

УДК 681.6.012

DOI:10.30987/2223-4608-2021-10-39-44

Н.Д. Толсто́ба, к.т.н.,
К.Ю. Бо́дров, заведующий лабораторией
(Университет ИТМО, 197101, Санкт-Петербург, Кронверкский пр. 49, лит А),
E-mail: nadinet@mail.ru

Проектирование деталей с учетом трехмерной технологии их изготовления

Рассмотрены вопросы разработки деталей и узлов с учетом технологии трехмерной печати. Проведен анализ процесса выбора параметров конструкции и параметров устройства трехмерной печати для получения готового изделия необходимых размеров и прочности.

Ключевые слова: аддитивные технологии; 3D-печать; приборостроение; конструирование.

N.D. Tolstoba, Candidate of Technical Sciences, **K.Yu. Bodrov**, Head of the laboratory
(ITMO University, lit. A, 49, Kronverksky ave., St. Petersburg, 197101)

Design of parts taking into account the three-dimensional technology of their manufacture

The paper studies the issues of the development of parts and assemblies taking into account the technology of three-dimensional printing. The analysis of the identification of design parameters and three-dimensional printing device parameters for obtaining a finished product of the required dimensions and strength is carried out.

Keywords: additive technologies; 3D printing; instrumentation; design.

Введение

Длительное время основными технологиями изготовления механических изделий являлись точение, резание, сверление и другие методы, построенные на принципе удаления лишнего материала из первоначальной заготовки. Основными недостатками данной группы технологий являются: значительная доля отхода материала (от 10 до 90 %) и ограничения по уровню сложности деталей. В конце XX века началось развитие новых методов, призванных заменить традиционные технологии. Они опирались на наличие модели изготавливаемого изделия и процесс его послойного «выращивания». Так появились первые методы, вошедшие в группу технологий аддитивных производств (additive manufactu-

ring).

В настоящее время в производстве широко применяются различные виды трехмерной печати [1 – 3]:

– Прототипирование методом наплавления (FDM). Доступный метод изготовления, который заключается в послойном наложении горячей нити из плавкого рабочего продукта (воска; металла; пластика).

– Селективное лазерное спекание (SLS). Формирование детали из порошкового продукта (керамики; металлопластика) методом плавления под воздействием лазера.

– Лазерная стереолитография (SLA). Прототипирование с использованием жидкого полимера, который затвердевает под воздействием ртутного излучения.

Распространены и другие технологии трех-

мерного моделирования в адаптивном и промышленном производстве. Однако самым простым и популярным методом 3D-печати является моделирование путем наплавления (FDM). Области применения трехмерной печати весьма разнообразны, от приборостроения до авиационной промышленности и медицины [4 – 6]. При этом необходимо заметить, что прочностные характеристики изделий вплотную приближаются по свойствам к свойствам изделий, полученных способом литья под давлением [6].

Учеными исследованы технологии печати на трехмерном принтере с целью анализа механических свойств компонентов ABS и PLA, изготовленных с использованием различных любительских принтеров [7], проведены испытания для определения прочности на растяжение. Результаты показывают, что средняя прочность на разрыв составляет 28,5 МПа для ABS и 56,6 МПа для PLA со средними модулями упругости 1807 МПа для ABS и 3368 МПа для PLA. Эти результаты показывают, что компоненты, напечатанные на любительском оборудовании, сопоставимы по прочности на разрыв и модулю упругости с деталями, напечатанными на коммерческих системах трехмерной печати.

Благодаря доступности материала и широкому распространению услуг трехмерной печати, технология FDM становится спутником каждого технически грамотного человека, в особенности конструктора приборов. Для того чтобы получить результат с необходимыми размерами и параметрами жесткости, необходимо учитывать особенности технологического процесса еще на этапе разработки и конструирования. Ведутся исследования в различных областях производства, например, в авиационной промышленности [8] нашло применение использование технологий трехмерной печати. В работе рассматриваются подробно аспекты точности, уделяется внимание построению конкретных моделей, особенности формирования файлов для получения необходимого результата, и даже применение технологий обработки и сборки, однако не даны рекомендации к процессу конструирования деталей, отличающиеся от общепринятых для процесса конструирования.

В обзорном материале [6] подробно рассмотрено влияние режимов печати на прочностные свойства готовых изделий, учитывается множество факторов, и предлагаются пути дальнейших исследований.

Конструирование, моделирование и изготовление деталей методом послойного наплавления кажется интуитивно понятным, поэтому необходимо уделить внимание базовым пра-

вилам конструирования изделий, изготавливаемых с использованием технологии FDM и разработать общий свод рекомендаций, который помогал бы в работе над конструкцией изделий.

Печать по технологии FDM происходит с применением термопластичных полимеров. При остывании полученная деталь сокращается в размерах, «усаживается». Учитывая особенности того, как накладываются слои в рамках технологии, возникает неравномерность усадки, появляется анизотропия свойств изделия. Поверхность, на которой производится печать – гладкая, часто выполняется из стекла. Поэтому детали могут отклеиваться. Технологическим процессом предусмотрены операции и дополнительные элементы для предотвращения отклеивания деталей от стола и других издержек, но у каждого такого элемента есть свои особенности. Все эти моменты неочевидны, требуют аналитики и выработки общих рекомендаций к процессу конструирования. Этому исследованию и посвящена данная работа.

Особенности технологии FDM

Учеными по различным направлениям производства ведутся исследования по систематизации ошибок печати и организации процесса контроля дефектов, возникающих в процессе изготовления деталей [8 – 13].

Терминологически для рассмотрения правил конструирования деталей, потребуются следующие понятия из области процесса печати. Программное обеспечение, которое преобразует трехмерную модель, разработанную в системе автоматизированного проектирования, в траекторию работы принтера, именуемое слайсером (от англ. slice – разрезать). Деталь устройства трехмерной печати, сквозь которую производится подача расплавленного пластика на стол – экструдер. Тонкая трубка, через которую проходит пластик при выдавливании – сопло [14].

Материал

Одним из самых популярных в 3D-печати полимеров является акрилонитрил бутадиенстирол (ABS-пластик). Он имеет следующие особенности: заметная усадка напечатанной модели (от 2 до 8 %) [15]; достаточная прочность для применения в конструировании прототипов, учебных стендов и других конструкций, не подверженных высоким статическим и/или динамическим нагрузкам [7]; широкие возможности постобработки готового изделия (возможность сверлить; фрезеровать; шлифовать; красить; адгезионно склеивать и пр.).

На примере ABS-пластика будут проанализированы особенности разработки конструкции деталей.

Форма

В процессе проектирования формы детали важное значение имеет выбор технологической базы. Это поверхность, на которой будет размещаться деталь при изготовлении. Она получится гладкой, благодаря идеальной гладкости печатного стола. Остальные поверхности без постобработки будут иметь шероховатость, зависящую от толщины слоя печати. Поэтому необходимо заранее решить, какая поверхность эстетически заслуживает высокой гладкости и точности и конструировать, а затем моделировать деталь с учетом этих условий.

С целью повышения адгезии детали к печатному столу в модель вводятся дополнительные технологические элементы, предохраняющие деталь от отрыва. Их необходимо механически удалять после завершения процесса остывания стола. Если технологическое оборудование позволяет, то лучше выбирать режим изготовления детали без дополнительных элементов. Любая механическая обработка – это дополнительная операция, которая делает процесс изготовления менее технологичным, снижает качество поверхностей, требует организации дополнительного рабочего

места и затрат времени. При печати без дополнительных элементов упрощается технологическая цепочка, деталь поступает на следующие операции по сборке, юстировке или обработке сразу после изготовления.

Таким образом, рекомендуется избегать использования технологических элементов. Ориентация детали на печатном столе также скажется и на ее прочности в различных направлениях.

В статье [15] анализируется механическое поведение деталей из FDM. Рассматривается анизотропия свойств в зависимости от заполнения детали и от направления укладки волокон слайсером. ABS-пластик показывает выраженное ортотропное поведение.

Аналитические исследования показывают, что прочность детали на разрыв в направлении параллельном столу, в несколько раз выше, чем в направлении ортогональном плоскости стола [14]. Необходимо разместить деталь таким образом, чтобы основная рабочая нагрузка приходилась на направления параллельные печатному столу. Стол в данном случае является технологической базой изделия, поэтому рекомендуется основную рабочую нагрузку детали направлять параллельно технологической базе изделия.

Для того чтобы изготовить детали, имеющие сложную форму, программное обеспечение добавляет в модель специальную структуру для поддержания висящих в пространстве элементов (рис. 1).

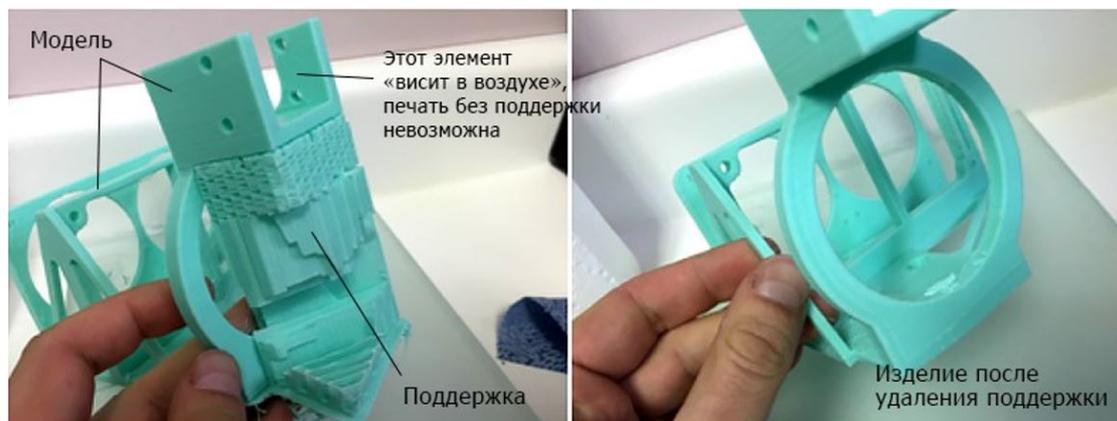


Рис. 1. Фотография поддерживающих элементов при изготовлении нависающих частей детали [16]

Поддержки – дополнительные технические элементы, опираясь на которые, строится конструкция изделия. Поддержки сложно отделить от детали и их использование снижает точность и качество изготовления [14, 16]. С поддержками должны печататься все элементы, базирующиеся на воздухе: элементы отверстий; крышки; потолки кожухов.

Для того чтобы повысить точность испол-

нения изделия, необходимо исключить или минимизировать применение поддержек еще на этапе проектирования детали.

Опираясь на опыт [17] и понимание технологического процесса послойного наплавления, можно рекомендовать при проектировании выполнять переходы форм с помощью фасок, наклоном не более 45°. Рис. 2 показывает схематичное размещения поддерживаю-

щих структур на изделии.

На рис. 3 можно видеть процесс исследования печати нависающих элементов деталей без поддерживающих структур.

Если предусмотреть в конструкции замену нависающих элементов наклонными поверхностями с углом более 45° , можно избежать применения поддерживающих технологических конструкций. При грамотном проектировании деталей можно добиться почти безотходного производства и сократить количество отходов до 10 % от массы конечного изделия.

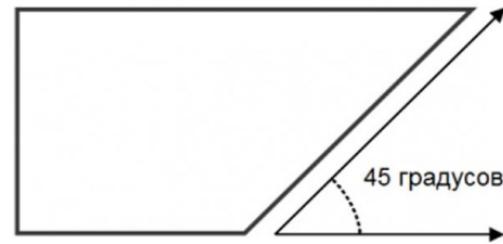


Рис. 2. Поддержки для детали (не нужна, если угол нависания больше 45°) [17]

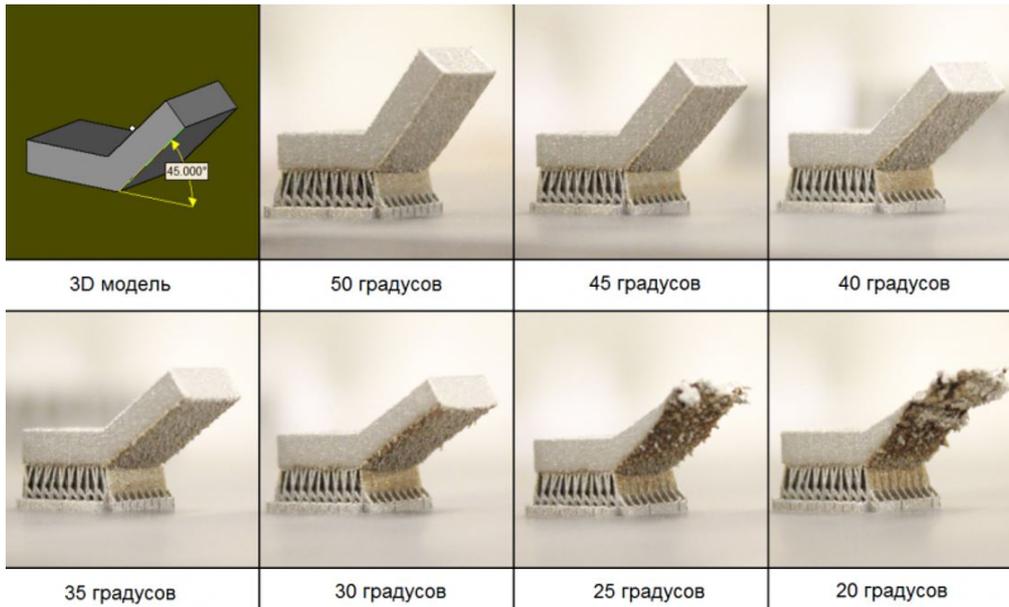


Рис. 3. Исследование процесса печати [17]

Таким образом, рекомендуется для нависающих конструкций применять переходы форм под углом более 45° .

Наибольшее напряжение в детали образуется на стыках поверхностей, присоединяемых друг к другу под прямым углом. Возникшее напряжение негативно сказывается на прочности детали. Поэтому на стыках плоскостей в конструктивно неотвественных местах целесообразно добавлять фаски или скругления.

Эти элементы будут выполнять эстетическую и эргономическую функцию, а также усиливать жесткость и прочность конструкции печатной детали [18].

Размеры

Максимальные размеры детали не должны превышать размер печатного стола принтера. Поэтому при конструировании необходимо учитывать возможности оборудования и проводить проектирование и конструирование с учетом этих сведений.

Минимальные размеры детали должны со-

ответствовать возможностям печатного устройства. Необходимо делать толщину любого тонкого элемента размером два диаметра сопла $+0,01$ мм. Если задать толщину элемента меньше, то будут пропускаться шаги печати (рис. 4). Минимальный по размеру доступный к изготовлению элемент составляет $0,81 \times 0,81 \times 0,5$ мм, если размер сопла 0,4 мм и для изготовления используется 5 слоев пластика по 0,1 мм.

Изготовление изделия заданной формы обеспечивается за счет плавления пластика. Модели печатаются при температуре выше 100°C [1, 14, 19]. При отверждении материала происходит сокращение его объема. Усадка происходит только в направлении XY (в плоскости стола). В направлении вертикальной оси Z размеры детали остаются стабильны. Поэтому для изготовления соединений из ABS-пластика необходимо внести коррекцию в модели.

Рекомендации по учету усадки детали на этапе конструирования 3D-модели:

- размеры валов, лежащих вдоль осей X и Y, либо в плоскости XY под углом к одной из

этих осей необходимо оставить неизменными;

- размеры отверстий (на которых отразится усадка материала), расположенных аналогично валам выше, делать с поправкой от +0,2 до +0,6 мм на диаметр (линейный размер выемки);
- размеры отверстий вдоль оси Z необходимо оставить неизменными.

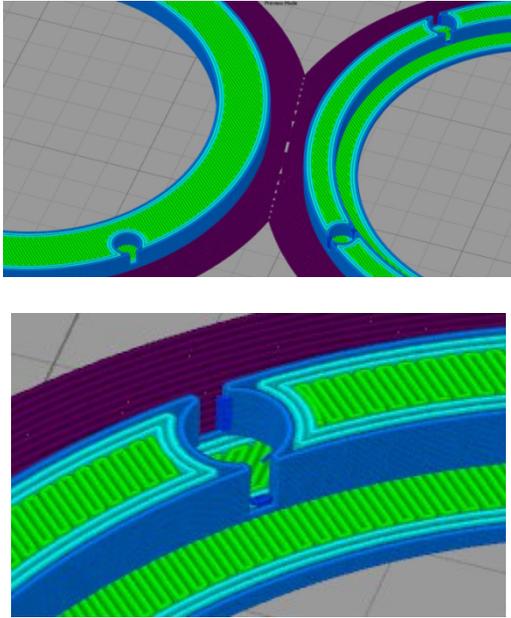


Рис. 4. Проблемные участки с неверно выбранной толщиной стенки элемента

Учитывая пренебрежимо малую усадку вдоль оси Z, отверстия, расположенные в плоскостях, которым принадлежит ось Z (например, плоскости XZ и YZ) будут получаться овальными.

Варианты действий, возникающие из обозначенного выше замечания:

- если к отверстию не предъявляются высокие требования к точности диаметрального размера, допустимо оставить его без дополнительной обработки;
- в остальных случаях разумнее всего воспользоваться техниками постобработки изделий, изготовленных при помощи технологии FDM.

Подготовка проекта. Сохранение файла STL

Конструирование детали завершается операцией сохранения модели в подходящем для слайсера формате. Таким форматом файла принят STL от англ. stereolithography [8, 14, 20]. Для того чтобы сложные формы изготавливались качественно, необходимо сохранение модели проводить с высокой точностью. Точность модели позволит избежать низкополигональных артефактов при печати.

Заключение

В процессе аналитического исследования были разработаны рекомендации для конструирования изделий методом трехмерной печати:

1. Избегать использования технологических элементов.
2. Для нависающих конструкций применять переходы форм под углом нависания более 45°.
3. Основная рабочая нагрузка детали должна быть параллельна технологической базе изделия.
4. В эстетических целях фронтальную поверхность детали совместить с технологической базой.
5. Размеры отверстий, нормальных к технологической базе, конструировать с поправкой от +0,2 мм (натяг) до +0,6 мм (переходная) на линейный размер выемки.
6. Толщина минимального элемента два диаметра сопла +0,01 мм.
7. На стыках плоскостей целесообразно добавлять фаски или скругления.

Конструирование деталей с учетом данных рекомендаций позволит избежать типичных ошибок и издержек как при прототипировании, так и при производстве качественных, надежных и эстетичных изделий с применением аддитивных технологий.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Валетов, В.А. Аддитивные технологии (состояние и перспективы): учеб. пособие. – СПб: Университет ИТМО, 2015. – 63 с.
2. Яблочников, Е.И., Пирогов, А.В., Васильков, С.Д., Восоркин, А.С., Кушнарченко, А.А. Принципы проектирования литьевых форм для производства пилотных серий деталей оптических приборов из термопластичных полимерных материалов // Современное машиностроение. Наука и образование. – 2013. – №3. – С. 409-418.
3. Яблочников, Е.И., Пирогов, А.В., Грибовский, А.А. Совместное применение аддитивных технологий и систем виртуального моделирования при подготовке производства полимерных изделий // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. – 2014. – Т. 57. – №5. – С. 72-76.
4. Медведев, М.П., Фомина, М.А. 3D-печать как новая эпоха в медицине // Новая наука: от идеи к результату. – 2016. – №11-4. – С. 16-19.
5. Бобцова, С.В., Валетов, В.А. Возможности использования технологий быстрого прототипирования в приборостроении // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. – 2001. – №3. – С. 97-103.
6. Кондрашов, С.В., Пыхтин, А.А., Ларионов, С.А., Сорокин, А.Е. Влияние технологических режимов FDM-печати и состава используемых материалов на физико-механические характеристики FDM-моделей (обзор) // Труды ВИАМ. – №10 (82). – 2019. – С. 36-49.
7. Tumorak, B.M., Kreiger, M., Pearce, J. Materials and Design; Mechanical properties of components fabricated with open-source 3-D printers under realistic environmental conditions // Materials and Design. – 2014. – Vol. 58. – PP. 242-246.

8. Автушенко, А.А., Анамова, Р.Р., Иванов, А.О., Рипецкий, А.В., Осипов, А.В. Методика применения аддитивных технологий на этапах изготовления опытных образцов агрегатов и узлов авиационной техники // Вестник Брянского государственного технического университета. – 2015. – Вып. 46. – С. 8-16.

9. Измайлов, Д.В., Бодров, К.Ю., Толстова, Н.Д. Подбор параметров оптической системы и подходы к разработке программного обеспечения комплекса технического зрения для трехмерной печати // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. – 2018. – Т. 18. – №6. – С. 946-953.

10. Ивашкова, К.П., Филиппов, А.Н., Копасов, Е.А. Анализ и систематизация дефектов 3D-печати // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. – 2017. – Т. 60. – №5. – С. 426-430.

11. Камоничкина, Н.В., Кочешков, И.В. Исследование прочностных характеристик модельного материала, получаемого методом FDM-печати // Аддитивные технологии. – 2018. – №3. – С. 39-41.

12. Saitgalina, A.K., Tolstoba, N.D., Mitiushkin, A.V. Development of methods for accurate modeling of optical equipment for three-dimensional printing // Proceedings of SPIE. – 2016. – Vol. 9947. – p. 994715.

13. Saitgalina, A., Mityushkin, A., Tolstoba, N.D. Research of limits of applicability of an open-source equipment for development the optical equipment kit // Proceedings of SPIE. – 2016. – Vol. 9889. – p. 98891W.

14. ГОСТ Р 57558-2-017. Аддитивные технологические процессы. Базовые принципы.

15. Casavola, C., Cazzato, A., Moramarco, V., Pappalettere, C. Orthotropic mechanical properties of fused deposition modelling parts described by classical laminate theory // Materials & Design. – 2016. – Vol. 90. – PP. 453-458.

16. GLOBATEK3D [Электронный ресурс]: Что такое материал поддержки в 3D-печати / АО «Глобатэк». Москва: АО «Глобатэк». URL: http://3d.globatek.ru/world3d/support_material/. (дата обращения 22.06.2021).

17. 3DNetPrint [Электронный ресурс]: Поддерживающие структуры при FDM 3D печати / 3DNetPrint. Москва: 3DNetPrint. URL: <https://3dnetprint.ru/support-structure-material-in-3d-print/>. (дата обращения 22.06.2021).

18. Орлов, П.И. Основы конструирования: Справочное-методическое пособие. – М.: Машиностроение, 1998. – 560 с.

19. Зленко, М.А., Нагайцев, М.В., Довбыш, В.М. Аддитивные технологии в машиностроении. – М.: ГИЦ «НАМИ», 2015. – 220 с.

20. Burns, M. Automated Fabrication. – USA: Prentice Hall, 1993. – p. 369.

REFERENCES

1. Valetov, V.A. Additive technologies (state and prospects), study guide, St. Petersburg: ITMO University, 2015, 63 p.

2. Yablochnikov, E. I., Pirogov, A.V., Vasilkov, S. D., Vorsokin, A. S., Kushnarenko, A. A. Principles of designing injection molds for the production of pilot series of optical devices made of thermo-plastic polymer materials // Modern Mechanical engineering. Science and education, 2013, no. 3, p. 409-418.

3. Yablochnikov, E.I., Pirogov, A.V., Gribovsky, A.A. Joint application of additive technologies and virtual modeling systems in the preparation of polymer products production // News of higher educational institutions. Instrumentation, 2014, Vol. 57, no. 5, p. 72-76.

4. Medvedev, M. P., Fomina, M. A. 3D printing as a new era in medicine, New science: from idea to result, 2016, no. 11-4, p. 16-19.

5. Bobtsova, S. V., Valetov, V. A. Possibilities of using rapid prototyping technologies in instrument engineering, Scientific and Technical Bulletin of information Technologies, Mechanics and Optics, 2001, no. 3, p. 97-103.

6. Kondrashov, S. V., Pykhtin, A. A., Larionov, S. A., Sorokin, A. E. The influence of technological modes of FDM printing and the composition of the materials used on the physical and mechanical characteristics of FDM models (review) // Proceedings of VIAM, no.10 (82), 2019, p. 36-49.

7. Tymrak, B.M., Kreiger, M., Pearce, J. Materials and Design; Mechanical properties of components fabricated with open-source 3-D printers under realistic environmental conditions // Materials and Design. – 2014. – Vol. 58. – PP. 242-246.

8. Avtushenko, A. A., Anamova, R. R., Ivanov, A. O., Ripetsky, A.V., Osipov, A.V. Methods of using additive technologies at the stages of manufacturing prototypes of aircraft units and components // Bulletin of the Bryansk State Technical University., 2015, Issue 46, p. 8-16.

9. Izmailov, D. V., Bodrov, K. Yu., Tolstoba, N. D. Selection of parameters of an optical system and approaches to the development of software for a complex of technical vision for three-dimensional printing // Scientific and Technical Bulletin of information technologies, mechanics and Optics, 2018, Vol. 18. no. 6, p. 946-953.

10. Ivashkova, K. P., Filippov, A. N., Kopasov, E. A. Analysis and systematization of 3D printing defects, News of higher educational institutions. Instrumentation, 2017, Vol. 60, no. 5, p. 426-430.

11. Kamonichkina, N. V., Kocheshkov, I. V. Investigation of the strength characteristics of a model material obtained by the FDM-printing method // Additive technologies, 2018, no. 3, p. 39-41.

12. Saitgalina, A.K., Tolstoba, N.D., Mitiushkin, A.V. Development of methods for accurate modeling of optical equipment for three-dimensional printing // Proceedings of SPIE, 2016, Vol. 9947, p. 994715.

13. Saitgalina, A., Mityushkin, A., Tolstoba, N.D. Research of limits of applicability of an open-source equipment for development the optical equipment kit // Proceedings of SPIE, 2016, Vol. 9889, p. 98891W.

14. GOST R 57558-2-017. Additive technological processes. Basic principles.

15. Casavola, C., Cazzato, A., Moramarco, V., Pappalettere, C. Orthotropic mechanical properties of fused deposition modelling parts described by classical laminate theory // Materials & Design, 2016. Vol. 90, PP. 453-458.

16. GLOBATEK3D [Electronic resource]: What is the support material in 3D printing / Globatek JSC. Moscow: Globatek JSC. URL: http://3d.globatek.ru/world3d/support_material/. (accessed 22.06.2021).

17. 3D NetPrint [Electronic resource]: Supporting structures for FDM 3D printing / 3D NetPrint. Moscow: 3D NetPrint. URL:<https://3dnetprint.ru/support-structure-material-in-3d-print/>. (accessed 22.06.2021.)

18. Orlov, P.I. Fundamentals of design: A reference manual. - M.: Mechanical Engineering, 1998, 560 p.

19. Zlenko, M.A., Nagaytsev, M.V., Dovbysh, V.M. Additive technologies in mechanical engineering. - M.: SSC "NAMI", 2015, 220 p.

20. Burns, M. Automated Fabrication. – USA: Prentice Hall, 1993, p. 369.

Рецензент д.т.н.
Людмила Александровна Губанова