

УДК 621.74

ОПЫТ ПРИМЕНЕНИЯ СТЕРЕОЛИТОГРАФИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ПРИ ГАЗОДИНАМИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЯХ

© 2015 В. Н. Матвеев, Л. С. Шаблий, А. В. Кривцов

Самарский государственный аэрокосмический университет
имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет)

При планировании любого экспериментального исследования встаёт вопрос об изготовлении испытываемых образцов. Зачастую они достаточно сложные, состоят из нескольких отдельных деталей, собранных воедино. Из-за сложности, высокой потребной точности и отсутствия серийности экспериментальные образцы имеют высокую стоимость и достаточно длительный срок изготовления по традиционным технологиям производства. Динамично развивающиеся аддитивные технологии (технологии поэтапного добавления материала) позволяют материализовывать детали любой формы по единой технологии. При этом сложность формы деталей практически не увеличивает сложность изготовления, а потребность в оснастке отсутствует, либо минимальна. Одной из самых первых и самых точных технологий 3D-печати является технология лазерной стереолитографии (SLA – Stereolithography Laser Additive). В статье описан опыт использования установки прототипирования на базе технологии лазерной стереолитографии при создании экспериментальных образцов для газодинамических исследований. Сформулированы базовые требования к подобным экспериментальным образцам: прочность, жёсткость и твёрдость, непроницаемость для газа или жидкости, противодействие диффузии рабочих сред, стойкость к воздействию химически агрессивных исследуемых жидкостей (в т.ч. топлив, масел). В ходе сравнения разных технологий прототипирования показано, что стереолитографические модели лучше других отвечают базовым требованиям.

Прототипирование, стереолитография, аэродинамический эксперимент, 3D-принтер, информационные технологии поддержки проектирования.

doi: 10.18287/2412-7329-2015-14-3-296-304

Натурные эксперименты по обдуву исследуемых образцов газом (или омыванию жидкостью) или же продуванию газа (проливанию жидкости) внутри исследуемых каналов являются необходимой частью любого газодинамического исследования. Сроки подготовки таких экспериментов подчас являются определяющими для всей научно-исследовательской работы (НИР). И поскольку экспериментальное оборудование для создания потоков жидкости и газа (компрессоры, насосы, клапаны) и для регистрации их параметров (LDA-, PIV-сенсоры, измерители расхода, давления и температуры), как правило, является достаточно универсальным, то срок его настройки для применения в конкретном исследовании невелик. Определяющими для всей работы являются сроки получения экспериментальных образцов. В этой связи актуальным является изучение вариантов использования технологий быстрого прототипирования для создания экспериментальных образцов для газодинамических исследований. В данной работе описаны преимущества

применения для этих целей технологии лазерной стереолитографии, поскольку получаемые с её помощью модели максимально полно отвечают требованиям, предъявляемым к экспериментальным образцам для газодинамических исследований.

Многообразие технологий быстрого прототипирования позволяет найти наиболее подходящую для конкретных целей. Но выбор невозможен без полной информированности о преимуществах и недостатках тех или иных технологий. Некоторые 3D-принтеры, несмотря на привлекательные цены оборудования и расходных материалов, подходят исключительно для макетирования, поскольку получаемые с их помощью образцы непригодны для газодинамических исследований из-за низкой прочности, наличия пористости, отсутствия стойкости к агрессивным жидкостям. С другой стороны ценовой линейки находятся технологии прямого лазерного спекания порошковых металлов. Несмотря на крайне высокую цену оборудования и материалов, а также привлекательную

скорость прямого получения металлических образцов, прототипы, получаемые спеканием порошков, обладают достаточно шероховатыми поверхностями (как при литье в песчаные формы). При этом шлифование наружных поверхностей увеличивает сроки изготовления, а отшлифовать внутренние полости зачастую вообще не представляется возможным.

За время работы межкафедральной лаборатории быстрого прототипирования СГАУ [1] её сотрудниками были созданы экспериментальные образцы для десятка газодинамических исследований, проводимых в научно-образовательном центре

газодинамических исследований СГАУ [2], среди которых стоит выделить такие:

- модели малоразмерных турбомашин [3] (рис. 1);
- модели втулочных поверхностей для испытания турбомашин (рис. 2);
- модели катализатора [4, 5] и каталитической горелки [6] (рис. 3);
- модели горелки для изучения потока PIV-методом (рис. 4);
- модели лопастных насосов (рис. 5);
- модели сотового заполнителя для оценки его сопротивления (рис. 6);
- масштабные модели спроектированных в результате НИР [2,3] элементов газотурбинного двигателя (ГТД) (рис. 7).



Рис. 1. Образцы центробежного микротурбинного привода: сопловой аппарат (слева) и цельновыращенное закрытое рабочее колесо (справа)

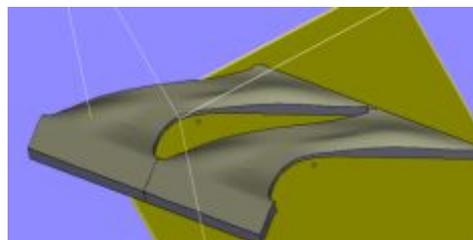


Рис. 2. Модель втулочной поверхности межлопаточного канала

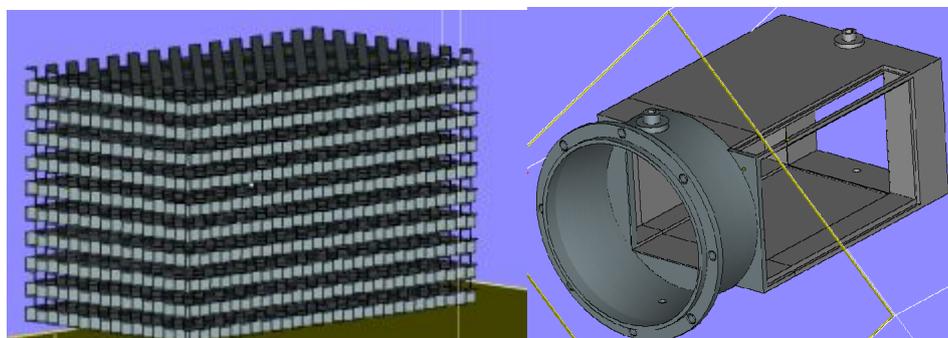


Рис. 3. Модель наполнителя катализатора (слева) и блок для его PIV-исследования (справа)



Рис. 4. Экспериментальный образец горелки с прозрачными окнами в наружной части для PIV-исследования потока внутренней зоны



Рис. 5. Образец крыльчатки лопастного насоса для гидродинамических испытаний

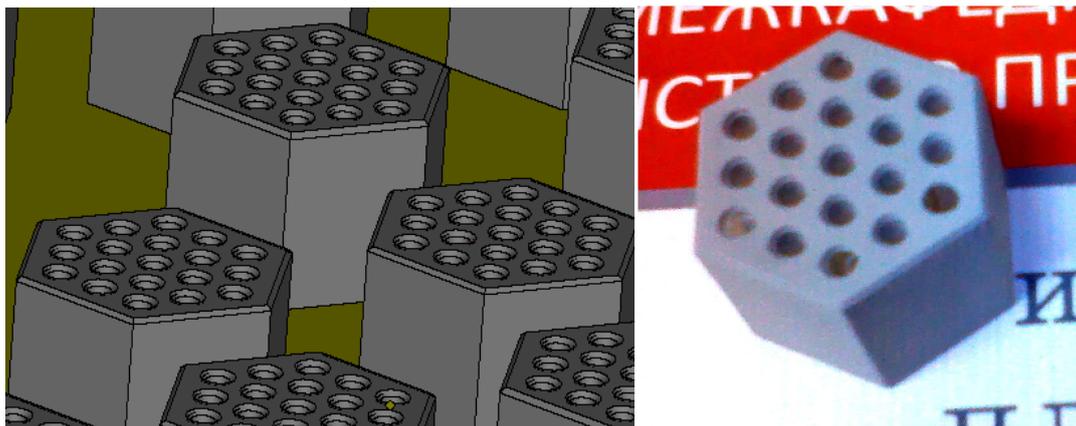


Рис. 6. Модель сотового заполнителя для гидравлических испытаний

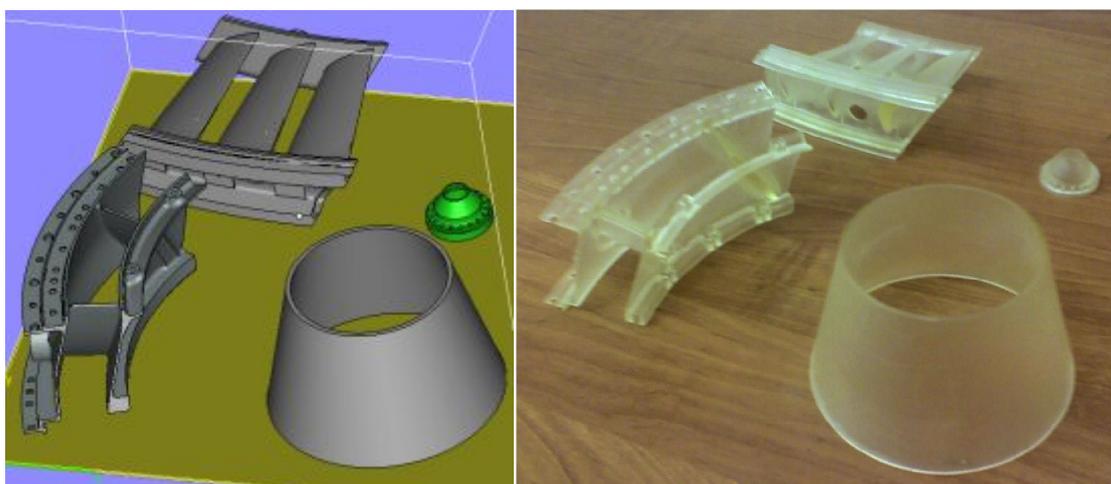


Рис. 7. Компьютерные модели (слева) и физические масштабные модели (справа) элементов ГТД: сектор лопаточного венца, форсунка, осесимметричное сопло и опора с конфузорной проточной частью

Накопленный опыт создания таких экспериментальных образцов позволил сформулировать основные требования к экспериментальным образцам для газодинамических исследований:

- материал моделей должен обладать достаточной прочностью, жёсткостью и твёрдостью, чтобы выдерживать усилия, создаваемые набегающими потоками газа или жидкости, вибрациями стенда, а также центробежные и гравитационные нагрузки: образцы нередко имеют консольные крепления, а также могут быть подвергнуты вращению;

- материал должен быть непроницаем для газа или жидкости, не должен впитывать или активно задерживать на себе рабочие среды, должен быть стоек к воздействию исследуемых жидкостей (топлив, масел, газов). При оценке исследуемых сред следует учитывать не только сами

рабочие тела, но дополнительные компоненты, необходимые для средств измерений. Например, для работы LDA- и PIV-измерителей необходим засев потока частицами водяного пара или масляным туманом. В последнем случае при высокой концентрации возможно осаждение тумана на образец в виде масляной плёнки.

Далеко не все технологии прототипирования [7] позволяют удовлетворить вышеописанным требованиям. Стереолитографические модели вполне им удовлетворяют [8, 9]:

1. Стереолитографическая смола, из которой изготавливаются модели, обладает высокой химической стойкостью, достаточной для проведения любых исследований: материал практически инертен к жидким углеводородам (бензин, керосин, нефтяные и синтетические масла), в течение десятков минут способен выдержи-

вать воздействие сильных растворителей (спирт, нефтяные растворители, ацетон), потоков горячих (до 100°C) воды и воздуха. При сильном нагреве во время экспериментов с горением смолы не плавится и сохраняет первоначальную форму. Данные свойства позволяют применять стереолитографические прототипы даже для огневых испытаний. Например, при исследовании процесса воспламенения топливной форсунки полное сгорание кромки пластикового прототипа происходит в течение 0,5–1,5 с, что позволяет зафиксировать процесс воспламенения и горения с помощью высокоскоростной камеры, а также PIV-измерителя размеров и распределения капель.

2. Материал твёрдый, плотный, непористый, однородный по структуре, непроницаемый для жидких сред. Это позволяет формировать экспериментальные модели каналов сложных пространственных форм с гарантированным разделением отдельных внутренних полостей даже тонкими перегородками (толщиной 1–2 мм). Несмотря на то, что прототип формируется путём послойного отверждения материала, структура получается практически однородной: отдельные слои не отделяются под механическим или химическим воздействиями. Таким образом, не стоит беспокоиться, что какая-то часть канала окажется перекрытой отклеившимся из-за длительного воздействия потока воды верхним слоем прототипа. Хотя для других технологий прототипирования, например, послойного ламинирования, «шелушение» слоёв прототипа не является редкостью, что просто неприемлемо при газодинамических исследованиях сложных каналов.

3. Высокая удельная прочность, достаточная для испытаний вращающихся моделей [10]. При прочности стереолитографического полимера 30–80 МПа (большие значения при отсутствии агрессивных воздействий) и плотности 1,0–1,1 г/см³ его удельная прочность составляет $(27 \div 80) \times 10^3 \text{ м}^2/\text{с}^2$, что сопоставимо с удельной прочностью чистого

алюминия ($\sim 20 \cdot 10^3 \text{ м}^2/\text{с}^2$) или титана ($\sim 70 \cdot 10^3 \text{ м}^2/\text{с}^2$). Это обуславливает значительную способность стереолитографических моделей противостоять инерционным нагрузкам, возникающим при газодинамических испытаниях вращающихся рабочих колёс турбин и крыльчаток насосов. При нагружении инерционными и газовыми силами модели лопаток могут изгибаться, изменяя свою форму, что вносит погрешность в результаты эксперимента, поэтому использование для испытаний податливых материалов неприемлемо. Стереолитографические модели обладают высокой жёсткостью, поэтому практически не изгибаются под любыми нагрузками вплоть до полного разрушения.

4. Материал хорошо шлифуется и полируется. Для исследований, в которых важна шероховатость поверхностей, могут быть получены модели любой степени гладкости, вплоть до глянцевых поверхностей. Кроме шлифовки может быть использована окраска любыми красками и лаками, включая термостойкие. Высокая адгезия стереолитографического полимера обеспечивает качественное сцепление лакокрасочного покрытия с основой, что гарантирует отсутствие отслоений как при механическом, так и химическом воздействии. Также это свойство позволяет создавать сборные модели, склеиваемые по частям, в том числе из разнородных материалов. При этом модели могут склеиваться как без возможности последующей разборки (с использованием сильных клеев), так и с возможностью разъединения склеенных деталей (при использовании силиконовых клеевых герметиков). В последнем случае остатки клея легко удаляются с поверхности деталей благодаря плотной структуре (отсутствию пористости) твёрдого фотополимера.

Кроме того, следует обозначить определённые особенности экспериментальных образцов для газодинамических исследований, которые позволяют использовать дополнительные преимущества лазерной стереолитографии:

- как правило, образцы представляют собой по форме массив круглого или прямоугольного сечений с большими внутренними полостями, т.е. фактически модели представляют собой сложный набор тонких стенок. При этом объём материала, формирующего стенки-перегородки, составляет лишь небольшую часть от габаритного объёма модели;

- форма образцов для газодинамических исследований, как правило, «обтекаемая»: с плавными обводами, постепенными изменениями кривизны, большим количеством галтелей. Это, в первую очередь, связано с необходимостью обеспечения плавности каналов для газовых потоков, но также обусловлено и прочностными соображениями.

Указанные особенности позволяют реализовать дополнительные преимущества лазерной стереолитографии:

- в «расход» идёт только отверждённый полимер, а жидкий полимер из всех

внутренних поверхностей сливается обратно и может быть повторно использован. Во-первых, это значительно сокращает конечную стоимость прототипа, и, во-вторых, позволяет создавать целиком такие детали, которые невозможно выполнить неразъёмными, пользуясь традиционными или другими технологиями быстрого прототипирования (рис. 8);

- модели в процессе формирования поддерживаются так называемыми подпорками, создаваемыми из того же материала, что и сам прототип (рис. 9). При плавных обводах прототипа количество подпорок оказывается минимальным, так как в отличие, например, от технологии 3D-печати, при выращивании стереолитографических прототипов поддерживающие слои формируются только для сильно нависающих поверхностей, а не для всех (рис. 10).



Рис. 8. Элементы турбомашин, изготовленные целиком

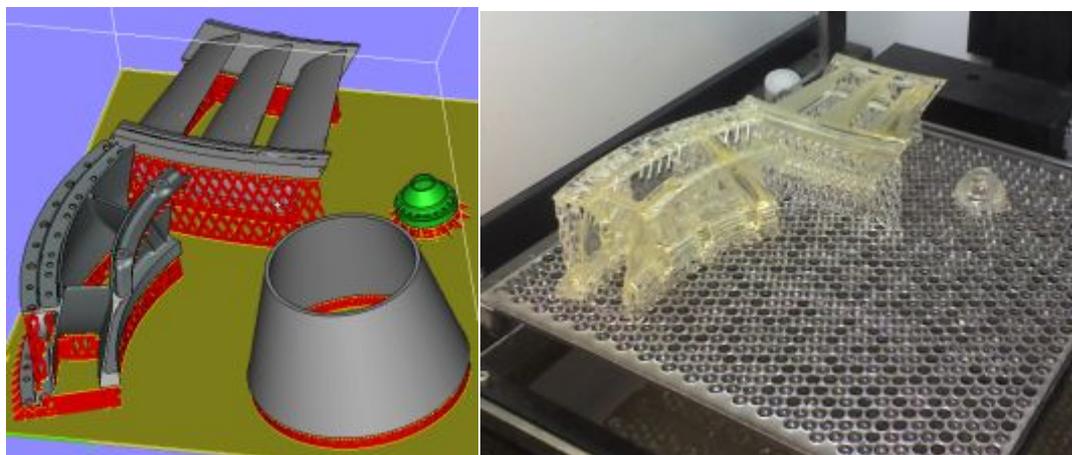


Рис. 9. 3D-модели с подпорками, подготовленные к выращиванию в программе Magics (слева), и готовые физические модели на платформе установки ЛС-250 (справа)

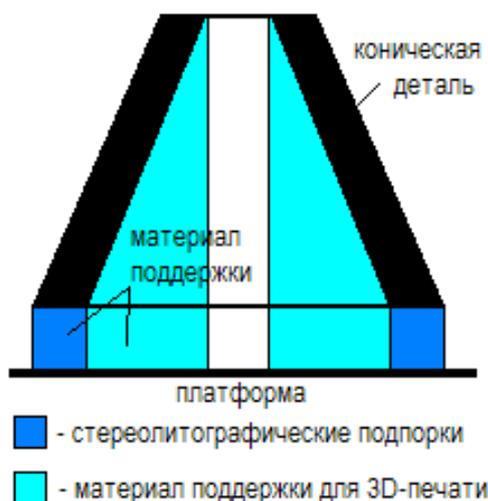


Рис. 10. Разница объёма поддерживающего материала при использовании технологий стереолитографии и 3D-печати

У стереолитографических моделей есть и недостаток – коробление моделей вследствие усадки фотополимера. Короблению более подвержены модели, имеющие форму пластин, когда размер по одному измерению на порядок меньше, чем

по двум другим. При изготовлении же моделей для газодинамических исследований, которые имеют размеры одного порядка по всем измерениям, коробление практически отсутствует.

Кроме описанных выше преимуществ стереолитографической технологии, следует отметить ещё один аспект. Лазерная стереолитография может использоваться для формирования мастер-моделей, по которым с помощью технологий литья в силиконовые формы [11] могут быть отлиты восковые модели, а по ним – металлические отливки. В СГАУ успешно выполнены такие работы. Например:

- создание пластиковых крыльчаток для насоса (рис. 11);
- создание металлического газохода для ракетного двигателя (рис. 12);
- создание металлической крыльчатки для микроГТД (рис. 13).

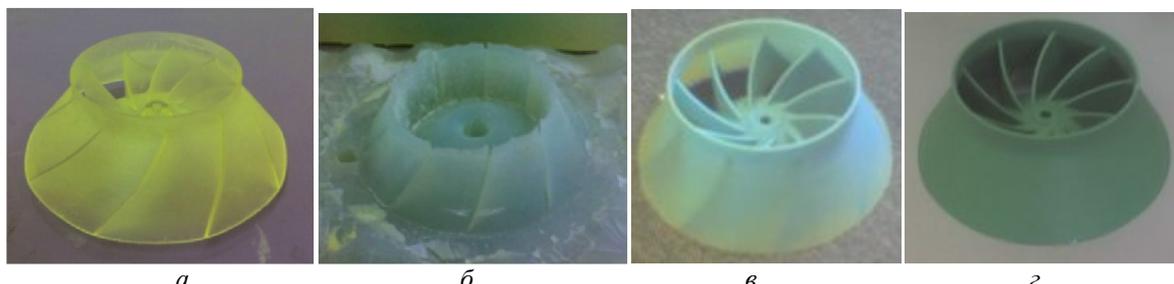


Рис. 11. Этапы изготовления крыльчатки:
 а - стереолитографический прототип; б - изготовленная по нему силиконовая форма;
 в - отлитая в силикон восковка (для дальнейшего литья металла);
 г - отлитая в силикон деталь из компаунда



Рис. 12. Создание газохода для ракетного двигателя:
 а - мастер-модель (сборка из стереолитографических прототипов); б - силиконовая форма;
 в - восковка для литья металла



Рис. 13. Создание металлической крыльчатки для микроТТД (слева направо): восковка, силиконовая форма, металлическая отливка

Поэтому стереолитографические модели могут быть использованы дважды: на первом этапе как экспериментальные образцы для газодинамических испытаний на модельных рабочих телах, а после предварительных испытаний – как мастер-модели для изготовления металличе-

ских экспериментальных образцов для огневых испытаний.

Таким образом, при изготовлении моделей для газодинамических исследований выгоднее всего использовать технологию лазерной стереолитографии, поскольку получаемые с её помощью модели максимально полно отвечают требованиям, предъявляемым к экспериментальным образцам для газодинамических исследований.

Работа выполнена при финансовой поддержке Правительства Российской Федерации (Минобрнауки) на основании Постановления №218 от 09.04.2010 (шифр темы 2013-218-04-4777) с использованием оборудования ЦКП САМ-технологий, оснащенного в рамках проекта RFMEFI59314X0003.

Библиографический список

1. Межкафедральная лаборатория быстрого прототипирования СГАУ. <http://mlbp.narod.ru/>
2. Научно-образовательный центр газодинамических исследований. <http://secfdr.ssau.ru/>
3. Шаблий Л.С. Метод и средства газодинамического проектирования и доводки выходных устройств центростремительных микротурбинных приводов. Дис. кандидата технических наук. Самара, 2012. 162 с.
4. Кныш Ю.А., Цыбизов Ю.И., Дмитриев Д.Н., Горшкалев А.А. Формирование микровихревых потоков газа в каналах блочного катализатора с компланарными каналами // Вестник СГАУ. 2013. № 3(41), ч. 1. С. 113-117.
5. Кныш Ю.А., Цыбизов Ю.И., Дмитриев Д.Н., Горшкалев А.А. Формирование в каналах блочного катализатора микровихревых потоков газа с интенсивной закруткой // Вестник СГАУ. 2012. № 3(34), ч. 3. С. 121-125.
6. Кныш Ю.А. Малоэмиссионная каталитическая горелка: патент РФ на полезную модель № 2014125978/06(042256); опубл. 27.11.2014.
7. Центр Технологий ФГУП «НАМИ». <http://gp-salon.weebly.com/>
8. Лаборатория лазерного синтеза объёмных изделий ИПЛИТ РАН. <http://shatura.laser.ru/Rapid/>
9. Матвеев В.Н., Шаблий Л.С. Опыт освоения оборудования быстрого прототипирования при изготовлении моделей деталей двигателей летательных аппаратов // Материалы Всеросс. научно-техн. конференции «Новые материалы и технологии - НМТ-2008». Т 2. М.: МАТИ, 2008. С. 65-66.
10. Шаблий Л.С. Исследование применимости технологии лазерной стереолитографии для изготовления турбоприводов // Сборник конкурсных докладов VIII Всероссийского молодежного Самарского конкурса-конференции научных работ по оптике и лазерной физике. Самара: Самарский университет, 2010. С. 275-281.
11. Лаборатория аддитивных технологий СГАУ. <http://www.ssau.ru/struct/deps/pdla/lat/>

Информация об авторах

Матвеев Валерий Николаевич, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой теории двигателей летательных аппаратов, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: tdla@ssau.ru. Область научных интересов: лопаточные машины, турбоприводы, микротурбины.

Шаблий Леонид Сергеевич, кандидат технических наук, доцент кафедры теории двигателей летательных аппаратов, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академи-

ка С.П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: shelbi-gt500@mail.ru. Область научных интересов: лопаточные машины, численные методы расчёта, программирование.

Кривцов Александр Васильевич, ассистент кафедры теории двигателей летательных аппаратов, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: krivcov63@ramler.ru. Область научных интересов: моделирование рабочих процессов тепловых машин.

APPLICATION OF STEREO LITHOGRAPHY PROTOTYPES FOR GAS DYNAMIC TESTS

© 2015 V. N. Matveev, L. S. Shabliy, A. V. Krivcov

Samara State Aerospace University, Samara, Russian Federation

Planning any pilot study brings up the question of producing test specimens. These are quite often rather complex, consisting of several individual parts put together. Test specimens are very expensive and take long time to produce using traditional technologies of production because of high accuracy required of them and absence of quantity production. Dynamically developing additive technologies (rapid prototyping) make it possible to produce plastic and metal parts of any form using a uniform technology. Therein the complexity of the part shape practically does not increase the manufacturing complexity and the need for equipment is absent or minimal. Laser stereolithography (SLA – Stereolithography Laser Additive) is one of the earliest and most precise technologies of 3D-printing. The paper presents the experience of using a prototyping machine on the basis of laser stereolithography for the production of experimental specimens for gas-dynamic investigations. On the basis of synthesis of this experience, basic requirements for similar experimental specimens are formulated: durability, rigidity and hardness, impermeability for gas or liquid, resistance to working fluid diffusion, resistance to chemically aggressive fluids (including fuels, oils). Comparison of different technologies of prototyping shows that stereolithographic models meet all listed requirements better than others.

Prototype, stereolithography apparatus (SLA), gas dynamic tests, 3-D printing, computer-aided design, computer-aided manufacturing.

References

1. *Mezhkafedral'naya laboratoriya bistrogo prototipirovaniya SGAU* [SSAU interdepartment laboratory of rapid prototyping]. Available at: <http://mlbp.narod.ru/>
2. *Nauchno-obrazovatel'nyy tsentr gazodinamicheskikh issledovaniy* [Research-and-educational center of gas dynamic research.]. Available at: <http://secfdr.ssau.ru/>
3. Shabliy L.S. *Metod i sredstva gazodinamicheskogo proektirovaniya i dovodki vykhodnykh ustroystv tsentrostremitel'nykh mikroturbinnnykh privodov. Diss. kand. tekhnicheskikh nauk* [Method and facilities of gas dynamic design and refining of output devices of centripetal. microturbine drives.

Candidate Dissertation in Engineering Science.] Samara, 2012. 162 p.

4. Knysh Yu.A., Tsybizov Yu.I., Dmitriev D.N., Gorshkalev A.A. Formation of microvortex gas flows in channels of a block catalyst with coplanar channels. *Vestnik of the Samara State Aerospace University*. 2013. No. 3(41), part 1. P. 113-117 (In Russ.)

5. Knysh Yu.A., Tsybizov Yu.I., Dmitriev D.N., Gorshkalev A.A. Formation in the channels of the block catalyst the micro vortex gas flows with intense twist. *Vestnik of the Samara State Aerospace University*. 2012. No. 3(34), part 3. P. 121-125. (In Russ.)

6. Knysh Yu.A. *Maloemissionnaya kataliticheskaya gorelka* [Low-emission catalytic burner]. Patent RF no. 2014125978/06 (042256), 2014. (Publ. 27.11.2014)

7. *Tsentr Tekhnologiy FGUP «NAMI»*. [Center of Technologies of the “NAMI” Federal State Unitary Enterprise]. Available at: <http://rp-salon.weebly.com/>

8. *Laboratoriya lazernogo sinteza ob"emnykh izdeliy IPLIT RAN* [Laboratory of laser

synthesis of three-dimensional products of the Institute on Laser and Information Technologies, Russian Academy of Sciences]. Available at: <http://shatura.laser.ru/Rapid/>

9. Matveev V.N., Shabliy L.S. Opyt osvoeniya oborudovaniya bystrogo prototipirovaniya pri izgotovlenii modeley detaley dvigateley letatel'nykh apparatov. *Materialy Vseross. nauchno-tekhn. konf. «Novye materialy i tekhnologii - NMT-2008»*. V. 2. Moscow: MATI Publ., 2008. P. 65-66. (In Russ.)

10. Shabliy L.S. Issledovanie primenimosti tekhnologii lazernoy stereolitografii dlya izgotovleniya turboprivodov. *Sbornik konkursnykh dokladov VIII Vserossiyskogo molodezhnogo Samarskogo konkursa-konferentsii nauchnykh rabot po optike i lazernoy fizike*. Samara: Samarskiy universitet Publ., 2010. P. 275-281. (In Russ.)

11. *Laboratoriya additivnykh tekhnologiy SGAU* [SSAU Laboratory of Additive Technologies]. Available at: <http://www.ssau.ru/struct/deps/pdla/lat/>

About the authors

Matveev Valeriy Nikolaevich, Doctor of Science (Engineering), Professor of the Department of the Theory of Aircraft Engines, Samara State Aerospace University, Samara, Russian Federation. E-mail: tdla@ssau.ru. Area of Research: turbomachines, microturbines.

Shabliy Leonid Sergeevich, Candidate of Science (Engineering), Assistant Professor of the Department of the Theory of Aircraft Engines, Samara State Aerospace University, Samara, Russian Federation. E-mail: [\[gt500@mail.ru\]\(mailto:gt500@mail.ru\). Area of Research: impeller machines, numerical calculations, programming.](mailto:shelbi-</p></div><div data-bbox=)

Krivtsov Alexander Vasileevich, assistant of the Department of the Theory of Aircraft Engines, Samara State Aerospace University, Samara, Russian Federation. E-mail: krivcov63@ramler.ru. Area of Research: impeller machines, numerical calculations, processes of heat exchange and diffusion.