УДК 67.02, 681.6

Вестник СибГАУ
Том 18, № 1. С. 10–14

ПРИМЕНЕНИЕ АДДИТИВНОЙ ТЕХНОЛОГИИ ПРИ ИЗГОТОВЛЕНИИ КАРКАСА СТАТОРА ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ-МАХОВИКА

С. А. Акарачкин, Д. В. Ермаков

АО «Научно-производственный центр «Полюс»
Российская Федерация, 634050, г. Томск, просп. Кирова, 56в
E-mail: info@polus-tomsk.ru

Снижение себестоимости продукции и сроков ее изготовления всегда актуально, однако с помощью традиционных методов инструментальной обработки материалов достичь его не всегда возможно. Альтернативой здесь может служить аддитивная технология. Первые коммерческие разработки оборудования, позволяющего изготавливать изделия по аддитивной технологии методами 3D-печати, появились более 30 лет назад. Ее бурное развитие в последние годы связано с прекращением действия патентных ограничений.

Применение трехмерной печати способно значительно сократить использование инструментальной обработки или полностью отказаться от нее. Одним из главных преимуществ при этом является возможность изготовления изделий сложной геометрической формы, в том числе с внутренними полостями.

Разработано множество вариантов 3D-принтеров, отличающихся не только способом печати, но и используемыми материалами, в частности пластмассами, в том числе с наполнением стеклом или углеродом, металлами и керамикой.

Для исследования возможностей аддитивной технологии на FDM- и SLS-принтерах напечатаны каркасы статора электродвигателя-маховика, применяемого в системе ориентации космического аппарата. Каркасы подвергались воздействию внешних неблагоприятных факторов, таких как вакуум, повышенные температура и влажность. Наиболее перспективной показала себя печать на SLS-принтере из порошкообразного полиамида.

Ключевые слова: аддитивная технология, электродвигатель-маховик, 3D-принтер, стойкость к внешним воздействующим факторам.

Sibirskii Gosudarstvennyi Aerokosmicheskii Universitet
imeni Akademika M. F. Reshetneva. Vestnik
Vol. 18, No. 1, P. 10–14

APPLICATION OF ADDITIVE TECHNOLOGY TO PRODUCE THE FRAMEWORK OF AN ELECTRICAL DRIVE-FLYWHEEL

S. A. Akarachkin, D. V. Ermakov

JSC “Scientific and Industrial centre “Polyus”
56v, Kirov Av., Tomsk, 634050, Russian Federation
E-mail: info@polus-tomsk.ru

The purpose of reducing the prime cost and time of manufacture was always timely. The additive technology can be the alternative to the traditional one which uses tools treatment of materials. The first commercial equipment to make products by additive technology was made more than 30 years ago. Due to the termination of the patent restrictions the rapid development of this technology has been observed recently. The equipment operating by the additive technology is called 3D printers and manufacturing process 3D-printing.

The application of additive technology can significantly reduce the use of instrumental treatment or completely abandon it. One of the main advantages of the additive technology is the possibility of manufacturing products of complex geometric shape, it can also include internal cavities.

Many types of 3D printers were designed; it varies not only by a pressing method, but using materials. In present time it becomes available to print by metal, ceramic and plastic which can be filled with glass or carbon.

The framework of electrical drive-flywheel, which is used at orientation system of satellites, was printed to test the additive technology. The printing was done by FDM and SLS printers. The frameworks have been exposed to unfavorable external factors such as vacuum, elevated temperature and humidity. SLS technology of printing by powder of polyamide was identified as the most promising one.

Keywords: additive technology, electrical drive-flywheel, 3D-printer, prototyping, resistance to external factors.

Введение. Традиционная технология производства деталей при помощи инструментальной обработки заготовок с удалением материала имеет ряд недостатков: большое количество отходов после обработки, необходимость применения различной технологической оснастки и обрабатывающего инструмента.

В перспективе на замену традиционной может прийти аддитивная технология, основанная на построении требуемой детали с добавлением материала и реализующая прямое преобразование цифровой модели изделия в физический объект, минуя инструментальную обработку. Технологическое оборудование, работающее данным образом, получило название 3D-принтера, а процесс изготовления изделия – 3D-печати.

В настоящее время разработано множество методов 3D-печати с возможностью использования разнородных материалов – пластмасс, металлов и керамики.

Успешное применение такого способа для изготовления деталей из титана продемонстрировала авиастроительная компания Boeing [1], а части деталей ракетных двигателей из жаропрочных сталей – компания SpaceX [2].

Среди разработок отечественных университетов широко известны результаты 3D-печати в НИ СГАУ имени академика С. П. Королева при создании камеры сгорания газотурбинного двигателя [3; 4].

Аддитивная технология находит повсеместное применение в типичных производственных задачах [5; 6]. Вследствие этого необходимо ее дальнейшее изучение для оценки перспектив внедрения при изготовлении ряда трудоемких изделий сложной формы.

Описание работы. Для исследования технологических возможностей, предлагаемых аддитивной технологией, был спроектирован каркас статора электродвигателя-маховика [7–9]. Подобные изделия выполняются из пресс-материала АГ-4В, ГОСТ 20437–89, методом горячего прессования, что требует создания дорогостоящих пресс-форм. Заготовка, полученная данным способом, проходит дополнительную механическую обработку. Конкретный типоразмер каркаса статора может быть изготовлен для изделия в единичном экземпляре и далее никогда не будет повторен. Применение в таком случае пресс-форм и горячего прессования в целом становится экономически не выгодным, в то время как 3D-печать может дать заметный экономический эффект.

Исходя из этого, по разработанной модели производилась печать изделия (рис. 1) из пластиков типа ABS [10] и HIPS методом послойного укладывания нити расплава (FDM-принтер), а также из порошкообразного полиамида [11] Nylon методом селективного лазерного спекания (SLS-принтер). Внутренний диаметр каркаса статора составил 72 мм.

Для оценки эксплуатационных характеристик каркасов, изготовленных методом 3D-печати, была составлена следующая программа испытаний:

– измерение геометрических размеров согласно конструкторской документации;

– проведение термоциклирования (температура ±60 °С, 3 цикла, время выдержки при каждой температуре 2 ч);

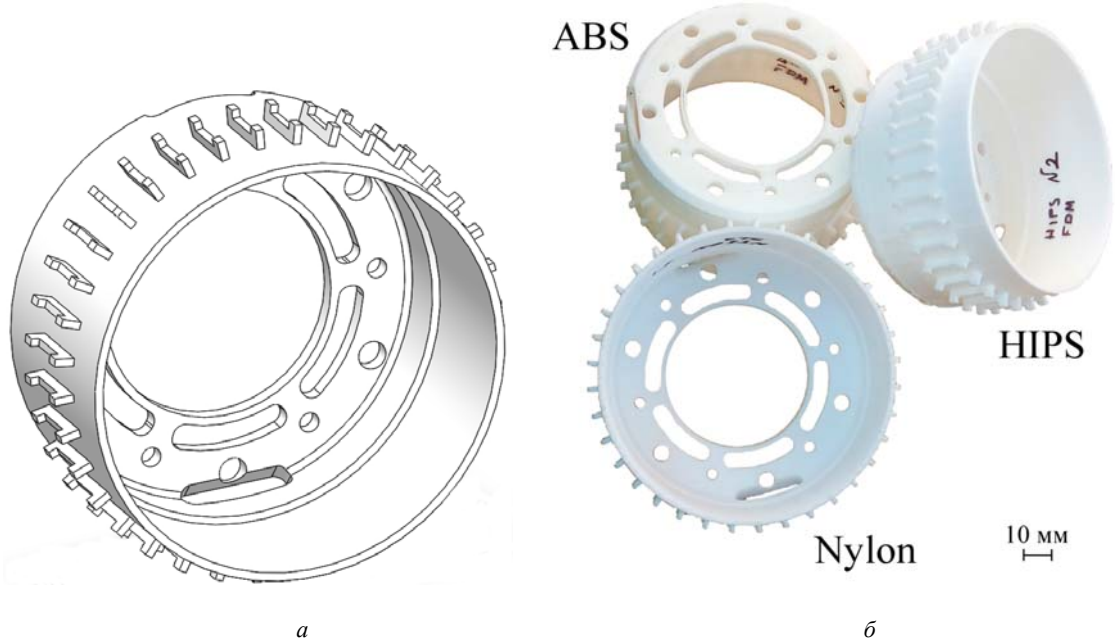
– повторное измерение геометрических размеров;

– определение показателей газовыделения материалов в соответствии с ГОСТ Р 50109–92;

– измерение влагопоглощения материалов после выдержки при относительной влажности воздуха (95 ± 5) % и температуре 20–25 °С в течение 3 суток;

– наложение обмотки с использованием штатной технологической оснастки и действующего технологического процесса.

Результаты испытаний должны показать, обладает ли каркас достаточной механической прочностью для данного типа изделий, а также стойкостью к внешним воздействующим факторам при хранении, транспортировании и отчасти эксплуатации в условиях вакуума.



а *б*

Рис. 1. 3D-модель (*а*) и внешний вид (*б*) напечатанных каркасов

Результаты испытаний. При измерении изделий установлено, что наименьший разброс относительно исходных геометрических размеров имеет каркас, напечатанный на SLS-принтере. Большинство измеренных размеров имело идентичное отклонение от значений, заданных в конструкторской документации. Стоит ожидать от данного способа печати лучшие показатели повторяемости геометрии напечатанных изделий при серийном производстве.

По абсолютному отклонению размеров (0,05–0,15 мм) оба рассмотренных метода печати (SLS и FDM) схожи.

При изготовлении изделий точной механики методом 3D-печати требуется минимальная финишная постобработка. Тем не менее, при подготовке 3D-модели в САПР также необходимо задать припуски, учитывая последующее доведение рабочих размеров до требуемых значений. Даже с учетом доработки трудозатраты и материалоемкость готовых изделий значительно ниже в сравнении с изготовленными по традиционной технологии с помощью механической обработки заготовок или применения пресс-форм для литья пластмасс под давлением. Литье под давлением особенно невыгодно при мелкосерийном производстве.

Повторное измерение размеров после воздействия термоциклов согласно программе испытаний показало, что отклонение размеров относительно первоначальных показателей различно для каркасов, изготовленных по технологии FDM (Δ_{max} = 0,4 мм) и SLS (Δ_{max} = 0,1 мм). Большее значение данного параметра у изделий, созданных методом FDM, можно объяснить наличием в материале в исходном состоянии множества мелких расслоений, вызванных несоблюдением оптимального режима печати. Воздействие знакопеременных температур могло послужить причиной увеличения размеров трещин (зазоров между слоями материала), что в итоге сказалось на габаритах каркаса. Также стоит отметить, что при измерении размеров один из каркасов, выполненных из пластика HIPS, растрескался вдоль линии соединения слоев.

Так как при 3D-печати методом селективного лазерного спекания изделие формируется из мелкодисперсного порошка, то качество и точность построения значительно выше, чем при использовании метода печати укладкой нити расплава.

Поскольку каркас статора электродвигателя-маховика располагается в герметичном объеме корпуса с остаточным давлением 10^{-5} мм рт. ст., то задача обеспечения минимального газовыделения становится весьма важной. Интенсивное выделение летучих веществ из материала каркаса способно привести к изменению рабочих характеристик двигателя-маховика. Определение газовыделения материалов дало следующие результаты (табл. 1).

Таблица 1

Параметры газовыделения материалов каркасов

Материал	Потеря массы, %	Летучие конденсируемые вещества, %
ABS	0,74	0,05
HIPS	2,2	0,3
Nylon	1,2	0,1

При допустимых значениях потери массы не более 1 % и содержании летучих конденсируемых веществ не более 0,1 % самым газящим материалом показал себя пластик HIPS. По этой причине он не может быть рекомендован для изделий вакуумной техники.

Из всех рассмотренных пластиков наилучшими показателями газовыделения обладает ABS. Его применение не требует предварительной дегазации деталей перед установкой в изделия.

Материал Nylon имеет повышенное значение потери массы. Для деталей из этого пластика необходима предварительная дегазация либо покрытие малогазящим полимерным составом, например лаком или компаундом.

Следующим этапом комплексных испытаний каркасов было определение влагопоглощения материалов, из которых они изготовлены (табл. 2), так как повышенное влагопоглощение материала в процессе хранения или транспортирования может сказаться на снижении сопротивления изоляции каркаса или повышении газовыделения в условиях вакуума.

Таблица 2

Показатели влагопоглощения каркасов

Материал	Влагопоглощение, %
ABS	0,63
HIPS	0,26
Nylon	0,56

Влияние адсорбированной влаги на сопротивление изоляции пластиков, используемых для 3D-печати, не исследовалось по причине отсутствия образцов требуемой по ГОСТ 6433.2–71 формы. Стойкость к воздействию влаги определялась косвенно по изменению массы изделий.

На основании измеренных показателей можно сделать вывод о пригодности испытанных пластиков к эксплуатации в условиях влажного климата. Для сравнения, измеренные значения влагопоглощения широко применяемого литьевого стеклонаполненного полиамида 610-Л-СВ ГОСТ 10589–87 и полиамида ПА66-КС ОСТ 6-11-498–79 составляют 1,4 и 3,3 % соответственно.

По результатам экспериментальной работы наиболее перспективным методом 3D-печати является селективное лазерное спекание. Каркас, напечатанный из порошкового полиамида с помощью этого метода, наиболее точно воссоздает геометрию исходной компьютерной модели, не имеет дефектов в виде расслоений, трещин или раковин. Показатели влагопоглощения и газовыделения также находятся на хорошем уровне.

Данный каркас был выбран для проведения завершающего этапа испытаний – укладки обмотки. Обычно для выполнения этой операции требуется применение специальной оснастки, поскольку к изделию прикладывается значительная механическая нагрузка. Укладка же обмотки на каркас, изготовленный методом селективного лазерного спекания, осуществлялась с использованием штатной технологической оснастки без дополнительных доработок.

Рис. 2. Общий вид обмотанного каркаса

Как было сказано ранее, напечатанный каркас имеет отклонение в размерах от заданных в конструкторской документации около 0,1–0,15 мм, вследствие чего после установки на технологическое приспособление и дальнейшей укладки обмотки с наложением нитяного бандажа снять каркас с приспособления было затруднительным.

Вместе с тем стоит отметить, что жесткость каркаса, напечатанного на 3D-принтере, значительно меньше, чем у каркаса, изготовленного традиционным способом из пресс-материала АГ-4В (1700 и 22 000 МПа соответственно). Поэтому при укладке обмотки усилие наложения нитяного бандажа было скорректировано в меньшую сторону.

Коммерчески доступны SLS-принтеры, печатающие стеклонаполненным полиамидом, например, ProX™ 500 Plus компании 3D Systems. Модуль упругости при изгибе композита DuraForm GF составляет 3106 МПа. Для внедрения в производство подобный композит более предпочтителен, чем ненаполненный полиамид [12–15].

Для оценки жесткости конструкции готового обмотанного каркаса (рис. 2) и способности противостоять действию сжимающего усилия от уложенной с натягом обмотки измерялись его геометрические размеры.

Измерения показали, что внутренний диаметр каркаса претерпел незначительное изменение. Исходное значение диаметра составило 71,85–71,90 мм, после укладки обмотки он уменьшился до 71,78–72,03 мм. Жесткость каркаса оценена как удовлетворительная.

Заключение. Экономическая выгода 3D-печати велика при мелкосерийном производстве, где нецелесообразны методы автоматизации и часто требуется изготовление дополнительной технологической оснастки. Стоит отметить в этом случае минимальную постобработку деталей при жестких требованиях к чистоте поверхности и допусках на размеры.

Среди рассмотренных 3D-технологий наиболее перспективным выглядит селективное лазерное спекание. Абсолютное значение отклонений размеров при использовании этого метода не превышает 150 мкм. Он также обеспечивает отличную повторяемость геометрии. При проектировании изделий в САПР потребуется лишь припуск на постобработку с учетом погрешности печати.

У деталей, изготовленных по методу FDM, при внешнем осмотре обнаружены расслоения, что говорит о неправильно подобранных температурных режимах печати и скорости подачи материала из сопла головки экструдера. При согласованном режиме печати подобных расслоений в изделиях быть не должно.

Рассмотренные пластики ABS и Nylon показали низкое газовыделение в условиях вакуума. Вместе с тем по прочностным показателям материал Nylon уступает применяемым в настоящее время на предприятии стеклонаполненным полиамидам 610-Л-СВ и ПА66-КС, имеющим модуль упругости около 7000 МПа. У него этот показатель составляет 1700 МПа. В целом же пластик Nylon имеет достаточные прочностные характеристики для применения в качестве конструкционного материала: прочность при статическом изгибе не менее 45 МПа, прочность при растяжении не менее 48 МПа, удлинение при разрыве – 5 %.

Серьезным фактором, замедляющим внедрение аддитивной технологии, является стоимость оборудования. Модели 3D-принтеров, печатающие из порошкообразного полиамида методом селективного лазерного спекания и не относящиеся к профессиональному классу, предлагаются на отечественном рынке по цене от 40 000 долл. Стоимость моделей профессионального класса, например ProX™ 500 Plus компании 3D Systems, начинается от 700 000 долл.

Библиографические ссылки

1. Официальный сайт компании Boeing [Электронный ресурс]. URL: http://www.boeing.com/features/2016/08/record-books-08-16.page (дата обращения: 06.10.16).

2. Официальный сайт компании SpaseX [Электронный ресурс]. URL: http://www.spacex.com/news/2014/07/31/spacex-launches-3Dprinted-part-space-creates-printed-engine-chamber-crewed (дата обращения: 06.10.16).

3. Балякин А. В., Смелов В. Г., Чемпинский Л. А. Применение аддитивных технологий для создания деталей камеры сгорания // Вестник Самар. гос. аэрокосмич. ун-та. 2012. № 3(34). 458 с.

4. Ученые Самарского университета впервые «напечатали» на 3D-принтере камеру сгорания газотурбинного двигателя [Электронный ресурс] // Официальный сайт НИ СГАУ. URL: http://www.ssau.ru/news/12978-Uchenye-Samarskogo-universiteta-vpervye-napechatali-na-3D printere-kameru-sgoraniya-gazoturbinnogo-dvigatelya/ (дата обращения: 06.10.16).

5. Лысыч М. Н., Шабанов М. Л., Романов В. В. Области применения технологий 3D-печати // Современные наукоемкие технологии. 2014. № 12. 345 с.

6. Токарев Б. Е., Токарев Р. Б. Анализ технологий рынка 3D-печати: два года спустя [Электронный ресурс] // Науковедение : интернет-журнал. 2016. Т. 8, № 1. DOI: 10.15862/28EVN116 (дата обращения: 06.10.16).

7. Меркин Д. Р. Гироскопические системы. М. : Физматгиз : Наука, 1974. 356 с.

8. Ишлинский А. Ю. Механика гироскопических систем. М. : Изд-во АН СССР, 1963. 327 с.

9. Тищенко О. Ф. Элементы приборных устройств. М. : Высш. шк., 1978. 384 с.

10. Энциклопедия полимеров : в 3 т / под ред. В. А. Кабанова. М. : Советская энциклопедия, 1974. Т. 2. 1032 с. : ил.

11. Энциклопедия полимеров : в 3 т. / под ред. В. А. Кабанова. М. : Советская энциклопедия, 1977. Т. 3. 1152 с.

12. Первицкий Ю. Д. Расчет и конструирование точных механизмов. М. : Высш. шк., 1976. 456 с.

13. Биргер И. А., Шорр Б. А., Иосилевич Г. Б. Расчет на прочность деталей машин : справочник. 3-е изд., перераб. и доп. М. : Машиностроение, 1979. 702 с.

14. Исакович М. М., Клейман Л. И., Перчанок Б. Х. Устранение вибрации электрических машин. Л. : Энергия. Ленингр. отд-ние, 1979. 200 с.

15. Шубов И. Г. Шум и вибрация электрических машин. Л. : Энергия, 1973. 259 с.

References

1. *Boeing*. Available at: http://www.boeing.com/features/2016/08/record-books-08-16.page (accessed 06.10.16).

2. *Spase X*. Available at: http://www.spacex.com/news/2014/07/31/spacex-launches-3D printed-part-space-creates-printed-engine-chamber-crewed (accessed 06.10.16).

3. Balyakin A. V., Smelov V. G., Chempinskiy L. A. [Application of additive technology to produce the details of combustion space]. *Vestnik SGAU*. 2012, No. 3 (34), P. 47–52 (In Russ).

4. *NI SGAU*. Available at: http://www.ssau.ru/news/12978-Uchenye-Samarskogo-universiteta-vpervye-napechatali-na-3D-printere-kameru-sgoraniya-gazoturbinnogo-dvigatelya/ (accessed 06.10.16).

5. Lysych M. N., Shabanov M. L., Romanov V. V. [Sphere of technologies 3D printing]. *Journal Sovremennye naukoemkie tekhnologii*, 2014, No. 12, P. 165–169 (In Russ).

6. Tokarev B. E., Tokarev R. B. [Technology analysis of 3D printing market: two years later]. *Internet-zhurnal "Naukovedenie"*. 2016, Vol. 8, No. 1 (In Russ). Available at: http://naukovedenie.ru/ (accessed 06.10.16).

7. Merkin D. R. *Giroskopicheskie sistemy* [Gyroscopic systems]. Moscow, Phizmatgiz–Nauka Publ., 1974, 356 p.

8. Ishlinskij A. J. *Mekhanika giroskopicheskikh sistem* [Mechanics of gyroscopic systems]. Moscow, AN SSSR Publ., 1963, 327 p.

9. Ticshenko O. F. *Elementy pribornykh ustroystv*. [Element of instrument devices]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1978, 384 p.

10. Kabanova V. A. *Entsyklopedia polymerov* [Encyclopedia of polymer]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1974, Vol. 2, 1032 p.

11. Kabanova V. A. *Entsyklopedia polymerov* [Encyclopedia of polymer: in 3 values]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1977, Vol. 3, 1152 p.

12. Pervickij J. D. *Raschet i konstruirovanie tochnykh mekhanizmov* [Calculation and design of exact machinery]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1976, 456 p.

13. Birger I. A., Shorr B. A., Iosilevich G. B. *Raschet na prochnost' detaley machin* [Calculations of details of machines on durability]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1979, 702 p.

14. Isakovich M. M., Kleyman L. I., Perchanok B. H. *Ustranenie vibratsii elektricheskikh mashin* [Elimination of vibration in electric machines]. Leningrad, Energiya Publ., 1979, 200 p.

15. Shubov I. G. *Shum i vibratsiya elektricheskikh mashin* [Din and vibration of electrical machines]. Leningrad, Energiya Publ., 1973, 259 p.

© Акарачкин С. А., Ермаков Д. В., 2017