



Технологии 3D-печати для аэродинамических моделей РКТ



Михаил КУЛИКОВ
Mikhail Yu. KULIKOV

Максим ЛАРИОНОВ
Maxim A. LARIONOV



Денис ГУСЕВ
Denis V. GUSEV

Куликов Михаил Юрьевич — доктор технических наук, профессор Московского государственного университета путей сообщения (МИИТ), Москва, Россия.
Ларионов Максим Александрович — кандидат технических наук, старший научный сотрудник ЦНИИмаш, Королёв, Россия.
Гусев Денис Витальевич — аспирант МИИТ, Москва, Россия.

3D-Printing Technology for Aerodynamic Models of Rocket and Spacecrafts

(текст статьи на англ. яз. – English text of the article – p. 56)

В статье оценивается возможность использования 3D-печати для создания размероподобных моделей элементов ракетно-космической техники, пригодных к условиям наземных аэродинамических испытаний. Полученные результаты позволяют сделать вывод о перспективности технологии Digital Light Processing (DLP) и фотополимера HTM-140, их способности отвечать требованиям не только до- и трансзвуковых режимов в аэродинамической трубе, но и гиперзвуковых.

Ключевые слова: ракетно-космическая техника, аэродинамические модели, прототипирование, технологии 3D-печати, наземные испытания.

Для определения аэродинамических характеристик изделий ракетно-космической техники (РКТ) при наземной отработке используются специальные модели. К ним предъявляется ряд жестких требований: допуск на размеры внешних обводов должен соответствовать 5-7 качеству, шероховатость внешних поверхностей — укладываться в установленный предел $Ra < 1,25$ мкм, модель обязана иметь как можно меньшую массу.

Изготовление моделей РКТ для наземных аэродинамических испытаний по традиционным технологиям машиностроения основано на механической обработке составляющих деталей. Это является весьма трудоемкой и затратной задачей, поэтому обычные технологии становятся все менее перспективными. Для штучного и мелкосерийного производства наиболее оптимальное решение — использование генеративных технологий, например, 3D-печати. В случае невозможности изготовления модели с применением механообработки из-за сложной формы изделия 3D-печать

облегчает выход из сложившейся ситуации. Современные технологии 3D-прототипирования позволяют чрезвычайно оперативно получить точную деталь с минимальными затратами.

Сегодня о технологиях быстрого прототипирования имеется много доступной информации, однако выделить преимущества и недостатки каждой из них и выбрать для производства моделей PKT оптимальную при отсутствии практического опыта нереально. Испытания Национального управления по воздухоплаванию и исследованию космического пространства США (NASA) доказывают, что такие модели в основном подходят для изучения аэродинамических характеристик изделия PKT на до- и трансзвуковых скоростях («холодных режимах»), но из-за низкой теплоустойчивости материалов их использование на гиперзвуковых режимах испытаний («горячих режимах») невозможно [1].

Поэтому главная задача — выбор материала и технологии изготовления аэродинамических моделей, которые позволяли бы проводить испытания не только в до- и трансзвуковых, но и гиперзвуковых диапазонах скоростей потока. Был проведен анализ технологий, основанных на фотополимеризации (лазерная стереолитография SLA, напыление головкой капель смолы PolyJet, светоотверждение полимера DLP, нанесение жидкого расплавленного модельного материала или связующего состава с помощью многоструйных головок Multi Jet Modeling), технологий спекания порошков и листовых материалов (селективное лазерное спекание SLS, послойное склеивание плёночных материалов LOM), технологий тепловой обработки твёрдых материалов (послойное нанесение нитевидного полимера FDM), а также и других видов 3D-печати [4–6].

Из анализа технологий и, учитывая опыт NASA, для нашего исследования была выбрана технология DLP. При построении модели применяется акриловый фотополимер, отверждение слоев которого происходит по методу проецирования световых масок. Точность геометрических размеров, достигаемая при этом, удовлетворяет требованиям, предъявляемым к аэродинамическим моделям, а применяемые материалы обладают достаточной теплоустойчивостью.

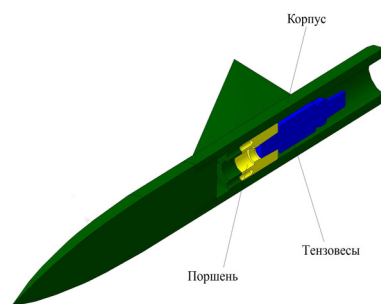


Рис. 1. Модель AGARD-B (компьютерная, в разрезе).

По эскизу, взятому из альбома AGARD [3], разработана компьютерная 3D-модель AGARD-B, которая была испытана на многих аэродинамических установках Европы и мира. С использованием технологии 3D-печати DLP на установке Ultra 2 фирмы EnvisionTEC нами изготовлена аэродинамическая модель, представленная на рис. 1. Толщина одного слоя составляет 100 мкм. Модель из фотополимера HTM-140, теплоустойчивость которого сохраняется до 140°C.

При помощи профилометра была измерена шероховатость на оживальной, цилиндрической и торцевой поверхностях в 15 точках. Максимальное значение шероховатости составило $Ra \sim 0,64$ мкм, тогда как модели из алюминия, выходящие из-под токарного резца после механообработки, имеют шероховатость минимум $Ra \sim 3,2$ мкм и нуждаются в последующей обработке. Точность геометрических размеров соответствует 7 качеству. Все требования взаимного расположения поверхностей и точностей форм соблюдены. Проведены исследования на металлографическом микроскопе Levenhuk 3L и ультразвуковом дефектоскопе Ultrasonic Flaw Detector A1214 Expert, которые никаких дефектов в виде газовых раковин не выявили.

На аэродинамической установке У-3М ЦНИИмаш успешно прошли испытания модели при изменении числа Маха от 0,8 до 1,3 и изменении угла атаки α от 0 до +15 градусов.

Для дальнейших испытаний на гиперзвуковых «горячих» режимах (число Маха равно 6 и угол атаки $\alpha = 0^\circ$) на установке У-6 ЦНИИмаш использовалась только носовая оживальная часть модели AGARD-B.



Визуальный осмотр после заданных режимов никаких дефектов модели не показал. Контрольные измерения геометрических форм и температурного коробления поверхности отклонений не выявили. Степень точности линейных размеров и шероховатость поверхностей остались в пределах требований к модели.

ВЫВОДЫ

Анализируя представленные материалы, можно констатировать, что использование технологии DLP и фотополимера HTM-140 при изготовлении моделей элементов ракетно-космической техники позволяет создавать прототипы, полностью соответствующие принятым требованиям для испытаний в аэродинамических трубах на до- и трансзвуковых режимах. При про-

ведении «горячих» (гиперзвуковых) испытаний оживальной части модели AGARD-V материал HTM-140 не потерял свои физико-механические свойства и не был подвержен температурному короблению, что подтверждает возможность применения для таких испытаний моделей типа тел вращения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Charles G. Miller, NASA Langley Research Center. Aerothermodynamic Flight Simulation Capabilities for Aerospace Vehicles. AIAA 98-2600 (20th AIAA Advanced Measurements and Ground Testing technology Conference, June 15-18, 1998, Albuquerque, NM).
2. AGARDograft a review of measurement on AGARD calibration models; Aircraft Research Association, Bedford, England.
3. Грабченко А. И., Внуков Ю. Н., Доброскок В. Л., Интегрированные генеративные технологии: учеб. пособие. — Харьков: НТУ «ХПИ», 2011. — 416 с.
4. <http://www.cybercom.ru>. Доступ 12.02.2015.
5. <http://www.3D-systems.com>. Доступ 12.02.2015. ●

Координаты авторов: Куликов М. Ю. – muk.56@mail.ru, Ларионов М. А. – pioneer_maxim@mail.ru, Гусев Д. В. – dess.2010@mail.ru

Статья поступила в редакцию 28.11.2014, принята к публикации 17.02.2015.

Статья подготовлена на основе материалов, представленных авторами на Международной научно-практической конференции «Конструкция, динамика и прочность подвижного состава», посвященной 75-летию со дня рождения В. Д. Хусидова (МИИТ, 20-21 марта 2014 года).

3D-PRINTING TECHNOLOGY FOR AERODYNAMIC MODELS OF ROCKET AND SPACECRAFTS

Kulikov, Mikhail Yu., Moscow State University of Railway Engineering (MIIT), Moscow, Russia.

Larionov, Maxim A., TsNIIMash, Korolev, Russia.

Gusev, Denis V., Moscow State University of Railway Engineering (MIIT), Moscow, Russia.

ABSTRACT

The article briefly evaluates the use of 3D-printing to create size-similar models of rocket and spacecrafts' elements suitable for conditions of aerodynamic ground testing. The practices of NASA regarding generative technology for aerodynamics simulation are considered. The authors built a model using AGARD calibration models, 3D printer Ultra 2 of

EnvisionTEC, Digital Light Processing (DLP) and photopolymer HTM-140. Next described step was model's fault detection and analyze of roughness of surface layer. The results obtained enable to conclude on the potential of Digital Light Processing (DLP) technology and photopolymer HTM-140, their ability to meet the requirements for not only sub- and transonic modes in a wind tunnel, but also hypersonic.

Keywords: rocket and spacecrafts, aerodynamic model, prototyping, 3D-printing technology, ground tests.

Background. To determine aerodynamic characteristics of rocket and spacecrafts (hereinafter-RS) for ground tests special models are used. They should meet a number of stringent requirements: outer contours' dimensional tolerances must comply with 5-7 class of accuracy, roughness of outer surfaces fit into the set range $Ra < 1.25 \mu m$, the model must have the lowest possible weight.

Production of RS models for aerodynamic ground testing on traditional mechanical engineering technology is based on mechanical processing of component parts. It is a very time-consuming and cost-intensive task, so conventional technologies are becoming less promising. For single-part and small-series production the best solution is the use of generative technologies, for example, 3D-printing. In

case of impossibility of manufacturing a model with machining due to complex-shaped products 3D-printing facilitates the solution of this problem. Modern technologies of 3D-prototyping enable very quickly to get a precision component detail with minimal costs.

Today, a lot of information on technologies of rapid prototyping is available, however, it is unreal to highlight advantages and disadvantages of each of them and to choose an optimal one for production of RST models in the absence of practical experience. Tests of National Aeronautics and Space Administration (NASA) show that such models are generally suitable for the study of aerodynamic characteristics of RST product at sub- and transonic speeds («cold mode»), but because of low heat resistance of materials their

use in hypersonic test mode («hot operation mode») is not possible [1].

Therefore the main task is a choice of materials and manufacturing technology of aerodynamic models that would enable to carry out tests in not only sub- and transonic, but also in hypersonic range of flow rates. An analysis was made of technologies based on photo polymerization (laser stereo lithography SLA, spraying of drops of gum PolyJet, digital light processing DLP, application of liquid molten modeling material or binder composition using multi-jet heads Multi Jet Modeling), technologies of sintering of powders and sheet materials (selective laser sintering SLS, laminated object manufacturing LOM), heat treatment technology of solid materials (fused deposition modeling FDM), as well as other kinds of 3D-printing [4,5,6].

Objective. The objective of the authors is to consider possibilities of application of 3D-printing technologies in the field of rocket and spacecrafts modeling.

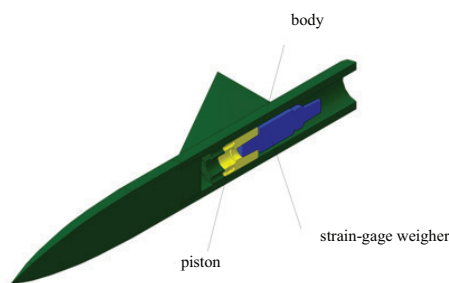
Methods. The authors use general scientific and engineering methods, modeling, comparative analysis.

Results. From the analysis of technology and, given the experience of NASA, for our research DLP technology was selected. In constructing the model an acrylic photopolymer is applied, hardening the layers of which takes place using the method of light masks projecting. The accuracy of geometric dimensions, achieved at the same time meets the requirements for aerodynamic models and the materials used have sufficient heat resistance.

In the sketch, taken from the album AGARD [3] a computer 3D-model AGARD-B was developed, which has been tested on many wind installations in Europe and the world. With the use of 3D-printing technology DLP on the installation Ultra 2 of the firm EnvisionTEC we made aerodynamic model, shown in Pic. 1. The thickness of one layer is 100 μm . Model is made of photopolymer HTM-140, heat resistance of which retains up to 140°C.

Using a profilometer roughness was measured on ogive, cylindrical, and end surfaces at 15 points. The maximum value of roughness was $Ra \sim 0,64 \mu\text{m}$, whereas the model of aluminum, coming out of the turning tool after mechanical processing have minimum roughness of $Ra \sim 3,2 \mu\text{m}$ and require further processing. The accuracy of geometric dimensions corresponds to 7 class of accuracy. All requirements for relative position of surfaces and form accuracy are met. Researches were carried out on metallographic microscope Levenhuk 3L and ultrasonic flaw detector Ultrasonic Flaw Detector A1214 Expert, that did not detect any defects as gas blowholes.

On the aerodynamic installation U-3M of TsNIIMash were successfully tested models in the



Pic. 1. Model AGARD-B (computer, in section).

change of Mach number from 0,8 to 1,3, and the change in the angle of attack α from 0 to +15 degrees.

For further tests in hypersonic «hot» modes (Mach number is 6, and the angle of attack $\alpha = 0^\circ$) on the installation U-6 of TsNIIMash only nose ogive part of the model AGARD-B was used.

Visual inspection after testing specified modes did not show any defects. Control measurements of geometric shapes and thermal warping of surface did not identify any deviations. The degree of dimensional accuracy and surface roughness were within the requirements for the model.

Conclusions. Analyzing submitted materials, we can state that the use of DLP technology and photopolymer HTM-140 in the manufacture of models of rocket and spacecrafts' elements enables to create models, that fully meet relevant requirements for testing in wind tunnels in sub- and transonic modes. During «hot» (hypersonic) tests of ogive part of the model AGARD-B material HTM-140 did not lose its physical properties and has not been exposed to thermal warping, which confirms the possibility of applying for «hot» (hypersonic) tests of models such as bodies of rotation.

REFERENCES

1. Miller, Charles G. Aerothermodynamic Flight Simulation Capabilities for Aerospace Vehicles. AIAA 98-2600. Albuquerque, NM, 20th AIAA Advanced Measurements and Ground Testing technology Conference, June 15-18, 1998, 35 p.
2. AGARDograph 64. A review of measurement on AGARD calibration models. Ed. by R. Hills, Aircraft Research Association, Bedford, England, 1961, 245 p.
3. Grabchenko, A.I., Vnukov, Yu. N., Dobroskok, V.L. Integrated generative technologies: educational guide [Integrirovannye generativnye tehnologii: ucheb. posobie]. Kharkov, NTU «KhPI», 2011, 416 p.
4. <http://www.cybercom.ru>. Last accessed 12.02.2015.
5. <http://www.3d-systems.com>. Last accessed 12.02.2015.

Information about the authors:

Kulikov, Mikhail Yu. – D.Sc. (Eng.), professor of Moscow State University of Railway Engineering (MIIT), Moscow, Russia, muk.56@mail.ru.

Larionov, Maxim A. – Ph.D. (Eng.), senior researcher of TsNIIMash, Korolev, Russia, pioneer_maxim@mail.ru.

Gusev, Denis V. – Ph.D. student of Moscow State University of Railway Engineering (MIIT), Moscow, Russia, dess.2010@mail.ru.

Article received 28.11.2014, accepted 17.02.2015.

The article is based on the papers, presented by the authors at the International scientific and practical conference «Rolling stock's Design, Dynamics and Strength», dedicated to the 75th anniversary of V. D. Husidov, held in MIIT University (March, 20-21, 2014).

