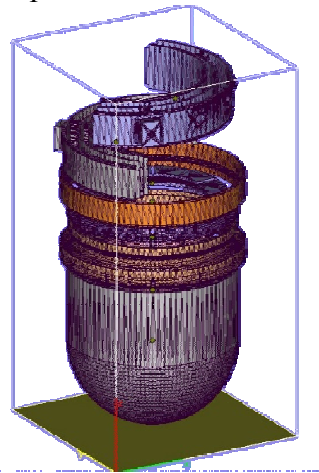


Рис. 12. Компоновка камеры оборудования

Компоновка моделей деталей в камере оборудования выполнена с помощью программного продукта Magics, который позволяет исключить возможные самопересечения 3D-моделей и заложить технологические зазоры между деталями для избежания перегрева детали при спекании (рис. 12).

При сборке изделий из полиамида применяются несколько вариантов креплений. Это механические замки, изготовляемые вместе с деталью и являющиеся ее частью, а также различные клеи на основе эпоксидной смолы с добавлением порошка полиамида для придания смеси более густой консистенции и образования в месте склеивания однородной структуры.

В качестве основного варианта в рассматриваемой конструкции выбрана стыковка изделия в виде паза с последующим заполнением клеящей смесью (рис. 13).

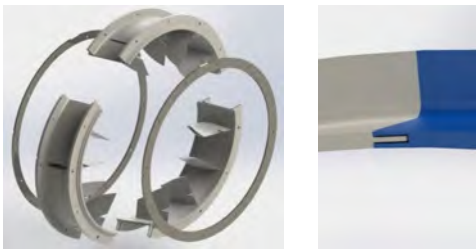


Рис. 13. Вариант технологического членения обода стойки

Для сохранения геометрии канала и исключения погрешности сборки применены специальные фланцы, изготовленные методом лазерной резки металлов. Фланцы устанавливаются при окончательной сборке изделия и закрепляются при помощи болтов М4 с самоконтрящимися гайками, чтобы исключить саморазвертывание. Варианты членения агрегатов представлены на рис. 14 и 15.

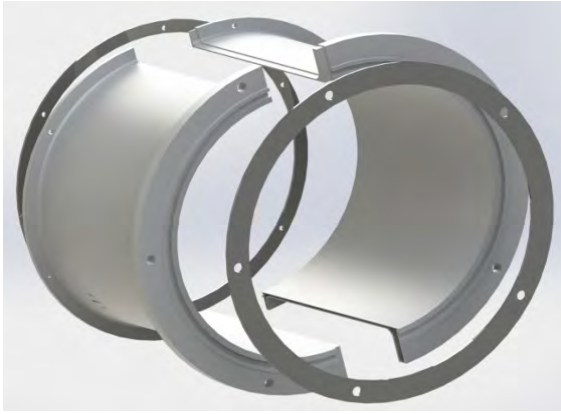


Рис. 14. Членение входной втулки



Рис. 15. Членение втулки выхода

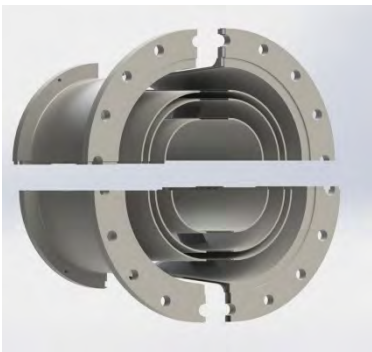


Рис. 16. Технологическое членение части выхода

Самым сложным с точки зрения технологического членения является выход двигателя. Выбор оптимального варианта членения в этом случае зависит от размера камеры оборудования и от сложности конечной сборки и обработки. Для дополнительного контроля канала и жесткости конструкции в рассматриваемом агрегате стыковка проходит по всем поверхностям (рис. 16).

Изготовление конструкции. Основные этапы изготовления и сборки агрегата показаны на рис. 17.

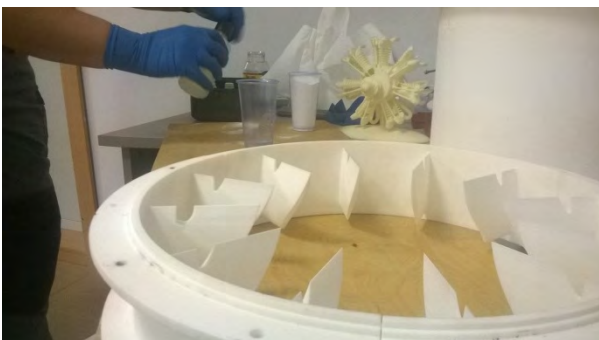


Рис. 17. Изготовление агрегата авиационного двигателя

Полное изготовление всех агрегатов макета заняло: в объеме материала – 4,5 камеры, в объеме времени работы машины – 112 часов (без учета времени на остывание).

Валидация геометрических параметров. С целью валидации и верификации полученных данных с 3D-геометрией проведено лазерное сканирование агрегатов изделия с помощью координатно-измерительной машины FAROFusionArm с лазерной сканирующей головкой Кгеоп. В результате лазерного сканирования получено облако точек в единой системе координат, которое содержит всю информацию по геометрической модели исследуемого объекта и представляет собой взаимно ориентированный массив точек. Процедура обработки облака точек и получения трехмерной модели осуществлена в программном комплексе Geomagic Studio. Результат сравнения отсканированной детали и эталонной 3D-модели представлен в таблице и проиллюстрирован на рис. 18 и 19.

Таблица

Отчет о сканировании детали агрегата авиационного двигателя

Входные данные				Стандартные отклонения		
Наименование		Значение		Наименование	Координаты точек	В % к итогу
Число точек данных		4393186		Выход за верхнее критическое значение	0	0,000
Тип допуска		3D отклонение		Выход за нижнее критическое значение	0	0,000
Единицы		мм		Для реального распределения (+/-)		
Макс. критическое		1,000				
Макс. номинальное		0,000				
Мин. номинальное		0,000				
Мин. критическое		-1,000		-1	0	0
Отклонение				-0,4	0	0
				-0,3	0	0
Макс. верхнее откл.		1,000		-0,2	24649	0,561
Макс. нижнее откл.		-1,000		-0,15	118949	2,708
Среднее отклонение		0,15		-0,1	3802035	86,54
Стандартное отклонение		0,18		0,1	282124	6,422
Отклонения распределения				0,2	157882	3,594
Признак		Координаты точек	В % к итогу	0,3	7547	0,172
Больше или равно мин.	Меньше макс			0,4	0	0
-1,000	0,000	394727	8,985	0,5	0	0
0,000	1,000	3998459	91,015	0,7	0	0

Валидация геометрических параметров методом лазерного трехмерного сканирования показала соответствие геометрии изготовленных деталей параметрической модели. Среднее отклонение по всей геометрии деталей равно 0,2 мм, что соответствует характеристикам технологического оборудования. Максимальное отклонение наблюдается в мес-

тах стыков в деталях, которые для изготовления были разделены на части, и составляет от 0,2 до 0,3 мм.

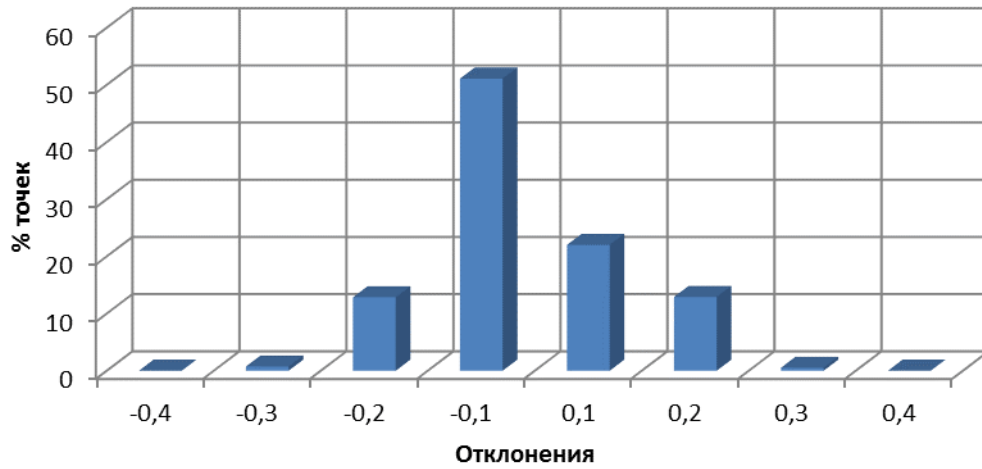


Рис. 18. Диаграмма отклонений

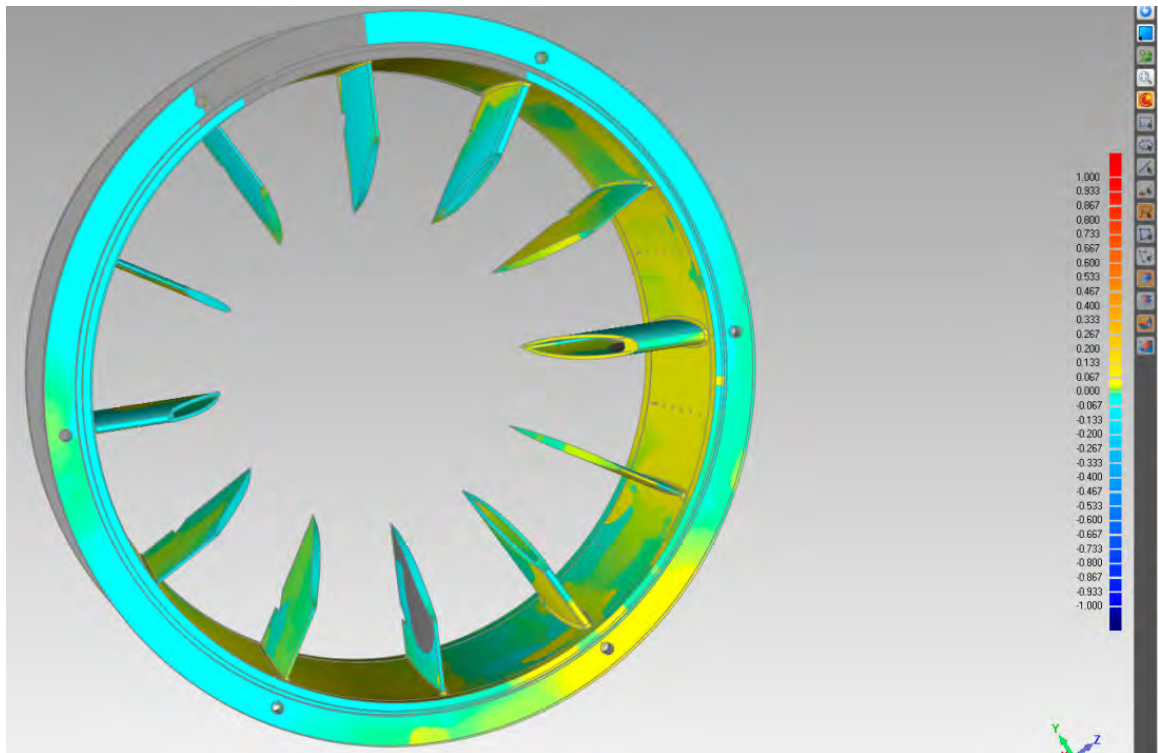


Рис. 19. Распределения отклонений по поверхности

Таким образом, проведенные экспериментальные исследования позволили получить следующие новые научные результаты:

- 1) выявлена зависимость между качеством STL-сетки модели и качеством изготовления деталей, обладающих сложными профилированными поверхностями;
- 2) разработана и апробирована методика применения аддитивных технологий для изготовления опытных образцов агрегатов и узлов авиационной техники.

Изготовление деталей с помощью аддитивной технологии позволило сформулировать некоторые рекомендации по ее применению:

1) рекомендуется сложные составные модели членить на более простые, так как это позволит создавать монолитные модели без дополнительных стыков, чтобы увеличить точность при изготовлении и снизить расход материала;

2) для обеспечения необходимой точности сборочных работ необходимо предусматривать в параметрических моделях дополнительные утолщения в местах стыков;

3) для обеспечения качества изготавливаемых посредством аддитивных технологий агрегатов и узлов авиационной техники необходим контроль качества сеточного представления моделей (как при экспорте из CAD-систем, так и непосредственно при подготовке к запуску прототипирующей установки).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сапрыкин, А.А. Повышение производительности процесса селективного лазерного спекания при изготовлении прототипов: дис. ...канд.техн.наук / А.А.Сапрыкин. – Юрга, 2006. – 161 с.
2. Шишковский, И.В. Селективное лазерное спекание и синтез функциональных структур: дис. ...д-ра физ.-мат. наук/ И.В. Шишковский. – Самара, 2005. – 390 с.
3. Гореткина, Е. 3D-печать как способ изготовления деталей/ Е. Гореткина. – URL: <http://www.pcweek.ru/industrial/article/detail.php?ID=157646>.
4. 3DTransVidia–интеллектуальная трансляция моделей.– URL: <http://www.tesis.com.ru/software/3dtransvidia/>.

Материал поступил в редколлегию 20.04.15.