

ПРОТОТИПИРОВАНИЕ ЦЕНТРОБЕЖНЫХ МИКРОКОМПРЕССОРОВ МЕТОДАМИ АДДИТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

Седунин В.А., Марченко Ю.Г., Калинин И.А.

Уральский федеральный университет

имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, г. Екатеринбург

Ключевые слова: 3D печать, быстрое прототипирование, центробежный компрессор, микротурбина.

Аннотация. В статье рассматривается прототипирование центробежного компрессора с помощью аддитивных технологий. Внимание уделяется выбору технологии 3D печати изделий, а также влиянию параметров печати на механические свойства изделия. В ходе работы обосновывается выбор параметров печати. В заключении приводятся результаты испытаний прототипа микрокомпрессора, а также даются рекомендации по изготовлению серийных изделий.

ON 3D PROTOTYPING OF MICRO RADIAL COMPRESSOR

Sedunin V.A., Marchenko Y.G., Kalinin I.A.

*Ural federal university named after the first President of Russia B.N. Yeltsin,
Ekaterinburg*

Keywords: 3D manufacturing, rapid prototyping, centrifugal compressor, microturbine.

Abstract. The article discusses prototyping a centrifugal compressor using additive technologies. Attention is paid to the choice of 3D printing technology for products, as well as the influence of printing parameters on the mechanical properties of the product. In the course of work, the choice of printing parameters is justified. In conclusion, the results of tests of a prototype of a microcompressor are given, as well as recommendations for the manufacture of serial products are given.

Введение

На сегодняшний день применение аддитивных технологий позволяет существенно ускорить процесс разработки и вывода на рынок новых продуктов. Так, например, элементы турбомашин ранее изготавливались методами фрезерования или литья из металлических сплавов, что требовало больших затрат времени и средств. Аддитивные технологии позволяют изготовить детали любой сложности из полимерных пластиков с приемлемыми прочностными свойствами, достаточными для предварительных испытаний. За счет замены металлов полимерами общая стоимость мероприятий по доводке может быть снижена на 20-50%.

Наиболее характерными материалами для прототипирования рабочих колес турбин и компрессоров являются высокопрочные пластики типа РЕЕК, для прототипирования статорных элементов возможно использование ABS. В работе [1] сравниваются характеристики колеса микротурбины (диаметр – 49мм, скорость вращения до 36 000об/мин.) из ABS и РЕЕК пластика. Установлено, что прочность колеса из РЕЕК пластика на 50% выше. Однако ABS пластик, в силу своей доступности, возможно использовать для быстрого прототипирования изделий, что вызывает особый интерес.

Объект прототипирования

В качестве объекта прототипирования выступает центробежный микрокомпрессор предназначенный для нагнетания воздуха с давлением до 110м/бар и расходом более 200л/мин. Диаметр крыльчатки – 47мм, скорость вращения до 60 000об/мин. Прототипированию подлежит рабочее колесо компрессора и воздухосборная камера – «улитка», продемонстрированные на рисунке 1.

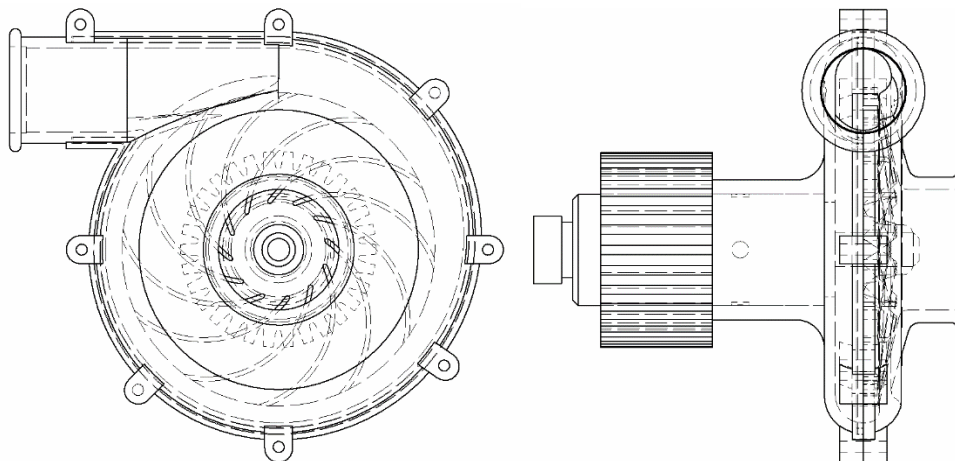


Рис. 1. Прототип рабочего колеса и воздухосборной камеры

При этом к изготовлению прототипа рабочего колеса предъявляются основные требования: 1) печать колеса производится с отсутствием поддержек с рабочей стороны; 2) прототип колеса кратковременно выдерживает нагрузки от вращения до 60 000об/мин; 3) необходимо достижение минимально возможной шероховатости рабочих поверхностей.

К изготовлению улитки предъявляются аналогичные требования, с учётом необходимости обеспечения структурной прочности при воздействии внешних нагрузок и избыточном давлении внутри камеры.

Параметры изготовления

В работах [2-3] описывается опыт прототипирования рабочих колес центробежных компрессоров методом FDM технологии. Печать деталей по технологии заключается в послойном добавлении материала (полимера). Преимуществом является возможность воспроизведения геометрических форм любой сложности, в частности лопаток компрессора. Однако поверхность лопаток при печати получается шероховатой, что вызвано слоистостью детали. Таким образом, для проведения аэродинамических испытаний требуется ручная доводка (полировка) получаемых рабочих колес.

В работе [4] приведено сравнение прочностных свойств импеллера водяного насоса, изготовленного по FDM технологии из ABS и PLA пластика. Установлено что прочность на разрыв ABS пластика примерно на 50% ниже, чем у PLA. В испытании на растяжение наибольшую прочность показал PLA, однако его пластичность существенно зависит от направления внешних нагрузок.

Таким образом в качестве технологии прототипирования выбрана технология FDM печати из PLA пластика, ввиду доступности и скорости изготовления.

Изделия при 3D печати зависят не только от характеристик материала, но и от параметров печати таких как: ориентация детали на печатном столе, скорость экструзии, толщина слоя и угол раstra (угол между траекторией сопла и осью X печатной платформы). Самые высокие значения предельной прочности и модуля упругости показывают образцы, напечатанные с углом раstra 0 градусов для слоев толщиной 0,2мм и 0,4мм. Ориентация раstra под 90 градусов показывает самые низкие значения предела прочности и модуля упругости. При этом образцы деталей, напечатанные слоем 0,2мм, показывают значительно более высокий предел прочности по сравнению с образцами с толщиной слоя 0,4мм [5].

Таким образом, для увеличения прочностных характеристик рабочего колеса и уменьшения шероховатости, изготовление деталей производилось слоем 0,2мм. Для финальных образцов изготовление производилось слоем 0,1мм, однако, чем тоньше слой, тем больше вероятность получения неравномерностей при заполнении и спекании. Опытным путем установлена оптимальная температура сопла в 200°C и температура стола в 60°C. Эти параметры обеспечивают наилучшее качество поверхности в данной задаче.

Установлено, что достижение оптимальной посадки рабочего колеса с натягом на вал обеспечивается при припуске на радиус +0,125мм, что учитывает усадку пластика PLA. При этом диаметр вала находится в диапазоне 3..6мм. Модель улитки была выполнена разъемной из двух половин, чтобы обеспечить минимальную шероховатость проточной части за счёт отсутствия поддержек. На рисунке 2 показана модель улитки, подготовленная к печати.

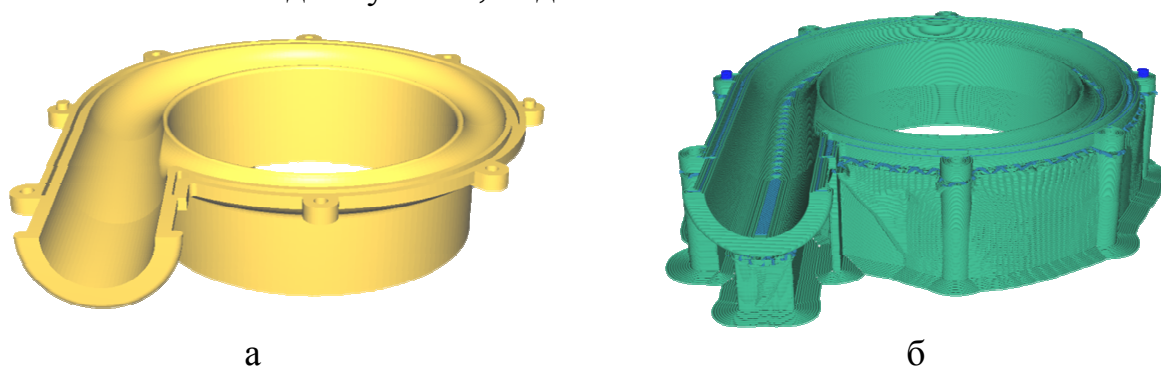


Рис. 2. Исходная модель части улитки (а) и послойная модель улитки для печати (б)

Испытания

В результате печати были получены функциональные прототипы рабочего колеса и улитки центробежного микрокомпрессора. Применение рекомендуемых выше параметров позволило обеспечить собираемость изделия без дополнительной обработки. На рисунке 3 продемонстрирована напечатанная модель.

Проведены аэродинамические и прочностные испытания. Суть испытаний заключалась в разгоне микрокомпрессора до максимальной частоты вращения (60 000 об/мин) и измерения параметров расхода воздуха и напора. Установлено, что для проведения аэродинамических испытаний прочности рабочего колеса достаточно. Однако при проведении длительных испытаний на минимальном расходе и максимальном напоре существенно возрастает температура воздуха, а значит и температура колеса, что приводит к разрушению последнего в течение нескольких минут.



Рис. 3. Напечатанная модель

Стоит отметить, что при изготовлении колеса из нейлона, ресурс работы составил более 168 часов, но качество поверхности и неоднородность материала привели к повышенным вибрациям, и, как следствие, преждевременному разрушению подшипников.

В серийном изделии температура воздуха может достигать 120 градусов Цельсия в течение длительного периода времени, а значит рабочие температуры материала должны быть выше. Поэтому для изготовления серийного изделия рекомендуется использовать инженерный PEEK пластик. Также к материалам изделия предъявляются требования по продолжительности работы более 10 000 часов, био-инертности и устойчивости к высокой концентрации кислорода.

Выводы

1. Для быстрого прототипирования изделия была выбрана технология FDM печати. Печать по такой технологии обеспечивает наилучшее соотношение цена/качество/скорость. Скорость печати колеса и улиток составляет до 18 часов.

2. В качестве материала для 3D печати прототипов был выбран PLA пластик, т.к. обладает большей прочностью на разрыв, а основной нагрузкой действующей на колесо является растяжение от центробежных сил. Также PLA пластик обладает меньшей усадкой по сравнению с ABS что делает его предпочтительным для печати рабочего колеса, в частности лопаток, т.к. от точности воспроизведения геометрии зависят основные аэродинамические параметры.

3. При печати образцов колёс для длительных испытаний был использован нейлон, однако, при этом не удалось достичь требуемой равномерности и качества поверхности. 3D печать из материалов класса PEEK на данный момент не освоена.

4. Рабочие колеса и улитки напечатаны соплом диаметром 0,4мм с толщиной слоя 0,2мм. Это позволяет достичь оптимального сочетания прочности, скорости печати и шероховатости поверхности. Параметры принтера при печати: температура стола 60 градусов Цельсия, температура сопла – 200 градусов. Припуск на радиус, учитывающий усадку и необходимый натяг, составил +0,125мм. Модель улитки была выполнена из двух половин, для минимизации количества поддержек и шероховатости проточной части.

5. Испытания показали, что рабочее колесо выдерживает требуемые нагрузки (до 60 000 об/мин). Нарботка пилотного образца составила 168 часов, что достаточно для проведения испытаний, но не для серийных изделий. Получаемые параметры напора/расхода зависят от шероховатости поверхности и герметичности и точности изделия.

6. Для изготовления серийного изделия предлагается использовать литые детали из РЕЕК пластика, ввиду био-инертности и устойчивости к высоким температурам (до 250 градусов), а также повышенным прочностным свойствам.

Список литературы

1. Hernandez Carrillo Isaias, Wood Christopher, Liu Hao. Advanced materials for the impeller in an ORC radial microturbine // Energy Procedia. 2017. No. 129. P. 1047-1054. doi.org/10.1016/j.egypro.2017.09.241.
2. Fernández Silvia, Calzado Mariano, Porras José, Romero Luis, Espinosa M.M., Domínguez Manuel. Additive Manufacturing and Performance of Functional Hydraulic Pump Impellers in Fused Deposition Modeling Technology // Journal of Mechanical Design. In press. 2016. doi.org/10.1115/1.4032089.
3. Prabha K., Rohit P., Nitturi Sai, Nithin Bobba. Manufacturing of 3D Shrouded Impeller of a Centrifugal Compressor on 3D-Printing machine using FDM Technology // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2021. No. 1012. P. 012039. doi.org/10.1088/1757-899X/1012/1/012039.
4. Pavlovic Ana, Šljivić Milan, Kraišnik Milija, Ilić Jovica, Anic Jelica. Polymers in additive manufacturing: The case of a water pump impeller // FME Transaction. 2017. No. 45. P. 354-359. doi.org/10.5937/fmet1703354P.
5. Rankouhi B., Javadpour S., Delfanian F. et al. Failure Analysis and Mechanical Characterization of 3D Printed ABS With Respect to Layer Thickness and Orientation. // J Fail. Anal. and Preven. 2016. No. 16. P. 467-481. https://doi.org/10.1007/s11668-016-0113-2.

Сведения об авторах:

Седунин Вячеслав Алексеевич – к.т.н., доцент, УрФУ им. Б.Н. Ельцина, г.Екатеринбург;

Марченко Юрий Глебович – преподаватель, УрФУ им. Б.Н. Ельцина, г.Екатеринбург;

Калинин Илья Александрович – преподаватель, УрФУ им. Б.Н. Ельцина, г.Екатеринбург.