

## К ВОПРОСУ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ FDM-ТЕХНОЛОГИЙ 3D-ПЕЧАТИ

*Джелялов С.И., Ромашов Ю.С., Бекиров А.Ш., Аблаев О.Ф.*

*Крымский инженерно-педагогический университет имени Февзи Якубова,  
Симферополь*

**Ключевые слова:** FDM, 3D-печать, аддитивные технологии, метод послойного наплавления, проблемы 3D-печати.

**Аннотация.** В публикации представлен обзор состояния и проблем, сопровождающих аддитивные технологии 3D-печати. Рассмотрены возможности 3D-печати в рамках мелкосерийного промышленного производства. Выделены пути развития перспективных направлений, связанные с решением частных задач повышения точности изготовления изделий из полимерных материалов, полученных 3D-печатью. С этой целью предложены варианты эффективной комбинации технологий лазерной резки с 3D-печатью пластмассовых изделий.

## TO THE QUESTION OF INCREASING THE EFFICIENCY OF THE APPLICATION OF FDM-TECHNOLOGIES OF 3D-PRINTING

*Dzhelialov S.I., Bekirov A.Sh., Romashov Yu.S., Ablaev O.F.*

*Crimean Engineering and Pedagogical University named after Fevzi Yakubov,  
Simferopol*

**Keywords:** FDM, 3D-printing, additive technologies, fused deposition modeling, 3D-printing problems.

**Abstract.** The publication provides an overview of the state and problems accompanying additive 3D printing technologies. The possibilities of 3D printing in the framework of small-scale industrial production are considered. It was outlined the ways of development of perspective areas related to the solution of particular problems of improving the accuracy of manufacturing products from polymer materials obtained by 3D-printing. For this purpose, options for an effective combination of laser cutting technologies with 3D printing of plastic products are proposed.

**Постановка проблемы.** Опыт современных производств показывает, что своевременное внедрение инновационных технологических решений в процессы изготовления промышленных изделий практически определяет успех и перспективы существования предприятия. Данный фактор является одним из важных условий достижения максимальной производительности в период, пока производства развивающихся стран (Китай, Индия, Тайвань и т.д.) смогут реализовать изготовление удешевленных аналогов. Преобладание производства даже уникальной продукции над конкурентами проявляется лишь в короткий период, который предполагает как можно быстрый выпуск максимального ее количества. В таких условиях применение аддитивных технологий изготовления продукции, которые на сегодня стали доступными фактически любому производству становятся особенно востребованным. Их широкому внедрению способствуют шаги, направленные на изменение подходов к реализации традиционных технологий производственных предприятий.

**Литературный обзор.** В качестве основных преимуществ аддитивных технологий в [1] отмечается следующее: улучшение свойств конечной продукции (плотности, остаточного напряжения и др.) по сравнению с подобными изделиями, изготовленными литьем или механической обработкой; экономия сырья, за счет практически безотходности технологии. Добавим, что аддитивные технологии отличает возможность изготовления предметов с усложненной геометрией (элементы в замкнутой полости, сложные внутренние каналы т.п.), создание которых фактически недостижимо при получении другими способами. Гибкость и мобильность аддитивных технологий дает возможность в минимальные сроки запустить изготовление детали. Наличие электронной модели будущего изделия уже фактически предопределяет начало этапа его изготовления. К тому же, такой подход упрощает организацию производства дистанционно.

Среди всего разнообразия видов аддитивных технологий наиболее распространенным считается способ, основанный на послойном выращивании трехмерных объектов. Источник [2] выделяет такие направления его применения, как воспроизведение контрольных моделей (прототипов) изделий, перед предстоящим их серийным выпуском (Rapid Prototyping); создание оснастки, инструмента (к примеру, для литья, штамповки), вспомогательных средств для данных типов производств (Rapid Tooling); непосредственное изготовление деталей будущих механизмов. Как показывает обзор литературных источников [3-16] FDM-технологии 3D-печати (Fused deposition modeling или моделирование методом послойного наплавления) имеет перспективы к расширению областей ее применения. Наиболее доступным сырьем для реализации данного типа аддитивных технологий являются филаменты (filaments) на полимерной основе. Этот вид материала отличает как универсальность использования, так дешевизна. Следует также отметить доступность оборудования (3D-принтеров), работающих при использовании полимеров. Из общего разнообразия видов полимерного сырья в приоритете находятся пластмассы, проявляющие меньшую склонность к усадке, обладающие высокими адгезионными свойствами, оптимальным сочетанием жидкотекучести и вязкости, гомогенной структурой. Важными характеристиками являются также экологичность материалов и долговечность полученных из них изделий, проявляемой при их эксплуатации. Таким образом, наиболее широкое применение нашли пластики типа PLA, PETG, а также ABS.

Распространено мнение о том, что использование полимеров в 3D-печати сориентировано преимущественно на создание прототипов будущих изделий. Так в свое время устоялось понятие «прототипирование» (от «prototyping»). Обзор современных исследований [4-16] показывает, что постепенное удешевление возможностей FDM-технологий объемной печати предопределило расширение областей их применения. Сферы применения 3D-печати на сегодня охватывают как единичное изготовление предметов сувенира и ремонтных деталей механизмов [4-6, 17], так и для создания готовых изделий мелкосерийных производств [7, 17, 22]. В последнем случае целесообразно изготовление изделий небольших размеров и сложной формы, производство которых традиционными способами технически усложнено. В [13] отмечается, что локальное

использование 3D-печати на производстве исключает ряд этапов из жизненного цикла предмета. Применение аддитивных технологий обеспечивает экологичность производства. Возможность производить полые или частично заполненные объекты позволяет снизить растраты материала и энергии. Особую актуальность использования 3D-печати отмечают для малых предприятий, ориентированных на производство небольших партий деталей узкой специализации. На рынке запасных частей отмечаются случаи отсутствия возможности оперативного приобретения отдельных их видов и неоправданно завышенных цен в условиях отсутствия бюджетных аналогов. Тем самым время изготовления и себестоимость послойного выращивания оказываются на конкурентоспособном уровне.

В соответствии с вышеизложенным **целью** работы является установление перспектив развития исследований в направлении решения проблем получения изделий, изготовленных на 3D-принтерах.

### Изложение основного материала

Ряд исследователей [19-21] обсуждают проблему создания нависающих элементов изделий, полученных 3D-печатью. К таким поверхностям относят верхнюю часть периферии боковых отверстий, выступов, выемок, печать которых усложнена малой площадью опоры предыдущего печатного слоя. Проблема «провисания» нити (рис. 1) приводит к появлению подтеков, приводящих к нарушению геометрии изделия.



Рис. 2. Провисание нити (указано стрелкой) при печати нависающей поверхности изделия из PLA-пластика

Устранение данной проблемы часто осуществляют путем создания так называемых «поддержек» (см. рис. 2, а). В программах-слайсерах такие элементы создаются автоматически. Однако не всегда обеспечение структуры 3D-модели при использовании поддержек может происходить корректно. К ним относят случаи, когда поддерживающие элементы находятся в местах труднодоступных или местах, откуда их удаление невозможно без ущерба для изделия. Это приводит к тому, что модели приходится выращивать по частям. Затем их приходится соединять склеиванием или другими способами, что, в свою очередь, усложняет технологию изготовления.



Рис. 2. Пример образца (применяется для испытаний на разрыв), требующего создания поддерживающих элементов для получения нависающих плоскостей:  
а – образец с элементами поддержки; б – тот же образец после удаления элементов поддержки

Дополнительной проблемой является потребность финишной доработки мест крепления поддерживающих элементов. А создание так называемых «пользовательских моделей» связано с трудностями их проектирования.

Решение вопроса получения точных труднопроизводимых печатных 3D-поверхностей возможно путем комбинации технологии объемной печати с лазерной резкой. В работе [23] отмечаются преимущества такого подхода. Лазерная резка может быть также применена как прецизионная доработка изделий 3D-печати. Такой подход позволяет обойти процедуру комплексного контроля точности изготовления изделия во время 3D-печати, который усложнен анизотропностью структуры выращенных изделий.

**Выводы.** Внедрение технологий 3D-печати в мелкосерийном производстве изделий на предприятиях известных промышленных брендов свидетельствует о перспективах развития данной отрасли. Главным преимуществом 3D-печати является возможность гибкой адаптации к видоизменению продукции и сокращению времени между проектированием и отгрузкой готового изделия. Недостатки технологий FDM, проявляющиеся при печати элементов конструкций повышенной точности (таких как отверстия, выступы, выемки и другие трудноконфигурируемые 3D-печатные поверхности), формируемые как нависающие, склоняют к проведению исследований в направленных на изучение потенциала технологий лазерной резки распространенных полимеров типа PLA, PETG, ABS и др. Это позволит установить зависимость качества и точности

обработанных лазером поверхностей от заданных режимных параметров и первичной архитектуры изделия. Продолжает оставаться актуальность исследований, направленных на установление зависимостей характеристик прочности, полученных 3D-печатью изделий от степени и геометрической конфигурации заполнения.

### Список литературы

1. Ляпков А.А. Полимерные аддитивные технологии: учебное пособие. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2016. – 114 с.
2. Колесников Л.А. Состояние и перспективы развития технологий быстрого прототипирования в промышленности (Часть первая) / Л.А. Колесников, Г.П. Манжула, В.К. Шелег, А.М. Якимович // Наука и техника. – 2013. – № 5. – С. 3-9.
3. Глухов В.И. К вопросу повышения прочности и точности геометрических характеристик зубчатых колес, изготовленных посредством 3D-печати / В.И. Глухов, Л.Г. Варепо, И.В. Нагорнова, Ф.А. Доронин // Известия ТулГУ. – 2019. – Вып. 6. – С. 322-331.
4. Полутов А.Г. Промышленное применение деталей, изготовленных с использованием аддитивных технологий / А.Г. Полутов, И.О. Федоров // Сборник докладов: «Материалы VI научно-практической конференции памяти О.В. Успенского». – М.: Изд. дом Академии имени Н.Е. Жуковского, 2019. – С. 233-240.
5. Доронин Ф.А. Особенности аддитивного производства планарных и объемных изделий, применимых в экстремальных условиях. / Ф.А. Доронин, М.А. Савельев, А.Г. Евдокимов, О.В. Лазарева, Г.О. Рытиков, В.Г. Назаров // Сборник трудов XIV Всероссийской научной конференции «Технологии и материалы для экстремальных условий». – Агой, Россия, 16-20 сентября 2019г. – М.: Межведомственный центр аналитических исследований в области физики, химии и биологии при Президиуме Российской академии наук, 2019. – С. 90-94.
6. Гусева М.А. Технологии 3D-печати в производстве персонифицированных швейных изделий / М.А. Гусева, В.В. Гетманцева, Е.Г. Андреева, И.Б. Разин, И.А. Петросова, И.Д. Гусев // Территория новых возможностей. Вестник Владивостокского государственного университета экономики и сервиса. – 2020. – Т. 12, № 3. – С. 132-142.
7. Власов А.В. Проблемы 3D-печати при мелкосерийном производстве продукции. Материалы международной научно-практической конференции. / А.В. Власов, А.Р. Власова // Материалы международной научно-практической конференции. – Мурманск: Мурманский государственный технический университет, 2016. – С. 21-26.
8. Карпов Е.К. Особенности моделирования резьбовых соединений в САД-системах для последующей 3D-печати, на примере Компас-3D / Е.К. Карпов, И.Е. Карпова, В.В. Иванов. // Зауральский научный вестник. – 2014. – № 1 (5). – С. 25-27.
9. Михрютин А.В Совершенствование конструкций устройств многопоточной 3D-печати по технологии FDM // XLIII Гагаринские чтения. Международная молодежная научная конференция. – М.: Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского Российской академии наук, 2017. – С. 54-55.
10. Федулов В.М. Влияние технологических режимов при FDM-печати на качество поверхностей детали из ABS и PLA пластика / В.М. Федулов, Ю.С. Федулова, Е.Е. Кулик // Вестник РГАТА им. П.А. Соловьева. – 2017. – № 4 (43). – С. 162-167.
11. Савицкий В.В. Исследование влияния параметров 3D-печати на размерную точность изделий / В.В. Савицкий, А.Н. Голубев, Д.И. Быковский // Вестник Витебского государственного технологического университета. – 2018. – № 2 (35). – С. 52-61.
12. Толкачѳ С.А. Перспективы развития аддитивного производства в США. / С.А. Толкачѳ, Е.И. Москвитина, Т.М. Цветкова // США и Канада: экономика, политика, культура. – 2016. – № 1 (553). – С. 87-102.
13. Габбасов М.Ф. Обзор технологий 3D печати: проблемы и перспективы развития // Поволжский научный вестник. –2018. – № 2. – С. 34-41.

14. Santhakumar J. Investigation on the Effect of Tensile Strength on FDM Build Parts Using Taguchi-Grey Relational Based Multi-Response Optimization / J. Santhakumar, U. Mohammed Iqbal, M. Prakash // International Journal of Mechanical Engineering and Technology (IJMET). – 2017. – Vol. 8, Iss. 12. – P. 53-60.
15. Dizon J.R.C. Mechanical characterization of 3D-printed polymers / J.R.C. Dizon, A.H. Espera, Q. Chen, and R.C. Advincula // Additive Manufacturing. – 2018. – Vol. 20. – P. 44-67.
16. Popescu D. FDM process parameters influence over the mechanical properties of polymer specimens: a review. / D. Popescu, A. Zapciu, C. Amza, F. Vaciu, R. Marinescu // Polymer Testing. – 2018. – Vol. 69. – P. 157-166.
17. Прошин А.А. . Области применения 3D принтеров / А.А. Прошин, Н.В. Горячев, Е.П. Горячева, Е.С. Каракулов, Н.К. Юрков // Робототехника и системный анализ. – 2015. – Вып. 1. – С. 95-105.
18. Нефёлов И.С. Способы предотвращения технологических дефектов деталей машин, изготовленных с использованием аддитивных технологий / И.С. Нефёлов, Н.И. Баурова // Вестник современных технологий. – 2017. – № 1 (5). – С. 36-40.
19. Зайцев В.Д. Дефекты, сопровождающие технологии быстрого прототипирования, и методы их устранения / В.Д. Зайцев, Н.И. Наумкин, Е.А. Кильмяшкин, А.Н. Ломаткин, Д.В. Пивкин // Современные проблемы теории машин. – 2016. – № 4-2. – С. 115-118.
20. Тигнибидин А.В. Использование аддитивных технологий при прототипировании. контроль геометрических характеристик детали из пластика ABS для определения исходных размеров для печати / А.В. Тигнибидин, С.В. Такаюк // Динамика систем, механизмов и машин. – 2018. – Т. 6, № 2.– С. 57-65.
21. Холодилов А.А. Применение аддитивных технологий при производстве поверхностей сложных форм / А.А. Холодилов, М.В. Пузынина Е.В. Фалеева // Новые информационные технологии в научных исследованиях: материалы XXI Всероссийской научно-технической конференции студентов, молодых ученых и специалистов, 16-18 ноября 2016г., Рязанский государственный радиотехнический университет. – Рязань: Редакционно-издательский центр РГРТУ, 2016. – С. 364-365.
22. Использование 3D-принтеров в промышленности [Электронный ресурс] / Журнал главного инженера. – 2019. – № 12. – Режим доступа: <http://gl-engineer.com/articles/ispolzovanie-3d-printerov-v-promyshlennosti>
23. Джелялов С.И. Поиск путей решения отдельных проблем создания моделей, изготавливаемых при использовании FDM-технологий 3D-печати // Ученые записки Крымского инженерно-педагогического университета. – 2019 – № 2 (64). – С. 262-267.

Сведения об авторах:

*Джелялов Сервер Идрисович* – к.т.н., доцент кафедры «Электромеханика и сварка»;

*Бекиров Аким Шакир-оглы* – магистрант;

*Ромашов Юрий Сергеевич* – магистрант;

*Аблаев Осман Фазирович* – магистрант.