

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ДЕТАЛЕЙ ИЗ ТЕРМОСТОЙКИХ ПЛАСТИКОВ И ИХ ИСПЫТАНИЕ В СОСТАВЕ МАЛОРАЗМЕРНОГО ГАЗОТУРБИННОГО ДВИГАТЕЛЯ

**А. В. Побелянский, А. И. Мустейкис,
А. А. Галаджун, Д. С. Круглов**

*Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д. Ф. Устинова,
г. Санкт-Петербург, Российская Федерация*

В рамках сотрудничества БГТУ «ВОЕНМЕХ» с ООО «Современное оборудование» (группа компаний «Солвер») был реализован проект по изготовлению основных узлов мало-размерного газотурбинного двигателя, оценке деталей, их дальнейшему испытанию, а также проведена предварительная оценка применения аддитивных технологий в аэрокосмической отрасли.

В качестве объекта исследования в данном проекте был выбран малогабаритный газотурбинный двигатель с расчетной тягой 10 кгс. Актуальность выбора объекта исследования объясняется тем, что в настоящее время в России активно разрабатываются беспилотные летательные аппараты, а также силовые установки для них.

Все детали малогабаритного газотурбинного двигателя можно условно отнести к трём температурным диапазонам эксплуатации, что позволило выделить ряд его деталей, которые могут быть изготовлены методом FDM из термостойкого пластика.

В рамках проекта были решены следующие задачи:

- проведение предварительных расчетов теплового состояния деталей в составе малогабаритного газотурбинного двигателя;*
- печать деталей, оценка точности изготовления, качества поверхности;*
- проведение испытаний деталей в составе малогабаритного газотурбинного двигателя;*
- съём деталей и проведение дефектации;*
- анализ полученных данных, выводы и рекомендации по применению аддитивных технологий термостойких пластиков в авиакосмической отрасли.*

Печать проводилась на производственных мощностях ООО «Современное оборудование» на 3D-принтере Stratasys Fortus 900 mc. После удаления поддерживающих структур была проведена оценка качества поверхности деталей и замеры шероховатости исследуемых элементов. Собранный двигатель был испытан на кафедре «Двигатели и энергоустановки ЛА» БГТУ «ВОЕНМЕХ» им. Д. Ф. Устинова.

Предварительные результаты проекта позволяют утверждать, что внедрение аддитивных технологий термостойких пластиков в процесс разработки малогабаритных газотурбинных двигателей позволяет в достаточно короткие сроки создать и испытать различные варианты конструкций, что позволит сократить время разработки подобных двигателей и теоретически повысить их эффективность за счет снижения массы конструкции.

Ключевые слова: аддитивные технологии, малогабаритный газотурбинный двигатель, термостойкие пластики.

В настоящее время в рамках сотрудничества ООО «Современное оборудование» (группа компаний «Солвер») и БГТУ «ВОЕНМЕХ» им. Д. Ф. Устинова реализуются проекты, направ-

ленные на исследование возможности изготовления и функционального применения деталей аэрокосмической отрасли, полученных методами аддитивных технологий из термостойких пластиков.

Аддитивные технологии термостойких пластиков находят все больше применение в аэрокосмической отрасли, например, проекты компании

Stratasys [2], проект «Aurora» [1, 4] (рис. 1) и многие другие. Наиболее подходящими для таких целей являются пластики типа PPSF и линейка пластиков ULTEM, в частности ULTEM 1010, специально разработанный для аэрокосмической отрасли.

Можно перечислить следующие преимущества применения аддитивной технологии термостойких пластиков методом экструзии полимерных нитей (FDM):

- повышение гибкости проектирования;
- уменьшение сроков изготовления функциональных прототипов, переход к прямому цифровому производству;
- снижение массы деталей на 40–50 %.

В качестве объекта исследования в данном проекте был выбран малоразмерный газотурбинный двигатель (МГТД) с расчетной тягой 10 кгс (рис. 2).

Такой двигатель способен поднимать в воздух беспилотный летательный аппарат (БПЛА) массой до 50 кг. Актуальность выбора объекта исследования объясняется тем, что в настоящее время в России активно ведутся разработки БПЛА, а также силовых установок для них. В качестве силовых установок для БПЛА могут использоваться малоразмерные электродвигатели, ДВС или ГТД, но при этом применение именно ГТД в качестве силовой установки БПЛА обеспечивает большую скорость и маневренность аппарата.

Все детали МГТД могут быть условно отнесены к трем температурным диапазонам эксплуатации (рис. 3):

- I – низкотемпературный (150–220 °С);
- II – среднетемпературный (300–400 °С);
- III – высокотемпературный (свыше 500 °С).



Рис. 1. Проекты компаний Stratasys и Aurora Flight Sciences

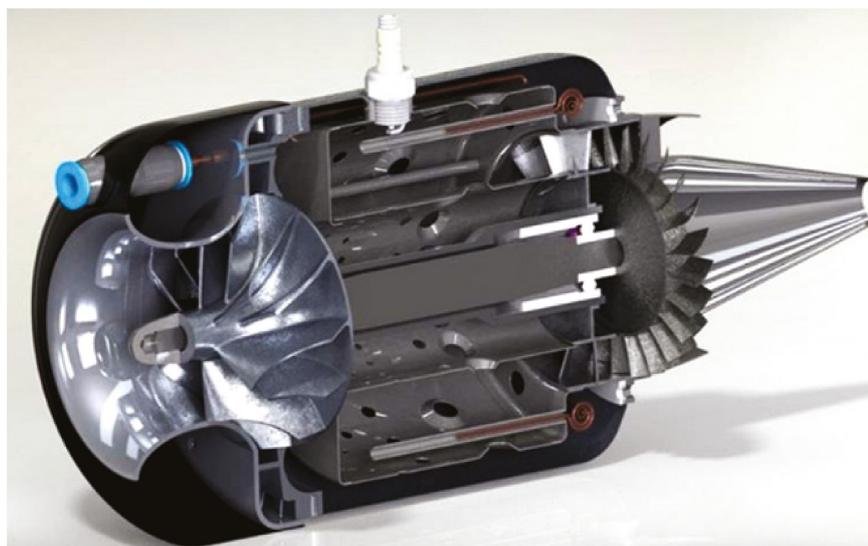


Рис. 2. Модель выбранного МГТД

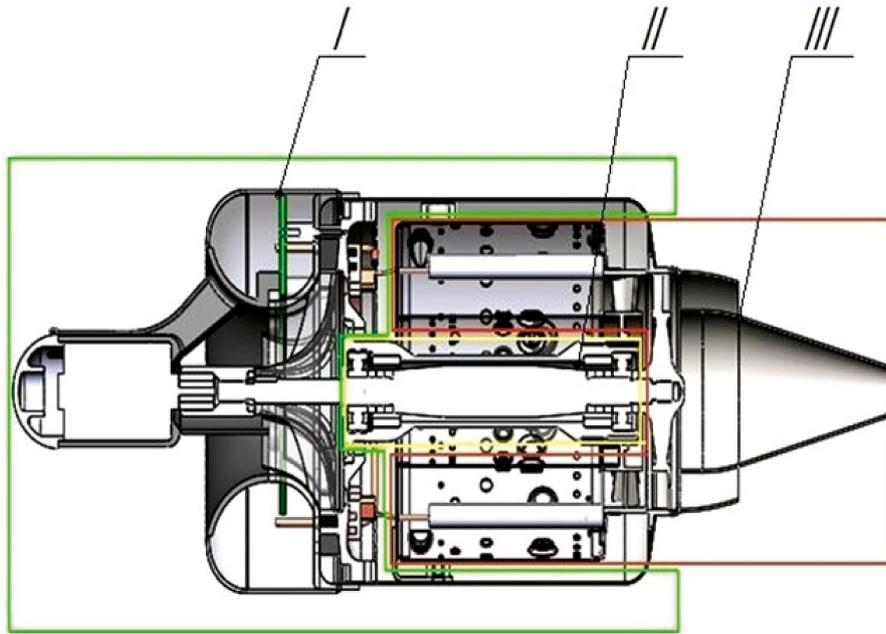


Рис. 3. Температурные зоны эксплуатации

Это позволило выделить ряд деталей МГТД (рис. 4): крышку компрессора; колесо компрессора; диффузор, а также корпус камеры сгорания, которые могут быть изготовлены методом FDM из термостойкого пластика.

Далее был проведен расчет теплового состояния конструкции МГТД для условий, соответствующих максимальному режиму работы (рис. 5). Анализ распределения температуры по сечению МГТД показал, что выбранные детали испытывают умеренную тепловую нагрузку с температурой до 200 °С. При этом в зоне контакта корпуса камеры сгорания с корпусом соплового аппарата турбины имеется локальное превышение температуры свыше 200 °С, что говорит о необходимости использования в данной области теплоизолирующих материалов, например, прокладок из паронита.



Рис. 4. Детали, изготовленные методом FDM

Из имеющихся в настоящее время термостойких пластиков стоит рассматривать для данной задачи следующие (табл. 1): PPSF; ULTEM 1010; ULTEM 9085 [3, 5]. В ходе сравнения названных пластиков с наиболее распространенным в авиастроительной отрасли материалом дюралюминием (дюраль Д16) для печати деталей был выбран материал ULTEM 1010, как наиболее подходящий по температуре эксплуатации.

Печать деталей проводилась на производственных мощностях ООО «Современное оборудование» на 3D-принтере Stratasys Fortus 900 mc.

После удаления поддерживающих структур была проведена оценка качества поверхности деталей. На исследуемых поверхностях корпуса камеры сгорания и диффузора шероховатость Ra составила примерно 20 мкм (рис. 6). При этом профиль шероховатости имеет повторяющуюся волнообразную структуру с четким разделением слоев наносимого материала. Данный тип шероховатости получается в результате обработки поверхности при удалении поддержек.

Собранный МГТД был установлен на испытательном стенде кафедры «Двигатели и энергоустановки ЛА» БГТУ «ВОЕНМЕХ» им. Д. Ф. Устинова. МГТД размещался на подвижной платформе, связанной с тягоизмерительной системой. Предварительная раскрутка ротора МГТД обеспечивалась электростартером, связанным с ротором через обгонную муфту. Подача топлива (керосин ТС-1) осуществлялась шестеренным насосом и регулировалась сигналом ШИМ от пульта управления.

Состав испытательного стенда (рис. 7): топливный насос 1, клапан запального топлива 2, клапан основного топлива 3, запальное устрой-

Таблица 1

Сравнительная характеристика термостойких пластиков

Материал	Температура тепловой деформации (1,82 МПа), °С	Плотность, кг/м ³	Временное сопротивление разрыву, МПа	Линейный коэффициент термического удлинения, 10 ⁻⁶ °С ⁻¹
PPSF	189	1280	55	55
ULTEM 1010	213	1270	37–81	47
ULTEM 9085	153	1340	42–69	65
Дюраль Д16	Рекомендуемая T _{экспл.} не более 230 °С	2800	460	22

ство 4, тягоизмерительная система 5, датчик давления в КС 6, датчик числа оборотов ротора 7.

В ходе испытаний МГТД из-за сбоя циклограммы запуска режимных параметров достичь не удалось. При частоте вращения ротора примерно 10 000 об/мин произошел прогар стенки корпуса камеры сгорания и разрушение топливного коллектора, которое привело к возгоранию задней стенки диффузора и ее частичному короблению. Однако в целом детали из термостойких пластиков даже в условиях локального возгорания со-

хранили свои геометрические размеры и частично функционал.

В связи с вышеперечисленными обстоятельствами результаты испытаний деталей из термостойких пластиков в составе МГТД следует считать предварительными. Тем не менее полученные результаты позволяют сделать некоторые выводы.

1. Детали, изготовленные из термостойких пластиков методами аддитивных технологий, пригодны для использования в качестве испытательных макетов МГТД с незначительными доработ-

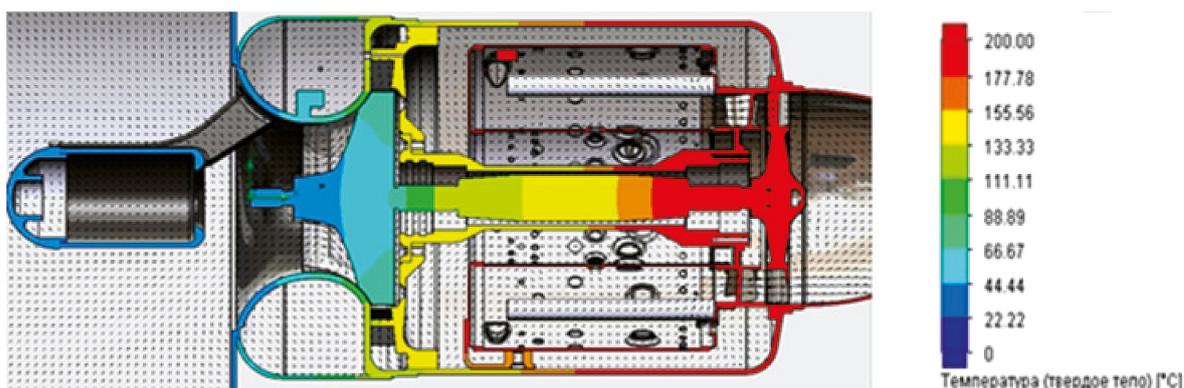


Рис. 5. Результаты теплового расчёта конструкции МГТД

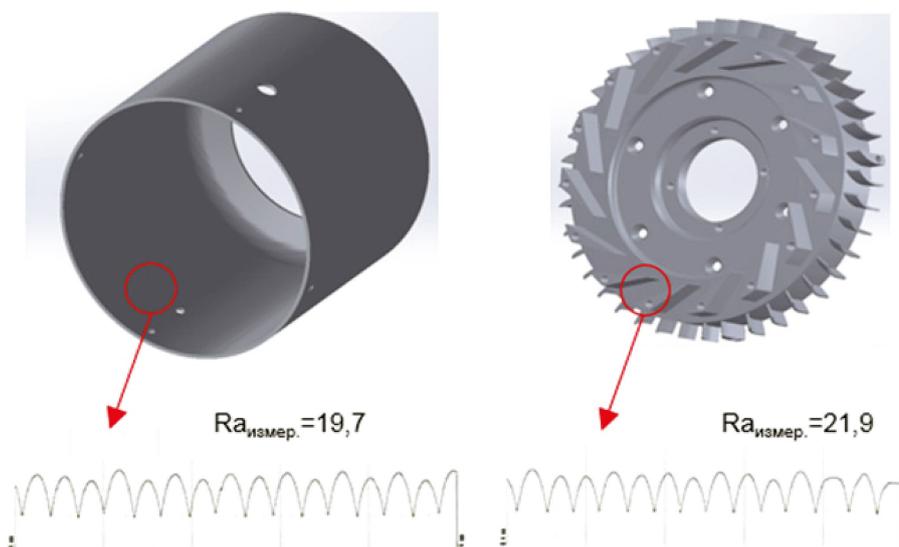


Рис. 6. Профиль шероховатости поверхности деталей

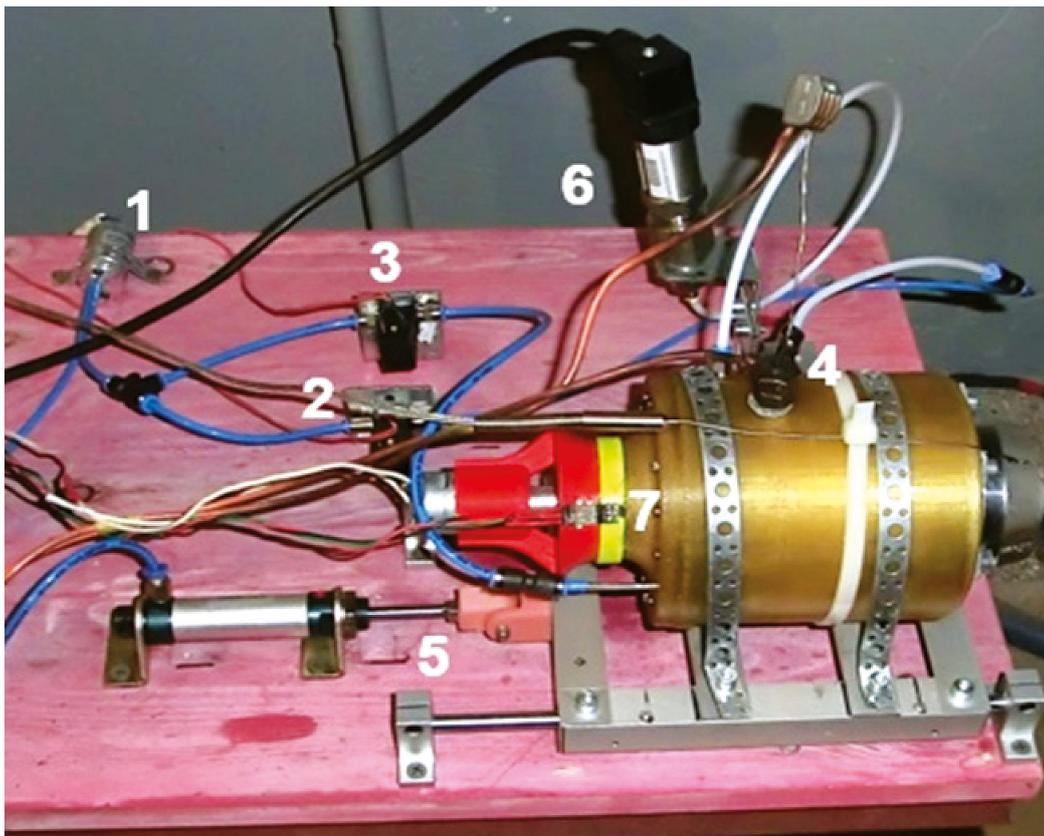


Рис. 7. Испытательный стенд

ками (увеличение толщины стенок, использование теплоизоляции при сборке).

2. Требуются дополнительные испытания для подтверждения возможности использования подобных деталей в качестве полнофункциональных изделий.

3. Современный уровень 3D-печати методом FDM не позволяет изначально достичь качества поверхности и точности размеров деталей, требуемого для аэрокосмической отрасли. Требуется дополнительная механическая постобработка.

4. Желательно разрабатывать немеханические методы постобработки, особенно для деталей сложных форм.

В заключение стоит отметить, что внедрение технологии FDM в процесс разработки МГТД даст возможность в достаточно короткие сроки создать и испытать различные варианты конструкций, что позволит сократить время разработки подобных двигателей и теоретически повысить их эффективность за счет снижения массы конструкции.

Список литературы

1. Проект «Аврора». 3D печать. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://articles.sae.org/13170/> (дата обращения 11.05.2017).
2. Материалы, готовые для космоса. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://blog.stratasys.com/2016/03/23/atlas-rocket-3d-printed-parts/> (дата обращения 11.05.2017).
3. Инновации в ракетостроении при помощи 3D печати. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.stratasysdirect.com/blog/high-power-rocketry-using-3d-printing/> (дата обращения 11.05.2017).
4. Партнёрство со Stratasys. Проектировка и разработка в проекте «Аврора». [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.cimetrixsolutions.com/resources/case-studies/aerospace> (дата обращения 11.05.2017).
5. Термостойкие пластики для FDM. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.stratasys.com/materials/fdm> (дата обращения 11.05.2017).

История статьи

Поступила в редакцию 29 мая 2017 г.
Принята к публикации 27 июня 2017 г.

RESEARCH OF THE POSSIBILITY OF USING PARTS FROM HEAT-RESISTANT PLASTICS AND THEIR TESTING AS PART OF A SMALL-SIZED GAS TURBINE ENGINE

A. V. Pobelyansky, A. I. Musteikis, A. A. Galadzhun, D. S. Kruglov

Baltic State Technical University «VOENMEH» named after D. F. Ustinov,
Saint Petersburg, Russian Federation

Within the framework of the cooperation between BSTU «VOENMEH» and LLC «Modern Equipment» (Solver Group of Companies), a project was implemented to manufacture the main components of a small-sized gas turbine engine, evaluate the details, further test them, and also make a preliminary assessment of the application of additive technologies in aerospace industry.

As an object of research in this project was selected small-sized gas turbine engine with a calculated thrust of 10 kgf. The urgency of the choice of the object of the study is explained by the fact that at the present time unmanned aerial vehicles are actively being developed in Russia, as well as power installation for them. All the details of a small-sized gas turbine engine can be conditionally attributed to three temperature ranges of operation, which made it possible to identify a number of parts that can be manufactured by the FDM method from heat-resistant plastic.

Within the framework of the project the following tasks were formulated:

- Preliminary calculations of the thermal state of parts in the small-sized gas turbine engine;
- Printing of parts, evaluation of manufacturing accuracy, surface quality;
- Testing of parts in the small-sized gas turbine engine;
- Removal of parts and defect management;
- Analysis of the data obtained, conclusions and recommendations on the use of additive technologies of heat-resistant plastics in the aerospace industry.

Printing was carried out at the production facilities of OOO Modern Equipment on the Stratasys Fortus 900 mc 3D printer. After removing supporting structures, the surface quality of the parts was measured and the roughness of the test elements was measured. The collected small-sized gas turbine engine was tested at the Department «Engines and power plants of aircrafts» BSTU «VOENMEH» named after D. F. Ustinov. The preliminary results of the project allow us to state that the introduction of additive technologies of heat-resistant plastics in the process of developing a small-sized gas turbine engine makes it possible to create and test various versions of structures in a short time, which will shorten the development time of such engines and theoretically increase their efficiency by reducing the weight of the structure.

Keywords: additive technologies, small-sized gas turbine engine, heat-resistant plastics.

References

1. *Proekt Avrora. 3D pechat* [Project Aurora. 3D printing]. Available at: <http://articles.sae.org/13170/> (accessed 11 May 2017). (In Russian)
2. *Materialyi, gotovyye dlya kosmosa* [Materials ready for space]. Available at: <http://blog.stratasys.com/2016/03/23/atlas-rocket-3d-printed-parts/> (accessed 11 May 2017). (In Russian)
3. *Innovatsii v raketostroenii pri pomoschi 3D pechati* [Innovations in rocket engineering with the help of 3D printing]. Available at: <https://www.stratasysdirect.com/blog/high-power-rocketry-using-3d-printing/> (accessed 11 May 2017). (In Russian)
4. *Partnyorstvo so Stratasys. Proektirovka i razrabotka v proekte Avrora* [Partnership with Stratasys. Design and development in the project Aurora]. Available at: <http://www.cimetrixsolutions.com/resources/case-studies/aerospace/> (accessed 11 May 2017). (In Russian)
5. *Termostoykie plastiki dlya FDM* [Heat-resistant plastics for FDM]. Available at: <http://www.stratasys.com/materials/fdm/> (accessed 11 May 2017). (In Russian)

Article history

Received 29 May 2017

Accepted 27 June 2017