DOI: 10.15593/2224-9982/2021.67.03

УДК 621.515

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

Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б.Н. Ельцина,
Екатеринбург, Россия

ПРОТОТИПИРОВАНИЕ ЦЕНТРОБЕЖНЫХ МИКРОКОМПРЕССОРОВ МЕТОДАМИ АДДИТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

На быстроразвивающемся рынке сроки разработки становятся все более критичными для клиентов. Однако у всех технологий есть ограничения. Например, применение так называемых технологий аддитивного производства, в частности 3D-печати FDM, ограничено используемыми материалами и качеством детали. Существенным преимуществом аддитивного производства является создание компонентов без использования форм или инструментов. Представлен опыт быстрого прототипирования центробежного компрессора с использованием 3D-печати полимерными пластиками. В данном исследовании основной целью 3D-печати деталей является разработка структурного и функционального прототипа для испытания различных центробежных компрессоров. Технологии аддитивного производства позволяют изготавливать центробежные компрессоры с меньшими затратами труда и любой конфигурации. Особое внимание уделяется выбору технологии 3D-печати, материалов и влиянию параметров печати на механические свойства изделия. В результатах представлены экспериментальные данные для прототипа вместе с рекомендациями по серийному производству. Также описан лабораторный стенд, на котором проводятся варианты испытания. Все это позволит читателю более обоснованно интерпретировать эти решения и более детально учесть специфику при разработке технического задания на испытания центробежных компрессоров.

Ключевые слова: центробежный компрессор, центробежный вентилятор, микрокомпрессор, прототипирование, FDM-печать, 3D-печать, аддитивные технологии, полимерные пластики, испытания, высокооборотные электромоторы.

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

Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin,
Yekaterinburg, Russian Federation

PROTOTYPING OF CENTRIFUGAL MICROCOMPRESSORS USING ADDITIVE TECHNOLOGIES

In the fast-developing market of customer products, a development lead time becomes more and more critical. However, these technologies have limits. Also, the application of so-called additive manufacturing technologies, particularly FDM 3D printing, is limited by the materials used and the part's quality. The significant advantage of additive manufacturing is building components without the use of molds or tools. The paper presents an experience of fast prototyping a centrifugal compressor using 3D printing with polymer plastics. 3D printing of parts has the main goal in this study to develop a structural and functional prototype for variation centrifugal compressors testing. Additive manufacturing technologies can fabricate centrifugal compressors with less labor and any configuration. Attention is paid to the choice of 3D printing technology, materials, and the influence of printing parameters on the product's mechanical properties. In conclusion, experimental results are presented for the prototype together with recommendations for serial manufacturing. Also, a laboratory bench is described where variant tests will be carried out. All this will allow the reader to interpret those solutions more reasonably and take into account the specifics in more detail when developing a technical requirement for centrifugal compressors testing.

Keywords: centrifugal compressor, centrifugal fan, microcompressor, prototyping, FDM-printing, 3D-printing, additive technologies, polymer plastics, testing, high-speed electric motors.

Введение

Сегодня использование технологий аддитивного производства позволяет значительно ускорить процесс разработки и вывода на рынок новых продуктов. Например, элементы турбомашин ранее изготавливались фрезерованием или литьем из металлических сплавов, что предполагало высокую стоимость изго-

товления. Технологии аддитивного производства позволяют изготавливать сложные детали из полимерных пластиков с приемлемыми прочностными свойствами, достаточными для проведения предварительных испытаний. При замене металлов полимерами общие затраты на предварительные экспериментальные работы и испытания составят на порядок меньше, чем при фрезеровании металлических де-

талей. Наиболее типичными материалами для изготовления прототипов рабочих колес турбин и компрессоров являются высокопрочные пластмассы, такие как PEEK. Пластмасса ABS может использоваться для прототипирования элементов статора. В работе [1] сравниваются характеристики колеса микротурбины (диаметр 49 мм, частота вращения до 36 000 об/мин) из пластика ABS и PEEK. Было обнаружено, что прочность колеса из PEEK на 50 % выше. Однако ABS-пластик, благодаря своей доступности, может использоваться для быстрого прототипирования изделий, что вызывает особый интерес.

Изготавливаемый продукт представляет собой центробежный микрокомпрессор, предназначенный для подачи воздуха со статическим давлением до 110 мбар и расходом более 200 л/мин. Рабочее колесо компрессора имеет диаметр 47 мм, скорость вращения достигает 60 000 об/мин. Рабочее колесо компрессора и воздухосборная камера-улитка показаны на рис. 1, и они являются предметом дальнейшего прототипирования и испытаний. Основные требования к крыльчатке были следующие: 1) отсутствие опор со стороны проточного тракта; 2) достаточная прочность на центробежные нагрузки при частоте вращения до 60 000 об/мин; 3) минимально возможная шероховатость поверхности и максимально возможное разрешение кривизны лопасти. Для части корпуса, которая включает в себя впускной патрубок, крышку улитки рабочего колеса, спиральную камеру и выпускной патрубок, дополнительным требованием являлось поддержание прочности конструкции, а также любых возможных эксплуатационных и ремонтных нагрузок.

В работах [2, 3] описан опыт создания прототипов крыльчатки центробежных компрессоров с использованием технологии FDM. Печать деталей по данной технологии подразумевает послойное добавление материала (полимера). Преимущество – возможность воспроизводить геометрические формы любой сложности, в частности лопасти компрессора, без необходимости использования дополнительного оборудования. Однако во время печати поверхность лопастей образуется ступенями и полосами, которые вызваны

наслоением детали. Таким образом, для проведения аэродинамических испытаний требуется ручная доводка (полировка) полученных крыльчаток.

Рис. 1. Прототип рабочего колеса и улитки

Методы

В работе [4] сравниваются прочностные характеристики крыльчатки водяного насоса, изготовленной из ABS- и PLA-пластиков с использованием технологии FDM. Было обнаружено, что прочность на разрыв ABS-пластика примерно на 50 % ниже, чем у PLA. В испытании на растяжение PLA показал самую высокую прочность, но его пластичность существенно зависит от направления внешних нагрузок. Для текущего проекта пластик PLA был выбран в качестве основного материала из-за доступности и скорости изготовления.

Характеристики деталей, напечатанных на 3D-принтере, зависят не только от характеристик материала, но и от параметров печати, таких как ориентация детали [5, 6] на печатном столе, скорость экструзии, толщина слоя и угла растра (угол между траекторией сопла и осью X печатной платформы). Наивысшие значения предела прочности и модуля упругости достигаются для образцов, напечатан-

ных с углом растра 0° , для слоев толщиной 0,2 и 0,4 мм. Ориентация растра под углом 90° показывает самые низкие значения прочности на разрыв и модуля упругости. В то же время образцы деталей, напечатанных со слоем 0,2 мм, показывают значительно более высокую прочность на разрыв по сравнению с образцами с толщиной слоя 0,4 мм [7]. Таким образом, для повышения прочностных характеристик рабочего колеса и уменьшения шероховатости детали были изготовлены образцы деталей со слоем 0,2 мм. Для конечных образцов изготовление производилось со слоем 0,1 мм, однако чем тоньше слой, тем менее устойчива внутренняя структура детали из-за неровностей при заполнении и спекании.

Оптимальная температура сопла экспериментально установлена на уровне 200°C , а температура стола – 60°C . Эти параметры обеспечивают наилучшее качество поверхности для данной задачи. Установлено, что оптимальная посадка ступицы рабочего колеса на вал двигателя достигается с припуском на радиус $+0,125$ мм, который учитывает усадку пластика PLA. В данном прототипе диаметр вала варьировался в диапазоне 3–6 мм. Модель улитки была разделена на две половины, чтобы обеспечить минимальную шероховатость пути потока за счет исключения опор. На рис. 2 показана подготовленная к печати модель корпуса.

Рис. 2. Подготовленная к печати деталь

Важным требованием к характеристикам компрессора было обеспечение минимального, но достаточного осевого зазора между рабочим колесом и корпусом на всем протяжении над лопастями рабочего колеса. Большой зазор означает большие потери, связанные с утечками и перетеканием между лопаток. Поскольку лопасти рабочего колеса уменьшаются от входа к выходу, часть корпуса должна иметь коническую поверхность с переменным углом наклона. А при разделении детали на слои часто возникают ошибки аппроксимации и может быть получен нелинейный неконтролируемый осевой зазор [8, 9].

В данной конструкции при печати верхней части улитки поверхность корпуса в верхней части рабочего колеса имела отклонение до 2° от проектного значения. Данные отклонения приводили к трению лопаток об элементы статора.

Для обеспечения необходимого зазора и качества поверхности предлагается использовать опцию адаптивных слоев, которая позволяет печатать локальные геометрические элементы (например, выпуклые и вогнутые стены) с разной высотой слоя [10–15]. При этом значительно уменьшается шероховатость поверхности и полученное отклонение геометрии [16–20].

Результаты и обсуждения

На рис. 3 показаны напечатанные детали. Первичные испытания проводились без дополнительной обработки поверхности. Во время экспериментов крыльчатка вращалась со скоростью 60 000 об/мин в течение нескольких минут для получения параметров потока при закрытии дроссельной заслонки. Экспериментальная установка представлена на рис. 4

Рис. 3. Напечатанное рабочее колесо и улитка

Рис. 4. Экспериментальная установка

Экспериментальная установка состоит из самого микрокомпрессора, за которым следует прямая труба с измерением массового расхода и дросселем на конце. Длина трубы 1,5 м, она необходима для стабилизации потока. Статическое давление измеряется на выходе из улитки. Модуль DSA имеет соединение с отводом статического давления через капиллярную трубку. Этот же модуль использовался для обработки сигнала от объемного расходомера.

Измерение статического давления происходит в выходном патрубке улитки с помощью вклеиваемой трубки по нормали к патрубку. Трубка соединяется с системой сбора данных (DSA) с помощью пневмолинии. Длина тракта от выходного патрубка улитки до расходомера составляет 1,5 м и обусловлена необходимостью стабилизации потока. На конце тракта прикрепляется расходомер, данные с которого также передаются на DSA.

Для построения изодром предусмотрено дросселирующее устройство, установленное после расходомера. Изменение сопротивления сети с помощью дросселя приводит к изменению скорости вращения электромотора. Для поддержания постоянства частоты вращения используется контроллер скорости вращения.

Также немаловажным параметром является уровень шумового давления. По уровню и спектру шума возможно делать выводы

о аэродинамическом совершенстве проточной части и о степени сбалансированности ротора, поэтому для измерения шума предусмотрен микрофон, который устанавливается на расстоянии 1 м от компрессора. Аналоговый сигнал микрофона преобразовывается в цифровой с аналого-цифрового конвертера (ADC). Данные, полученные с DSA и ADC, поступают на персональный компьютер и обрабатываются с помощью специальных программ.

С помощью испытательной станции было протестировано более 50 прототипов. В ходе проведения экспериментов установлено, что изменение шероховатости в сравнении с напечатанными образцами без постобработки и с постобработкой для улитки влияет на изменение перепада давления до 5 % и на 15 % по потребляемой мощности. При этом для рабочего колеса изменение параметров лежит в пределах погрешности. Такое незначительное изменение производительности можно объяснить ориентацией детали на столе, при которой шероховатость от слоев расположена вдоль линий тока рабочего тела. Таким образом, предложено вносить в результаты испытаний поправочный коэффициент, учитывающий влияние шероховатости.

Также установлено, что для проведения аэродинамических испытаний прочности рабочего колеса достаточно, однако при проведении длительных испытаний на минимальном расходе и максимальном напоре существ-

венно возрастает температура воздуха, а значит, и температура колеса, что приводит к разрушению последнего в течение нескольких минут.

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

В серийном изделии температура воздуха может достигать 120 °С в течение длительного периода времени, а значит, рабочие температуры материала должны быть выше, поэтому для изготовления серийного изделия рекомендуется использовать инженерный РЕЕК-пластик. Также к материалам изделия предъявляются требования по продолжительности работы более 10 000 ч, биоинертности и устойчивости к высокой концентрации кислорода.

Заключение

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 ч.

2. В качестве материала для 3D-печати прототипов был выбран PLA-пластик, так как он 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-пластиком, что делает его предпочтительным для печати рабочего колеса, в частности лопаток, так как от точности воспроизведения геометрии зависят основные аэродинамические параметры.

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

4. Рабочие колеса и улитки напечатаны соплом диаметром 0,4 мм с толщиной слоя 0,2 мм. Это позволяет достичь оптимального сочетания прочности, скорости печати и шероховатости поверхности. Параметры принтера при печати следующие: температура стола 60 °С, температура сопла – 200 °С. Припуск на радиус, учитывающий усадку и необходимый натяг, составил +0,125 мм. 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 ч, что достаточно для проведения испытаний, но не для серийных изделий. Получаемые параметры напора / расхода зависят от шероховатости поверхности, герметичности и точности изделия.

6. Для изготовления серийного изделия предлагается использовать литье деталей из РЕЕК-пластика, ввиду биоинертности и устойчивости к высоким температурам (до 250 °С), а также повышенным прочностным свойствам.

Исследование выполнено при поддержке "Уральского межрегионального научно-образовательного центра международного уровня "Передовые производственные технологии и материалы".

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Библиографический список

1. Advanced materials for the impeller in an ORC radial microturbine / Hernandez Carrillo, Isaias & Wood, Christopher & Liu, Hao // Energy Procedia. – 2017. – Vol. 129. – P. 1047–1054. DOI: 10.1016/j.egypro.2017.09.241
2. Additive manufacturing and performance of functional hydraulic pump impellers in fused deposition modeling technology / Fernández Silvia & Calzado, Mariano & Porras, José & Romero, Luis & Espinosa, M.M. & Domínguez, Manuel // Journal of Mechanical Design. In press. – 2016. – Vol. 138. – 5 p. 10.1115/1.4032089.
3. Manufacturing of 3D Shrouded impeller of a centrifugal compressor on 3D-printing machine using FDM technology / Prabha K & Rohit P & Nitturi Sai & Nithin Bobba // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2021. – Vol. 1012. – P. 012039. DOI: 10.1088/1757-899X/1012/1/012039

4. Polymers in additive manufacturing: The case of a water pump impeller / Pavlovic Ana & Šljivić Milan & Krašnik Miliša & Ilić Jovica & Anic, Jelica // *FME Transaction*. – 2017. – Vol. 45. – P. 354–359. DOI: 10.5937/fmet1703354P
5. Effect of manufacturing parameters on tensile properties of FDM printed specimens / Vălean, Cristina & Marsavina, Liviu & Mărghițaș, Mihai & Linul, Emanoil & Razavi, Mohammad & Berto, Filippo // *Procedia Structural Integrity*. – 2020. – Vol. 26. – P. 313–320. DOI: 10.1016/j.prostr.2020.06.040
6. Villalpando L & Eiliat Hasti & Urbanic Ruth Jill. An optimization approach for components built by fused deposition modeling with parametric internal structures // *Procedia CIRP*. – 2014. – Vol. 17. – P. 800–805. DOI: 10.1016/j.procir.2014.02.050
7. Failure analysis and mechanical characterization of 3D printed abs with respect to layer thickness and orientation / B. Rankouhi, S. Javadpour, F. Delfanian [et al.] // *J. Fail. Anal. and Preven.* – 2016. – No. 16. – P. 467–481. DOI.org/10.1007/s11668-016-0113-2
8. Anish S., Sitaram N. Computational investigation of impeller-diffuser interaction in a centrifugal compressor with different types of diffusers // *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy*. – 2009. – Vol. 223 (2). – P. 167–178. DOI: 10.1243/095756509JPE662
9. Pascariu I.S., Zaharia S.M. Design and testing of an unmanned aerial vehicle manufactured by fused deposition modeling // *Journal of Aerospace Engineering*. – 2020. – Vol. 33 (4). – Art. 06020002. DOI: 10.1061/(ASCE)AS.1943-5525.0001154
10. Evaluation of the influence of build and print orientations of unmanned aerial vehicle parts fabricated using fused deposition modeling process / S. Ravindrababu, Y. Govdeli, Z.W. Wong, E. Kayacan // *Journal of Manufacturing Processes*. – 2018. – Part A 34. – P. 659–666. DOI: 10.1016/j.jmapro.2018.07.007
11. Strength of PLA components fabricated with fused deposition technology using a desktop 3D printer as a function of geometrical parameters of the process / V.E. Kuznetsov, A.N. Solonin, O.D. Urzhumtsev, R. Schilling, A.G. Tavitov // *Polymers*. – 2018. – Vol. 10 (3). – Art. 313. DOI: 10.3390/polym10030313
12. Mechanical properties of 3D-printing polylactic acid parts subjected to bending stress and fatigue testing / J.A. Travieso-Rodriguez, R. Jerez-Mesa, J. Llumà, O. Traver-Ramos, G. Gomez-Gras, J.J.R. Rovira // *Materials*. – 2019. – Vol. 12 (23). – Art. 3859. DOI: 10.3390/ma12233859
13. Effect of environment on mechanical properties of 3D printed polylactide for biomedical applications / A. Moetazedian, A. Gleadall, X. Han, V.V. Silberschmidt // *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*. – 2020. – Vol. 102. – Art. 103510. DOI: 10.1016/j.jmbbm.2019.103510
14. Interlayer bonding has bulk-material strength in extrusion additive manufacturing: New understanding of anisotropy / J. Allum, A. Moetazedian, A. Gleadall, V.V. Silberschmidt // *Additive Manufacturing*. – 2020. – Vol. 34. – Art. 101297. DOI: 10.1016/j.addma.2020.101297
15. Allum J., Gleadall A., Silberschmidt V.V. Fracture of 3D-printed polymers: Crucial role of filament-scale geometric features // *Engineering Fracture Mechanics*. – 2020. – Vol. 224. – Art. 106818. DOI: 10.1016/j.engfracmech.2019.106818
16. Baran E.H., Yildirim Erbil H. Surface modification of 3d printed pla objects by fused deposition modeling: review // *Colloids and Interfaces*. – 2019. – Vol. 3 (2). – Art. 43. DOI: 10.3390/colloids3020043
17. Bikulčius G., Ignatjev I., Ručinskiene A. Rapid method to determine suitability of ABS plastics for metallization // *Transactions of the Institute of Metal Finishing*. – 2014. – Vol. 92 (1). – P. 47–51. DOI: 10.1179/0020296713Z.000000000138
18. Impact of the fused deposition (FDM) printing process on polylactic acid (PLA) chemistry and structure / M.A. Cuiffo, J. Snyder, A.M. Elliott, N. Romero, S. Kannan, G.P. Halada // *Applied Sciences (Switzerland)*. – 2017. – Vol. 7 (6). – Art. 579. DOI: 10.3390/app7060579
19. Thermo-mechanical characterization of metal / polymer composite filaments and printing parameter study for fused deposition modeling in the 3D printing process / S. Hwang, E.I. Reyes, K.-S. Moon, R.C. Rumpf, N.S. Kim // *Journal of Electronic Materials*. – 2015. – Vol. 44 (3). – P. 771–777. DOI: 10.1007/s11664-014-3425-6
20. Tymrak B.M., Kreiger M., Pearce J.M. Mechanical properties of components fabricated with open-source 3-D printers under realistic environmental conditions // *Materials and Design*. – 2014. – Vol. 58. – P. 242–246. DOI: 10.1016/j.matdes.2014.02.038

References

1. Hernandez Carrillo, Isaias & Wood, Christopher & Liu, Hao. (2017). Advanced materials for the impeller in an ORC radial microturbine. *Energy Procedia*. 129. 1047-1054. 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, vol. 138, 5 p. 10.1115/1.4032089.
3. Prabha, K & Rohit, P & Nitturi, Sai & Nithin, Bobba. (2021). Manufacturing of 3 D Shrouded Impeller of a Centrifugal Compressor on 3D-Printing machine using FDM Technology. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 1012. 012039. 10.1088/1757-899X/1012/1/012039.
4. Pavlovic, Ana & Šljivić, Milan & Krašnik, Milija & Ilić, Jovica & Anic, Jelica. (2017). Polymers in additive manufacturing: The case of a water pump impeller. *FME Transaction*. 45. 354-359. 10.5937/fmet1703354P.
5. Vălean, Cristina & Marsavina, Liviu & Mărghițaș, Mihai & Linul, Emanoil & Razavi, Mohammad & Berto, Filippo. (2020). Effect of manufacturing parameters on tensile properties of FDM printed specimens. *Procedia Structural Integrity*. 26. 313-320. 10.1016/j.prostr.2020.06.040.
6. Villalpando, L & Eiliat, Hasti & Urbanic, Ruth Jill. An Optimization Approach for Components Built by Fused Deposition Modeling with Parametric Internal Structures. *Procedia CIRP*, 2014, vol. 17, pp. 800-805. 17. 10.1016/j.procir.2014.02.050.
7. 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.* 16, 467–481 (2016). <https://doi.org/10.1007/s11668-016-0113-2>
8. Anish, S., Sitaram, N. Computational investigation of impeller-diffuser interaction in a centrifugal compressor with different types of diffusers. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy*, 2009, 223 (2), pp. 167-178. doi: 10.1243/09576509JPE662
9. Pascariu, I.S., Zaharia, S.M. Design and Testing of an Unmanned Aerial Vehicle Manufactured by Fused Deposition Modeling (2020) *Journal of Aerospace Engineering*, 33 (4), art. no. 06020002. DOI: 10.1061/(ASCE)AS.1943-5525.0001154
10. Ravindrababu, S., Govdeli, Y., Wong, Z.W., Kayacan, E. Evaluation of the influence of build and print orientations of unmanned aerial vehicle parts fabricated using fused deposition modeling process (2018) *Journal of Manufacturing Processes, Part A* 34, pp. 659-666. doi: 10.1016/j.jmapro.2018.07.007
11. Kuznetsov, V.E., Solonin, A.N., Urzhumtsev, O.D., Schilling, R., Tavitov, A.G. Strength of PLA components fabricated with fused deposition technology using a desktop 3D printer as a function of geometrical parameters of the process (2018) *Polymers*, 10 (3), art. no. 313. doi: 10.3390/polym10030313
12. Travieso-Rodriguez, J.A., Jerez-Mesa, R., Llumà, J., Traver-Ramos, O., Gomez-Gras, G., Rovira, J.J.R. Mechanical properties of 3D-printing polylactic acid parts subjected to bending stress and fatigue testing (2019) *Materials*, 12 (23), art. no. 3859. doi: 10.3390/ma12233859
13. Moetazedian, A., Gleadall, A., Han, X., Silberschmidt, V.V. Effect of environment on mechanical properties of 3D printed polylactide for biomedical applications (2020) *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, 102, art. no. 103510. doi: 10.1016/j.jmbbm.2019.103510
14. Allum, J., Moetazedian, A., Gleadall, A., Silberschmidt, V.V. Interlayer bonding has bulk-material strength in extrusion additive manufacturing: New understanding of anisotropy (2020) *Additive Manufacturing*, 34, art. no. 101297. doi: 10.1016/j.addma.2020.101297
15. Allum, J., Gleadall, A., Silberschmidt, V.V. Fracture of 3D-printed polymers: Crucial role of filament-scale geometric features (2020) *Engineering Fracture Mechanics*, 224, art. no. 106818. DOI: 10.1016/j.engfracmech.2019.106818
16. Baran, E.H., Yildirim Erbil, H. Surface modification of 3d printed pla objects by fused deposition modeling: review (2019) *Colloids and Interfaces*, 3 (2), art. no. 43. doi: 10.3390/colloids3020043
17. Bikulčius, G., Ignatjev, I., Ručinskiene, A. Rapid method to determine suitability of ABS plastics for metallization (2014) *Transactions of the Institute of Metal Finishing*, 92 (1), pp. 47-51. DOI: 10.1179/0020296713Z.000000000138
18. Cuiffo, M.A., Snyder, J., Elliott, A.M., Romero, N., Kannan, S., Halada, G.P. Impact of the fused deposition (FDM) printing process on polylactic acid (PLA) chemistry and structure (2017) *Applied Sciences (Switzerland)*, 7 (6), art. no. 579. doi: 10.3390/app7060579
19. Hwang, S., Reyes, E.I., Moon, K.-S., Rumpf, R.C., Kim, N.S. Thermo-mechanical Characterization of Metal/Polymer Composite Filaments and Printing Parameter Study for Fused Deposition Modeling in the 3D Printing Process (2015) *Journal of Electronic Materials*, 44 (3), pp. 771-777. DOI: 10.1007/s11664-014-3425-6
20. Tymrak, B.M., Kreiger, M., Pearce, J.M. Mechanical properties of components fabricated with open-source 3-D printers under realistic environmental conditions (2014) *Materials and Design*, 58, pp. 242-246. DOI: 10.1016/j.matdes.2014.02.038

Об авторах

Седунин Вячеслав Алексеевич (Екатеринбург, Россия) – кандидат технических наук, доцент кафедры «Турбины и двигатели» ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б.Н. Ельцина» (620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, д. 19, e-mail: v.a.sedunin@urfu.ru).

Марченко Юрий Глебович (Екатеринбург, Россия) – преподаватель кафедры «Турбины и двигатели» ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б.Н. Ельцина» (620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, д. 19, e-mail: iug.marchenko@urfu.ru).

Калинин Илья Александрович (Екатеринбург, Россия) – преподаватель кафедры «Турбины и двигатели» ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б.Н. Ельцина» (620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, д. 19, e-mail: i.a.kalinin@urfu.ru).

About the authors

Vyacheslav A. Sedunin (Yekaterinburg, Russian Federation) – Csc in Technical Sciences, Associate Professor of Turbines and Engines Department, Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin (19, Mira st., Yekaterinburg, 620002, Russian Federation; e-mail: vasedunin@urfu.ru).

Yuri G. Marchenko (Yekaterinburg, Russian Federation) – Lecturer of Turbines and Engines Department, Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin (19, Mira st., Yekaterinburg, 620002, Russian Federation; e-mail: iug.marchenko@urfu.ru).

Ilya A. Kalinin (Yekaterinburg, Russian Federation) – Lecturer of Turbines and Engines Department, Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin (19, Mira st., Yekaterinburg, 620002, Russian Federation; e-mail: i.a.kalinin@urfu.ru).

Получено 13.11.2021

Принято 04.12.2021

Опубликовано 28.01.2022